

Adubação silicatada na produtividade e respostas fisiológicas das plantas

Silicate fertilization on productivity and physiological responses of plants

Fertilización con silicatos sobre la productividad y las respuestas fisiológicas de las plantas

Recebido: 14/11/2022 | Revisado: 24/11/2022 | Aceitado: 25/11/2022 | Publicado: 03/12/2022

Franciely da Silva Ponce

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3894-1506>
Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Brasil
E-mail: francielyponce@gmail.com

Daniele Cristina de Lima Machado

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3133-1369>
Universidade do Estado de Mato Grosso, Brasil
E-mail: danielelimamachado@gmail.com

Fernanda Lourenço Dipple

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3616-0359>
Universidade do Estado de Mato Grosso, Brasil
E-mail: fernanda.dipple@gmail.com

Rivanildo Dallacort

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7634-8973>
Universidade do Estado de Mato Grosso, Brasil
E-mail: rivanildo@unemat.br

Santino Seabra Júnior

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4986-7778>
Universidade do Estado de Mato Grosso, Brasil
E-mail: santinoseabra@hotmail.com

Resumo

O Silício é o segundo elemento mais abundante da crosta terrestre correspondendo a 27,7% de sua composição. Porém, em solos tropicais, a maior parte deste Si encontra-se indisponível para as plantas. Mesmo não se tratando de um elemento essencial, a suplementação de Si gera benefícios às culturas. O objetivo deste trabalho foi combinar dados de múltiplos estudos sobre adução com silício a fim de esclarecer os efeitos sobre a produtividade, indução de resistência a pragas, doenças e condições de salinidade e déficit hídrico. A revisão abordou os seguintes temas: 1) O silício no solo 2) Formas de aplicação de silício 3) Efeitos da adubação com silício na indução de resistência a salinidade 3) A importância da adubação com silício nas plantas 4) Resposta agrônômica referente aos efeitos da adubação com silício na produtividade, resistência a insetos, resistência a doenças e tolerância a salinidade e déficit hídrico. O uso de Si proporciona efeitos sobre a fisiologia, bioquímicos e estrutura das plantas, o que conferi maior resistência mecânica, resistência a efeitos bióticos e abióticos. Os efeitos referentes à produtividade variam conforme a cultura ou cultivar utilizada. Nos estudos realizados foram observados algum efeito benéfico relacionado ao uso do Si. Os benefícios são resistência mecânica, bioquímica, redução do estresse causado pela salinidade e déficit hídrico. Com a necessidade de alimentos crescente a adubação silicatada representa uma ferramenta a mais para a agricultura.

Palavras-chave: Adubação foliar; Doenças de planta; Indução de resistência; Insetos-praga e micronutriente.

Abstract

Silicon is the second most abundant element in the earth's crust, corresponding to 27.7% of its composition. However, in tropical soils, most of this Si is unavailable to plants. Even though it is not an essential element, Si supplementation generates benefits to crops. The objective of this work was to combine data from multiple studies on silicon aduction in order to clarify the effects on productivity, induction of resistance to pests, diseases and conditions of salinity and water deficit. The review addressed the following topics: 1) Silicon in the soil 2) Forms of silicon application 3) Effects of silicon fertilization in inducing resistance to salinity 3) The importance of silicon fertilization in plants 4) Agronomic response regarding the effects of silicon fertilization on productivity, resistance to insects, resistance to diseases and tolerance to salinity and water deficit. The use of Si provides effects on the physiology, biochemistry and structure of plants, which gives greater mechanical strength, resistance to biotic and abiotic effects. The effects related to productivity vary according to the crop or cultivar used. In the studies carried out, some beneficial effect related to the use of Si was observed. The benefits are mechanical and biochemical resistance, reduction of stress caused by salinity and water deficit. With the growing need for food, silicate fertilization represents an additional tool for agriculture.

Keywords: Foliar fertilization; Plant diseases; Resistance induction; Pest insects and micronutrient.

Resumen

El silicio es el segundo elemento más abundante en la corteza terrestre, correspondiendo al 27,7% de su composición. Sin embargo, en suelos tropicales, la mayor parte de este Si no está disponible para las plantas. Aunque no es un elemento esencial, la suplementación de Si genera beneficios a los cultivos. El objetivo de este trabajo fue combinar datos de múltiples estudios sobre aducción de silicio para esclarecer los efectos sobre la productividad, inducción de resistencia a plagas, enfermedades y condiciones de salinidad y déficit hídrico. La revisión abordó los siguientes temas: 1) Silicio en el suelo 2) Formas de aplicación del silicio 3) Efectos de la fertilización con silicio en la inducción de resistencia a la salinidad 3) La importancia de la fertilización con silicio en las plantas 4) Respuesta agronómica con respecto a los efectos de la fertilización con silicio en productividad, resistencia a insectos, resistencia a enfermedades y tolerancia a la salinidad y al déficit hídrico. El uso de Si proporciona efectos sobre la fisiología, bioquímica y estructura de las plantas, lo que le otorga mayor resistencia mecánica, resistencia a efectos bióticos y abióticos. Los efectos relacionados con la productividad varían según el cultivo o cultivar utilizado. En los estudios realizados se observó algún efecto beneficioso relacionado con el uso de Si. Los beneficios son la resistencia mecánica y bioquímica, la reducción del estrés causado por la salinidad y el déficit hídrico. Con la creciente necesidad de alimentos, la fertilización con silicatos representa una herramienta adicional para la agricultura.

Palabras clave: Fertilización foliar; Enfermedades de las plantas; Inducción de resistencia; Insectos plaga y micronutrientes.

1. Introdução

O processo de modernização da agricultura, ocorrido principalmente a partir dos anos 50, fez com que a forma de agricultura e a forma de cultivo de plantas fossem modificadas (Souza; Resende, 2003). Devido à inserção de maquinários pesados, uso de produtos fitossanitários e a adubação química. Além disso, houve também a seleção de variedades mais produtivas, desenvolvimento de cultivares e híbridos que apresentam desempenho excelente, no entanto, precisam de condições favoráveis para entregar sua máxima produção. A modernização dos processos fez com que a agricultura alcançasse elevada produção (Albergoni & Pelaez, 2007).

A melhoria das condições do solo através da adubação química é uma das práticas mais comuns na atualidade e uma das responsáveis pela produtividade elevada das culturas. Os fertilizantes são separados em macronutrientes e micronutrientes, conforme a quantidade necessária para as plantas. O fósforo (P), o potássio (K) e o nitrogênio (N) são requeridos em grande quantidade e são denominados macronutrientes primários, e Enxofre(S), Cálcio (Ca) e Magnésio (Mg) são macronutrientes secundários (Mengel; Kirkby, 1987). Dentre os micronutrientes mais exigidos pelas plantas Boro (B), Molibdênio (Mo), o Zinco (Zn), o Cobre (Cu), o Manganês (Mn), Ferro (Fe), Cobalto (Co), Silício (Si), Cloro (Cl), Selênio (Se) e Níquel (Ni), a importância de cada nutriente depende da cultura. Em milho, por exemplo, sabe-se que o zinco é o micronutriente mais exigido de 2 a 6 kg ha⁻¹, em soja, os mais exigidos são boro e molibdênio (Fancelli; Almeida, 2015; Mascarenhas et al., 2014). Os micronutrientes embora requeridos em menor quantidade pelas plantas apresentem funções essenciais que em condições de deficiência influenciaram de forma negativa na produtividade (Lacerda, et al., 2019).

A produtividade das culturas pode ser afetada tanto pela deficiência de nutrientes, como pelo excesso o que pode levar a fitotoxicidade. Além disso, uma boa nutrição das plantas está diretamente relacionada à capacidade de tolerância a estresse biótico e abiótico como o ataque de pragas (Gonçalves, 2021) e incidência de doenças (Matiello et al., 1997). Neste sentido, o fornecimento adequado dos nutrientes exerce um papel importante, pois plantas bem nutridas têm maior resistência frente a esses entraves.

O silício é um metaloide que não apresenta funções essenciais para as plantas (Freitas et al., 2011), no entanto, nos últimos anos tem sido estudado por apresentar relação com várias funções fisiológicas das plantas, tais como resistência a estresse biótico como pragas e doenças (Epstein, 2001) e abiótico como seca e salinidade (Pulz et al., 2008; Madeiros et al., 2009; Rodrigues et al., 2018; Venâncio, 2021; Nunes et al., 2020; Gaur et al., 2020).

A ação do silício tem sido associada a efeitos indiretos fisiológicos e bioquímicos, tais como maior eficiência fotossintética, maior resistência mecânica das células ativa genes envolvidos na produção de fenóis e enzimas relacionadas

com os mecanismos de defesa da planta (Camargo et al., 2007; Ávila et al., 2010; Gunes et al., 2007).

A resistência conferida às plantas a partir da adubação silicatada é referente à deposição de silício, que forma uma barreira mecânica a colonização ou herbívora (Goussain, 2002), ou mesmo pela ação como elicitador de indução de resistência (Fawe et al., 2001; Gomes et al., 2005). Os efeitos relacionados a ganhos de produtividade precisam de maiores estudos, uma vez que tanto pode ocorrer o incremento ou mesmo a redução, pois cada cultura pode responder de maneira distinta. O aumento nos compostos de defesa pode promover uma realocação dos recursos, resultando na redução de produtividade, ou devido a menor ataque a plantas pode investir em produção de biomassa (Nojosa et al., 2006; Délano-Frier et al., 2004).

Desta forma, o objetivo deste trabalho foi combinar dados de múltiplos estudos sobre adubação com silício a fim de esclarecer os efeitos sobre a produtividade, indução de resistência a pragas, doenças e condições de salinidade e déficit hídrico.

2. Revisão de Literatura

2.1 Silício no solo

Na crosta terrestre, o silício é segundo elemento mais abundante, correspondendo a 27,7%, proveniente de rochas carbonáceas, carbonitos, basaltos, calcários e ortoquartzitos na natureza este elemento é encontrado em forma de óxido de silício (SiO_2), nas formas de quartzo, opala ($\text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$) e outras formas não disponíveis às plantas (Atta et al., 2019; Adrees et al., 2015; Bakhat et al., 2018; Wedepohl, 1995; Monger; Kelly, 2002). Com o intemperismo, o Si é liberado na forma de ácido monossilícico, forma que é absorvido pelas plantas (Epstein, 2001).

A liberação do Si para o solo através do intemperismo das rochas é lenta, sendo dependente de fatores como precipitação, temperatura, vento, entre outros. Dentre as rochas liberadoras de Si para o solo, podemos destacar feldspato (66% SiO_2), granodiorito (72% SiO_2) e anfibolito (47% SiO_2) (FAIMON, 1998). A reposição e conteúdo de Si no solo irão depender da capacidade de reposição do sistema solo e da exportação do Si presente no solo, pelas plantas (Marschner, 1995).

O Si no solo pode estar na forma líquida, sólida ou adsorvida, sendo a fase sólida representada pelos silicatos primários e secundários e outros materiais de sílica, que pode ter origem biogênica, ou seja, a partir de matéria orgânica e lito/pedogênica, quando se origina do complexo formado por ferro, alumínio juntamente com o Si (Matichencov; Bocharnikova, 2001).

Em solos do Cerrado, devido ao elevado grau de intemperismo, o silício encontra-se em baixos teores de Si-trocável sendo assim a capacidade desses solos de suprimento de silício é baixa (MA et al., 2001). Os solos da região dos cerrados representam 23% dos solos brasileiros, sendo fortemente ocupados pelo agronegócio, principalmente pela produção de grãos (Pereira et al., 2003). Em solos com pH maior que 7,0 o ácido monossilícico (H_4SiO_4) encontra-se disponível para as plantas, no entanto a maioria dos solos brasileiros não apresentam esta condição (Jones; Handreck, 1967). O SiO_2 extraível pelas plantas pode variar em função do teor de argila do solo e também dos teores de ferro e alumínio (Freitas et al., 1977), sendo o pH o fator mais fácil de ser manejado para que haja disponibilidade deste elemento (Mc Keague; Cline, 1963).

Os solos tropicais são bastante intemperizados, o que promove baixa disponibilidade de Si, mesmo sendo o segundo elemento mais abundante na crosta terrestre (Pereira et al., 2003; Gaur et al., 2020). A exportação de Si pelas plantas é outro fator que promove a redução das quantidades disponíveis no solo. O arroz é um exemplo de cultura que exporta elevadas quantidades de Si do solo em forma de sílica amorfa (Vilela, 2009; Zambolim et al., 2012).

A deficiência de Si no solo é de certa forma rara, sendo promovida pela exploração contínua e processos comuns como a lixiviação, sendo recomendada a suplementação quando (Camargo et al., 2011). Apesar de não ser considerado um nutriente para a planta, a presença do Si no solo e o fornecimento para as plantas é descrito por vários autores como benéfica (Tubana; et al., 2016). As gramíneas têm mais capacidade de acumular Si em suas células, enquanto que plantas leguminosas

têm menores ou nenhum acúmulo (Ma; et al., 2001). A utilização do Si tem crescido nos últimos anos principalmente após a inclusão como micronutriente na legislação de fertilizantes.

No solo, o Si compete pelos mesmos sítios de adsorção de fósforo (P). A aplicação Si antes da adubação fosfatada reduz em até 41% a adsorção do P, o que aumenta a disponibilidade para as plantas (Pozza et al., 2007). O que explica o aumento da produtividade em alguns casos, já que o Si não é considerado um nutriente de plantas, mas a maior disponibilidade de P no solo refletirá na maior produtividade das plantas.

2.2 Formas de aplicação de silício

A aplicação de silício pode ocorrer via solo ou foliar, sendo ambas as formas eficientes, irão depender do fertilizante disponível, podendo ocorrer ainda via fertirrigação, o que reduz a necessidade de mão-de-obra (Pereira Júnior et al., 2010; Moreira, et al., 2010).

O Si pode ser aplicado no solo através da adubação no solo em forma de silicato de cálcio (CaSiO_3), o que irá contribuir para o aumento na capacidade de trocas de cátions e na correção de acidez, disponibilizando cátions e fornecendo cálcio para a cultura (Alleoni et al., 2009; Ker et al., 2012). A dose pode variar, sendo realizados vários estudos neste sentido. Como fonte de Si, podem ser usadas escórias industriais e palhada de arroz (Estesami; Jeong, 2018).

Diversas culturas como abóbora, milho, cana-de-açúcar, arroz, soja respondem bem a adubação silicatada, no entanto as culturas acumuladoras de Si apresentam melhores respostas. A cana-de-açúcar e o arroz apresentam resultados bastante expressivos quanto à suplementação de Si (Tubana et al., 2016).

A forma de fornecimento de Si pode surtir efeitos distintos dependendo da cultura. Em soja a adubação via solo com doses de 1,67 mg. ha⁻¹a 2,32 mg. ha⁻¹ proporcionou maior massa e vigor de sementes (Oliveira et al., 2015). Enquanto que a adubação foliar utilizando-se dose de 500 mL ha⁻¹ em V8, R1 e R5, o crescimento da cultura e o acúmulo de massa seca (Moreira et al., 2010), devido principalmente a maior taxa de assimilação.

A adubação com Si propicia ainda a redução da necessidade de pulverizações de produtos fitossanitários, como inseticidas e fungicidas, devido ao efeito protetor promovido por este micronutriente (Lima Filho, 2010).

As fontes de Si variam sendo a mais comum os silicatos de cálcio, para que possa ser utilizado, no entanto é preciso que seja realizado a descontaminação de metais pesados e também de contaminantes como alumínio (Al) (Lima Filho, 2009). Uma boa fonte de silício deve ser solúvel, proveniente de matéria prima confiável, ser livre de contaminantes, além de ser facilmente aplicável (Vilela, 2009). Os xistos, “folhelhos oleígenos” (rochas silto-argilosas), escórias siderúrgicas (primárias com alta concentração de Si, Mg e Ca) e os termofosfatos são descritos como boas fontes de Si (Pereira et al., 2003). A casca de arroz carbonizada é outra fonte bastante viável de Si, além de ser um subproduto de baixo custo (Castellanos et al., 2016).

2.3 A importância da adubação com silício nas plantas

O papel do Si para as plantas ainda precisa ser mais estudado, havendo divergências quanto ao assunto na literatura, sendo descrito como elemento essencial por alguns autores e por outros como componente benéfico para a produção de plantas (Bakhat et al., 2018). Algumas espécies como arroz (*Oryza sativa*) e sorgo (*Sorghum bicolor* L.) apresentam capacidade de acumulação de Si, sendo grandes exportadoras deste elemento (Hurtado et al., 2020).

Dentre os benefícios do Si as plantas, destaca-se a maior resistência da parede celular, o que favorece maior resistência mecânica, reduzindo o acamamento (Vilela, 2009; Islam et al., 2020; Huang et al., 2021), o que é bastante benéfico, principalmente quando se trata de processos mecanizados.

A adubação silicatada fornece resistência às plantas contra fatores bióticos e abióticos, sendo importante atenuador de estresse (Adrees et al., 2015; Mauad et al., 2016). Andrees et al. (2015) descreve que o fornecimento de Si propicia maior

crescimento às plantas, devido principalmente a maior taxa de assimilação. Em condições de deficiência de Si, as plantas apresentam maior suscetibilidade ao ataque de pragas, menor resistência mecânica e a contaminação por metais pesados e maior estresse causado pela deficiência hídrica (Vilela, 2009; Islam et al., 2020; Huang et al., 2021).

A resistência a insetos pode estar ligada tanto a fatores mecânicos como maior rigidez da parede celular, como pode estar relacionado à produção de ácido jasmônico, conhecido hormônio de defesa de plantas (Islam et al., 2020; Huang et al., 2021; Bakhat et al., 2018). Com a redução do estresse, as plantas menos são mais produtivas, pois direcionam os fotoassimilados para o acúmulo de material vegetal.

O Si está relacionado a processos bioquímicos, fisiológico e fotossintético (Mauad et al., 2016; Vilela, 2009) que são naturalmente interligados, uma vez que a bioquímica, fisiologia e fotossíntese são processos naturais das plantas que regem a sobrevivência, resistência a insetos e produtividade (Taiz; Zeiger, 2017). Além disso, a adubação silicatada ainda auxilia na maior disponibilidade de outros nutrientes para as plantas, como o fósforo e há uma adequação do pH (Pozza et al., 2007). Pozza et al. (2015) ressaltam que os mecanismos de ação do Si nas plantas precisam de aprofundamento, a partir de estudos moleculares e bioquímicos para que sejam elucidados.

A aplicação de Si apresenta efeitos distintos nas plantas, sendo observada a melhoria de germinação de sementes e sobrevivência de plântulas de trigo, sem que tenha surtido efeito sobre a qualidade das sementes (Oliveira Júnior et al., 2018). Outros estudos comprovaram a influência do Si no acúmulo de matéria seca das plantas, maior número de perfilho e efeitos sobre a fotossíntese e bioquímica, sendo refletido no teor de clorofila a, b e total (Oliveira Júnior, et al., 2018).

O Si fornecido às plantas via solo é absorvido pelas raízes juntamente com a água, sendo móvel na planta e transportado no sentido do fluxo de transpiração, ou seja, ascendente, na parte aérea e se acumula na cutícula, proporcionando a formação de uma barreira para insetos e doenças (Bakhat et al., 2018). A absorção do Si é um processo ativo, o transporte é feito a partir de proteínas transportadoras chamadas Lsi1, Lsi2, Lsi3 e Lsi6 (Gaur et al., 2018). Cada proteína apresenta características distintas quando ao transporte, a Lsi1 trata-se de uma proteína permeável de membrana aquaporina e apresenta seletividade, enquanto que a Lsi2 é uma proteína de fluxo de Si, transportadora de ânions. As proteínas realizam o transporte do Si na membrana celular, no entanto, isso pode variar conforme a espécie (Ma; Yamaji, 2015).

No citosol das células, a presença do Si promove a produção de ácido jasmônico, importante substância de defesa das plantas (Bakhat et al., 2018). O Jasmonato está ligado à síntese de compostos fenólicos, síntese de lignina e promove maior resistência às células. Além disso, é um importante hormônio de defesa das plantas, servindo também como sinalizador de que a planta está sendo atacada, sendo um importante componente da interação tritrófica entre plantas, herbívoros e seus predadores/parasitoides (Reymond; Farmer, 1998).

As plantas com sintomas de deficiência de Si apresentam crescimento anormal, menor resistência mecânica, maior susceptibilidade a pragas e doenças, além de serem mais afetadas por condições adversas como déficit hídrico, baixas temperaturas e salinidade (Epstein, 1999; Epstein, 2001). O excesso de Si no solo não afeta as plantas e nem é prejudicial ao meio ambiente (Etesami; Jeong, 2018).

2.4 Respostas agronômicas

2.4.1 Os efeitos da adubação com silício na produtividade

Os resultados quanto à produtividade atribuídos a adubação com Si são bastante controversos, sendo bastante variáveis quanto à cultura, estágio da planta em que foram realizadas as adubações e forma de aplicação do Si (Pozza et al., 2015).

Em soja existem resultados que apontam para um incremento de produtividade (Oliveira et al., 2015) em adubação via solo e maior acúmulo de massa seca quando realizou-se a adubação foliar (Moreira et al., 2010). O fornecimento de Si via

foliar aumentou a produtividade de soja em 19 sacos por ha-1, além disso, as plantas apresentavam maior espessura de folha devido à deposição de Si (Moreira, et al., 2010). A adubação silicatada proporcionou maior assimilação líquida, o que refletiu na fotossíntese e capacidade de trocas gasosas (Moreira, et al., 2010), o que proporcionou maior produtividade.

Oliveira et al. (2015) obteve maior produtividade e vigor de sementes de soja com o fornecimento de Si. No entanto, Coelho et al. (2019) trabalharam com seis doses crescentes de Si em semeadura de soja, não obtiveram aumento na produtividade em função das doses. Evidenciando que o momento e a forma de fornecimento do Si influenciam nos resultados obtidos.

Moraes et al. (2018), trabalhando com quiabeiro não obtiveram aumento na produtividade da cultura com o fornecimento de silicato de cálcio e magnésio em solo com boa fertilidade, no entanto, houve redução na acidez do solo e aumento nos teores de Ca e Mg.

Alguns estudos evidenciam que a adubação com Si apresenta benefícios relacionados à maior nodulação de bactérias Rhizobium, importantes nodulares relacionados a assimilação de nitrogênio em leguminosas. O aumento de nodulação também representa aumento na fixação de nitrogênio e conseqüentemente melhor desempenho das plantas (Corrêa & Mantoan, 2016).

Os estudos que buscam maior produtividade das culturas a partir do fornecimento de Si podem apresentar resultados contraditórios, no entanto mesmo que os benefícios da adubação silicatada não sejam refletidos em maior produtividade, outros resultados benéficos são evidenciados (Tabela 1).

Tabela 1 - Efeito da aplicação de Si via solo e foliar sobre a produtividade de diferentes culturas.

Cultura	Forma de fornecimento	Épocas de adubação	Efeito	Autores
Soja	Via foliar	Vegetativo, floração e reprodutivo	Aumento na produtividade e massa seca	Moreira et al., (2010).
Soja	Solo	Plantio	Aumento no número de vagens e maior rendimento de semente.	Oliveira et al. (2015).
Cana-de-açúcar	Solo	Plantio	Aumento na produtividade.	Korndörfer et al. (2002)
Cana-de-açúcar	Solo	Plantio	Não houve aumento na produtividade independente da dose utilizada, nem reduziu a infestação de <i>Diatraea saccharalis</i> .	Camargo et al. (2010).
Arroz	Via solo	Plantio	Melhoria no sistema radicular, maior produtividade, produção e aumento da massa seca dos grãos.	Carvalho-Pupatto et al. (2004).
Trigo	Via solo	Plantio	Aumento da produtividade e fenóis totais.	Mendonça et al., 2013.
Milho	Foliar	vegetativo	Não houve influencia na produtividade, inserção da espiga, número de grãos por espiga.	Freitas et al. (2011).
Milho	Foliar	Vegetativo	Houve aumento da produtividade em quatro híbridos testados.	Teodoro et al. (2014).
Helicônia	Via solo	Plantio	Maior comprimento e diâmetro da haste floral, e mais produção de hastes florais. Quando se utilizou o silicato houve menor queima da bráctea.	Albuquerque et al. (2014).

Fonte: Autores.

2.4.2 Resistência a insetos

A ocorrência de insetos-praga e doenças é o maior entrave a produção das culturas da atualidade, muitas pragas têm se tornado um desafio para os agricultores de todo o mundo, devido à dificuldade de controle e seleção de populações resistentes (Gaur et al., 2020; Sun et al., 2021). Com isso surge a necessidade de se buscar soluções que gerem menor impacto ao meio ambiente além de auxiliar o produtor no controle das pragas.

O Si biodisponível após ser absorvido pelas plantas é transportado com o auxílio de alguma ou de várias das proteínas

citadas anteriormente e é depositado nas células principalmente das folhas e caules na forma de fitólitos ou sílica amorfa. A resistência promovida pela absorção de SiO₂ proporciona resistência direta e indireta às plantas, ocorrendo tanto através da deposição de Si nas células o que faz com que aumente a espessura das folhas (Liang et al., 2015; Etesami; Ryong Jeong, 2018; Kim et al., 2002).

A absorção de Si pelas plantas resulta na deposição nas paredes das células, o que influencia na resistência mecânica das plantas. A maior rigidez das células proporciona o menor ataque de insetos, sejam eles sugadores como mosca-branca (*Bemisia tabaci*), tripes (Thysanoptera) e pulgões, ou mesmo insetos mastigadores como lagartas e besouros (Camargo, 2016).

A proteção das plantas pode ocorrer pela ação de substâncias bioquímicas e/ou hormônios ou mesmo pela ação da deposição do Si nas células vegetais. A ativação de ácido jasmônico ativa outros compostos, tais como compostos fenólicos e peroxidases proporcionando o acúmulo de lignina (Camargo, 2016) o que aumenta significativamente a rigidez das plantas, tornando o tecido menos nutritivo aos insetos. A ação de ácidos jasmônico também influencia na repelência dos insetos e atraem inimigos naturais, que controlam os insetos-praga (Reymond; Farmer, 1998).

O uso de Si em milho, batata e tomate apresentou resultados quanto a redução do ataque de *Spodoptera* spp. nessas culturas (Goussain, et al., 2002; Silva et al., 2010; Santos et al., 2008). Lagartas do gênero *Spodoptera* são pragas importantes em todo o mundo, são insetos generalistas que têm como hospedeiro muitas espécies de plantas, o que facilita sua permanência na área de cultivo (Sun et al., 2021). Em milho doce, a adubação com Si proporcionou menor infestação de *S. frugiperda*, o que resultou em menos danos às espigas (Silva et al., 2017).

Em gramíneas adubadas com Si, a lignificação das folhas diminuiu o ataque de gafanhotos (*Schistocerca gregaria* Forskal Orthoptera: Acrididae) (Song et al., 2016), no entanto, outros efeitos como aumento de serosidade da folha pode promover maior resistência, como em mudas de cafeeiro observada por Pozza et al. (2004).

Os insetos sugadores como os pulgões apresentam uma enorme variedade de plantas hospedeiras, além da alimentação contínua de seiva há ainda a transmissão de viroses (Ponce et al., 2021). Em batata utilizando-se adubação foliar e via solo de forma contínua, obteve-se aumento no teor de lignina e taninos em folhas de batata, promovendo menor infestação de *Myzus persicae* (Sulzer) (Hemiptera: Aphididae) (Gomes et al., 2008).

2.4.3 Resistência a doenças

As doenças e os insetos-praga são os fatores mais limitantes para a produção das plantas, sendo responsáveis por perdas de até 100% dos cultivos dependendo da praga e severidade da doença (Gaur et al., 2020). A absorção de Si pelas plantas promove respostas bioquímicas e mecânicas contra o ataque de patógenos (Fang et al., 2011; Tatagiba et al., 2014). O Si fornecido via adubação promove uma proteção física contra os patógenos, o enrijecimento dos tecidos vegetais dificulta a colonização dos fungos e bactérias. A produção de cumarina, quitinas, peroxidases, enzimas como SOD (superóxido dismutase), CAT (Catalase), polifenoloxidasas, fenilalanina amônia liase, lipoxigenase e glucanase e outras substâncias de defesas fazem parte de respostas à colonização por patógenos de plantas (Fang et al., 2011; Cruz et al., 2013; Mburu et al. al., 2016; Waewthongrak et al., 2015).

Normalmente essas substâncias são produzidas pelas plantas para atenuar estresses decorrentes estresse bióticas e abióticas, porém através da aplicação de Si, observa-se a produção dessas substâncias preventivamente ao dano. Além disso, há ainda a produção de substâncias bactericidas e fungicidas pelas plantas (Zhang et al., 2013). Bakhat et al. (2018) apontam a adubação com Si, como responsável pela resistência de plantas a doenças causadas por *Bipolaris oryzae*, *Sphaerotheca fuliginea*, *Cercospora kikuchii*, *Colletotrichum* spp. *Phakopsora pachyrhizi*, *Fusarium* spp.

Najihah et al. (2015) conduziram um estudo utilizando adubação com Si proporcionou efeito preventivo para *Ganoderma boninense* em dendezeiro. Em estudo conduzido com adubação silicata em cafeeiro, houve indução de resistência à

ferrugem do cafeeiro (*Hemilei avastatrix*) (Carré-Missio et al., 2014). Diversos outros estudos podem ser listados sobre o efeito da aplicação de Si sobre doenças de plantas (Tabela 2).

Tabela 2 - Efeito da aplicação de Si sobre a incidência de doenças em diferentes culturas.

Cultura	Efeito	Autores
Tomate	Indução de resistência a <i>Fusarium oxysporum</i> f. <i>spradicis-lycopersici</i> , e podridão radicular.	Huang et al. (2011).
Café	Indução de resistência a <i>Hemilei avastatrix</i> .	Carré-Missio et al. (2014).
<i>Capsicum annun</i>	Indução de resistência a <i>Phytophthora capsici</i>	French-Monar et al. (2010).
Sorgo	Menor severidade de antracnose (<i>Colletotrichum sublineolum</i> Hann. Kabát et Bub. (syn. <i>C. graminicola</i> (Ces.) G.W. Wils.)	Santos et al. (2014).
Soja	Redução da severidade da ferrugem asiática (<i>Phakopsora pachyrhizi</i>) em plantas adubadas com Si.	Cruz et al. (2012).

Fonte: Autores.

2.4.4 Tolerância a salinidade e déficit hídrico

As plantas enfrentam diversos fatores adversos tais como pragas e doenças, além de excesso de radiação, déficit hídrico, alagamento, salinidade, baixas temperaturas ou elevadas temperaturas. Para suportarem todos esses desafios, produzem hormônios e enzimas que desencadeiam processos tais a produção de compostos de sabor desagradável para barra à alimentação de uma praga (Taiz; Zeiger, 2017; Reymond; Farmer, 1998).

A salinidade é um dos problemas mais comuns que ocorre em áreas agricultáveis irrigadas, e impossibilita o cultivo dessas áreas. Em condições de salinidade há uma redução da absorção de água pelas plantas, afetando a turgidez dos tecidos, o que afeta a fotossíntese, levando a redução da produtividade, ou mesmo a morte (Taiz; Zeiger, 2017). A fotossíntese é dependente de água, se a planta reduz a absorção de água, afetara a absorção de nutrientes, assimilação de CO₂ devido ao fechamento dos estômatos, afetando todos os processos fisiológicos das plantas (Taiz; Zeiger, 2017).

A adubação silicatada apresenta papel importante para que as plantas apresentem certa tolerância ao estresse salino (Hussain et al., 2018; Kumar et al., 2017). Shi et al. (2013) utilizando Si no cultivo de arroz obtiveram menor transporte de íons de sódio e de cloro no interior das células, o que reduziu substancialmente os efeitos negativos da salinidade do solo sobre a cultura. O arroz é uma espécie considerada acumuladora de Si, desta forma, ao ser absorvido há uma deposição nas células, criando uma camada que estimula a fotossíntese. Além disso, a absorção de Si promove a produção de enzimas como catalase (CAT), e superóxido dismutase (SOD), que tem poder antioxidante. Este efeito foi observado por Liu et al. (2019) e Manivannan et al. (2015) o cultivo de Asteraceae.

Outro efeito observado pela suplementação de Si é a produção de aminoácidos e antioxidantes (Soundararajan et al., 2018), redução dos efeitos de deficiência de enxofre e efeito osmótico devido ao excesso de sais (MAILLARD et al., 2018). Em condições adversas, as plantas produzem hormônios relacionados à abscisão de órgãos como o etileno e o ácido abscísico, na intenção de reduzir a perda de água (Fagan et al., 2015). No entanto, a adubação com Si reduz o estresse osmótico, reduzindo a produção de ácido abscísico (Maillard et al., 2018). A redução do estresse oxidativo ocasionado pela salinidade também é reduzido (Gou et al., 2020).

O déficit hídrico é outro fator abiótico atenuado através da adubação silicatada, permitindo a produção de qualidade, mesmo em condições adversas. Os efeitos obtidos em couve-flor foram o aumento no rendimento, qualidade, vida útil pós-colheita, maior área foliar e produção de fotoassimilados (Barreto et al., 2017, Lozano et al., 2018, Nunes et al., 2019;

Wenneck et al., 2021). Sendo observada uma maior produtividade com o aumento das doses de Si, em condições de déficit hídrico (Wenneck et al., 2021). Desta forma, mesmo com pouca disponibilidade hídrica, o Si proporciona a redução do estresse, reduzindo as perdas que ocorrem nessas condições.

3. Considerações Finais

Tendo em vista a necessidade crescente de produção de alimentos, atrelada à necessidade de redução dos impactos ambientais, redução da utilização de agrotóxicos e aproveitamento consciente das áreas agricultáveis, a suplementação dos cultivos com Si tende a crescer nos próximos anos. Isso devido principalmente aos benefícios relatados por diversos estudos. Além disso, o uso do Si apresenta vantagens inegáveis como a não poluição do meio ambiente, redução na necessidade de pulverizações, produção satisfatória em condições adversas, o que possibilita o uso de áreas com limitação hídrica ou salinidade.

Os efeitos do Si sobre as plantas podem torna-las mais nutritivas ou com componentes interessantes a saúde humana, no caso dos antioxidantes, que apresentam vários benefícios à saúde humana. Sendo interessante a aplicação da técnica na melhoria dos atributos bioquímicos das culturas, o que encoraja outros estudos nesse sentido.

Pesquisas futuras devem ser encorajadas no sentido de minimizar os prejuízos promovidos por pragas e doenças em culturas diversas, pois os estudos ainda apresentam resultados restritos. Outro ponto importante a ser abordado é a relação entre a adubação silicatada e a produção de compostos bioativos, que trazem benefícios a saúde humana.

Referências

- Adrees, M., Ali, S., Rizwan, M., Zia-Ur-Rehman, M., Ibrahim, M., Abbas, F., Farid, M., Qayyum, M. F., & Irshad, M. K. (2015). Mechanisms of silicon-mediated alleviation of heavy metal toxicity in plants: a review. *Ecotoxicol. Environ. Saf.* v.119, p. 186–197. <https://doi.org/10.1007/s11356-014-3938-9>.
- Albergoni, L., & Pelaez, V. (2007). Da revolução verde à agrobiotecnologia: ruptura ou continuidade de paradigmas? *Revista de Economia*, 33 (1).
- Albuquerque, A. W. D., Santos, J. M. D., & Farias, A. P. D. (2014). Produtividade e qualidade pós-colheita de Helicônia Golden Torch submetida a fontes e doses de silício. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 18 (2):173-179.
- Alleoni, L. R. F., Mello, J. W., V., & de Rocha, W. S. D. da. (2009). Eletroquímica, adsorção e troca iônica no solo. In: Melo, V. F., Alleoni, L. R. F. eds. *Química e mineralogia do solo*. Viçosa: SBCS, p.69-129.
- Atta, B., Rizwan, M., Sabir, A. M., Gogi, M. D., & Ayub, M. A. (2019). Silicon mediated induced resistance in plants for the management of agricultural insect pests: a review. *World J. Biol. Biotechnol.* 4: 19–27. <https://doi.org/10.33865/wjb.004.01.0192>
- Ávila, F. W., Baliza, D. P., Faquin, V., Araújo, J. L., & Ramos, S. J. (2010). Interação entre silício e nitrogênio em arroz cultivado sob solução nutritiva. *Revista Ciência Agronômica*, 41 (2): 184-190.
- Bakhat, H. F., Bibi, N., Zia, Z., Abbas, S., Hammad, H. M., Fahad, S., Ashraf, M. R., Shah, G. M., Rabbani, F., & Saeed, S. (2018). Silicon mitigates biotic stresses in crop plants: a review. *Crop Protection*, 104, 21-34. <https://doi.org/10.1016/j.cropro.2017.10.008>
- Camargo, J. M. M., Moraes, J. C., Zanol, Q. M. R., & Queiroz, D. S. L. (2011). Interação silício e insetos-praga: defesa mecânica ou química? *Revista de Agricultura*, 86, (1): 62-79.
- Camargo, M. S. (2016). Efeito do silício na tolerância das plantas aos estresses bióticos e abióticos. *International Plant Nutrition Institute*. <https://www.researchgate.net/profile/Monica-Camargo-4/publication/309465267_Efeito_do_silicio_na_tolerancia_das_plantas_aos_estresses_bioticos_e_abioticos/links/5811e76308aec29d99f9e509/Efeito-do-silicio-na-tolerancia-das-plantas-aos-estresses-bioticos-e-abioticos.pdf>
- Camargo, M. S. D., Korndörfer, G. H., Foltran, D. E., Henrique, C. M., & Rossetto, R. (2010). Absorção de silício, produtividade e incidência de *Diatraea saccharalis* em cultivares de cana-de-açúcar. *Bragantia*, 69 (4): 937-944.
- Camargo, M. S. D., Korndörfer, G. H., & Pereira, H. S. (2007). Solubilidade do silício em solos: influência do calcário e ácido silícico aplicados. *Bragantia*, 66, 637-647. <https://doi.org/10.1590/S0006-87052007000400014>
- Carré-Missio, V., Rodrigues, F. A., Schurt, D. A., Resende, R. S., Souza, N. F. A., Rezende, D. C., & Zambolim, L. (2014). Effect of foliar-applied potassium silicate on coffee leaf infection by *Hemileia vastatrix*. *Annals of applied biology*, 164, (3): 396-403. <https://doi.org/10.1111/aab.12109>
- Carvalho-Pupatto, J. G., Büll, L. T., & Crusciol, C. A. C. (2004). Pesquisa Agropecuária Brasileira, 39, 1213-1218. <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2004001200008>

- Castellanos, C. I. S., Rosa, M. P., Deuner, C., Bohn, A., Barros, A. C. S. A., & Meneghello, G. E. (2016). Aplicação ao solo de cinza de casca de arroz como fonte de silício: efeito na qualidade de sementes de trigo produzidas sob estresse salino. *Revista de Ciências Agrárias*, 39 (1). <https://doi.org/10.19084/RCA15011>
- Coelho, P. H. M., Benett, K. S. S., Arruda, N.; Benett, C. G. S., & Nascimento, M. V. (2019). Crescimento e produtividade de dois cultivares de soja em função de doses de silício. *Revista de Agricultura Neotropical*, 6 (3): 60-65.
- Corrêa, C. V., & Mantoan, L. P. B. (2017). Silício aumenta a formação de nódulos na soja. *Campo & Negócios: Grãos*, 11. 28-29. <https://revistacampoenegocios.com.br/silicio-aumenta-os-nodulos-na-soja/>
- Epstein, E. (2001). Silicon in plants: facts vs concepts. In: Datnoff, L. E., Snyder, G. H., Korndörfer, G. H. (Eds.). *Silicon in agriculture The Netherlands: Elsevier Science*. 403 p. [https://doi.org/10.1016/S0928-3420\(01\)80005-7](https://doi.org/10.1016/S0928-3420(01)80005-7)
- Epstein, E. Silicon. (1999). *Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology*, 50, 641-664.
- Etesami, H., & Jeong, B. R. (2018). Silicon (Si): Review and future prospects on the action mechanisms in alleviating biotic and abiotic stresses in plants. *Ecotoxicology and environmental safety*, 147, 881-896. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2017.09.063>
- Fagan, E. B., Ono, E. O., Rodrigues, J. D., Chalfun Júnior, A., & Dourado Neto, D. (2015). *Fisiologia Vegetal: Reguladores Vegetais*. 1. ed. Piracicaba, SP: Andrei, 1. 300p.
- Faimon, J. (1998). The kinetics of the release of silicon and aluminum from aluminosilicates into aqueous mildly acid solutions. *Scripta. Fac. Sci. Nat. Univ. Masaryk Brun. (Brno. Czeck Rep.)*. 25:59-68.
- Fancelli, A. L., & de Almeida, R. E. M. (2015). Programa racional para fertilizantes deve considerar fatores que afetam cultivo. *Embrapa Pesca e Aquicultura-Artigo em periódico indexado (ALICE)*.
- Fawe, A., Menzies, J. G., Cherif, M., & Bélanger, R. R. (2001). Silicon and disease resistance in dicotyledons. In: Datnoff, L. E., Snyder, G. H., & Korndörfer, G. H. (Eds.). *Silicon in agriculture The Netherlands: Elsevier Science*, 403 p. [https://doi.org/10.1016/S0928-3420\(01\)80013-6](https://doi.org/10.1016/S0928-3420(01)80013-6)
- Freitas, L. B. D., Coelho, E. M., Maia, S. C. M., & Silva, T. R. B. (2011). Adubação foliar com silício na cultura do milho. *Revista Ceres*, 58, 262-267. <https://doi.org/10.1590/S0034-737X2011000200020>
- Freitas, L. C., Costa Filho, J. F., Aloisi, R. R., & Melo, W. J. (1977). Contribuição ao estudo da sílica solúvel em alguns perfis de solos. *Científica, Jaboticabal*, 5 (2): 296-305.
- French-Monar, R. D., Rodrigues, F. A., Korndörfer, G. H., & Datnoff, L. E. (2010). Silicon suppresses *Phytophthora* blight development on bell pepper. *Journal of Phytopathology*, 158(7-8), 554-560. <https://doi.org/10.1111/j.1439-0434.2009.01665.x>
- Gaur, S., Kumar, J., Kumar, D., Chauhan, D. K., Prasad, S. M., & Srivastava, P. K. (2020). Fascinating impact of silicon and silicon transporters in plants: A review. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, [S. l.], 202, March, 110885. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2020.110885>
- Gomes, F. B., Moraes, J. C., Santos, C. D. D., & Antunes, C. S. (2008). Uso de silício como indutor de resistência em batata a *Myzus persicae* (Sulzer) (Hemiptera: Aphididae). *Neotropical Entomology*, 37 (2): 185-190.
- Gomes, F. B., Moraes, J. C., Santos, C. D., & Goussain, M. M. (2005). Resistance induction in wheat plants by silicon and aphids. *Scientia Agricola, Piracicaba*, 62, (6): 547-551.
- Gonçalves, P. A. de S. (2021). Manejo de solos e a nutrição de plantas e sua relação com a ocorrência de pragas. *Scientific Electronic Archives Issue ID: Sci. Elec. Arch.* 13, (6) <http://dx.doi.org/10.36560/14620211301>
- Goussain, M. M., Moraes, J. C., Carvalho, J. G., Nogueira, N. L., & Rossi, M. L. (2002). Efeito da aplicação de silício em plantas de milho no desenvolvimento biológico da lagarta do cartucho *Spodoptera frugiperda* (J. E. Smith) (Lepidoptera: Noctuidae). *Neotropical Entomology, Londrina*, 31, (2): 305-310. <https://doi.org/10.1590/S1519-566X2002000200019>
- Gunes, A., Pilbeam, D. J., Inal, A.; Bagci, E. G., & Coban, S. (2007). Influence of silicon on antioxidant mechanisms and lipid peroxidation in chickpea (*Cicer arietinum* L.) cultivars under drought stress. *Journal of Plant Interactions*, 2, 105-113. <https://doi.org/10.1080/17429140701529399>
- Huang, H., Li, M., Rizwan, M., Dai, Z., Yuan, Y., Hossain, Md M., Cao, M., Xiong, S., & Tu, S. (2021). Synergistic effect of silicon and selenium on the alleviation of cadmium toxicity in rice plants. *Journal of Hazardous Materials*, [S. l.], 401, April, 123393, <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2020.123393>
- Hurtado, A. C., Chiconato, D. A., de Mello Prado, R., Junior, G. D. S. S., Gratão, P. L., Felisberto, G., Viciado, D. O., & dos Santos, D. M. M. (2020). Different methods of silicon application attenuate salt stress in sorghum and sunflower by modifying the antioxidative defense mechanism. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 203, 110964. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2020.110964>
- Hussain, M., Ahmad, S., Hussain, S., Lal, R., Ul-Allah, S., & Nawaz, A. (2018). Arroz em solos salinos: fisiologia, bioquímica, genética e manejo. *Av. Agron.* 148, 231-287. <https://doi.org/10.1016/bs.agron.2017.11.002>
- Islam, W., Tayyab, M., Khalil, F., Hua, Z., Huang, Z., & Chen, H. Y. (2020). Silicon-mediated plant defense against pathogens and insect pests. *Pesticide Biochemistry and Physiology*, 168, 104641. <https://doi.org/10.1016/j.pestbp.2020.104641>
- Jones, L. H. P., & Handreck, K.A. (1965). Studies of silica in the oat plant: III. Uptake of sílica from soils by the plant. *Plant Soil* 23, 79-99. <https://www.jstor.org/stable/42932125>
- Ker, J. C., Curi, N., Schaefer, C. E. G. R., & Vidal-Torrado, P. (2012). *Pedologia: Fundamentos*. (1ª edição). Viçosa, SBCS, 343p.

- Korndörfer, G. H., Pereira, H. S., & Camargo, M. S. (2002). Papel do silício na produção de cana-de-açúcar. STAB, Piracicaba, 21, (2): 34-37.
- Kumar, J., Singh, S., Singh, M., Srivastava, P. K., Mishra, R. K., Singh, V. P., & Prasad, S. M., (2017). Regulação transcricional do estresse salino em plantas: uma breve revisão. Plant Gene, 11, 160-169. <https://doi.org/10.1016/j.plgene.2017.04.001>.
- Lacerda, M. C., Nascente, A. S., & Pereira, E. (2019). Adubação nitrogenada afeta a produtividade e a qualidade comercial de grãos do feijoeiro em sistema plantio direto. Revista de Ciências Agrárias, 42, (2): 369-378. <https://doi.org/10.19084/rca.15649>
- Liang, Y., Nikolic, M., Belanger, R., Haijun, G., & Song, A. (2015). Silicon in Agriculture. From Theory to Practice. Dordrecht: Springer, 1ª ed., 235 p.
- Lima Filho, O. F. (2010). O silício e a resistência das plantas. Embrapa, março/2010.
- Liu, B., Soundararajan, P., & Manivannan, A. (2019). Mechanisms of Silicon-Mediated Amelioration of Salt Stress in Plants. Plants, 8(9), 307. doi:10.3390/plants8090307
- Ma, J. F., Miyake, Y., & Takahashi, E. (2001). Silicon as a beneficial element for crop plants In: Datnoff, L. E., Snyder, G. H., Korndörfer, G. H., Eds., Silicon in agriculture, Studies in Plant Science 8, Amsterdam, Elsevier, 17-39.
- Ma, J. F., & Yamaji, N. (2015). A cooperative system of silicon transport in plants. Trends. Plant Sci., 20, 435-442. <https://doi.org/10.1016/j.tplants.2015.04.007>.
- Madeiros, L. B., Vieira, A. O., & Aquino, B. F. (2009). Micronutrientes e silício nas folhas da cana-de-açúcar: escória siderúrgica aplicado no solo. Engenharia Ambiental, 6, (1): 027-037.
- Manivannan, A., Soundararajan, P., Arum, L. S., Ko, C. H., Muneer, S., & Jeong, B. R. (2015). Silicon-mediated enhancement of physiological and biochemical characteristics of *Zinnia elegans* 'Dreamland Yellow' grown under salinity stress. Hortic. Environ. Biotechnol. 56, 721-731. <https://doi.org/10.1007/s13580-015-1081-2>
- Marschner, H. (1995). Beneficial Mineral Elements. In: Mineral Nutrition of Higher Plants. (2nd ed.) Academic Press, London, pp. 405-434.
- Mascarenhas, H. A. A.; Esteves, J. A. S., Wutke, E. B., & Gallo, P. B. (2014). Micronutrientes em soja no estado de São Paulo. Nucleus, 11 (1): 323-343, 2014. <https://dx.doi.org/10.3738/1982.2278.1102>
- Matichenkov, V. V., & Bocharnikova, E. A. (2001). The relationship between silicon and soil physical and chemical properties. In Studies in plant science Elsevier, 8, 209-219.
- Matiello, R. R., Barbieri, R. L., & Carvalho, F. I. F. (1997). Resistência de plantas a moléstias fúngicas. Ciência rural, 27, (1): 161-168. <https://doi.org/10.1590/S0103-84781997000100028>
- Mauad Déllano-Frier, J. P., Martínez-Gallardo, N. A., De La Vega, O. M., Salas-Araiza, M. D., Vargas, P., & Borodanenko, A. (2004). The effect of exogenous jasmonic acid on induced resistance and productivity in amaranth (*Amaranthus hypochondriacus*) is influenced by environmental conditions. Journal of Chemical Ecology, New York, 30, (5): 1001-1034. <https://doi.org/10.1023/B:JOEC.0000028464.36353.bb>
- Mauad, M., Grassi Filho, H., Crusciol, C. A. C., & Corrêa, J. C. (2003). Teores de silício no solo e na planta de arroz de terras altas com diferentes doses de adubação silicatada e nitrogenada. Revista Brasileira de Ciência do Solo, 27, (5): 867-873. <https://doi.org/10.1590/S0100-06832003000500011>
- Mburu, K., Oduor, R., Mgtutu, A., & Tripathi, L. (2016). Silicon application enhances resistance to xanthomonas wilt disease in banana. Plant Pathology, 65 (5): 807-818. <https://doi.org/10.1111/ppa.12468>
- Mc Keague, J. A., & Cline, M. G. (1963). Silica in soils. Advances in Agronomy, New York, 15, (3): 339-397.
- Mendonça, A. O. de, Tavares, L.C., Brunes, A. P., Monzón, D. L. R., & Vilella, F.A. (2013). Acúmulo de silício e compostos fenólicos na parte aérea de plantas de trigo após a adubação silicatada. Bioscience Journal [online], 29, (5). [Accessed 12 February 2022]. <https://seer.ufu.br/index.php/biosciencejournal/article/view/22432>.
- Mengel, K., & Kirkby, E. A. (1987). Principles of plant nutrition. Worblaufen-Bern: International Potash Institute, 687p.
- Monger, H. C., & Kelly, E. F. (2002). Silica minerals. In: Soil Mineralogy With Environmental Applications. Soil Science Society of America, Madison, USA, 611-636.
- Moraes, E. R., dos Reis, A. C., da Silva, N. E. P., Ferreira, M., & de Menezes, F. G. (2018). Nutrientes no solo e produção de quiabo conforme doses de silicato de cálcio e magnésio. Revista de Agricultura Neotropical, 5, (1): 60-65. <https://doi.org/10.32404/rean.v5i1.2097>
- Moreira, A. R., Fagan, E. B., Martins, K. V., & Souza, C. E. E. (2010). Resposta da cultura de soja a aplicação de silício foliar. Bioscience Journal, Uberlândia, 26, (3): 413-423.
- Najihah, N. I., Hanafi, M. M., Idris, A. S., & Hakim, M. A. (2015). Silicon treatment in oil palms confers resistance to basal stem rot disease caused by *Ganoderma boninense*. Crop Protection, 67, 151-159. <https://doi.org/10.1016/j.cropro.2014.10.004>
- Nojosa, G. B. A., Resende, M. L. V., & Resende, A. V. (2006). Uso de fosfitos e silicatos na indução de resistência. In: Cavalcanti, L. S. et al. (Eds.). Indução de resistência em plantas a patógenos e insetos Piracicaba: FEALQ, 263 p.
- Nunes, A. M. C., de Lima Nunes, L. R., Rodrigues, A. J. O., & Uchôa, K. S. A. (2019). Silício na tolerância ao estresse hídrico em tomateiro. Revista Científica Rural, 21, (2): 239-258. <https://doi.org/10.30945/rcr-v21i2.2658>
- Oliveira Júnior, S. G., Ferreira, E. A., Nery, M. C., Silva, R. F. C., Melo, S. G. F., & Teixeira Filho, C. M. (2018). Aplicação foliar de silício em plantas de trigo associado a qualidade fisiológica das sementes. Revista Brasileira de Agropecuária Sustentável (RBAS), 8, (1): 9-16.
- Oliveira, S., Lemes, E. S., Meneghello, G. E., Tavares, L. C., & Barros, A. C. S. A. (2015). Aplicação de silício via solo no rendimento e na qualidade fisiológica de sementes de soja. Semina: Ciências Agrárias, Londrina, 36, (5): 3029-3042. <http://dx.doi.org/10.5433/1679-0359.2015v36n5p3029>

- Pereira, H. S., Korndörfer, G. H., Moura, W.F., & Corrêa, G. F. (2003). Extratores de silício disponível em escórias e fertilizantes. *Rev. Bras. Ciênc. Solo*, 27, 265–274. <https://doi.org/10.1590/S0100-06832003000200007>
- Ponce, F. S., Trento, D. A., Toledo, C. A. de L., Antunes, D. T., Zanuzo, M. R., Dallacort, R., Oliveira, R. C., & Seabra, S. (2021). Low tunnels with shading meshes: An alternative for the management of insect pests in kale cultivation. *Scientia Horticulturae*, 288, 110284. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2021.110284>
- Pozza, A. A. A., Curi, N., Costa, E. T. D. S., Guilherme, L. R. G., Marques, J. J. G. D. S., & Motta, P. E. F. D. (2007). Retenção e desorção competitivas de ânions inorgânicos em gibbsita natural de solo. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, 42, (11): 1627-1633. <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2007001100015>
- Pozza, A. A., Alves, E., Pozza, E. A., Carvalho, J. G. D., Montanari, M., Guimarães, P. T., & Santos, D. M. (2004). Efeito do silício no controle da cercosporiose em três variedades de cafeeiro. *Fitopatologia Brasileira*, 29, (2): 185-188.
- Pozza, E. A., Pozza, A. A. A., & Botelho, D. M. D. S. (2015). O silício no controle de doenças de plantas. *Revista Ceres*, 62, 323-331. <https://doi.org/10.1590/0034-737X201562030013>
- Pulz, A. L., Crusciol, C. A. C., Lemos, L. B., & Soratto, R. P. (2008). Influência de silicato e calcário na nutrição, produtividade e qualidade da batata sob deficiência hídrica. *Revista Brasileira de Ciência Solo*, 32, 1651-1659.
- Reymond, P., & Farmer, E. E. (1998). Jasmonate and salicylate as global signals for defense gene expression. *Current Opinion in Plant Biology*, 1(5), 404–411. doi:10.1016/s1369-5266(98)80264-1
- Rodrigues, J. H. V., Angelini, M. R., de Oliveira, R. S., & Queiroz, A. A. (2018). Efeito de doses de silício na resistência do feijoeiro a *Spodoptera frugiperda*. *Revista de Agricultura Neotropical*, 5(4), 13-19.
- Santos, G. R., Rodrigues, A. C., Bonifacio, A., Chagas Junior, A. F., & Tschoeke, P. H. (2014). Severidade de antracnose em folhas de sorgo submetido a doses crescentes de silício. *Revista Ciência Agronômica*, 45, 403-408. <https://doi.org/10.1590/S1806-66902014000200023>
- Santos, M. C., Junqueira, A. M. R., & Peixoto, J. R. (2008). Efeito do silício na incidência da traça-do-tomateiro em plantas de tomate industrial. *Horticultura Brasileira*, 26, 842-846.
- Shi, Y., Wang, Y., Flores, T. J., & Gong, H. (2013). O silício diminui o transporte de cloreto em arroz (*Oryza sativa* L.) em condições salinas. *J. Plant Physiol.* 170, 847-853. <https://doi.org/10.1016/j.jplph.2013.01.018>
- Silva, V. F. D., Moraes, J. C., & Melo, B. A (2010). Fontes de silício na indução de resistência a insetos praga e no desenvolvimento de plantas de batata inglesa. *Revista Brasileira de Agroecologia*, 5, (2):149-156.
- Silva, V. J., da Silva Wanderley, L. R., de Sousa, A. F., de Oliveira Rodrigues, R., de Souza, P. C., & de Freitas, L. M. (2017). Efeito da adubação com silício no controle de lagarta do cartucho (*Spodoptera frugiperda*) Em Plantas De Milho Doce. In *Anais do Congresso Brasileiro de Fitossanidade*.
- Song, A., Xue, G., Cui, P., Fan, F., Liu, H., Yin, C., Sun, W., & Liang, Y. (2016). The role of silicon in enhancing resistance to bacterial blight of hydroponic- and soil-cultured rice. *Sci. Rep.* 6, 24640. <https://doi.org/10.1038/srep24640>.
- Souza, J. L., & Resende, P. (2003). *Manual de horticultura orgânica Viçosa: Aprenda Fácil*. 564 p.
- Sun, X. X., Hu, C. X., Jia, H. R., Wu, Q. L., Shen, X. J., Zhao, S. Y., Yu-Yingjiang., & Wu, K. M. (2021). Case study on the first immigration of fall armyworm, *Spodoptera frugiperda* invading into China. *Journal of Integrative Agriculture*, 20(3), 664-672. [https://doi.org/10.1016/S2095-3119\(19\)62839-X](https://doi.org/10.1016/S2095-3119(19)62839-X)
- Taiz, L., Zeiger, E., Moller, I., & Murphy, A. (2017). *Fisiologia e desenvolvimento vegetal*. (6ª.ed.): Artmed. 888 p.
- Teodoro, P. E., Ribeiro, L. P., Corrêa, C. C. G., & Torres, F. E. (2014). Desempenho de híbridos de milho sob aplicação foliar de silício no cerrado sul-mato-grossense. *Bioscience Journal*, 30(3), 224-231.
- Tubana, B. S., Babu, T., & Datnoff, L. E. (2016). A Review of silicon in soils and plants and its role in US agriculture: history and future perspectives. *Soil Science*, 181, (9- 10): 393-411, 2016.10.1097/SS.0000000000000179
- Venâncio, J. B. Produção, morfofisiologia e qualidade de cebola sob salinidade e aplicação de silício. < <https://ppgfito.ufersa.edu.br/wp-content/uploads/sites/222/2021/12/TESE-JEFFERSON-FITOTECNIA-versao-BIBLIOTECA.pdf>>
- Vilela, H. (2009). As fontes de silício (silicatos). *Agronomia: Artigos Científicos*, <http://www.agronomia.com.br/conteudo/artigos/artigos_fontes_silicio_brasil.htm>
- Waewthongrak, W., Pisuchpen, S., & Leelasuphakul, W. (2015). Effect of *Bacillus subtilis* and chitosan applications on green mold (*Penicillium digitatum* Sacc.) decay in citrus fruit. *Postharvest Biology and Technology*, 99, 44-49. <https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2014.07.016>
- Wedepohl, K. H. (1995). The composition of the continental crust. *Geochim. Cosmochim. Acta*. 59: 1217–1239.
- Wenneck, G. S., Saath, R., Rezende, R., Andrean, A. F. B. A., & Santi, D. C. (2021). Resposta agrônômica de couve-flor à adição de silício ao solo sob estresse hídrico. *Pesquisa Agropecuária Tropical*, 51, e66908-e66908. 10.1590/1983-40632021v51i66908
- Zambolim, L., Ventura, J. A., & Zanão Júnior, L. A. (2012). Efeito da nutrição mineral no controle de doenças de plantas. *Viçosa/MG*: 321p.
- Zhang, G., Cui, Y., Ding, X., & Dai, Q. Stimulation of phenolic metabolism by silicon contributes to rice resistance to sheath blight. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*. 176, 118-124.2013. <https://doi.org/10.1002/jpln.201200008> Colocar espaço entre uma referência e outra. Lembre-se que usamos a norma APA. (fonte TNR 8 – espaço simples -justificado)