

**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DO
TOCANTINS**

CAMPUS ARAGUATINS

CURSO DE BACHARELADO EM ENGENHARIA AGRONÔMICA

ANA BEATRIZ DE CASTRO OLIVEIRA

**SILÍCIO COMO ATENUADOR DE ESTRESSES ABIÓTICOS EM PLANTAS
CULTIVADAS**

ARAGUATINS - TO

2021

ANA BEATRIZ DE CASTRO OLIVEIRA

**SILÍCIO COMO ATENUADOR DE ESTRESSES ABIÓTICOS EM PLANTAS
CULTIVADAS**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Coordenação do Curso de Bacharelado em Engenharia Agrônoma do Instituto Federal do Tocantins – *Campus Araguatins*, como exigência à obtenção do grau de Bacharel em Agronomia.

Orientador: Dr. Samuel de Deus da Silva

ARAGUATINS - TO

2021

**Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
Bibliotecas do Instituto Federal do Tocantins**

O48s Oliveira, Ana Beatriz de Castro
Silício como atenuador de estresses abióticos em plantas
cultivadas. / Ana Beatriz de Castro Oliveira. – Araguatins, TO, 2021.
36 f. : il. color.

Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Agronomia) –
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Tocantins,
Campus Araguatins, Araguatins, TO, 2021.

Orientador: Dr. Samuel de Deus da Silva

1. Estresses abióticos. 2. Silício. 3. Atenuação. I. Silva, Samuel
de Deus da. II. Título.

CDD 630

A reprodução total ou parcial, de qualquer forma ou por qualquer meio, deste documento é autorizada para fins
de estudo e pesquisa, desde que citada a fonte.

**Elaborado pelo sistema de geração automática de ficha catalográfica do IFTO com os dados fornecidos
pelo(a) autor(a).**



Ministério da Educação
Secretaria de Educação Profissional e Tecnológica
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Tocantins
Campus Araguatins
Coordenação do Curso de Bacharelado em Engenharia Agrônômica

FOLHA DE APROVAÇÃO

TÍTULO: “SILÍCIO COMO ATENUADOR DE ESTRESSES ABIÓTICOS EM PLANTAS CULTIVADAS”

AUTORA: Ana Beatriz de Castro Oliveira

ORIENTADOR: Prof. Dr. Samuel de Deus da Silva

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Tocantins, *Campus Araguatins*, como parte das exigências para a conclusão do Curso de Bacharelado em Agronomia.

Aprovado em 24 de junho de 2021.



Documento assinado eletronicamente por **Samuel de Deus da Silva, Servidor**, em 24/06/2021, às 09:30, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015.



Documento assinado eletronicamente por **Roberta de Freitas Souza Lobo, Servidora**, em 24/06/2021, às 09:32, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015.



Documento assinado eletronicamente por **Edvar de Sousa da Silva, Servidor**, em 24/06/2021, às 09:32, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015.



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site http://sei.ifto.edu.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **1316818** e o código CRC **A564D6C6**.

Referência: Processo nº 23233.010454/2021-93

SEI nº 1316818

A Deus, minha mãe Márcia, vovó Filó e todos que me ajudaram a chegar até aqui.

Dedico.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço a Deus por sempre ter me dado forças e proteção nesses anos de faculdade, nunca ter me deixado fraquejar e desistir nos momentos difíceis.

A Eu mesma por acreditar e preferir ver o lado bom de todos os momentos, isso me possibilitou chegar ao final dessa jornada.

À minha família, principalmente minha Mãe Márcia e minha Avó Filomena que nunca mediram esforços para me ajudar e apoiar quando precisei.

A minha amiga e irmã de coração Vitória Virna, por estar sempre comigo superando as dificuldades, dividindo as alegrias e conquistas, e principalmente me dando o apoio emocional que eu tanto precisava.

Aos amigos, Rafael, Charles, Ribamar Júnior, Wemerson, Carol, Lohanna, Fernanda, e tantos outros que fizeram esses anos serem mais leves e inesquecíveis.

Aos meus professores por todo ensinamento compartilhado, pela paciência e parceria durante a vida acadêmica. Agradeço ao Instituto Federal do Tocantins – *campus* Araguatins, pela estrutura e todas oportunidades oferecidas que foram essenciais para a minha formação.

A todos que me ajudaram e estiveram comigo muita gratidão.

RESUMO

O cultivo de plantas sob condições de campo às expõe a estresses ambientais, tais como os de natureza abiótica, que correspondem aos principais estresses que mais afetam o crescimento das plantas. Plantas expostas a essas condições apresentam diminuição na biomassa vegetal, bem como na produção da colheita. Dessa forma, a busca por estratégias de manejo que minimizam os danos causados por esses estresses é considerada fundamental para otimização da eficiência do uso dos recursos naturais. Entre essas estratégias insere-se o silício (Si), um elemento benéfico que pode diminuir os danos causados por estresses abióticos por meio de vários mecanismos. Dessa forma, revisões sistemáticas que demonstram os efeitos obtidos com o Si na mitigação de estresses abióticos em plantas, obtidas a partir de trabalhos científicos são de grande importância. Sua finalidade é de propor o uso do Si nos cultivos agrícolas como estratégia de manejo para o aumento de produtividade. Diante deste contexto, o objetivo do estudo foi realizar um levantamento bibliográfico para demonstrar o potencial do uso do Si na atenuação dos danos causados por estresses de natureza abiótica em espécies de plantas cultivadas. Os dados foram coletados buscando-se fontes atualizadas e com mérito científico relevante quanto ao efeito do elemento na atenuação dos danos causados pelos estresses abióticos. As palavras-chave utilizadas nas pesquisas foram: silício, estresse abiótico (ou seja, estresse/déficit hídrico, estresse salino, desequilíbrio nutricional: nitrogênio, fósforo, potássio, cálcio, magnésio, enxofre, ferro, manganês, zinco, boro). Em suma, evidencia-se que, com a aplicação do Si nos manejos de adubações, pode colaborar com uso eficiente de recursos ambientais nos cultivos agrícolas no Brasil.

Palavras-chave: Elemento benéfico. Adubação. Manejo.

ABSTRACT

Growing plants under field conditions exposes them to environmental stresses, such as those of an abiotic nature, which correspond to the main stresses that most affect plant growth. Plants exposed to these conditions show a decrease in plant biomass, as well as in crop production. Thus, the search for management strategies that minimize the damage caused by these stresses is considered essential for optimizing the efficiency of the use of natural resources. Among these strategies is silicon (Si), a beneficial element that can alleviate the damage caused by abiotic stresses through several mechanisms. Thus, systematic reviews that demonstrate the effects obtained with Si in the mitigation of abiotic stresses in plants, obtained from scientific works, are of great importance. Its purpose is to propose the use of Si in agricultural crops as a management strategy to increase productivity . Given this context, the aim of the study was to carry out a literature review to demonstrate the potential of using Si to mitigate those caused by abiotic stresses in cultivated plant species. Data were collected from up-to-date sources with relevant scientific merit as to the effect of the element in mitigating the damage caused by abiotic stresses. The keywords used in the surveys were: silicon, abiotic stress (ie, water stress/deficit, salt stress, nutritional imbalance: nitrogen, phosphorus, potassium, calcium, magnesium, sulfur, iron, manganese, zinc, boron). In short, it is evident that, with the application of Si in fertilizer management, it can collaborate with the efficient use of environmental resources in agricultural crops in Brazil.

Keywords: Beneficial elemento. Fertilizing. Management.

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	10
2 METODOLOGIA	12
2.1 Caracterização do tipo de pesquisa	12
2.2 Instrumentos da pesquisa	12
2.3 Coleta de dados	13
2.4 Análise dos dados	13
3 PESQUISA BIBLIOGRÁFICA	14
3.1 Silício no sistema - solo	14
3.2 Silício no sistema - planta	16
3.3 Potencial do uso do Si na atenuação de estresses abióticos	18
3.3.1 Uso do Si na atenuação dos danos causados pelo déficit hídrico	18
3.3.2 Silício como atenuador de estresse por salinidade	21
3.3.3 Silício como atenuador de deficiências nutricionais	22
3.3.3.1 Nitrogênio (N)	22
3.3.3.2 Fósforo (P)	23
3.3.3.3 Potássio (K)	24
3.3.3.4 Cálcio (Ca)	25
3.3.3.5 Magnésio (Mg)	25
3.3.3.6 Enxofre (S)	26
3.3.3.7 Ferro (Fe)	26
3.3.3.8 Manganês (Mn)	27
3.3.3.9 Zinco (Zn)	27
3.3.3.10 Boro (B)	28
4 CONSIDERAÇÕES FINAIS	28
REFERÊNCIAS	29

1 INTRODUÇÃO

Os elementos benéficos estimulam o crescimento das plantas, mas são essenciais apenas para espécies vegetais específicas, ou sob condições específicas ou não atendem aos critérios de essencialidade dos nutrientes preconizados por Arnon e Stout (1939). Entre esses elementos insere-se o silício (Si), que é o segundo elemento mais abundante na superfície da Terra após o oxigênio (EPSTEIN, 1994). Apesar da abundância do elemento, as contínuas reações do Si no solo interferem na disponibilidade às plantas (KORNDÖRFER; PEREIRA; NOLLA, 2004).

O Si é um elemento benéfico que tem sido utilizado na mitigação de múltiplos estresses de natureza abiótica que ameaçam o rendimento de plantas cultivadas (VASANTHI et al., 2014). O cultivo de plantas sob condições de campo às expõe a estresses ambientais, tais como os de natureza abiótica, que correspondem aos principais estresses que mais afetam o crescimento das plantas. Plantas expostas a essas condições apresentam diminuição na biomassa vegetal, bem como na produção da colheita (LI et al., 2018). Dessa forma, a busca por estratégias de manejo que minimizam os danos causados por esses estresses é considerada fundamental para otimização da eficiência do uso dos recursos naturais.

Como um elemento benéfico, o acúmulo de Si na rizosfera e nas plantas pode aliviar os efeitos desfavoráveis das principais formas de estresses abióticos por meio de vários mecanismos. Os efeitos benéficos do Si no crescimento das plantas e na produtividade das culturas sob condições dos principais estresses de natureza abiótica, tais como deficiência hídrica (ROCHA et al., 2021; AMIN et al., 2018), salinidade (HURTADO et al., 2020a; YAN et al., 2021) e deficiência nutricional (BUCHELT et al., 2020; CHEN et al., 2016).

Nesse cenário, a incorporação de Si tem sido utilizada para atenuação de estresses abióticos. Nesta revisão bibliográfica foi realizado um levantamento de dados publicados recentemente na literatura, sendo organizados de forma sistemática para discussão dos mecanismos no qual o Si melhora o crescimento de plantas cultivadas sob condições dos principais estresses ambientais de natureza abiótica. Espera-se evidenciar o potencial deste elemento benéfico para posterior recomendação do uso do Si nos cultivos agrícolas como estratégia para o aumento de produtividade de plantas sob condição de estresses.

Diante deste contexto, o objetivo do estudo foi realizar um levantamento bibliográfico para demonstrar o potencial do uso do Si na atenuação dos danos causados por estresses de natureza abiótica em espécies de plantas cultivadas.

2 METODOLOGIA

2.1 Caracterização do tipo de pesquisa

A pesquisa científica é a realização de uma investigação planejada, desenvolvida de acordo com as normas da metodologia consagrada pela ciência (RUIZ, 1985).

Na presente pesquisa, o método da abordagem do problema de estudo, é do tipo qualitativo pois permite a interdependência dinâmica entre o mundo real e o sujeito (SILVA; MENEZES, 2005). Com relação ao nível, a pesquisa é do tipo descritivo, pois apresenta como objetivo a necessidade de redefinir um problema, a fim de proporcionar melhor visão deste ou torná-lo mais específico, considerando que este pode ser amplo e pouco esclarecido (SILVA; MENEZES, 2005). Descritivo, pois descreve o potencial do elemento benéfico Si para atenuação de estresses ambientais, que comprometem o potencial produtivo das plantas cultivadas.

Quanto ao delineamento a pesquisa é bibliográfica, segundo Severino (2007) pode ser entendido como: “[...] aquela que se realiza a partir do registro disponível, decorrente de pesquisas anteriores, em documentos impressos, como livros, artigos, teses etc. [...]”. A pesquisa bibliográfica caracteriza-se pela utilização de um conjunto de conhecimentos humanos reunidos na elaboração de suas obras. Tem como base fundamental conduzir o leitor a determinado assunto e a produção, coleção, armazenamento, reprodução, utilização e comunicação das informações coletadas para o desempenho da pesquisa (FACHIN, 1993).

2.2 Instrumentos da pesquisa

Os procedimentos metodológicos utilizados na realização do presente estudo, consistiram na fundamentação teórica pautada na elaboração de uma revisão bibliográfica, fundamentada no estudo sistemático com levantamento de dados em materiais publicados em livros, revistas especializadas, artigos científicos, entre outras publicações que possuam relevante mérito científico (MARCONI; LAKATOS, 2006).

A condução da pesquisa foi cursada em questões consideradas concernentes ao âmbito de definição das interações do elemento silício no sistema solo e no sistema planta, bem como, o potencial do uso deste elemento na atenuação de danos causados pelos principais estresses de natureza abiótica que ameaçam o rendimento das plantas cultivadas.

2.3 Coleta de dados

Os dados foram coletados buscando-se fontes atualizadas e com mérito científico relevante quanto ao efeito do elemento silício na atenuação dos danos causados pelos estresses abióticos. As palavras-chave utilizadas nas pesquisas foram: silício, estresse abiótico (ou seja, estresse/déficit hídrico, estresse salino, desequilíbrio nutricional: nitrogênio, fósforo, potássio, cálcio, magnésio, enxofre, ferro, manganês, zinco, boro).

2.4 Análise dos dados

Concomitantemente, os dados foram analisados e organizados de maneira sistemática e metodológica.

3 PESQUISA BIBLIOGRÁFICA

3.1 Silício no sistema - solo

O silício (Si) é considerado um elemento químico benéfico para as plantas terrestres e essencial para as equisetáceas (pteridófitas, equisetíneas e isospóricas) e algumas algas (diatomáceas) (EPSTEIN, 1999). O Si é um elemento benéfico às plantas terrestres porque apenas estimula o crescimento das plantas sob condições específicas, mas não atende aos critérios de essencialidade proposto por Arnon e Stout (1939):

- i) o elemento participa de algum composto ou de alguma reação, sem a qual a planta não vive;
- ii) na ausência do elemento a planta não completa o ciclo de vida;
- iii) o elemento não pode ser substituído por nenhum outro;
- iv) o elemento deve ter um efeito direto na vida da planta e não exercer apenas o papel de, com sua presença no meio, neutralizar efeitos físicos, químicos ou biológicos desfavoráveis ao vegetal.

Assim, os elementos benéficos podem desempenhar um papel importante na melhoria da biomassa e no rendimento (PRADO, 2020). Portanto, os elementos essenciais representam a universalidade da exigência nutricional em plantas superiores, enquanto os elementos benéficos refletem a diversidade da exigência nutricional (MARSCHNER, 1995).

O Si é o segundo elemento químico mais abundante da crosta terrestre, representando 27,7%, superado apenas pelo oxigênio (EPSTEIN, 1999). É encontrado na natureza na forma de ácido monossilícico ou ácido ortossilício $[\text{Si}(\text{OH})_4]$, Si adsorvido com óxidos (Fe, Al e Mn), sílica oriunda da decomposição da matéria orgânica (formas amorfas), ou ainda como Si estrutural em minerais de silicatados (SOUSA; KORNDÖRFER; WANGEN, 2010).

As plantas só conseguem absorver o Si presente na solução do solo que esteja na forma de ácido monossilícico (H_4SiO_4) com concentração que geralmente variam de 1 a 2,0 mM (EPSTEIN, 1994). Essa concentração se aproxima a apresentada por nutrientes de plantas como potássio (K), cálcio (Ca) e enxofre (S) e é aproximadamente o dobro das concentrações de fósforo (P) nas soluções do solo (EPSTEIN, 1999).

A concentração do elemento no solo varia em função do material de origem, dos níveis de intemperismo ou das adubações realizadas. Em solos argilosos, o teor de Si pode variar de 200 a 300 g kg⁻¹ e em solos arenosos, o teor médio é de 450 g kg⁻¹ (TUBANA; BABU; DATNOFF, 2016). Entretanto, grande parte desse elemento presente no solo está na forma inerte, não disponível em solução, o que limita a absorção pelas plantas (PRADO, 2020).

A baixa disponibilidade de Si assimilável para as plantas é maior em regiões de clima tropical, pois as condições climáticas aumentam a vulnerabilidade dos solos à ocorrência de eventos que favorecem a dessilicação, como a lixiviação, a elevada acidez e os baixos valores de saturação por bases (KEEPING, 2017). Essas características são comuns em Argissolos, Latossolos e Neossolos, solos altamente intemperizados e que, portanto, apresentam baixos teores de Si (TUBANA; BABU; DATNOFF, 2016).

Dessa forma, considera-se que o Si está presente em maior quantidade em solos mais jovens, como os Cambissolos, em comparação à solos mais intemperizados, como os Latossolos (TUBANA; BABU; DATNOFF, 2016). Assim, devido ao alto grau de intemperismo dos solos do Brasil, o Si representa cerca de 5 a 40% na sua composição. Além disso, a disponibilidade desse elemento também depende de características do solo, como o pH, que aumenta proporcionalmente a sua dissociação, e conseqüentemente, a sua disponibilidade para as plantas (MANDLIK et al., 2020). O elemento pode ser adicionado ao solo através da aplicação de fertilizantes silicatados ou ainda pela decomposição de resíduos vegetais (SAVANT et al., 1999; KATZ, 2014).

A decomposição de resíduos vegetais é relevante em áreas com plantios de plantas acumuladoras do elemento, como a cana-de-açúcar, que chega a remover até 700 kg ha⁻¹ ao ano (KEEPING, 2017). Por essa razão, o cultivo de cana-de-açúcar de forma extensiva expõe o solo ao declínio da fertilidade causado pela absorção contínua de Si pelas soqueiras sem o reabastecimento do Si através de adubações, resultando em diminuição no desempenho produtivo de culturas em cultivos em todo o mundo (SAVANT et al., 1999; MAJUMDAR; PRAKASH, 2020).

A maior parte do Si é exportada do campo cultivado durante a colheita, em vez de incorporada ao solo. Estudos recentes validaram que uma quantidade substancial de Si armazenado em culturas cultivadas é removida do campo no momento da colheita e não retorna diretamente ao solo (KATZ et al., 2021; CRUSCIOL et al.,

2013a). Portanto, o resíduo acumulado da colheita pode desempenhar um papel importante na manutenção do equilíbrio de Si nos campos de cultivo (SINGH; SINGH; SINGH, 2021). Da mesma forma, Katz et al. (2021) sugeriram que a reciclagem de resíduos vegetais no campo pode ajudar na adição de Si aos solos.

Contudo, o fornecimento de Si via fertilizantes é importante para manutenção da produtividade dos sistemas de produção agrícola. O Si que comumente é fornecido às culturas é proveniente da siderurgia, que é uma fonte de Si abundante no Brasil, sendo constituída basicamente por silicato de cálcio e magnésio e termofosfatos magnesiano (SOUSA; KORNDÖRFER; WANGEN, 2010). No entanto, deve-se atentar a qualidade desse material que podem apresentar concentração de metais pesados, além de apresentar baixa solubilidade em água e causar alteração de pH em solos já corrigidos (MANDLIK et al., 2020).

Entre as fontes solúveis de Si, destaca-se o silicato de potássio, sendo a mais utilizada em pulverizações foliares e para fornecimento via solução nutritiva (ZANÃO JÚNIOR; FONTES; ÁVILA, 2009), por apresentar maior quantidade de Si na forma absorvida pelas plantas, o ácido monossilícico, é aplicado o elemento já na forma em que ele é absorvido, reduzindo os gastos energéticos da planta (CRUSCIOL et al., 2013b). No entanto, a maior limitação para o uso de Si é a alta facilidade de polimerização, sendo que em concentrações maiores que 3 mmol L^{-1} na solução pode ser polimerizado, inviabilizando a absorção pela planta (BIRCHALL, 1995).

Devido isso, fontes com maior estabilidade vêm surgindo com o intuito de melhorar a qualidade da solução e favorecer a absorção pela planta. Entre elas, destaca-se o silicato de sódio e potássio estabilizado com sorbitol, que aumenta a estabilidade do Si por manter as formas manoméricas, o que aumenta a absorção pelas plantas e melhora a eficiência de aplicação (BABIKER; DUNCAN, 1974).

3.2 Silício no sistema - planta

As plantas absorvem o Si na forma de ácido monossilícico (H_4SiO_4) juntamente com a água por fluxo de massa (absorção passiva) ou pela ação de transportadores (absorção ativa) (MA; YAMAJI, 2006). Após absorvido, o ácido monossilícico é transportado via xilema, sendo distribuído de acordo com a taxa transpiratória de cada parte da planta (MITANI; YAMAJI; MA, 2009). O Si se acumula principalmente nas

áreas de máxima transpiração (tricomas, espinhos, etc.) como ácido silícico polimerizado (sílica amorfa) (MANDLIK et al., 2020).

A capacidade de absorver e acumular Si nos tecidos varia em função da espécie vegetal. A habilidade de absorção de Si pelas raízes está relacionada com essa diferença de acumulação do elemento nas diversas espécies (MA; YAMAJI, 2006). De acordo com o acúmulo de Si, as plantas são classificadas como acumuladoras (100 a 150 g kg⁻¹ de Si), incluindo as gramíneas, como o milho; intermediárias (10 a 50 g kg⁻¹ de Si) como algodão e algumas dicotiledôneas e não acumuladoras (<5 g kg⁻¹ de Si) como leguminosas (MANDLIK et al., 2020; MITANI; YAMAJI; MA, 2009).

A variação na quantidade acumulada de Si deve-se as formas de absorção do elemento, plantas consideradas acumuladoras apresentam mecanismo ativo (governado por transportadores com alta afinidade nas membranas) e as não acumuladoras absorvem o Si de forma passiva (conduzido pela transpiração) (MITANI; YAMAJI; MA, 2009).

Após absorvido, o Si colabora no desenvolvimento das plantas, sobretudo, quando expostas à estresses ambientais. A atuação do Si na proteção das plantas aos estresses pode ser de três formas: bioquímica, fisiológica e física. Bioquímica e fisiologicamente, o acúmulo de Si pode aumentar a tolerância das plantas, mantendo o potencial hídrico foliar (PEI et al., 2010), o ajuste osmótico (AMIN et al., 2014), modificando atributos de trocas gasosas como a assimilação de CO₂ e as taxas de transpiração (FRAZÃO et al., 2020), reduzindo o estresse oxidativo (OLIVEIRA et al., 2019), provocando modificações nos osmólitos (TEIXEIRA et al., 2020b), fitohormônios e na expressão de genes (FAROOQ; DIETZ, 2015) e aumentando a eficiência nutricional (TEIXEIRA et al., 2020c). E física, pela melhoria da arquitetura foliar, menor abertura do ângulo foliar (SANTOS et al., 2020), tendo folhas mais eretas, redução do autossombreamento, além da deposição de Si no apoplasto das folhas proporcionando maior resistência à danos mecânicos (MA; YAMAJI, 2015).

Apesar da divergência sobre a sua essencialidade, as pesquisas realizadas com o elemento têm mostrado efeitos benéficos importantes que refletem em aumento no crescimento e produção de diversas plantas, sobretudo, quando submetidas à estresses ambientais (HERNANDEZ-APAOLAZA, 2014). Existem diversos trabalhos que demonstram efeito benéfico desse elemento em plantas submetidas à estresses ambientais, como a deficiência hídrica (TEIXEIRA; MELLO PRADO; ROCHA, 2021;

ROCHA et al., 2021), estresse por salinidade (HURTADO et al., 2020b), estresses por deficiência nutricional, como de ferro (Fe) (BITYUTSKII et al., 2014; TEIXEIRA et al., 2020), manganês (Mn) (OLIVEIRA et al., 2019), potássio (K) (SARAH et al., 2021) e boro (B) (SOUZA JÚNIOR et al., 2019). Portanto, o Si é visto como um elemento valioso e importante para as estratégias de manejo que visam diminuir as perdas em plantas sob estresse nutricional (VASANTHI et al., 2014).

3.3 Potencial do uso do Si na atenuação de estresses abióticos

Estresses abióticos são os principais fatores que limitam o crescimento das plantas em todo o mundo. Plantas expostas a essas condições apresentam diminuição na biomassa vegetal, bem como na produção da colheita (LI et al., 2018). Como um elemento benéfico, o acúmulo de Si na rizosfera e nas plantas pode aliviar os efeitos desfavoráveis das principais formas de estresses abióticos por meio de vários mecanismos. Os efeitos benéficos do Si no crescimento das plantas e na produtividade das culturas sob condições dos principais estresses de natureza abiótica, tais como deficiência hídrica, salinidade e deficiência nutricional, foram revisados neste estudo e são apresentados a seguir:

3.3.1 Uso do Si na atenuação dos danos causados pelo déficit hídrico

A deficiência hídrica em condições de campo é um fenômeno cada vez mais comum em áreas destinadas a agricultura (CARDOZO; DE OLIVEIRA BORDONAL; LA SCALA, 2018). Os danos causados pelo estresse por déficit hídrico causam modificações morfológicas e fisiológicas nas plantas cultivadas, caracterizadas principalmente por: fechamento estomático, inibição do crescimento de caules e folhas, diminuição da área foliar (MARCOS et al., 2018) e interrupção do alongamento e divisão celular (MACHADO et al., 2009).

No entanto, o uso do Si como atenuador dos danos causados pela seca tem sido demonstrado como uma estratégia eficiente. A aplicação de Si pode interferir em diversos fatores que podem contribuir para o aumento da tolerância das plantas, como a modificação da arquitetura foliar, deixando-as mais eretas (SANTOS et al., 2020), reduzindo, desse modo, o sombreamento; o aumento da rigidez dos tecidos; a melhoria da eficiência de utilização da água, e, ainda, contribuição para a manutenção

do teor de clorofila das folhas de plantas submetidas a seca (TEIXEIRA; MELLO PRADO; ROCHA, 2021).

Verificou-se ainda que o Si via solo desempenhou papel importante na manutenção da água no tecido foliar, pelo aumento das taxas fotossintéticas e regulação da transpiração, otimizando a eficiência de uso da água em plantas sob condições de deficiência hídrica (HATTORI et al., 2005). Em cana-de-açúcar, a fertilização com silício via radicular na fase de perfilhamento, proporcionou maior rendimento de sacarose, diâmetro do caule e acúmulo de biomassa em condições de moderado estresse hídrico (55% da capacidade de retenção de água), mesmo para cultivares sensíveis à seca (DE CAMARGO et al., 2017).

A aplicação de Si em milho sob condições de estresse hídrico, proporcionou um aumento de até 32 cm na altura em relação as plantas que não receberam Si, com aumento simultâneo em outros parâmetros morfológicos que podem interferir na manutenção da produtividade da cultura, como o diâmetro do caule, o número de folhas e conseqüentemente a produção de matéria seca (AMIN et al., 2018).

O efeito mitigador do Si em plantas expostas a deficiência hídrica está relacionado principalmente às modificações físicas, pois ocorre uma deposição e polimerização de sílica na epiderme foliar, formando uma camada de sílica-cutícula e sílica-celulose na parede vegetal (MANDLIK et al., 2020; MITANI; YAMAJI; MA, 2009). Essa deposição pode contribuir para o aumento da taxa fotossintética, agindo na redução da transpiração e na melhora da absorção de nutrientes (ÁVILA et al., 2010). Essa redução da transpiração melhora a eficiência de uso de água, e contribui para o desenvolvimento das plantas em solos de clima tropical, onde estão sujeitas a veranicos (FREW et al., 2018).

A aplicação de Si via solo na fonte silicato de cálcio promoveu maior produção de massa seca e maior conteúdo de água em plantas de milho com déficit hídrico moderado (60% da capacidade de retenção de água no solo), no entanto, esse efeito só foi observado utilizando doses relativamente altas (100 a 150 mg kg⁻¹) (AMIN et al., 2014).

Em solução nutritiva, a adição de 2 mmol L⁻¹ de Si em condição de déficit hídrico induzido por polietilenoglicol (30%), proporcionou aumento da eficiência do uso da água por reduzir a transpiração das plantas (GAO et al., 2006). Resultados semelhantes também foram observados em condição de déficit hídrico severo, a

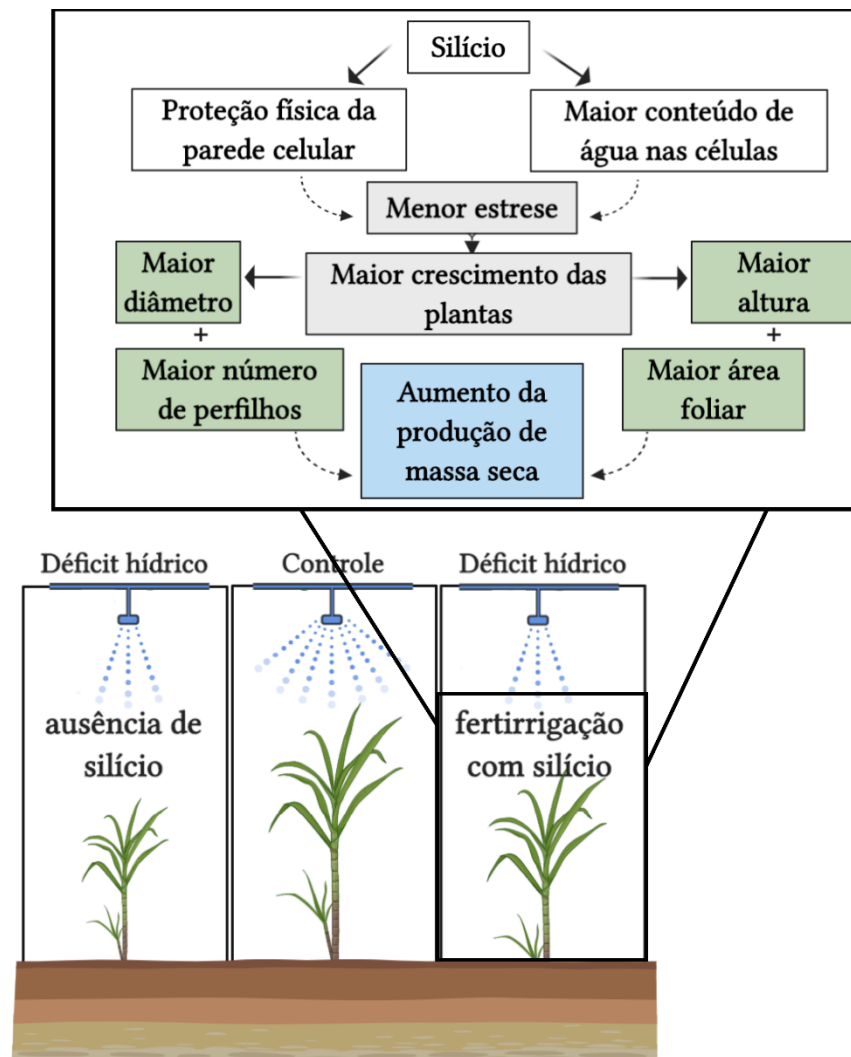
aplicação de Si melhorou o crescimento e o rendimento das plantas e isso foi atribuído a uma melhor taxa fotossintética e transpiração reduzida (AMIN et al., 2016).

O suprimento de Si via solução nutritiva foi mais eficiente quando comparado ao Si via pulverização foliar, na formação de mudas pré-brotadas de cana-de-açúcar nos primeiros 30 dias após o transplante, porque aumentou a eficiência quântica do fotossistema II, teor de clorofila, potencial hídrico foliar e o conteúdo relativo de água, diminuindo o índice de extravasamento de eletrólitos celulares e o teor de prolina livre, esses efeitos refletiram no aumento do crescimento e produção de biomassa das plantas (TEIXEIRA et al., 2020b).

Além desses efeitos fisiológicos, também foram evidenciadas mudanças estruturais induzidas pelo Si em plantas sob déficit hídrico. O Si aplicado na raiz e na folha modificou a estequiometria C:N:P, aumentando a eficiência de uso de C, N e P. Esse aumento do desempenho nutricional contribuiu no ajuste de parâmetros fisiológicos e no aumento da produção de matéria seca (TEIXEIRA et al., 2020c).

Segundo Teixeira et al. (2020d), os mecanismos básicos de atuação do Si aplicado via fertirrigação na mitigação dos danos causados pelo déficit hídrico em cana-de-açúcar são: proteção física da parede celular, preservando o conteúdo de água nas células, o que diminui o nível de estresse da planta e resulta em maior crescimento. O que se torna evidente pela maior altura, área foliar, diâmetro do colmo, número de perfilhos e, conseqüentemente, maior acúmulo de massa seca (Figura 1).

Figura 1 - Esquema indicando o efeito da aplicação de silício via fertirrigação em cana-de-açúcar sob déficit hídrico



Fonte: Teixeira et al. (2020d).

Desse modo, pode-se afirmar que a nutrição com Si proporciona benefícios à produtividade, podendo dar às culturas melhores condições para suportar adversidades climáticas.

2.3.2 Silício como atenuador de estresse por salinidade

A salinidade também é um dos principais estresses abióticos, tem efeito hostil no crescimento e desenvolvimento das culturas e afeta aproximadamente 20% do total de terras aráveis (YAN et al., 2021). O excesso de sais diminui o crescimento da planta, principalmente devido ao aumento do gasto de energia necessário para

absorver água do solo, dado aumento do potencial osmótico e hídrico, e fazer ajustes bioquímicos relacionados aos danos secundários associados a toxicidade de íons, desequilíbrios nutricionais e estresse oxidativo, que posteriormente danificam o maquinário fotossintético (LI et al., 2015).

Em condições estressantes ao sal, a adição de Si mostrou aumentar o crescimento de muitas culturas, incluindo cevada, arroz, cana-de-açúcar, tomate, pepino, feijão, alfaça, trigo, soja e sorgo (RIZWAN et al., 2015). Além disso, os resultados de um experimento hidropônico revelaram que a aplicação de Si aumentou a tolerância ao sal nos genótipos de cana-de-açúcar, principalmente devido à diminuição da concentração de Na^+ e ao aumento do K^+ com uma melhoria na relação K^+/Na^+ (ASHRAF et al., 2010).

Em plantas de girassol e sorgo sob condição de estresse salino, a adição de Si atenuou os danos modificando as concentrações de C, N e P e a eficiência de uso de C, N e P (HURTADO et al., 2020b). Além disso, os efeitos nocivos do estresse salino foram atenuados por tratamentos com Si em plantas de girassol e sorgo porque diminuiu a absorção de Na^+ , prevenindo a peroxidação lipídica, pois o excesso de Na^+ induz a produção de ERO (espécies reativas de oxigênio) que altera o metabolismo das plantas, causando estresse oxidativo e danos às proteínas, lipídios e ácidos nucléicos (DHIMAN et al., 2021). O Si ainda aumentou a absorção de K^+ , o teor relativo de água na folha, a atividade de enzimas antioxidantes, a área foliar e matéria seca da parte aérea (HURTADO et al., 2020a).

3.3.3 Silício como atenuador de deficiências nutricionais

Plantas que não são fertilizadas adequadamente sofrem com a diminuição do seu potencial produtivo, pois deficiências nutricionais causam comprometimento nas funções metabólicas, levando a desordens fisiológicas que comprometem o alcance da produtividade desejada (PRADO, 2020). Estudos apontam que o uso do elemento benéfico Si pode mitigar estresses nutricionais (HERNANDEZ-APAOLAZA, 2014).

3.3.3.1 Nitrogênio (N)

O nitrogênio (N) ao participar da constituição de enzimas e transportadores de membrana celular presente nas raízes (BESHIR et al., 2015) está envolvido no

processo de absorção ativa dos nutrientes e a sua deficiência afeta esse processo. Além disso, a deficiência de N interfere diretamente nos pigmentos fotossintéticos por ser um nutriente estrutural da molécula de clorofila (PRADO, 2020), diminuindo a taxa fotossintética porque a clorofila desempenha um papel fundamental na transferência de energia de excitação para os fotossistemas (BESHIR et al., 2015).

Um trabalho realizado por Deus et al. (2020) mostraram que efeitos benéficos do Si na mitigação da deficiência de N em plantas de arroz, evidenciando que esses efeitos estão relacionados à alteração da estequiometria do carbono (C) com o Si e aumento da síntese de lignina, resultando em maior produção. Contudo, em plantas forrageiras o Si não foi suficiente para atenuar os danos causados pela deficiência de N, porque a demanda nutricional de N por essas culturas é maior (BUCHELT et al., 2020).

Esses resultados sugerem que o desempenho no Si na atenuação de estresses nutricionais causados pela deficiência de N, é variável entre as culturas e existe maior potencial de obtenção de efeitos do elemento em níveis moderados de deficiência. (DEUS et al., 2020; BUCHELT et al., 2020).

3.3.3.2 Fósforo (P)

O fósforo (P) está ligado às atividades metabólicas com efeito direto nas trocas gasosas, taxa fotossintética e atividade da ribulose 1,5-bisfosfato carboxilase (rubisco) (SANTOS et al., 2015). Além disso, a deficiência de P causa desequilíbrio hormonal na raiz, reduzindo a concentração de auxina e aumentando a concentração de citocininas e ácido abscísico, que prejudicam a formação radicular lateral, diminuindo a área e massa seca radicular (VYSOTSKAYA; TREKOZOVA; KUDOYAROVA, 2016).

A inclusão de Si via solução nutritiva no cultivo de plantas de sorgo com deficiência de P, aumentou o acúmulo e a eficiência de uso de P, diminuiu o índice de extravasamento de eletrólitos, aumentou o índice relativo de clorofila, a produção de compostos fenólicos e a eficiência quântica do fotossistema II, refletindo em maior diâmetro do caule, altura das plantas e a produção de matéria seca (SILVA; PRADO, 2021). Resultados semelhantes haviam sido relatados por Ma e Takahashi (1990) em plantas de arroz deficientes em P, em que o fornecimento de Si induziu aumento na massa seca da parte aérea, sendo esse efeito atribuído a diminuição de 20 e 50% da

absorção de ferro (Fe) e manganês (Mn), respectivamente, melhorando as proporções de P/Mn e P/Fe e mantendo o equilíbrio iônico celular.

3.3.3.3 *Potássio (K)*

O potássio (K) é um dos macronutrientes de maior exigência pelos vegetais, responsável por atividades como ativação enzimática, síntese proteica e manutenção hídrica (RAGEL et al., 2019; PRADO, 2020). A deficiência de K induz a desregulação osmótica e redução do potencial fotossintético (RAGEL et al., 2019), associado a produção de espécies reativas de oxigênio (ERO), que afetam processos metabólicos e celulares (CHEN et al., 2016) podendo interferir no desenvolvimento e produção de culturas.

Contudo, pesquisas apontam que o Si em plantas pode potencializar a regulação osmótica, aumentar a rigidez estrutural dos tecidos, possibilitando maior resistência mecânica e formação de folhas mais eretas. Esses fatores somados a um aumento na concentração de clorofila resultam em melhora da fotossíntese e da absorção de CO₂ (EPSTEIN, 1994; SANTOS SARAH et al., 2021).

Um estudo pioneiro com a cultura da soja cultivada sob deficiência de K indicou que o fornecimento de Si na forma de silicato de sódio via radicular em solução nutritiva induziu a diminuição de ERO, e possibilitou o incremento da biomassa das plantas (MIAO; HAN; ZHANG, 2010).

Resultados semelhantes foram obtidos por Chen et al. (2016), em que a aplicação de ácido metasilícico em sorgo cultivados sob omissão de K proporcionou melhorias no desenvolvimento das plantas, por meio do ajuste da condutividade hidráulica, manutenção das trocas gasosas e aumento na concentração de K no xilema. Os autores também atribuíram o maior desempenho das plantas a atividade do Si no aumento da atividade das aquaporinas, proteínas que atuam no transporte hídrico nas plantas.

O Si aliviou o estresse por deficiência de K em plantas de milho, pois aumentou o acúmulo de K na parte aérea e nas raízes, os teores de clorofilas e carotenoides, diminuiu o índice de extravasamento de eletrólitos, resultando em maiores taxas fotossintéticas, conteúdo de água e eficiência de uso da água, esses efeitos refletiram em aumento no crescimento e na produção de massa das plantas (SARAH et al., 2021). Esse efeito também foi confirmado em plantas forrageiras (capim BRS Zuri e

BRS RB331 Ipyporã), em que a aplicação de Si atenuou os efeitos da deficiência de K, aumentando a massa seca da parte aérea acumulada, devido à maior eficiência no uso desse nutriente.

3.3.3.4 Cálcio (Ca)

O cálcio (Ca) desempenha principalmente papel estrutural e é responsável por manter a estabilidade das paredes celulares das plantas. Assim, a deficiência de Ca dificulta a formação das paredes celulares, resultando em folhas deformadas e em estresse oxidativo, pois a planta perde os mecanismos de sinalização de defesa celular responsáveis pela eliminação dos radicais livres (PRADO, 2020). Este dano oxidativo degrada a parede celular, prejudicando a firmeza do tecido e aumenta a perda de água que, por sua vez, resulta em murcha da folha e redução da vida útil do produto colhido (DA SILVA et al., 2021).

Sobre a deficiência de Ca os mecanismos de atuação do Si causam modificações estruturais que colaboram para estabilidade das membranas, através da formação de complexos com polímeros estruturais das células, tais como pectinas, calose, ligninas e carboidratos via associações com ácidos fenólicos (INANAGA; OKASAKA; TANAKA, 1995). Assim, é possível que em plantas com deficiência de Ca o Si auxilie na estrutura e na junção de componentes da parede celular a qual o nutriente esteja envolvido.

Trabalhos recentes evidenciam que a adição de Si atenuou a deficiência de Ca em plantas de repolho, diminuindo o extravasamento celular, aumentando o conteúdo de ácido ascórbico e a matéria fresca e seca, proporcionando folhas mais firmes devido à diminuição da perda de água nas folhas após a colheita (DA SILVA et al., 2021). Resultados semelhantes também foram encontrados por Buchelt et al. (2020) em gramíneas forrageiras.

3.3.3.5 Magnésio (Mg)

O Mg atua como ativador ou regulador de várias enzimas como, ATPases, Rubisco carboxilase/oxigenase e outras do metabolismo de carboidratos (GUO, 2019). A deficiência de Mg nas plantas prejudica seu papel biológico na ativação

enzimática e na composição química da clorofila (PRADO, 2020), explicando os danos em plantas cultivadas sob deficiência desse nutriente.

Porém, a aplicação de Si em plantas de milho expostas à deficiência de Mg causa efeitos benéficos que colaboram na regulação dos metabólitos primários e no aumento dos níveis de fito-hormônios, diminuindo a degradação oxidativa de clorofilas, aumentando as taxas fotossintéticas, colaborando para o aumento da eficiência de uso do Mg e sua conversão em massa seca (HOSSEINI et al., 2019).

3.3.3.6 Enxofre (S)

A deficiência de enxofre (S) causa diminuição na quantidade de pigmentos fotossintéticos porque as membranas tilacóides dos cloroplastos são compostas por compostos sulfolipídicos (PRADO, 2020). Assim, a deficiência de S inibe a síntese das membranas tilacoidais e promove a deficiência de clorofila.

Nesse contexto, Maillard et al. (2018) constataram que na cultura da cevada submetida à deficiência de S, o Si influencia no metabolismo das plantas retardando a senescência das folhas e mantendo maior teor de clorofila. Além disso, o Si aumenta a absorção de sulfato e nitrato nas raízes das plantas deficientes em S, aumentando a absorção do nitrato, ocorre incremento nas quantidades de glutamina e de prolina.

3.3.3.7 Ferro (Fe)

Plantas com deficiência de ferro (Fe) apresentam amarelecimento das folhas nova, provocado pela diminuição da síntese de clorofila associado ao aumento do estresse oxidativo (PAVLOVIC et al., 2013), prejudicando o crescimento e o desenvolvimento dos vegetais.

Contudo, a adição de Si no meio de cultivo de plantas sob deficiência de Fe diminui a degradação da clorofila e estimula a produção de compostos antioxidantes (NIKOLIC et al., 2019), melhorando o crescimento das plantas e aliviando os sintomas de deficiência de Fe (BITYUTSKII et al., 2014). Além disso, o Si pode atuar na mobilização do micronutriente em deficiência no apoplasto das raízes de plantas (PAVLOVIC et al., 2013) e na redistribuição para a parte aérea (BITYUTSKII et al., 2014), por diminuir a obstrução dos vasos impedindo a formação de calose (DONCHEVA et al., 2009).

Mais recentemente foi evidenciado que o papel nutricional do Si está mais relacionado ao transporte do micronutriente na planta do que na sua absorção, induzindo aumento no acúmulo de Fe nas folhas, na síntese de clorofila e na conversão do micronutriente acumulado em massa seca, ou seja, na sua eficiência de utilização (TEIXEIRA et al., 2020a).

3.3.3.8 Manganês (Mn)

O manganês (Mn) é um micronutriente responsável pela manutenção do transporte de elétrons entre fotossistemas e prevenção da fotoinibição do fotossistema II (FSII) na etapa fotoquímica da fotossíntese (PRADO, 2020). Dessa forma, plantas com deficiência nutricional de Mn possuem o crescimento prejudicado devido, principalmente, aos distúrbios no processo fotossintético.

O Si também contribui no alívio dos danos causados pela deficiência de Mn, por aumentar o acúmulo e a eficiência de uso (OLIVEIRA; PRADO; GUEDES, 2020) (TEIXEIRA et al., 2020d). Soma-se a isso, a atuação do Si na ativação de enzimas do sistema antioxidante de defesa das plantas, que diminui a degradação das membranas dos pigmentos fotossintéticos, como a clorofila e os carotenoides, atenuando os danos ao FSII (OLIVEIRA; PRADO; GUEDES, 2020).

3.3.3.9 Zinco (Zn)

A deficiência de zinco (Zn) nas plantas prejudica o transporte de elétrons, induzindo estresse oxidativo, o que aumenta o índice de extravasamento de eletrólitos celulares pela degradação dos lipídeos das membranas e diminui a quantidade de pigmentos fotossintéticos e a síntese proteica, causando decréscimo na massa seca e no crescimento vegetal (PRADO, 2020).

Em plantas com deficiência de Zn, o Si aplicado via foliar aumentou o acúmulo de Zn, os pigmentos fotossintéticos, a matéria seca da parte aérea e da raiz, enquanto diminuiu o vazamento celular, sendo a adição do Si à solução de Zn considerada agronomicamente viável (GUEDES et al., 2020).

3.3.3.10 Boro (B)

Em condições de deficiência de boro (B), a expansão foliar e a alongação das raízes das plantas são inibidas (MARSCHNER, 1995). As raízes adquirem coloração escura, menor comprimento, engrossamento e alta taxa de emissão de raízes que se deve ao impedimento da atividade meristemática com um declínio na divisão e na alongação celular (PRADO, 2020).

O Si mitigou os efeitos prejudiciais da deficiência de B em plantas de algodão, aumentando o conteúdo de clorofilas, com reflexos na melhoria da eficiência quântica do fotossistema II, aumentando a produção de massa seca em relação a plantas que não receberam o elemento benéfico (SOUZA JUNIOR et al., 2019).

4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Com base nos resultados apresentados nesta revisão fica evidente que os estresses ambientais de natureza abiótica, tais como déficit hídrico, salinidade e deficiências nutricionais relacionadas a macro e micronutrientes causam graves danos ao crescimento e rendimento das plantas expostas a essas condições em campo.

Além disso, também fica evidente que o Si exerce efeitos benéficos em plantas sob esses estresses ambientais por meio de ajustes de mecanismos fisiológicos e estruturais que combinados colaboram na manutenção ou ganho na produção de massa seca e no rendimento produtivo. A partir da análise sistemática dos trabalhos científicos encontrados, verificou-se que os efeitos exercidos pelo Si são eficientes na atenuação dos danos causados por déficit hídrico, salinidade e deficiências nutricionais diversas.

Neste cenário, em suma, evidencia-se que a aplicação do Si nos manejos de adubações, pode colaborar com uso eficiente de recursos ambientais nos cultivos agrícolas no Brasil.

REFERÊNCIAS

- AMIN, M.; AHMAD, R.; ALI, A.; HUSSAIN, I.; MAHMOOD, R.; ASLAM, M.; LEE, D. J. Influence of silicon fertilization on maize performance under limited water supply. **Silicon**, [s. l.], v. 10, n. 2, p. 177–183, 2018.
- AMIN, M.; AHMAD, R.; BASRA, S. M. A.; MURTAZA, G. Silicon induced improvement in morpho-physiological traits of maize (*Zea mays* L.) under water deficit. **Pakistan Journal of Agricultural Sciences**, [s. l.], v. 51, n. 1, p. 187–196, 2014.
- ARNON, D. I.; STOUT, P. R. The essentiality of certain elements in minute quantity for plants with special reference to copper. **Plant Physiology**, [s. l.], v. 14, n. 2, p. 371–375, 1939.
- ASHRAF, M.; RAHMATULLAH; AFZAL, M.; AHMED, R.; MUJEEB, F.; SARWAR, A.; ALI, L. Alleviation of detrimental effects of NaCl by silicon nutrition in salt-sensitive and salt-tolerant genotypes of sugarcane (*Saccharum officinarum* L.). **Plant and Soil**, [s. l.], v. 326, n. 1, p. 381–391, 2010.
- ÁVILA, F. W.; BALIZA, D. P.; FAQUIN, V.; ARAÚJO, J. L.; RAMOS, S. J. Interação entre silício e nitrogênio em arroz cultivado sob solução nutritiva. **Revista Ciência Agronômica**, [s. l.], v. 41, n. 2, p. 184–190, 2010.
- BABIKER, A. G. T.; DUNCAN, H. J. Penetration of bracken fronds by asulam as influenced by the addition of surfactant to the spray solution and by pH. **Weed Research**, [s. l.], v. 14, n. 6, p. 375–377, 1974.
- BESHIR, M. H.; TEFAYE, B.; BUECKERT, R.; TAR'AN, B. Pod quality of snap bean as affected by Nitrogen fixation, cultivar and climate zone under dryland agriculture. **African Journal of Agricultural Research**, [s. l.], v. 10, n. 32, p. 3157–3169, 2015.
- BIRCHALL, J. D. The essentiality of silicon in biology. **Chemical Society Reviews**, [s. l.], v. 24, n. 5, p. 351–357, 1995.
- BITYUTSKII, N.; PAVLOVIC, J.; YAKKONEN, K.; MAKSIMOVI, V. Contrasting effect of silicon on iron, zinc and manganese status and accumulation of metal-mobilizing compounds in micronutrient-deficient cucumber. **Plant Physiology and Biochemistry**, [s. l.], v. 74, p. 205–211, 2014.
- BUHELDT, A. C.; TEIXEIRA, G. C. M.; OLIVEIRA, K. S.; ROCHA, A. M. S.; DE MELLO PRADO, R.; CAIONE, G. Silicon contribution via nutrient solution in forage plants to mitigate nitrogen, potassium, calcium, magnesium, and sulfur deficiency. **Journal of Soil Science and Plant Nutrition**, [s. l.], v. 20, n. 3, p. 1532–1548, 2020.
- CARDOZO, N. P.; DE OLIVEIRA BORDONAL, R.; LA SCALA, N. Sustainable intensification of sugarcane production under irrigation systems, considering climate interactions and agricultural efficiency. **Journal of Cleaner Production**, [s. l.], v. 204, p. 861–871, 2018.

CHEN, D.; CAO, B.; WANG, S.; LIU, P.; DENG, X.; YIN, L.; ZHANG, S. Silicon moderated the K deficiency by improving the plant-water status in sorghum. **Scientific Reports**, [s. l.], v. 6, n. 22882, p. 1–14, 2016.

CRUSCIOL, C. A. C.; FERRARI NETO, J.; SORATTO, R. P.; COSTA, C. H. M. Da. Cycling of nutrients and silicon in pigeonpea and pearl millet monoculture and intercropping. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, [s. l.], v. 37, n. 6, p. 1628–1640, 2013. a.

CRUSCIOL, C. A. C.; SORATTO, R. P.; CASTRO, G. S. A.; COSTA, C. H. M. Da; FERRARI NETO, J. Aplicação foliar de ácido silícico estabilizado na soja, feijão e amendoim. **Revista Ciência Agronômica**, [s. l.], v. 44, n. 2, p. 404–410, 2013. b.

DA SILVA, D. L.; DE MELLO PRADO, R.; TENESACA, L. F. L.; DA SILVA, J. L. F.; MATTIUZ, B. H. Silicon attenuates calcium deficiency by increasing ascorbic acid content, growth and quality of cabbage leaves. **Scientific Reports**, [s. l.], v. 11, n. 1, p. 1–9, 2021.

DE CAMARGO, M. S.; BEZERRA, B. K. L.; VITTI, A. C.; SILVA, M. A.; OLIVEIRA, A. . Silicon fertilization reduces the deleterious effects of water deficit in sugarcane. **Journal of soil science and plant nutrition**, [s. l.], v. 17, n. 1, p. 99–111, 2017.

DEUS, A. C. F.; DE MELLO PRADO, R.; DE CÁSSIA FÉLIX ALVAREZ, R.; DE OLIVEIRA, R. L. L.; FELISBERTO, G. Role of silicon and salicylic acid in the mitigation of nitrogen deficiency stress in rice plants. **Silicon**, [s. l.], v. 12, n. 5, p. 997–1005, 2020.

DHIMAN, P.; RAJORA, N.; BHARDWAJ, S.; SUDHAKARAN, S. S.; KUMAR, A.; RATURI, G.; CHAKRABORTY, K.; GUPTA, O. P.; DEVANNA, B. N.; TRIPATHI, D. K.; DESHMUKH, R. Fascinating role of silicon to combat salinity stress in plants: An updated overview. **Plant Physiology and Biochemistry**, [s. l.], v. 162, n. February, p. 110–123, 2021.

DONCHEVA, S.; POSCHENRIEDER, C.; STOYANOVA, Z.; GEORGIEVA, K.; VELICHKOVA, M.; BARCELÓ, J. Silicon amelioration of manganese toxicity in Mn-sensitive and Mn-tolerant maize varieties. **Environmental and Experimental Botany**, [s. l.], v. 65, p. 189–197, 2009.

EPSTEIN, E. The anomaly of silicon in plant biology. **Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America**, [s. l.], v. 91, n. 1, p. 11–17, 1994.

EPSTEIN, E. Silicon. **Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology**, [s. l.], v. 50, p. 641–664, 1999.

FACHIN, O. **Fundamentos de metodologia**. São Paulo: Atlas, 1993.

FRAZÃO, J. J.; PRADO, R. de M.; DE SOUZA JÚNIOR, J. P.; ROSSATTO, D. R. Silicon changes C:N:P stoichiometry of sugarcane and its consequences for photosynthesis, biomass partitioning and plant growth. **Scientific Reports**, [s. l.], v.

10, n. 12492, p. 1–10, 2020.

FREW, A.; WESTON, L. A.; REYNOLDS, O. L.; GURR, G. M. The role of silicon in plant biology: A paradigm shift in research approach. **Annals of Botany**, [s. l.], v. 121, n. 7, p. 1265–1273, 2018.

GAO, X.; ZOU, C.; WANG, L.; ZHANG, F. Silicon decreases transpiration rate and conductance from stomata of maize plants. **Journal of Plant Nutrition**, [s. l.], v. 29, n. 9, p. 1637–1647, 2006.

GUEDES, V. H. de F.; PRADO, R. de M.; FRAZÃO, J. J.; OLIVEIRA, K. S.; CAZETTA, J. O. Foliar-applied silicon in sorghum (*Sorghum bicolor* L.) alleviate zinc deficiency. **Silicon**, [s. l.], 2020.

GUO, W. Magnesium homeostasis mechanisms and magnesium use efficiency in plants. In: **Plant Macronutrient Use Efficiency**. [s.l.] : Elsevier Inc., 2019. p. 197–213.

HATTORI, T.; INANAGA, S.; ARAKI, H.; AN, P.; MORITA, S.; LUXOVÁ, M.; LUX, A. Application of silicon enhanced drought tolerance in *Sorghum bicolor*. **Physiologia Plantarum**, [s. l.], v. 123, n. 4, p. 459–466, 2005.

HERNANDEZ-APAOLAZA, L. Can silicon partially alleviate micronutrient deficiency in plants? a review. **Planta**, [s. l.], v. 240, n. 3, p. 447–458, 2014.

HOSSEINI, S. A.; RAD, S. N.; ALI, N.; YVIN, J. C. The ameliorative effect of silicon on maize plants grown in Mg-deficient conditions. **International Journal of Molecular Sciences**, [s. l.], v. 20, n. 4, p. 969, 2019.

HURTADO, A. C.; CHICONATO, D. A.; PRADO, R. de M.; SOUSA JUNIOR, G. da S.; GRATÃO, P. L.; FELISBERTO, G.; VICIEDO, D. O.; SANTOS, D. M. M. Dos. Different methods of silicon application attenuate salt stress in sorghum and sunflower by modifying the antioxidative defense mechanism. **Ecotoxicology and Environmental Safety**, [s. l.], v. 203, n. July, 2020. a.

HURTADO, A. C.; CHICONATO, D. A.; PRADO, R. de M.; SOUSA JUNIOR, G. da S.; VICIEDO, D. O.; PICCOLO, M. de C. Si application induces changes C:N:P stoichiometry and enhances stoichiometric homeostasis of sorghum and sunflower plants under salt stress. **Saudi Journal of Biological Sciences**, [s. l.], 2020. b.

INANAGA, S.; OKASAKA, A.; TANAKA, S. Does silicon exist in association with organic compounds in rice plant? **Soil Science and Plant Nutrition**, [s. l.], v. 41, n. 1, p. 111–117, 1995.

KATZ, O. Beyond grasses: the potential benefits of studying silicon accumulation in non-grass species. **Frontiers in Plant Science**, [s. l.], v. 5, n. 376, p. 1–3, 2014.

KATZ, O.; PUPPE, D.; KACZOREK, D.; PRAKASH, N. B.; SCHALLER, J. Silicon in the soil–plant continuum: Intricate feedback mechanisms within ecosystems. **Plants**, [s. l.], v. 10, n. 652, p. 1–36, 2021.

KEEPING, M. G. Uptake of silicon by sugarcane from applied sources may not reflect plant-available soil silicon and total silicon content of sources. **Frontiers in Plant Science**, [s. l.], v. 8, n. May, p. 1–14, 2017.

KORNDÖRFER, G. H.; PEREIRA, H. S.; NOLLA, A. **Análise de silício no solo, planta e fertilizantes**. 2. ed. Uberlândia: UFU, 2004.

LI, H.; ZHU, Y.; HU, Y.; HAN, W.; GONG, H. Beneficial effects of silicon in alleviating salinity stress of tomato seedlings grown under sand culture. **Acta Physiologiae Plantarum**, [s. l.], v. 37, n. 71, 2015.

LI, Z.; SONG, Z.; YAN, Z.; HAO, Q.; SONG, A.; LIU, L.; YANG, X.; XIA, S.; LIANG, Y. Silicon enhancement of estimated plant biomass carbon accumulation under abiotic and biotic stresses. A meta-analysis. **Agronomy for Sustainable Development**, [s. l.], v. 38, n. 3, p. 26, 2018.

MA, J. F.; YAMAJI, N. Silicon uptake and accumulation in higher plants. **Trends in Plant Science**, [s. l.], v. 11, n. 8, p. 392–397, 2006.

MA, J.; TAKAHASHI, E. Effect of silicon on the growth and phosphorus uptake of rice. **Plant and Soil**, [s. l.], v. 126, n. 1, p. 115–119, 1990.

MACHADO, R. S.; RIBEIRO, R. V.; MARCHIORI, P. E. R.; MACHADO, D. F. S. P.; MACHADO, E. C.; LANDELL, M. G. de A. Respostas biométricas e fisiológicas ao déficit hídrico em cana-de-açúcar em diferentes fases fenológicas. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, [s. l.], v. 44, n. 12, p. 1575–1582, 2009.

MAILLARD, A.; ALI, N.; SCHWARZENBERG, A.; JAMOIS, F.; YVIN, J.-C.; HOSSEINI, S. A. Silicon transcriptionally regulates sulfur and ABA metabolism and delays leaf senescence in barley under combined sulfur deficiency and osmotic stress. **Environmental and Experimental Botany**, [s. l.], v. 155, p. 394–410, 2018.

MAJUMDAR, S.; PRAKASH, N. B. An overview on the potential of silicon in promoting defence against biotic and abiotic stresses in sugarcane. **Journal of Soil Science and Plant Nutrition**, [s. l.], v. 20, n. 4, p. 1969–1998, 2020.

MANDLIK, R.; THAKRAL, V.; RATURI, G.; SHINDE, S.; NIKOLIĆ, M.; TRIPATHI, D. K.; SONAH, H.; DESHMUKH, R. Significance of silicon uptake, transport, and deposition in plants. **Journal of Experimental Botany**, [s. l.], v. 71, n. 21, p. 6703–6718, 2020.

MARCONI, M. de A.; LAKATOS, E. M. **Técnicas de Pesquisa**. 6ª ed. São Paulo: Atlas, 2006.

MARCOS, F. C. C.; SILVEIRA, N. M.; MOKOCHINSKI, J. B.; SAWAYA, A. C. H. F.; MARCHIORI, P. E. R.; MACHADO, E. C.; SOUZA, G. M.; LANDELL, M. G. A.; RIBEIRO, R. V. Drought tolerance of sugarcane is improved by previous exposure to water deficit. **Journal of Plant Physiology**, [s. l.], v. 223, n. January, p. 9–18, 2018.

MARSCHNER, H. **Mineral nutrition of higher plants**. 2nd. ed. [s.l.] : Elsevier, 1995.

MIAO, B. H.; HAN, X. G.; ZHANG, W. H. The ameliorative effect of silicon on soybean seedlings grown in potassium-deficient medium. **Annals of Botany**, [s. l.], v. 105, n. 6, p. 967–973, 2010.

MITANI, N.; YAMAJI, N.; MA, J. F. Identification of maize silicon influx transporters. **Plant and Cell Physiology**, [s. l.], v. 50, n. 1, p. 5–12, 2009.

NIKOLIC, D. B.; NESIC, S.; BOSNIC, D.; KOSTIC, L.; NIKOLIC, M. Silicon alleviates iron deficiency in barley by enhancing expression of strategy II genes and metal redistribution. **Frontiers in Plant Science**, [s. l.], v. 10, n. April, p. 1–12, 2019.

OLIVEIRA, R. L. L. De; PRADO, R. de M.; FELISBERTO, G.; CHECCHIO, M. V.; GRATÃO, P. L. Silicon mitigates manganese deficiency stress by regulating the physiology and activity of antioxidant enzymes in sorghum plants. **Journal of Soil Science and Plant Nutrition**, [s. l.], p. 1–11, 2019.

OLIVEIRA, K. S.; PRADO, R. de M.; GUEDES, V. H. de F. Leaf spraying of manganese with silicon addition is agronomically viable for corn and sorghum plants. **Journal of Soil Science and Plant Nutrition**, [s. l.], v. 20, p. 872–880, 2020.

PAVLOVIC, J.; SAMARDZIC, J.; MAKSIMOVI, V.; TIMOTIJEVIC, G.; STEVIC, N.; LAURSEN, K. H.; HANSEN, T. H.; HUSTED, S.; SCHJOERRING, J. K.; LIANG, Y.; NIKOLIC, M. Silicon alleviates iron deficiency in cucumber by promoting mobilization of iron in the root apoplast. **New Phytologist**, [s. l.], v. 198, p. 1096–1107, 2013.

PEI, Z. F.; MING, D. F.; LIU, D.; WAN, G. L.; GENG, X. X.; GONG, H. J.; ZHOU, W. J. Silicon improves the tolerance to water-deficit stress induced by polyethylene glycol in wheat (*Triticum aestivum* L.) seedlings. **Journal of Plant Growth Regulation**, [s. l.], v. 29, n. 1, p. 106–115, 2010.

PRADO, R. de M. **Nutrição de Plantas**. 2ª ed. São Paulo: Unesp, 2020.

RAGEL, P.; RADDATZ, N.; LEIDI, E. O.; QUINTERO, F. J.; PARDO, J. M. Regulation of K⁺ nutrition in plants. **Frontiers in Plant Science**, [s. l.], v. 10, n. 281, 2019.

RIZWAN, M.; ALI, S.; IBRAHIM, M.; FARID, M.; ADREES, M.; BHARWANA, S. A.; ZIA-UR-REHMAN, M.; QAYYUM, M. F.; ABBAS, F. Mechanisms of silicon-mediated alleviation of drought and salt stress in plants: a review. **Environmental Science and Pollution Research**, [s. l.], v. 22, n. 20, p. 15416–15431, 2015.

ROCHA, J. R.; DE MELLO PRADO, R.; TEIXEIRA, G. C. M.; DE OLIVEIRA FILHO, A. S. B. Si fertigation attenuates water stress in forages by modifying carbon stoichiometry, favouring physiological aspects. **Journal of Agronomy and Crop Science**, [s. l.], n. August 2020, p. 1–13, 2021.

RUIZ, J. A. **Metodologia científica: guia para eficiência nos estudos**. São Paulo: Atlas, 1985.

SANTOS, K. R.; PEREIRA, M. P.; FERREIRA, A. C. G.; RODRIGUES, L. C. de A.; CASTRO, E. M. De; CORRÊA, F. F.; PEREIRA, F. J. Typha domingensis Pers. growth responses to leaf anatomy and photosynthesis as influenced by phosphorus. **Aquatic Botany**, [s. l.], v. 122, p. 47–53, 2015.

SANTOS, L.; TEIXEIRA, G.; PRADO, R.; ROCHA, A.; PINTO, R. Response of pre-sprouted sugarcane seedlings to foliar spraying of potassium silicate, sodium and potassium silicate, nanosilica and monosilicic acid. **Sugar Tech**, [s. l.], 2020.

SARAH, M. M. dos S.; PRADO, R. de M.; TEIXEIRA, G. C. M.; SOUZA JÚNIOR, J. P. De; MEDEIROS, R. L. S. De; BARRETO, R. F. Silicon supplied via roots or leaves relieves potassium deficiency in maize plants. **Silicon**, [s. l.], 2021.

SAVANT, N. K.; KORNDÖRFER, G. H.; DATNOFF, L. E.; SNYDER, G. H. Silicon nutrition and sugarcane production: A review. **Journal of Plant Nutrition**, [s. l.], v. 22, n. 12, p. 1853–1903, 1999.

SEVERINO, A. J. **Metodologia do trabalho científico**. 23ª ed. São Paulo: Atlas, 2007.

SILVA, E. L. Da; MENEZES, E. M. **Metodologia da pesquisa e elaboração de dissertação**. 4ª ed. Florianópolis: UFSC, 2005.

SILVA, J. L. F. Da; PRADO, R. de M. Elucidating the action mechanisms of silicon in the mitigation of phosphorus deficiency and enhancement of its response in sorghum plants. **Journal of Plant Nutrition**, [s. l.], p. 1–11, 2021.

SINGH, T.; SINGH, P.; SINGH, A. Silicon significance in crop production: Special consideration to rice: An overview. **The Pharma Innovation**, [s. l.], v. 10, n. 3, p. 223–229, 2021.

SOUSA, R. T. X. De; KORNDÖRFER, G. H.; WANGEN, D. R. B. Aproveitamento de silício proveniente de escória siderúrgica por cultivares de cana-de-açúcar. **Bragantia**, [s. l.], v. 69, n. 3, p. 669–676, 2010.

SOUZA JUNIOR, J. P. De; PRADO, R. de M.; SANTOS SARAH, M. M. Dos; FELISBERTO, G. Silicon mitigates boron deficiency and toxicity in cotton cultivated in nutrient solution. **Journal of Plant Nutrition and Soil Science**, [s. l.], v. 182, n. 5, p. 805–814, 2019.

TEIXEIRA, G. C. M.; DE MELLO PRADO, R.; OLIVEIRA, K. S.; D'AMICO-DAMIÃO, V.; DA SILVEIRA SOUSA JUNIOR, G. Silicon increases leaf chlorophyll content and iron nutritional efficiency and reduces iron deficiency in sorghum plants. **Journal of Soil Science and Plant Nutrition**, [s. l.], v. 20, p. 1311–1320, 2020. a.

TEIXEIRA, G. C. M.; DE MELLO PRADO, R.; ROCHA, A. M. S.; DOS SANTOS, L. C. N.; DOS SANTOS SARAH, M. M.; GRATÃO, P. L.; FERNANDES, C. Silicon in pre-sprouted sugarcane seedlings mitigates the effects of water deficit after transplanting. **Journal of Soil Science and Plant Nutrition**, [s. l.], v. 1, p. 1–11,

2020. b.

TEIXEIRA, G. C. M.; MELLO PRADO, R.; ROCHA, A. M. S. Low absorption of silicon via foliar in comparison to root application has an immediate antioxidant effect in mitigating water deficit damage in sugarcane. **Journal of Agronomy and Crop Science**, [s. l.], v. 00, p. 1–10, 2021.

TEIXEIRA, G. C. M.; PRADO, R. de M.; ROCHA, A. M. S.; PICCOLO, M. de C. 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**, [s. l.], v. 15, n. 10 October, p. 1–24, 2020. c.

TEIXEIRA, G. C. M.; ROCHA, A. M. S.; OLIVEIRA, K. S.; SARAH, M. M. dos S.; OLIVEIRA FILHO, A. S. B. De; PRADO, R. D. M.; PALARETTI, L. F. Silício na mitigação dos estresses por deficiência de manganês e pelo déficit hídrico em mudas pré-brotadas de cana-de-açúcar. **Científica**, [s. l.], v. 48, n. 2, p. 170, 2020. d.

TUBANA, B. S.; BABU, T.; DATNOFF, L. E. A review of silicon in soils and plants and its role in US agriculture. **Soil Science**, [s. l.], v. 181, n. 9/10, p. 393–411, 2016.

VASANTHI, N.; SALEENA, L. M.; RAJ, S. A.; VIJAY, R.; PVT, B. Silicon in crop production and crop protection - A Review. **Agricultural Research Communication Centre**, [s. l.], v. 35, n. 1, p. 14–23, 2014.

VYSOTSKAYA, L. B.; TREKOZOVA, A. W.; KUDOYAROVA, G. R. Effect of phosphorus starvation on hormone content and growth of barley plants. **Acta Physiologiae Plantarum**, [s. l.], v. 38, n. 5, p. 1–6, 2016.

YAN, G.; FAN, X.; ZHENG, W.; GAO, Z.; YIN, C.; LI, T.; LIANG, Y. Silicon alleviates salt stress-induced potassium deficiency by promoting potassium uptake and translocation in rice (*Oryza sativa* L.). **Journal of Plant Physiology**, [s. l.], v. 258–259, n. January, p. 153379, 2021.

ZANÃO JÚNIOR, L. A.; FONTES, R. L. F.; ÁVILA, V. T. Aplicação do silício para aumentar a resistência do arroz à mancha-parda. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, [s. l.], v. 44, n. 2, p. 203–206, 2009.