

érie
Produtor Rural

nº 82



Silício como mitigador do déficit hídrico na cultura da soja

Viviane Vieira Machado
Alasse Oliveira da Silva
Simone da Costa Mello

Universidade de São Paulo
Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz"
Divisão de Biblioteca

ISSN 1414-4530

Universidade de São Paulo - USP
Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” - ESALQ
Divisão de Biblioteca - DIBD

Viviane Vieira Machado¹
Alasse Oliveira da Silva²
Simone da Costa Mello³

¹ Especialista em Fisiologia Vegetal, Nutrição e Desenvolvimento de Plantas –
vivianevmachado@gmail.com

² Doutorando em Fitotecnia - ESALQ/USP - alasse.oliveira77@usp.br

³ Profa. Dra. – Departamento de Produção Vegetal – ESALQ/USP - scmello@usp.br

Silício como mitigador do déficit hídrico na cultura da soja

Série Produtor Rural nº 82

DOI: 10.11606/9786587391595

Piracicaba
2024

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

Reitor - Prof. Dr. Carlos Gilberto Carlotti Junior
Vice-reitora - Profa. Dra. Maria Arminda do Nascimento Arruda

Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”

Diretora - Profa. Dra. Thais Maria Ferreira de Souza Vieira
Vice-diretor - Prof. Dr. Marcos Milan

DIVISÃO DE BIBLIOTECA - DIBD

Av. Pádua Dias, 11 - Caixa Postal 9
13418-900 - Piracicaba - SP
biblioteca.esalq@usp.br • www.esalq.usp.br/biblioteca

Revisão e edição	Eliana Maria Garcia
Foto capa	Aline Oliveira da Silva
Layout Capa	José Adilson Milanêz
Editoração	Maria Clarete Sarkis Hyppolito

Dados de Catalogação na Publicação DIVISÃO DE BIBLIOTECA - DIBD/ESALQ/USP

Machado, Viviane Vieira

Silício como mitigador do déficit hídrico na cultura da soja [recurso eletrônico] / Viviane Vieira Machado, Alasse Oliveira da Silva e Simone da Costa Mello. - - Piracicaba : ESALQ - Divisão de Biblioteca, 2024.

50 p. : il. (Série Produtor Rural, n. 82)

ISSN: 1414-4530

ISBN: 978-65-87391-59-5

DOI: 10.11606/9786587391595

1. Antioxidantes 2. Déficit hídrico 3. Estresse abiótico 4. Fisiologia vegetal 5. Seca
6. Silício 7. Soja I. Silva, A. O. da II. Mello, S. da C. III. Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”. Divisão de Biblioteca IV. Título V. Série

CDD 633.34

Elaborada por Maria Angela de Toledo Leme - CRB-8/3359

Esta obra é de acesso aberto. É permitida a reprodução parcial ou total desta obra, desde que citada a fonte e a autoria e respeitando a Licença Creative Commons



SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	7
2. DESENVOLVIMENTO	11
2.1 Histórico da sojicultura no Brasil	11
2.2 Condições climáticas atuais	14
2.3 Impactos do déficit hídrico.....	16
2.4 Silício.....	19
2.4.1 Disponibilidade do silício no solo	19
2.4.2 Mecanismos de absorção e transporte de silício pelas plantas ..	20
2.4.3 Efeito do silício na fisiologia das plantas	22
2.4.4 Papel do silício na resistência de plantas a estresses abióticos .	24
2.4.5 Papel do silício na resistência de plantas a estresses bióticos ...	27
2.4.6 Efeitos do silício na qualidade dos alimentos	29
2.4.7 Inter-relação entre o silício e outros nutrientes	30
2.4.8 Aplicação prática de silício na agricultura	31
3. CONSIDERAÇÕES FINAIS	33
REFERÊNCIAS	35

AGRADECIMENTOS

“Gostaríamos de expressar nossa profunda gratidão ao Programa SolloAgro de Educação Continuada em Agricultura Sustentável (SolloAgro ESALQ/USP) e ao Departamento de Produção Vegetal (LPV) da (ESALQ-USP) pela oportunidade de colaboração e apoio inestimável pela realização desse trabalho”.

1. INTRODUÇÃO

Estima-se que a cultura da soja (*Glycine max* L.) foi cultivada em uma área de 44,9 milhões de hectares no território brasileiro no ano safra 23/24, havendo um crescimento de 4,4% em relação à safra anterior, correspondente a um incremento de 1,84 milhões de hectares dessa cultura (Companhia Nacional de Abastecimento - CONAB, 2024). O Brasil é atualmente o maior exportador e produtor, de acordo com dados da Embrapa (2023a, 2023b), concentrando 34,8% da produção mundial, e gerado uma receita de U\$ 47,9 bilhões em exportações em 2023 segundo levantamentos da AGROSTAT - Estatísticas de Comércio Exterior do Agronegócio Brasileiro, com constante acréscimo em sua área produtiva visando atender à crescente demanda populacional por alimento advindo direta ou indiretamente dessa cultura.

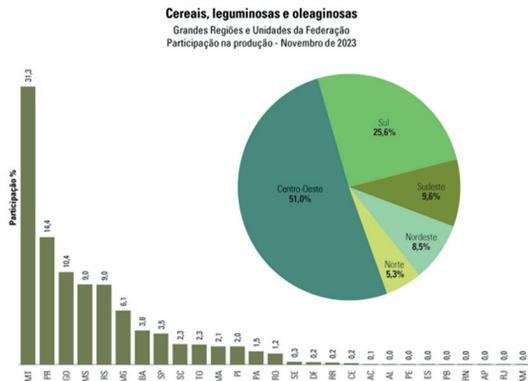


Figura 1 - Produção de soja no Brasil em 2023/2024 (IBGE, 2024).

Durante o ciclo reprodutivo da soja, existe uma necessidade de aplicar intensamente defensivos agrícolas e uma alta quantidade de insumos nutricionais, como adubos NPK, inseticidas, fungicidas, adubos foliares, entre outros. Esses produtos são amplamente difundidos e utilizados pelos agricultores com o objetivo de maximizar o potencial de produção das cultivares de soja adotadas.

No entanto, para alcançar boas produtividades, somente o manejo nutricional e sanitário não é suficiente. Isso ocorre porque existe a dependência da tríade **manejo, genótipo e ambiente**. Os dois primeiros elementos são mais facilmente corrigidos, considerando os amplos estudos e pesquisas realizados nessas áreas por grandes empresas e instituições do agronegócio. Dessa forma, muitas vezes nos encontramos à mercê de oscilações climáticas, as quais exercem pressões desafiadoras sobre o progresso da lavoura.

No decorrer da safra é comum períodos de forte estiagem, ou ainda pequenos veranicos, causando impactos nos níveis de água do solo e consequentemente nas culturas que estejam em fases fenológicas com maior sensibilidade. Esse fenômeno constantemente atinge a soja em seu período de estabelecimento, floração ou ainda enchimento de grãos, o que causa diminuição na produção final. A escassez hídrica é um dos fenômenos mais impactantes na diminuição de produtividade das lavouras, como visto anos safra 18/19 a 20/21 pelo prejuízo na produção de soja nos estados do Rio Grande do sul e Paraná, com perda de mais de 15 milhões de toneladas de grãos e cerca de 8 bilhões de dólares.

O silício (Si), um dos elementos mais abundantes na crosta terrestre é frequentemente encontrado em altas concentrações nos solos agricultáveis. Entretanto, não é considerado elemento essencial para o desenvolvimento das plantas, visto que elas são capazes de concluir seu ciclo sem a presença do mesmo. Mas, quando suplementadas com fornecimento de Si nas plantas em condições de estresse biótico e abiótico, o Si tem se mostrado como favorável agente redutor dos danos causados por diversos estresses abióticos, devido a sua influência em condições fisiológicas, bioquímicas e físicas.

As plantas podem absorver o Si através de suas raízes e utilizá-lo para uma variedade de fins. Alguns dos principais benefícios do uso de Si para as plantas incluem: **1º** - O fortalecimento de suas paredes celulares, tornando-as mais resistentes a danos físicos, como ventos fortes e chuvas intensas. O que a ajuda a manter as plantas eretas e com um bom crescimento; **2º** - Aumento da resistência a doenças e pragas: as plantas que recebem Si são menos propensas a sofrerem com doenças e ataques de insetos. Devido ao Si poder fortalecer a resistência natural (induzida) das plantas e ajudá-las a combater essas ameaças; **3º** - Melhora na absorção de nutrientes: o Si pode ajudar a melhorar a absorção de outros nutrientes importantes pelas plantas, como fósforo e potássio. Isso pode levar a um melhor crescimento e desenvolvimento das plantas; **4º** - Redução do estresse hídrico: as plantas que recebem silício podem ser mais resistentes ao estresse hídrico, como períodos de seca. Isso ocorre porque o silício pode ajudar a aumentar a capacidade das plantas de reter água e evita-se a desidratação; **5º** - Aumento da produtividade: em alguns casos, o uso de silício pode levar a um aumento na produtividade das plantas. Tal, pois as plantas que recebem silício podem crescer mais rapidamente, produzir mais frutos ou flores e ser mais resistentes a doenças e outros estresses ambientais. Em resumo, o uso de silício pode trazer vários benefícios para as plantas, incluindo um fortalecimento geral da estrutura das plantas.

Mesmo o silício tendo sido descoberto há quase 200 anos, ainda é um elemento pouco explorado do ponto de vista agrícola, com pouco conhecimento e estudos na literatura analisando sua intervenção no desenvolvimento de plantas de soja.

Portanto, objetivou-se com esse trabalho elucidar as respostas da planta às restrições hídricas através do uso de aplicações de silício, a fim de mitigar os efeitos da seca no metabolismo fotossintético e desenvolvimento das plantas, com enfoque na cultura da soja. Para isso, foi realizada uma revisão bibliográfica de artigos científicos, livros e periódicos.

2.1 Histórico da sojicultura no Brasil

A soja teve destaque comercialmente através da produção dos EUA, na segunda década do século XX, que a produziam como adubo verde ou forrageira, e que a partir de 1941 houve a inversão do cultivo visando agora a produção de grãos, crescendo em escala global a partir da década de 60, expandindo no Brasil devido se beneficiar de políticas de subsídio que visavam a autonomia do trigo. No decorrer dessa década a área cultivada no território brasileiro aumentou 5,5 vezes, no início dos anos 60 com 241 mil hectares, alcançando 1.319 mil hectares ao final da década, dos quais majoritariamente eram cultivados nos estados do Sul como cultura subsequente ao trigo (Gazzoni; Dall'agnol, 2018).

No entanto, a cultura já vinha se desenvolvendo no país a muito mais tempo, sendo os primeiros relatos do cultivo da soja datados de 1882 no estado da Bahia, onde tentaram implantar as cultivares já usadas a nível mundial em solo brasileiro, motivo que levou ao insucesso da produção, visto que eram cultivares adaptadas a ambientes de clima frio ou temperado, com latitudes predominantemente acima de 30 graus, divergindo da região baiana que conta com clima tropical e latitude de 12 graus (Castro *et al.*, 2016). Dessa forma, a cultura somente teve êxito no Brasil quando levada para o estado do Rio Grande do Sul, nessa época a cultura ainda tinha sua utilização focada na produção de forragem e grãos cozidos para consumo animal, principalmente de bovinos de leite e suínos que eram o foco das propriedades produtoras de soja, caracte-

rística que se manteve até meados dos anos 50 quando se instalou no Brasil a primeira indústria processadora do grão no município de Santa Rosa-RS, e iniciou-se o aparecimento do país nas estatísticas internacionais de produtor de soja (Andrade Neto *et al.*, 2024).

A trajetória de crescimento da soja seguiu então para as regiões de cerrado, a qual havia passado por um período de expansão com a construção da capital Brasília e adensamento populacional, muitos dos primeiros agricultores da região eram sulistas que tentaram implantar as cultivares que obtiveram êxito no sul do Brasil, porém por ainda se tratar de cultivares americanas não alcançaram êxito na região central brasileira.

Não tendo outras alternativas de cultivares visto que o Brasil no momento era o único país tropical a explorar de forma comercial a cultura, assim os antigos e novos agricultores do cerrado pressionaram às instituições públicas a desenvolverem cultivares adaptadas a região, que juntamente com novas técnicas de cultivo adequadas para a região permitiram o desenvolvimento agrícola da terra a qual era considerada improdutivo devido a sua elevada acidez e deficiência nutricional (Gazzoni; Dall'agnol, 2018).

O Brasil vive atualmente o ciclo da sojicultura, em que devido à evolução tecnológica e social pôde-se comparar com outros ciclos históricos, como o do café, borracha, cana de açúcar, que trouxeram destaque a economia nacional no exterior. A soja trouxe um impacto tão grande para o setor agroindustrial brasileiro que podemos separar a história em duas fases, o Brasil antes de 1960 que praticava uma agricultura de subsistência e o Brasil pós 1960 que trouxe uma nova perspectiva da agricultura, criando a mentalidade do agronegócio, e atingindo níveis e patamares cada vez maiores de produção até alcançar o título de maior produtor e exportador de soja (Gazzoni; Dall'agnol, 2018).

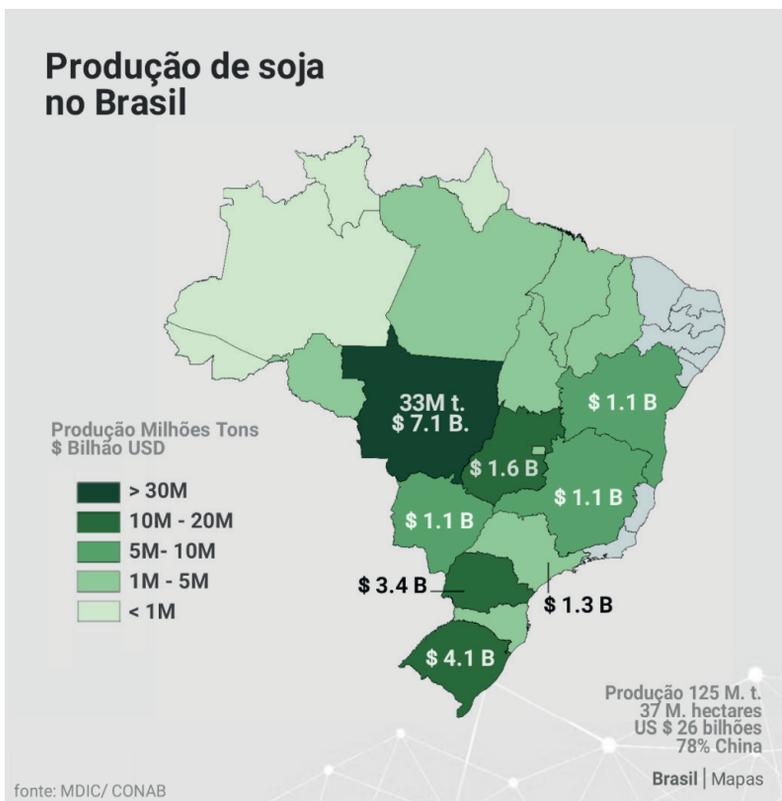


Figura 2 - Dados atuais da produção de soja no Brasil (MDIC; CONAB, 2023)

Agora no século XXI ainda se observa a expansão no cultivo para novas áreas, as quais denominamos de novas fronteiras agrícolas, em que na primeira década do século se concentrou na região , do MATOPIBA (Maranhão, Tocantins, Piauí e Bahia) prosseguindo para os anos mais recentes na região do Pará, Roraima e Rondônia (Barrozo *et al.*, 2018).

2.2 Condições climáticas atuais

A climatologia contemporânea aborda não apenas o estado atual do clima, mas concentra-se na análise e construção das características climáticas ao longo de um extenso período temporal. Os históricos climatológicos mostram a tendência de que períodos de déficit hídrico prevalecerão, em que a medida do passar dos anos já se observa a redução nos parâmetros meteorológicos (Figuras 1, 2 e 3), e provisiona-se a continuidade de alterações nos padrões de chuva com períodos longos de excesso de chuva e seca (Dubberstein *et al.*, 2020).

Para o ano safra 2023/2024 tem-se a configuração climática de El niño, acompanhado de temperaturas altas, registros de 2023 sendo considerados os maiores já obtidos desde a década de 60, conforme relatório da Organização Meteorológica Mundial (OMM). Depois de quase três anos sob a influência do fenômeno climático La niña, o panorama muda para o aquecimento anormal das águas do Pacífico confirmando o início das condições de El niño, que já vem demonstrando suas características trazendo o excesso de chuva para as regiões sul e a redução nos níveis de água para o MATOPIBA, o qual pode ocasionar de diminuição nos níveis produtivos a perdas significativas de produtividade, a região central do país também sofre com irregularidades da chuva, dificultando o manejo das culturas e atrasando o plantio da soja (Instituto Nacional de Meteorologia - INMETb, 2023).

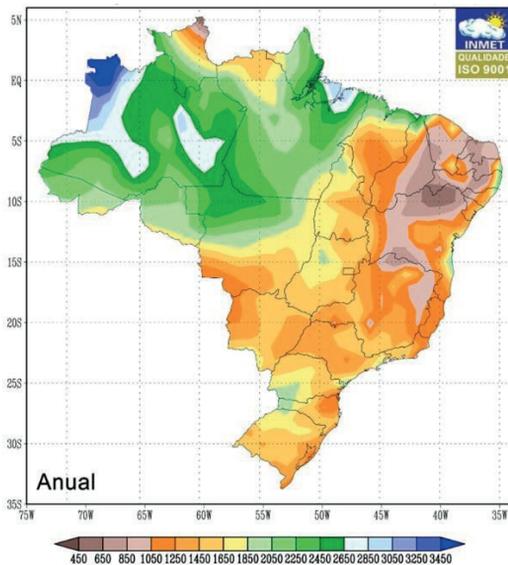


Figura 3 - Precipitação anual acumulada 1961- 1990 (INMETa, 2023)

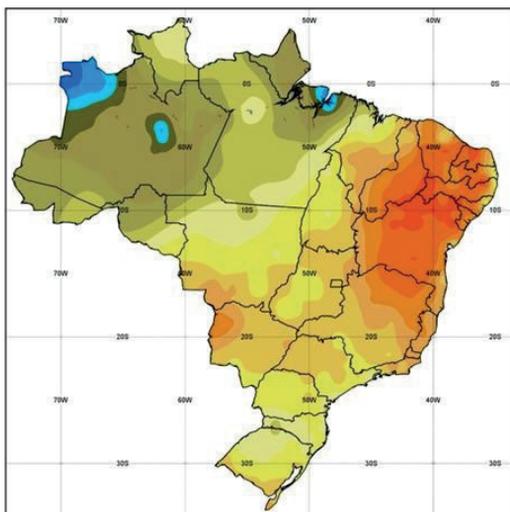


Figura 4 - Precipitação anual acumulada 1981- 2010 (INMETa, 2023)

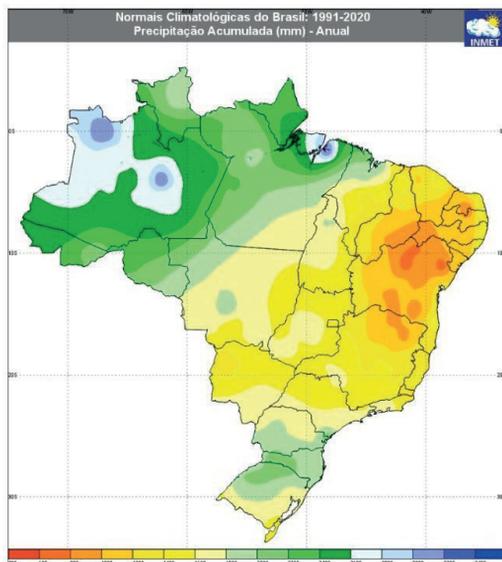


Figura 5 - Precipitação anual acumulada 1991-2020 (INMETb, 2023)

Ao observar o acúmulo pluviométrico anual nas imagens percebe-se o recuo da influência da região amazônica nos índices dos estados a sua volta, com perda de intensidade chuvosa em determinadas regiões como Mato Grosso, Goiás e Tocantins, e ainda em regiões litorâneas no Nordeste. Ao mesmo passo tem-se o aumento dos índices nas regiões Sul do país, como a exemplo o estado do Rio Grande do Sul que passa de níveis de 1250-1850 mm acumulados para 1450-2050 mm até a última normal climatológica com 1600-2200 milímetros acumulados (INMETa, 2023).

2.3 Impactos do déficit hídrico

O estresse é uma condição ambiental que desencadeia distúrbios fisiológicos e morfológicos no desenvolvimento das plantas, que pode ocasionar baixa produtividade agrícola dependendo do seu grau de intensidade e duração. A caracterização de estresse hídrico por déficit é a falta de água no sistema

planta-solo, não suprimindo sua demanda energética, debilitando a absorção de nutrientes pelas raízes, afetando toda a planta em sua morfologia, bioquímica, fisiologia e anatomia, sendo esse um dos principais estresses enfrentados atualmente pelos agricultores no campo por períodos curtos ou longos atingindo as culturas em fases sensíveis do seu ciclo produtivo (Consenço *et al.*, 2018).

O nível de desenvolvimento e crescimento de uma planta varia de acordo com o manejo aplicado a ela, potencial genético e fatores ambientais, sendo a água o fator ambiental mais limitante, visto que a mesma além dos prejuízos diretos que causa a planta em situação de déficit ainda impacta no processo de absorção de nutrientes, em que mesmo a soja sendo uma cultura altamente estudada e comercialmente importante, ainda tem a restrição hídrica como maior limitadora ao seu rendimento (Campos, 2021).

O principal objetivo das plantas em situações adversas é completar o seu ciclo reprodutivo, e quando cultivadas em condições de estresse como a escassez de água, lança de alterações fisiológicas e fenotípicas, tais como: diminuição nos níveis fotossintéticos, redução da taxa de crescimento, encurtamento de entre-nós, redução da área foliar para evitar a perda de água pela transpiração, pelo processo de murcha ou até mesmo abscisões e ainda através da redução da condutância estomática, em que as plantas mais afetadas são as classificadas como C3, como a soja, por precisarem de mais água para a fixação de carbono quando comparadas a mecanismos do tipo C4 e CAM (Hirakuri *et al.*, 2018).

O período que ocorre a deficiência hídrica também impactará no tipo de resposta gerado pela planta, em soja no período de floração e enchimento de grãos teremos queda no peso de grãos e tamanho, com amadurecimento insuficiente, isso se dá, pois a água é fundamental para a atividade enzimática responsável pela decomposição da clorofila, na fase reprodutiva após a emissão da florada, pôde-se observar o abortamento de flores e vagens, menor período para enchimento de grãos, levando a formação de grãos chochos e de baixa qualidade, conseqüentemente a menores índices produtivos (França-Neto *et al.*, 2016; Gava *et al.*, 2016).

A água é indispensável para um bom desenvolvimento do sistema produtivo, pois essa é responsável pelo transporte e absorção de nutrientes essenciais para o fechamento do ciclo da planta, logo atua diretamente no processo fotoquímico da fotossíntese, regulando a capacidade crescente de crescimento e desenvolvimento das plantas, em que mesmo períodos moderados de seca podem impactar de forma significativa o vegetal (Gajic *et al.*, 2018).

Em situação de estresse as plantas irão imprimir diferentes respostas no seu sistema vegetal, do ponto de vista fisiológico teremos como mecanismo primário adaptativo a redução da área foliar pela queda da taxa de expansão celular e volume pela desidratação do protoplasto, com o decréscimo desse volume haverá a contração das células e afrouxamento das paredes, ocasionando menor pressão de turgor logo aumento na concentração de solutos, como consequência final a diminuição do crescimento da planta (Alou *et al.*, 2018; Mageed *et al.*, 2022).

Com a menor área foliar e fechamento dos estômatos a planta irá transpirar menos, logo diminuir a fotossíntese pela redução no suprimento de CO₂, e conservar a reserva hídrica do solo por mais tempo, para algumas espécies a limitação foliar se dará também em número, em que após o extremo encolhimento da superfície da folha ocorrerá a abscisão foliar da mesma (Zhou *et al.*, 2019). No sistema bioquímico a planta sofrerá com danos oxidativos, impactando suas biomoléculas (enzimas, proteínas, pigmentos do cloroplasto, lipídios das membranas, ácidos nucleicos etc.) pela produção de espécies reativas de oxigênio, como os radicais de superóxido, hidróxido e peróxido de hidrogênio, produzidos por várias vias metabólicas e no transporte de elétrons (Scoffoni *et al.*, 2017; Foyer, 2020).

Para que a planta de soja alcance seu máximo rendimento é necessário que a temperatura do solo esteja entre 20 a 35 graus Celsius, tendo para o processo de emergência de plantas, de forma uniforme e rápida, a temperatura de 25 graus como ideal, e condições hídricas durante todo o ciclo de 450 a 800 mm bem distribuídos, variando de acordo com a cultivar, ciclo da planta, e clima inserido (Zanon *et al.*, 2018). Esses impactos que o déficit hídrico causa,

quando não lançados manejos para sua mitigação, causam nas lavouras morte de tecidos vegetais com perdas irreversíveis na sua produtividade (Rossi *et al.*, 2017).

2.4 Silício

2.4.1 Disponibilidade do silício no solo

Estima-se que em razão do maior intemperismo dos solos brasileiros exibem aproximadamente 5 a 40% de silício em sua composição (Ma *et al.*, 2006), e esteja presente na forma de opala e quartzo ($\text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$).

O silício é um dos elementos mais presentes na crosta terrestre, considerando na gênese do solo um dos principais formadores de argilo-minerais, em que sua principal origem se dá pela decomposição de resíduos vegetais, liberação de Si dos hidróxidos e óxidos de Al e Fe, e pela dissociação do ac. silícico polímero (Gaur *et al.*, 2020). Entretanto, o teor de Si solúvel disponibilizado no solo para as plantas irá variar de acordo com o teor de argila no solo, textura e mineralogia, em que solos mais jovens, com menor teor de argila, como Cambissolos e Argissolo de textura média, podem apresentar teores de Si suficientes no solo não respondendo a adubações silicatadas, já solo com maior teor de óxido Fe e Al, e arenosos ou de textura média sejam mais responsivos a adubação pela menor disponibilidade do elemento no solo (Bakhat *et al.*, 2018). Estima-se que em razão do maior intemperismo dos solos brasileiros exibem aproximadamente 5 a 40% de silício em sua composição (Ma *et al.*, 2006), e esteja presente na forma de opala e quartzo ($\text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$).

A presença do silício nos solos pode se dar através de minerais primários, secundários, ou adsorvidos aos colóides do solo, porém sua maior concentração se dá na solução do solo como ácido monossilícico (H_4SiO_4), de forma não dissociada, logo facilmente disponível para as plantas, mas também passível para perda por lixiviação (Menegale *et al.*, 2015). Sendo assim, a disponibilidade do nutriente irá variar de acordo com estabilidade dos minerais na fase sólida e ainda a incidência da forma disponível do elemento estará diretamente

relacionada ao pH do solo, uma vez que esse parâmetro exerce influência direta na absorção de elementos e em sua solubilidade (Santos *et al.*, 2021).

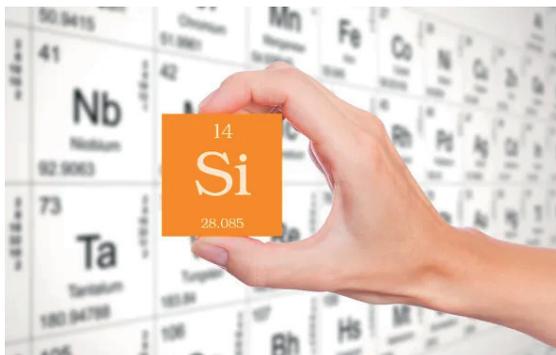


Figura 6 - Silício no ambiente terrestre (UOL, 2020)

2.4.2 Mecanismos de absorção e transporte de silício pelas plantas

O silício é absorvido pelas plantas na forma de ácido monossilícico (H_4SiO_4), de maneira passiva ou ativa, por transportadores de membrana específicos para esse fim, estando presente de maneira uniforme em plantas pouco acumuladoras de Si, sendo seu transporte realizado via xilema, onde sua distribuição depende diretamente das taxas de transpiração dos órgãos. Podendo ser encontrado em tecidos de suporte das folhas e caules em maior concentração, e em grãos em menor concentração, acumulado principalmente na forma de ácido silícico polimerizado, o qual é de difícil solubilização (Korndoffer, 2014).

O ácido monossilícico possui carga neutra, em que seu processo de absorção ocorre de um local de alta concentração para outro de baixa concentração, através das membranas das células epidérmicas, via apoplasto ou simplasto. A absorção via foliar acontece pelo contato do silício com a face abaxial ou

adaxial da folha, deslocando-se por difusão pelas paredes celulares e células cerosas, chegando à superfície externa do plasmalema, e o movimento através da membrana citoplasmática com a entrada do citoplasma, eventualmente até o vacúolo, depois de atravessar o tonoplasto (Taiz *et al.*, 2017). Contudo, em situações de presença de membranas hidrofóbicas o processo de absorção ocorrerá por canais de entrada de água ou difusão ativa, através dos espaços livres da membrana e espaços intercelulares por simplasto, podendo ainda ocorrer através de proteínas transportadoras específicas para o ácido monossilícico (Camargo, 2016).

O transporte do silício das raízes para a parte aérea pode acontecer via simplasto ou apoplasto, no qual a depender da via de transporte terá uma retenção diferente, em que via simplástica a retenção ocorrerá na endoderme, pela camada suberina ou por transportadores de efluxo de silício, e pela via apoplástica ocorrerá nas células corticais da raiz com gasto energético envolvido, o qual limitará o transporte de silício. Estudos apontam que o acúmulo e distribuição do silício podem ser regulados pela transpiração, porém em dicotiledônea e gramíneas podemos observar a redução na absorção do silício sem nenhuma consequência para a transpiração, em razão de inibidores respiratórios como azida sódica, ou fosforilação oxidativa como dinitrofenol e desacopladores do transporte eletrônico responsáveis por essa redução, demonstrando a possibilidade de regulação sem nenhum envolvimento com a transpiração (Cooke; Leishman, 2016).

As plantas podem ser divididas de acordo com sua capacidade de absorver e acumular Si, sendo acumuladoras entre 100 a 150 g/kg de Si, intermediárias de 10 a 50 g/kg de Si e não acumuladoras com concentrações abaixo de 5g/kg de Si (Camargo, 2017). Por muito tempo a absorção radicular do silício foi tida como exclusivamente passiva, porém atualmente sabe-se que para algumas espécies isso não é a realidade, já tendo sido demonstrado para exemplares de *Poaceae* e *Cyperaceae*, em que seu acúmulo e transporte podem ser regulados ativamente, através de estímulos a proteção contra estresses abióticos e bióticos, em geral as plantas acumuladoras de Si, contam com um processo de

absorção passivo, enquanto as plantas não acumuladoras tem um processo de absorção ativo (Sun *et al.*, 2016; McLarnon *et al.*, 2017).

Na cultura da soja ocorre a maior deposição de silício nas folhas mais velhas em relação às folhas mais jovens, com aumento na concentração do elemento nas raízes, em que o transporte de silício das raízes para a parte aérea se dará até atingir a concentração de 30mg/kg, e a partir dessa observaremos o aumento somente no sistema radicular, demonstrando a baixa mobilidade do elemento para a cultura (Du *et al.*, 2020).

A absorção ativa do silício pelas raízes das plantas é de extrema importância no seu processo de defesa, em que uma pequena quantidade de silício absorvido é necessária para aumentar a resistência a estresses bióticos ou abióticos, de forma que as plantas que mais absorvem silício estarão mais aptas a superar essas situações extenuantes (Zuffo *et al.*, 2020). Motomura *et al.* (2002) ainda propõem que há relação de acúmulo e transporte do silício a depender das estações do ano, a qual pode ser explicada pela variação da transpiração em cada período, atribuindo ao fato de que o estresse climático poderia gerar esse acúmulo. Estes autores demonstraram ainda, que a relação do acúmulo e absorção de silício com a produção de matéria seca segue um padrão em curva sigmoide, se estabilizando ao longo do desenvolvimento da planta, podendo ser repetida ao longo dos anos de acordo com as estações do ano, diminuindo o acúmulo em épocas de inverno e aumentado o no verão e primavera, mostrando uma relação direta com as condições climáticas e de transpiração.

2.4.3 Efeito do silício na fisiologia das plantas

Após o processo de absorção do ácido monossilícico esse é depositado nos tecidos mais jovens na forma de sílica amorfa hidratada, e em seguida nos tecidos mais velhos de forma mais rápida como sílica ou corpos silicosos, depósitos os quais acontecem com mais frequência na epiderme das folhas através da combinação da sílica com as frações de polissacarídeos da parede celular, sendo essas hemicelulose e celulose, e ainda aos espa-

ços intercelulares e lúmen (Habibi, 2014). Nessa epiderme foliar o silício depositado na forma sílica é encontrado, em ambas as faces, incorporado principalmente nas paredes exteriores da epiderme das folhas, o qual ocasiona a formação de uma dupla camada com a cutícula, que irá ajudar na defesa contra adversidades bióticas e abióticas, como ao ataque de insetos e a perda excessiva de água (Rizwan *et al.*, 2015).

Além disso, ocorre a melhoria na captação de energia solar e diminuição no acamamento, estudos mostram que com a aplicação de silicato de Ca e Mg na cultura da batateira a mesma apresentou menor acamamento nas hastes, maior crescimento com consequente maior quantidade de tubérculos comercializáveis (Prezotti *et al.*, 2018). Essa deposição ocorre de forma mais rápida para gramíneas, em que do total de silício absorvido 99% é depositado como sílica amorfa, e 1% na forma coloidal ou iônica, conferindo as mesmas maiores respostas a aplicação do elemento, sendo mais presentes na parte aérea do que nas raízes, e em maior concentração nas folhas velhas do que nas novas, bem como maiores na parte basal à apical (Ahmad *et al.*, 2018).

Estudos apontam que o Si estaria envolvido no crescimento vegetal, através da sua participação na biossíntese da parede celular, na forma de polifenóis e polissacarídeos, sendo responsável por alterações mecânicas e químicas na arquitetura da parede, gerando um aumento de sua extensibilidade (Alvarez *et al.*, 2018; Abdelaal *et al.*, 2020; Sales *et al.*, 2021).

Os ácidos fenólicos estão diretamente relacionados a produção de compostos orgânicos tais como lignina, poli hidróxidos (tanino, pectina e outros) e carboidratos, os quais tem sua síntese estimulado pelo Si, e que irão ajudar na defesa da planta, a exemplo do aumento da concentração de tanino em plantas de sorgo diminuindo o ataque de pássaros ao grão (Ahmed *et al.*, 2014).

Além disso, a absorção do Si aplicado de forma foliar faz com que cadeias maiores de ácido polissilícico sejam formadas, ocorrendo a polimerização, diminuindo a flexibilidade da parede dos estômagos levando ao seu fechamento, e logo a diminuição da transpiração e perda de água. Essa aplicação foliar gera

aumento na capacidade fotossintética, mecânica e redução na transpiração e trocas gasosas, em que a depender do seu momento de aplicação alcança resultados diferentes, como na fase final do ciclo de espécies hortícolas gerando maior armazenamento e qualidade pós-colheita em virtude da menor perda de água, e em culturas a campo maior resistência a déficits hídricos pelo mesmo fator (Silva *et al.*, 2019).

2.4.4 Papel do silício na resistência de plantas a estresses abióticos

Sugere-se na literatura que o Si age na defesa a adversidades climáticas, patógenos e doenças, sendo o principal a atuação do Si como barreira física, em razão da formação da dupla camada de cutícula e sílica pela deposição do elemento nessas, o qual impede o processo de infecção de fungos, ocasiona danos ao sistema bucal de pragas, e tem uma relação propícia com redução do processo transpirativo, diminuindo a água evapotranspirada pela planta durante seu ciclo produtivo, tornando-a menos suscetível ao déficit hídrico e menos exigente em água (Rodrigues *et al.*, 2019). Porém, o papel do silício vai muito além da simples formação de uma barreira física/mecânica, o elemento atua também modulando o metabolismo da planta alterando suas atividades fisiológicas, principalmente em plantas que estão em condições de estresse (Galviz *et al.*, 2020). Essa ação considerada como bioquímica ajuda as plantas a evitarem o estresse por déficit hídrico ou por salinidade, baixas temperaturas e excesso de água, através da ação química e bioquímica que o silício causa na planta há a manutenção do valor relativo de água na planta, que ajuda que ocorra o bom crescimento da planta, atingindo níveis produtivos ideais (Etesami *et al.*, 2017).

A capacidade de sobrevivência das plantas a adversidades, principalmente ao estresse por déficit hídrico, relaciona-se a um mecanismo regulador de mudanças fisiológicas, impactado pelo acúmulo de enzimas na parte aérea, o qual a partir da redução do potencial hídrico celular levará ao fechamento de estômatos e ativação de processos oxidativos, pelo aumento de prolina, através

da formação de espécies reativas de oxigênio (catalase, ascorbato peroxidase e dismutases de superóxido) (Roma-Almeida *et al.*, 2016). Na perspectiva fisiológica o uso do silício trará como benefício a maior atividade fotossintética, estímulo da formação de lignina e fitoalexinas através da indução de reações metabólicas, as quais protegem a planta na tolerância a seca, estimula a ação da defesa antioxidativa das plantas, que ocorre em resposta ao aumento de temperatura e estresse por déficit hídrico, visto que nessas condições haverá o acúmulo de prolina e peróxido de hidrogênio pelas plantas, e o silício atuará reduzindo o dano oxidativo e aumentando a resistência estomática (Hussain *et al.*, 2019).

Em estudos realizados por Teodoro *et al.* (2015) observaram que a aplicação foliar de silício na cultura da soja em situação de déficit hídrico resultou na redução do teor de água, provocando alterações em seu normal, e proporcionou a planta maior acúmulo de massa seca nas estruturas vegetativas e reprodutivas (hastes, folhas, sementes, vagens). Para o estudo foram utilizadas fontes de silicato de potássio, aplicados a 500mL por hectare nos estádios V3, V8 e R5. Contrapondo os resultados obtidos por Ruppenthal (2011), em que a adubação com silício causou interferência negativa nas plantas de soja sob estresse por déficit hídrico, prejudicando a absorção de nitrogênio, e reduzindo o acúmulo de massa seca e área foliar.

Já na pesquisa feita por Ludwig *et al.* (2015) na cultura do tomate não foram observadas grandes alterações na qualidade dos frutos ou no sistema de produção, contrapondo tem-se trabalhos de Nunes *et al.* (2019) que tiveram efeitos positivos aplicando 50mL/L de Si na cultura do tomate em situação de déficit hídrico, dessa forma podemos inferir que os benefícios gerados pela aplicação do silício são mais expressivos quando na presença de estresses.

Santos *et al.* (2022) realizaram experimentos com mudas de *Eugenia myrcianthes* Nied buscando avaliar o potencial do silício como mitigador do estresse gerado pelo déficit hídrico e alagamento das mudas, para tal foram usadas três doses de Si, 0, 2 e 4 mmol em suspensão hídrica e alagamento (flutuação hídrica) e irrigação contínua. Observaram que as mudas sofreram danos em

situação de déficit hídrico, com capacidade de se ajustar a flutuação, tendo a dosagem de 2 mmol de Si contribuído para a regulação das trocas gasosas, crescimento e rendimento fotoquímico durante as fases de déficit e alagamento.

Pinheiro *et al.* (2022) observaram que em sementes de sorgo submetidas a estresse por déficit hídricos e estresse salinos, quando da aplicação de soluções de silicato de potássio no tratamento de semente, tiveram efeitos positivos na atenuação da salinidade relacionada ao crescimento das plântulas, reduzindo os efeitos do déficit hídrico, mantendo a germinação até o potencial de -0,6 Mpa, e proporcionando melhor desenvolvimento radicular, resultado semelhantes ao obtido por Nascimento *et al.* (2014) também na cultura do sorgo. Na soja Leitzke *et al.* (2014) avaliaram o efeito da casca de arroz carbonizada como fonte de silício, verificando que quando aplicado 1000 kg por hectare houve o aumento do número de sementes e massa seca, além de amenizar a prejudicialidade do estresse salino. Pena *et al.* (2023) também obtiveram indícios que o silício é capaz de melhorar o crescimento da soja através do aumento das quantidades de prolina e potássio, impactando na resistência ao estresse salino pela melhor capacidade antioxidante conferida a planta. Para a cultura do arroz Cassol *et al.* (2021) obtiveram efeitos similares, em que o silício atenuou o déficit hídrico das plantas emergentes das sementes tratadas, percebidos aumentos nos teores de clorofila a e b, atividade enzimática de moléculas antioxidativas, teor de massa seca da parte aérea e área foliar. Também com efeitos positivos, Parveen *et al.* (2019) avaliaram a planta de milho em vasos sob situação de água a 60% da capacidade de campo, na aplicação de silício houve mitigação dos efeitos do déficit hídrico pela melhora na atividade das enzimas antioxidantes, comprimento e start das raízes e ainda aumento dos pigmentos fotossintetizantes.

No trabalho realizado por Moreira *et al.* (2010), objetivou-se avaliar o efeito de aplicações foliares de Si sobre o crescimento e produtividade da soja a campo, para tal utilizaram três aplicações de 500mL por hectare de silicato de potássio com 10% de Si, em V8, R1 e R5.1, como resultado tiveram o au-

mento na taxa de crescimento das plantas e fitomassa seca, ocasionando o incremento médio final de 19 sacas por hectare na produção. Resultados 22

De forma contrária Pereira *et al.* (2010) buscando qualificar os efeitos de Si nas características agrônômicas da soja, usaram de 11 dosagens aplicadas no sulco de plantio, constatando aumento no número de vagens por planta, maior altura de inserção da primeira vagem e altura de plantas, porém não houve diferença significativa estatisticamente entre as dosagens. De forma semelhante, Ferreira (2006) com aplicações de silicato de potássio não observou alterações significativas no desenvolvimento da soja, nem no processo fotossintético da clorofila A, B e total. Doso e Alovissi (2012) somente tiveram resultados positivos quando a adubação silicatada foliar foi associada com o uso de matéria orgânica, obtendo então aumento do número de legumes e produtividade.

Em uma meta-análise feita por Cooke e Leishman (2016), onde foram combinados o resultado de 145 experimentos feitos predominantemente em culturas agrícolas, avaliando a resposta das plantas de diferentes famílias sob condições de estresses abióticos a aplicação de silício, ficou demonstrado que o Si proporcionou aumento da biossíntese e taxa de assimilação da clorofila, acréscimo da matéria seca, e abrandamento nos danos oxidativos. A atenuação dos danos oxidativos foi consistente nos estudos, porém não sempre ligados diretamente a um aumento da produção de moléculas antioxidante, demonstrando o efeito do Si em diferentes mecanismos de mitigação de estresse. Observou-se também que a aplicação do silício aumentou as concentrações de potássio in shoots e diminuiu os metais tóxicos em raízes. Dessa forma, puderam concluir que o Si pode ser usado no tratamento de diversos efeitos abióticos, principalmente em condições de alteração climática.

2.4.5 Papel do silício na resistência de plantas a estresses bióticos

A relação positiva entre a adubação silicatada e a resistência de plantas a doenças já é comprovada por vários estudos (Tabela 1), podendo ser as

mesmas através de respostas físicas, químicas e moleculares. O Si na constituição física da planta proporciona a construção de uma barreira física, pela deposição do mesmo sobre e no interior da parede celular do mesófilo, com aumento de Si nas paredes celulares primárias e secundárias, formando uma dupla camada de sílica amorfa e promovendo a salificação das células, que resultará no período de pré-infecção, em maior dificuldade na penetração por micro-organismos fitopatogênicos. E ainda se pôde no período pós infecção formar-se barreiras no local de ataque destes organismos através de papilas (Rodrigues *et al.*, 2019).

Tabela 1. Supressão de doenças por silício.

FONTE	PATÓGENO	DOENÇA	CULTURA
Alves <i>et al.</i> (2020)	<i>Exserohilium turcicum</i>	Mancha de turcicum	Milho
Kowal <i>et al.</i> (2020)	<i>Mycospharella fragariae</i>	Micosferela	Morango
Alves <i>et al.</i> (2019)	<i>Bremia lactucae</i>	Míldio	Alface
Burlet (2018)	<i>Pantoea ananatis</i>	Mancha branca do milho	Milho
Santos <i>et al.</i> (2018)	<i>Meloidogyne javanica</i>	Nematóide das galhas	Pepino
Nascimento <i>et al.</i> (2017)	<i>Colletotrichum truncatum</i>	Antracnose	Feijão fava
Vedovatto (2017)	<i>Colletotrichum lindemuthianum</i>	Antracnose	Feijão

As alterações químicas proporcionadas pelo Si ocorrem no processo de resistência sistemática adquirido das plantas, agindo como ativador de genes e sinalizador na biossíntese de compostos de defesa, em que a planta sintetizará compostos fenólicos como fitoalexinas, fenilpropanóides e outro (Hussain *et al.* 2019). O silício age também no sistema de defesa das plantas como mensageiro secundário, na forma de modulador instigando a sinalização e extensão de respostas desse sistema, podendo ainda interferir na cadeia de defesa contra patógenos por se ligar a hidroxilas de proteínas envolvidas da tradução de sinais ou atuando como cofator catiônico das enzimas defensivas (quitinas, peroxidases, lipoxigenases e outras) (Foyer, 2018). A defesa química

proporcionada por esse somente acontece por influência do silício solúvel, indicando sua maior importância no aumento da resistência de plantas a fatores bióticos (Jesus *et al.*, 2017).

No estudo de Pereira *et al.* (2009) podemos ver a redução da severidade da ferrugem asiática, causada pelo patógeno *Phakopsora pachyrhizi*, em razão da aplicação de silicato de potássio no ciclo da soja, o qual também influencia no aumento de lignina das folhas conferindo uma barreira física. Marchioro *et al.* (2019) também observaram para a cultura do milho que a aplicação de silicatos diminuiu a palatabilidade das folhas, causando morte, canibalismo e diminuição populacional de *Spodoptera frugiperda*. Freire (2007), com uma dosagem de 1,6 ml dm⁻³ de silicato de potássio, na cultura da soja, relatou uma redução de 75% no nível reprodutivo do nematóide de cisto (*Heterodera glycines*).

2.4.6 Efeitos do silício na qualidade dos alimentos

O silício é essencial para a saúde humana e animal, este é responsável por regular o metabolismo de vários tecidos, principalmente cartilagens, ossos e músculos. O Si é considerado um oligoelemento, que são elementos químicos inorgânicos que desempenham variadas funções metabólicas, e são exigidos em pequenas quantidades pelo organismo, atuando principalmente na formação de enzimas vitais aos processos bioquímicos realizados pelas células, o qual é adquirido através de uma dieta balanceada e diversificada (Santos, 2012).

A alimentação da população atualmente tem sido pobre em fibras, principais fornecedoras de silício, e com o beneficiamento de cereais, como trigo e arroz, há a diminuição dos teores do elemento nos alimentos, consequentemente diminuindo sua ingestão pela população e não atendendo os níveis estimados sugeridos para o consumo humano (Nielsen, 2014). O enriquecimento dos alimentos através da biofortificação, processo no qual durante o ciclo produtivo das culturas há o enriquecimento nutricional a campo, é uma

técnica que pode ser utilizada para sanar essas deficiências vistas do aumento dos nutrientes disponíveis nas plantas.

2.4.7 Inter-relação entre o silício e outros nutrientes

Um dos principais benefícios da aplicação de silicatos na agricultura se dá pela eficiência mostrada no controle dos males ocasionado por estresses abióticos, fator atribuído a sua capacidade de detoxificação de elementos possivelmente tóxicos. Esse efeito pode se dar no solo ou na planta, em que no solo a aplicação de silicatos ocasionará a conversão dos elementos tóxicos para uma fração insolúvel, diminuindo assim sua biodisponibilidade além de estabilizá-los na fração insolúvel, isso pode ocorrer em razão de processos de humidificação, reações de adsorção e redução, precipitação ou ainda pela contenção dos metais na fração de matéria orgânica e óxidos de ferro (Morais *et al.*, 2022).

A aplicação de ânion silicatados no solo causam ainda a elevação do pH, fazendo com que haja a redução na atividade dos metais tóxicos, ocasionando a polimerização dos silicatos ligados aos metais tóxicos precipitando-os a compostos insolúveis (El Rafisi *et al.*, 2022). Na planta a diminuição dos efeitos de toxicidade dos elementos ocorre em razão de diferentes relações metabólicas relacionadas ao Si, sendo essas a complexação dos íons metais, seccionamento em vacúolos, parede celular ou citoplasma, ativação do sistema de defesa antioxidante, e ainda através da retenção dos mesmos durante o crescimento vegetal (Oliveira, 2009; Chen *et al.*, 2019).

Vale ressaltar ainda que nos solos ocorre a competição entre Si e fósforo pelos mesmos sítios de adsorção, em que o Si desloca o P do coloide, aumentando sua concentração no solo, por diminuir a fixação do P nos óxidos de Fe e Al, devido ao processo de competição, e ainda em razão do aumento do pH que ocorre quando se há adubação silicatada. Porém, esse mesmo aumento de pH, quando ocasionado por doses excessivas de Si, na forma de silicatos, pode alcançar valores acima dos ideais, sendo capaz de causar desequilíbrios nutricionais afetando

principalmente os micronutrientes cobre, ferro, manganês e zinco, causando deficiência dos mesmos e a insolubilização do fósforo (Haal *et al.*, 2019).

Estudos realizados por Hernandez-Apaolaza (2014) e Gonzalo *et al.* (2013) demonstraram que o silício pode também ter efeito benéfico na deficiência causada por micronutrientes como ferro e zinco, em que a aplicação de silício na cultura da soja levou ao atraso no aparecimento de clorose advinda da deficiência de ferro além de atenuar as demais sintomatologias de estresse ligado ao déficit no nutriente, e em plantas de arroz pôde-se constatar a maior distribuição de zinco do sistema radicular para a parte aérea em virtude da adubação silicatada (Mehrabanjoubani, 2017).

Na cultura do sorgo Oliveira (2017), observou a melhor resposta da planta a adubação via solo em comparação a foliar, tendo como resultado a mitigação dos efeitos ocasionado pela deficiência de manganês, trazendo benefícios para a maior eficiência no uso do elemento pela planta, maior área foliar, matéria seca e atividade fotossintética.

Na cultura da soja Steiner *et al.* (2018) observaram a influência da aplicação de silício no rendimento de grãos em virtude da influência do Si na relação simbiótica com o *Bradyrhizobium*, na qual houve melhor fixação de nitrogênio através do sistema de nodulação da soja. Para o estudo foram utilizadas duas cultivares de soja, uma convencional e outra transgênica, em que ambas tiveram o tamanho do nódulo influenciado, o aumento na concentração de nitrogênio foliar e nível de clorofila, e para a cultivar convencional foi observado ainda o aumento do número de nódulos, e como fonte de Si o silicato de cálcio e magnésio, resultados também observados por Queiroz (2016).

2.4.8 Aplicação prática de silício na agricultura

O silício por ser um supressor/redutor de estresses é altamente indicado para aplicações agrícolas, estresses bióticos e abióticos, como temperatura, ataque de fungos, déficit hídrico, podem ter seu efeito mitigado pela aplicação de fontes silicatadas. Tem-se como benefício também aumento da assimilação de nitrogênio em virtude do estímulo da fotossíntese e clorofila, deposição nas

folhas tornando-se mais eretas o que favorece a penetração de luz no dossel (Monzon *et al.*, 2021).

Na agricultura existem diversas fontes de silício, como o silicato de cálcio, silicato de magnésio, ácido monossilícico, silicato de potássio, em que na nutrição foliar a fonte mais utilizada atualmente é o silicato de potássio (K_2SiO_3) obtido através da moagem da fusão da sílica de quartzo e carbonato de potássio sob condições de alta pressão e temperatura, ou ainda utilizando como fonte de K o hidróxido de potássio (Rastogi *et al.*, 2019).

A utilização de fontes de silicato de Ca e Mg podem além de fornecer silício as plantas atuar no solo como corretivos de acidez, situação benéfica em solos sob sistema de plantio direto, que prezam pelo não revolvimento do solo, quando comparados com a aplicação de calcário que exigem água para sua reação e deve ser incorporado para maior eficácia, em que as fontes silicatadas citadas tem solubilidade de quase 7 vezes maior que o carbonato de cálcio, logo tem potencialmente melhor correção do solo em profundidade (Korndorfer; Souza, 2018).

3. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O silício está envolvido nas atividades metabólicas e fisiológicas das plantas, mostrando melhores resultados em condições de estresse bióticos e abióticos, o uso do silício pode influenciar positivamente a arquitetura das folhas, logo o aproveitamento da incidência solar, redução na transpiração de água, ativação do sistema de defesa antioxidativo, aumento da capacidade fotossintética, detoxificação de efeitos tóxicos, além dos demais efeitos citados ao longo da revisão, os quais levam a impactos na sobrevivência e produção das plantas.

Em decorrência de seus benefícios tem grande potencial para agregar ao manejo agrícola e aumento de produtividade, através de plantas mais saudáveis e vigorosas, com maior equilíbrio fisiológico e nutricional. Porém a depender da espécie pôde-se ter respostas diferentes a presença do elemento, variando sua absorção e acúmulo, dessa forma o momento e dosagem de aplicação de uma cultura se difere das demais, podendo levar a perda da eficiência do uso do silício, isso pode ocorrer tanto no processo de pesquisas científicas quanto nas práticas de manejo, que buscam respostas rápidas e precisas para melhor entendimento da sua influência na fisiologia e bioquímica da planta.

Diante de todo o conteúdo presente na revisão bibliográfica podemos concluir que mesmo o Si não cumprindo todas as exigências de classificação de um elemento essencial, é altamente benéfico para o crescimento e desenvolvimento das culturas agrícolas, principalmente ao considerarmos os aspectos

ambientais e climáticos da atualidade. Dessa forma, várias pesquisas têm sido feitas para elucidar o assunto, buscando inferir a influência do nutriente nas mais diversas culturas e doses, porém as pesquisas voltadas ao impacto do silício na sojicultura ainda são escassas e com resultados muito variáveis. Logo, são necessárias pesquisas mais direcionadas as culturas de acordo com sua classificação de acúmulo de silício, visto da grande divergência acerca da responsividade de cada uma, além de buscar melhor e maior desenvolvimento no campo de melhoramento genético, por ter variações positivas a depender da cultivar utilizada nos estudos, e analisar o benefício-custo da utilização desse elemento benéfico a campo. Buscando não só a influência do silício nos fatores bióticos, o qual compõe a maioria da literatura disponível, mas também sua influência nos demais elementos e mitigação de estresses abióticos.

ABD EL-MAGEED, T.A. et al. Physio- biochemical and agronomic changes of two sugar beet cultivars grown in saline soil as influenced by potassium fertilizer. **Journal of Soil Science and Plant Nutrition**, Temuco, v. 22, p. 3636-3654, 2022. Disponível em: <<https://doi.org/10.1007/s42729-022-00916-7>>. Acesso em: 08 dez. 2023.

ABDELAAL, K.A.; MAZROU, Y.S.; HAFEZ, Y.M. Silicon foliar application mitigates salt stress in sweet pepper plants by enhancing water status, photosynthesis, antioxidant enzyme activity and fruit yield. **Plants**, Basel, v. 9, n. 6, p. 733, 2020. Disponível em: <<https://doi.org/10.3390/plants9060733>>. Acesso em: 08 dez. 2023.

AHMAD, Z. et al. Physiological responses of wheat to drought stress and its mitigation approaches. **Acta Physiologiae Plantarum**, Warszawa, v. 40, n. 80, 2018. Disponível em: <<https://doi.org/10.1007/s11738-018-2651-6>>. Acesso em: 13 maio 2024.

AHMED, M.; ASIF, M.; HASSAN, F.U. Augmenting drought tolerance in sorghum by silicon nutrition. **Acta Physiologiae Plantarum**, Warszawa, v. 36, n. 2, p. 473-483, 2014. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1007/s11738013-1427-2>>. Acesso em: 24 nov. 2023.

ALOU, I.N. et al. Growth, phenological, and yield response of upland rice (*Oryza sativa* L. cv. Nerica 4[®]) to water stress during different growth stages. **Agricultural and Water Management**, Amsterdam, v. 198, p. 39–52, 2018. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.agwat.2017.12.005>>. Acesso em: 24 nov. 2023.

ALVAREZ, R.D.C.F. et al. Effects of soluble silicate and nanosilica application on rice nutrition in an oxisol. **Pedosphere**, Beijing, v. 28, n. 4, p. 597-606, 2018. Disponível em: <[https://doi.org/10.1016/S1002-0160\(18\)60035-9](https://doi.org/10.1016/S1002-0160(18)60035-9)>. Acesso em: 08 dez. 2023.

ALVES, A.P. et al. **Guia de boas práticas para o manejo dos enfezamentos e da cigarrinha-do-milho**. Brasília: Embrapa, 2020. Disponível em: <<https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/handle/doc/1129511>>. Acesso em: 24 nov. 2023.

ALVES, J.S. et al. Avaliação da incidência de doenças e insetos na cultura do milho relacionada ao número de aplicações de formulações de silício / Evaluation of the incidence of diseases and insects on maize culture related to the number of applications of silicon formulations. **Brazilian Journal of Animal and Environmental Research**, São José dos Pinhais, v. 3, n. 3, p. 1940–1945, 2020. Disponível em: <<https://doi.org/10.34188/bjaerv3n3-107>>. Acesso em: 24 nov. 2023.

ALVES, R.C. et al. Silício como indutor de resistência à *bremia lactucae* na cultura da alface. In: CONGRESSO INTERNACIONAL DE MEIO AMBIENTE E SOCIEDADE, 1.; CONGRESSO INTERNACIONAL DA DIVERSIDADE DO SEMIÁRIDO, 3., 2019, Campina Grande. **Anais...** Campina Grande: Realize Editora, 2019. Disponível em: <<https://editorarealize.com.br/artigo/visualizar/63898>>. Acesso em: 24 nov. 2023.

ANDRADE NETO, A.O.; RAIHER, A.P. Impacto socioeconômico da cultura da soja nas áreas mínimas comparáveis do Brasil. **Revista de Economia e Sociologia Rural**, Brasília, v. 62, n. 1, e267567, 2024. Disponível em: <<https://doi.org/10.1590/1806-9479.2022.267567>>. Acesso em: 24 nov. 2023.

BAKHAT, H.F. et al. Silicon mitigates biotic stresses in crop plants: a review. **Crop Protection**, Guildford, v. 104, p. 21–34, Mar. 2018.

BARROZO, J.C.; ROSA, J.C. da. A expansão do cultivo da soja no Brasil através dos dados oficiais. **Pampa**, Santa Fe, n. 18, p. 79-98, dic. 2018. Disponível em: <http://www.scielo.org.ar/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2314-02082018000200005>. Acesso em: 07 dez. 2023.

BURTET, G.W. **Silício e *Azospirillum brasilense* associado ao controle químico sobre a severidade de *Pantoea ananatis* em milho**. 2018. 64 p. Dissertação (Mestrado em Produção Vegetal) – Centro de Ciências Agrárias, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2018.

BUSSOLARO, I.; ZELIN, E.; SIMONETI, A.P.M.M. Aplicação de silício no controle de percevejos e produtividade da soja. **Cultivando o Saber**, Cascavel, v. 4, n. 3, p. 9-19, 2011.

CAMARGO, M.S. Efeito do silício na tolerância das plantas aos estresses bióticos e abióticos. **Informações Agrônomicas**, Piracicaba, n. 155, p. 1-8, 2016.

CAMARGO, M.S. et al. Silicon fertilization reduces the deleterious effects of water deficit in sugarcane. **Journal of Soil Science and Plant Nutrition**, Temuco, v. 17, n. 1, p. 99-111, 2017.

CAMPOS, A.J.M. et al. Estresse hídrico em plantas: uma revisão. **Investigação, Sociedade e Desenvolvimento**, Coimbra, v. 10, n. 15, 2021. Disponível em: <<https://rsdjournal.org/index.php/rsd/article/view/23155>>. Acesso em: 24 nov. 2023. doi: 10.33448/rsdv10i15.23155.

CASSOL, J.C. et al. Silicon as an attenuator of drought stress in plants of *Oryza sativa* L. treated with dietholate. **Brazilian Journal of Biology**, São Carlos, v. 81, n. 4, p. 1061-1072, 2021. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1590/1519-6984.235052>>. Acesso em: 24 nov. 2023.

CASTRO, L.S.; LIMA, J.E. A soja e o estado do mato grosso: existe alguma relação entre o plantio da cultura e o desenvolvimento dos municípios? **Revista Brasileira de Estudos Regionais e Urbanos**, Recife, v. 10, n. 2, p. 177-198, 2016.

CHEN, D. et al. Effects of boron, silicon and their interactions on cadmium accumulation and toxicity in rice plants. **Journal of Hazardous Materials**, Amsterdam, v. 367, p. 447-455, 2019.

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. **Acompanhamento da safra brasileira de grãos**, v. 10, n. 6, 2023. Disponível em: <<https://www.conab.gov.br/info-agro/safras/graos/boletim-da-safra-de-graos>>. Acesso em: 10 mar. 2023.

CONCENÇO, G. et al. Rice yield components under water stress imposed at different growth stages. **Journal of Agricultural Science**, Cambridge, v.10, n.3, p. 290-297, 2018.

COOKE, J.; LEISHMAN, M.R. Consistent alleviation of abiotic stress with silicon addition: a meta-analysis. **Functional Ecology**, Oxford, v. 30, n. 8, p. 1340-1357, 2016. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1111/1365-2435.1271>>. Acesso em: 24 nov. 2023..

CRUSCIOL, C.A.C. et al. foliar de ácido silícico estabilizado na soja, feijão e amendoim. **Ciência Agrônômica**, Fortaleza, v. 44, n. 2, p. 404-410, 2013.

DOSSO, V.H.; ALOVISI, A.M.T. Silício foliar e matéria orgânica na cultura da soja. In: REUNIÃO BRASILEIRA DE FERTILIDADE DE SOLO E NUTRIÇÃO DE PLANTAS, 29.; REUNIÃO BRASILEIRA SOBRE MICORRIZAS, 13.; SIMPÓSIO BRASILEIRO DE MICROBIOLOGIA DO SOLO, 11.; REUNIÃO BRASILEIRA DE BIOLOGIA DO SOLO, 8., 2010, Guarapari. **Anais...** Guarapari: SBCS, 2010, p-10-17.

DU, Y.L. et al. Effect of drought stress at reproductive stages on growth and nitrogen metabolism in soybean. **Agronomy**, Basel, v. 10, n. 302, 2020. Disponível em: <<https://doi.org/10.3390/agronomy10020302>>. Acesso em: 23 nov. 2023.

DUBBERSTEIN, D. et al. Resilient and sensitive key points of the photosynthetic machinery of *Coffea* spp. to the single and superimposed exposure to severe drought and heat stresses. **Frontiers in Plant Science**, Lausanne, v. 11, e1049, 2020. Disponível em: <<https://doi.org/10.3389/fpls.2020.01049>>. Acesso em: 14 maio 2024.

EL RASAFI, T. et al. Cadmium stress in plants: a critical review of the effects, mechanisms, and tolerance 535 strategies. **Critical Reviews in Environmental Science and Technology**, Boca Raton, v. 52, n. 5, p. 675-726, 2022. Disponível em: <<https://doi.org/10.1080/10643389.2020.1835435>>. Acesso em: 08 dez. 2023.

EMBRAPA. **Especialistas recomendam estratégias tecnológicas para mitigar falta de água em soja**. 2022a. Disponível em: <https://www.embrapa.br/busca-de-noticias?p_p_id=buscanoticia_WAR_pcebusca6_1portlet&p_p_lifecycle=0&p_p_state=pop_up&p_p_mode=view&p_p_col_id=column-1&p_p_col_count=1&buscanoticia_WAR_pcebusca6_1portlet_groupId=1355202&buscanoticia_WAR_pcebusca6_1portlet_articleId=65693223&buscanoticia_WAR_pcebusca6_1portlet_viewMode=print>. Acesso em: 10 mar. 2023.

EMBRAPA. **Soja em números (safra 2021/22)**. 2002b. Disponível em: <<https://www.embrapa.br/soja/cultivos/soja1/dados-economicos>>. Acesso em: 10 mar. 2023.

ETESAMI, H.; JEONG, B.R. Review and future prospects on the action mechanisms in alleviating biotic and abiotic stresses in plants. **Ecotoxicology and Environmental Safety**, Amsterdam, v. 147, p. 881-896, Jan. 2018. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.ecoenv.2017.09.063> PMID:28968941>. Acesso em: 24 nov. 2023.

FERREIRA, R.S. **Influência do Si na indução de resistência a mosca-branca *Bemisia tabaci* biótipo B Genn. (Hemiptera: Aleyrodidae) e no desenvolvimento vegetativo de dois cultivares de soja *Glycine max* (L.) Merrill**. 2006. 40 p. Dissertação (Mestrado em Agronomia) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2006.

FOYER, C.H. Reactive oxygen species, oxidative signaling and the regulation of photosynthesis. **Environmental and Experimental Botany**, Amsterdam, v. 154, p. 134-142, Oct. 2018. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.envexpbot.2018.05.003>>. Acesso em: 24 nov. 2023.

FRANÇA-NETO, J.B. et al. **Tecnologia da produção de sementes de soja de alta qualidade**. Londrina: Embrapa Soja, 2016. 82 p. (Documentos, 380).

FREIRE, E.S. **Controle dos nematoides de galhas (*Meloidogyne* spp.) e do cisto (*Heterodera glycines*) com silicatos**. 2007. 91 p. Dissertação (Mestrado em Fitopatologia) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2007.

GAJÍC, B. et al. Effect of irrigation regime on yield, harvest index and water productivity of soybean grown under different precipitation conditions in a temperate environment. **Agricultural Water and Management**, Amsterdam, v. 210, p. 224-231, Nov. 2018. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.agwat.2018.08.002>>. Acesso em: 24 nov. 2023.

GALVIZ, Y.C.; RIBEIRO, R.V.; SOUZA, G.M. Yes, plants do have memory. **Theoretical and Experimental Plant Physiology**, Londrina, v. 32, p. 195-202, 2020.

GAUR, S. et al. Fascinating impact of silicon and silicon transporters in plants: a review. **Ecotoxicology and Environmental Safety**, Amsterdam, v. 202, Oct. 2020. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2020.110885>>. Acesso em: 24 nov. 2023.

GAVA, R. et al. Estresse hídrico em diferentes fases da cultura da soja. **Revista Brasileira de Agricultura Irrigada**, Fortaleza, v. 9, n. 6, p. 349-259, 2015.

GAZZONI, D.L.; DALL'AGNOL, A. **A saga da soja de 1050 a.C. a 2050 d.C.** Brasília: Embrapa, 2018. 199 p.

GONZALO, M.J.; LUCENA, J.J.; HERNANDEZ-APAOLAZA, L. Effect of silicon addition on soybean (*Glycine max*) and cucumber (*Cucumis sativus*) plants grown under iron deficiency. **Plant Physiology**, Rockville, v. 70, p. 455-461, 2013.

GORTHI, A.; VOLENEC, J.J.; WELP, L.R. Stomatal response in soybean during drought improves leaf- scale and field-scale water use efficiencies. **Agricultural and Forest Meteorology**, Amsterdam, v. 276/277, p. 107629, Oct. 2019.

HABIBI, G. Silicon supplementation improves drought tolerance in canola plants. **Russian Journal of Plant Physiology: a Comprehensive Russian Journal on Modern Phytophysiology**, New York, v. 61, n. 6, p. 784-791, 2014. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1134/S1021443714060077>>. Acesso em: 24 nov. 2023.

HALL, C. R. et al. The role of silicon in antiherbivore phytohormonal signalling. **Frontiers in Plant Science**, Lausanne, v. 18, p. 1132, 2019.

HERNANDEZ - APAOLAZA, L. Can silicon partially alleviate micronutrient deficiency in plants? a review. **Planta**, Berlin, v. 240, p. 447-458, 2014.

HIRAKURI, M.H. et al. **Análise de aspectos econômicos sobre a qualidade de grãos de soja no Brasil**. Londrina: Embrapa Soja, 2018. 22 p. (Circular Técnica, 145).

HUSSAIN, A. et al. Seed priming with silicon nanoparticles improved the biomass and yield while reduced the oxidative stress and cadmium concentration in wheat grains. **Environmental Science and Pollution Research**, Berlin, v. 26, p. 7579-7588, 2019.

INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA DO BRASIL. **El niño pode causar impactos na agricultura brasileira**. 2023a. Disponível em: <<https://portal.inmet.gov.br/noticias/el-niño-pode-causar-impactos-na-agricultura-brasileira>>. Acesso em: 08 dez. 2023.

INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA DO BRASIL. **Normais climatológicas**. Disponível em: <<https://portal.inmet.gov.br/normais>>. Acesso em: 02 dez. 2023b.

JESUS, L.R. de; BATISTA, B.L.; LOBATO, A.K.S. Silicon reduces aluminum accumulation and mitigates toxic effects in cowpea plants. **Acta Physiologiae Plantarum**, Warszawa, v. 39, p. 138, 2017.

KORNDÖRFER, G.; SOUZA, S.R. Elementos benéficos. In: FERNANDES, M.S.; SOUZA, S.R. de; SANTOS, L.A. **Nutrição mineral de plantas**. Viçosa: Editora UFV, 2018. cap. 15, p. 563-599.

KORNDÖRFER, G.H. **Uso do silício na agricultura**. Uberlândia: Grupo de Pesquisa Silício na Agricultura, 2014. Disponível em: <http://www.dpv24.iciag.ufu.br/Silicio/Efeitos/Efeitos.htm> >. Acesso em: 24 nov. 2023.

LEITZKE, I.D. et al. Aplicação de silício via solo para diminuição do estresse salino. In: CONGRESSO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DE PELOTAS, 22., 2014, Pelotas. **Anais...** Pelotas: UFPel, 2014. p. 22-31

LUDWIG, F.; BEHLING, A.; SCHMITZ, J.A.K. Silício na produção e qualidade fitossanitária de tomate (*Lycopersicon esculentum*). **Scientia Agraria Paranaensis**, Marechal Cândido Rondon, v. 14, n. 1, p. 60-66, 2015. Disponível em: <<https://e-revista.unioeste.br/index.php/scientiaagraria/article/view/10043>>. Acesso em: 24 nov. 2023.

MA, J.F.; YAMAJI, N. Silicon uptake and accumulation in higher plants. **Trends in Plant Sciences**, Amsterdam, v. 11, n. 8, p. 392-397, Oct. 2006. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.tplants.2006.06.007>>. Acesso em: 24 nov. 2023.

MARCHIORO, S.T. et al. Mortalidade e canibalismo de *Spodoptera frugiperda* em milho tratado com silício. **Cadernos de Agroecologia**, Recife, v.14, n. 1, fev. 2019. Apresentado no CONGRESSO PARANAENSE DE AGROECOLOGIA, 2.; PARANÁ AGROECOLÓGICO, 3., 2018, Foz do Iguaçu. Disponível em: <<https://cadernos.aba-agroecologia.org.br/cadernos/article/view/2585/2306>>. Acesso em: 14 maio 2024.

McLARNON, E. et al. Evidence for active uptake and deposition of si-based defenses in tall fescue. **Frontiers in Plant Science**, Lausanne, v. 8, p. 1199, 2017.

MENEGALE, M.D.C.; CASTRO, G.S.A.; MANCUSO, M.A.C. Silício: interação com o sistema solo-planta. **Journal of Agronomic Sciences**, Umuarama, v.4, n. esp., p.435-454, 2015. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/282008661_SILICIO_INTERACAO_COM_O_SISTEM_A_SOLO-PLANTA>. Acesso em: 24 nov. 2023.

MONZON, D.L.R. et al. Influência da aplicação foliar de silício e sílica amorfa e sua resposta na cultura de arroz / Influence of foliar application of silicon and amorphous silica and their response in rice culture. **Brazilian Journal of Development**, São José dos Pinhais, v. 7, n. 3, p. 25932–25945, 2021. Disponível em: <<https://doi.org/10.34117/bjdv7n3-343>>. Acesso em: 24 nov. 2023.

MORAES, S.P.D.O. et al. Efeitos benéficos do silício em plantas sob condições de estresse abiótico: uma nova abordagem. **Revista Ciência Agrônômica**, Fortaleza, v. 53, e20218213, 2022. Disponível em: <<https://doi.org/10.5935/1806-6690.20220052>>. Acesso em: 14 maio 2024.

MOREIRA, A.R. et al. Resposta da cultura de soja a aplicação de silício foliar. **Bioscience Journal**, Uberlândia, v. 26, n. 3, p. 413-423, 2010.

MOTOMURA, H.; MITA, N.; SUZUKI, M. Silica accumulation in long-lived leaves of *Sasa veitchii* (Carrière) rehd. (Poaceae-Bambusoideae). **Annals of Botany**, Oxford, v. 90, n. 1, p. 149-152, 2002.

NASCIMENTO, A.D. et al. Severidade da antracnose do feijão-fava afetada por doses de cálcio e fontes de silício. **Revista Ciência Agrícola**, v. 15, n. 2, p. 61-68, 2017.

NASCIMENTO, E.H.S. et al. Utilização de silício na atenuação dos efeitos do estresse salino em plantas de sorgo. In: INOVAGRI INTERNATIONAL MEETING, 2., 2014, Fortaleza. <http://dx.doi.org/10.12702/ii.inovagri.2014-a558>.

NIELSEN, F.H. Update on the possible nutritional importance of silicon. **Journal of Trace Elements in Medicine and Biology**, Stuttgart, v. 28, n. 4, p. 379-382, 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jtemb.2014.06.024>. Acesso em: 24 nov. 2023.

NUNES, A.M.C. et al. Silício na tolerância ao estresse hídrico em tomateiro. **Revista Científica Rural**, Bagé, v. 21, p. 239-258, 2019.

OLIVEIRA, L.A. de. **Silício em plantas de feijão e arroz: absorção, transporte, redistribuição e tolerância ao cádmio**. 2009. 157 p. Tese (Doutorado em Energia Nuclear na Agricultura e no Ambiente) - Centro de Energia Nuclear na Agricultura, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2009. Disponível em: <<https://teses.usp.br/teses/disponiveis/64/64134/tde-03122009-094223/pt-br.php>>. Acesso em: 24 nov. 2023.

OLIVEIRA, R.L.L. **Aplicação de silício na fisiologia, na produção e na mitigação de estresse causado pela deficiência de manganês em plantas de sorgo granífero**. 2017. 44 p. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo) - Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho", Jaboticabal, 2017.

PARVEEN, A. Silicon priming regulates morpho-physiological growth and oxidative metabolism in maize under drought stress. **Plants**, Basel, v. 8, n. 10, p. 431, 2019. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.3390/plants8100431> PMID:31635179>. Acesso em: 24 nov. 2023.

PEÑA CALZADA, K. *et al.* Regulatory role of silicon on growth, potassium uptake, ionic homeostasis, proline accumulation, and antioxidant capacity of soybean plants under salt stress. **Journal of Plant Growth Regulation**, New York, v. 42, p. 4528-4540, 2023. Disponível em: <<https://doi.org/10.1007/s00344-023-10921-4>>. Acesso em: 08 dez. 2023.

PEREIRA, S.C. *et al.* Aplicação foliar de silício na resistência da soja à ferrugem e na atividade de enzimas de defesa. **Tropical Plant Pathology**, Brasília, v. 34, p. 164-170, 2009.

PEREIRA JÚNIOR, P. *et al.* Efeito de doses de silício sobre a produtividade e características agrônômicas da soja. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 34, p. 908-913, 2010.

PINHEIRO, P.R. *et al.* Silicato de potássio como indutor de resistência aos estresses abióticos em sementes de sorgo granífero. **Revista Ciência Agrônômica**, Fortaleza, v. 53, e20218136, 2022. Disponível em: <<https://doi.org/10.5935/1806-6690.20220025>>. Acesso em: 24 nov. 2023.

PREZOTTI, L.C.; GUARÇONI, A.; BALBINO, J.M.S. Nutrição, calagem e adubação da batata-baroa. In: BALBINO, J.M.S. (Org.). **Cultura da batata-baroa (mandioquinha-salsa)**: práticas da produção à pós-colheita. Vitória: INCAPER, 2018. p. 59-70.

QUEIROZ, A.A. Silício aumenta a formação de nódulos na soja. **Campo & Negócios: Grãos**, p. 2829, nov. 2016. Disponível em: <https://www.rigrantec.com.br/upload/produtos_artigos/c0804--silicio-aumenta-a-formacao-de-nodulos-na-soja-prosilicon-1548701541.79.pdf> Acesso em: 24 nov. 2023.

RASTOGI, A. et al. Application of silicon nanoparticles in agriculture. **Biotech**, Basel, v. 9, n. 90, p. 1-11, 2019. Disponível em: <<https://doi.org/10.1007/s13205-019-1626-7>>. Acesso em: 24 nov. 2023.

RIZWAN, M. et al. Mechanisms of silicon-mediated alleviation of drought and salt stress in plants: a review. **Environmental Science and Pollution Research International**, Berlin, v. 22, n. 20, p. 15416-15431, 2015. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1007/s11356-015-5305-x>> PMid:26335528>. Acesso em: 24 nov. 2023.

RODRIGUES, L.A. et al. Coating seeds with silicon enhances the corn yield of the second crop. **Caatinga**, Mossoró, v. 32, n. 4, p. 897-903, 2019.

ROMA-ALMEIDA, R.C.C. et al. Efeito da aplicação de silicato de cálcio e de cinza de casca de arroz sobre a incidência de fungos associados a manchas em sementes de arroz irrigado. **Summa Phytopathologica**, Piracicaba, v. 42, n. 1, p. 73-78, 2016.

ROSSI, R.F. et al. Vigor de sementes, população de plantas e desempenho agrônomo de soja. **Revista de Ciências Agrárias**, Fortaleza, v. 60, n. 3, p. 215-222, 2017. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.4322/rca.2239>>. Disponível em: <<https://doi.editoracubo.com.br/10.4322/rca.2239>>. Acesso em: 24 nov. 2023.

RUPPENTHAL, V. **Adubação silicatada na cultura da soja e sua influência na tolerância ao déficit hídrico**. 2011. 71 p. Dissertação (Mestrado em Agronomia) - Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Marechal Cândido Rondon, 2011. Disponível em: <<https://tede.unioeste.br/handle/tede/1404>>. Acesso em: 07 dez. 2023.

SALES, A.C. et al. Silicon mitigates nutritional stress in quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.). **Scientific Reports**, Tokyo, v. 11, p. 14665, 2021. Disponível em: <<https://doi.org/10.1038/s41598-021-94287-1>>. Acesso em: 08 dez. 2023.

SANTOS, B.H.C. dos et al. Silicato de cálcio no controle de *Meloidogyne javanica* em pepineiro em diferentes texturas de solo. **Revista Brasileira de Agropecuária Sustentável**, Viçosa, v. 8, n. 1, 2018. Disponível em: <<https://periodicos.ufv.br/rbas/article/view/3012>>. Acesso em: 24 nov. 2023.

SANTOS, C.C. et al. O papel do silício na mitigação do estresse hídrico em mudas de *Eugenia myrcianthes* Nied. **Brazilian Journal of Biology**, São Carlos, v. 82, e260420, 2022. Disponível em: <<https://doi.org/10.1590/1519-6984.260420>>. Acesso em: 24 nov. 2023.

SANTOS, C.J. **Oligoelementos e osteoporose**. 2012. 28 p. Dissertação (Mestrado Integrado em Medicina) – Instituto de Ciências Biomédicas Abel Salazar, Universidade do Porto, Porto, 2012. Disponível em: <<https://repositorio-aberto.up.pt/bitstream/10216/66087/2/30567.pdf>>. Acesso em: 24 nov. 2023.

SANTOS, L.C. dos et al. O papel do silício nas plantas. **Research, Society and Development**, Itabira, v. 10, n. 7, p. e3810716247, 2021.

SCOFFONI, C. et al. Outside-xylem vulnerability, not xylem embolism, controls leaf hydraulic decline during dehydration. **Plant Physiology**, Oxford, v. 173, n. 2, p. 1197-1210, Jan. 2017. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1104/pp.16.01643>>. Acesso em: 24 nov. 2023.

SILVA, K.S. et al. Contents of pigments and activity of antioxidant enzymes in rice plants pre-treated with sodium nitroprusside and exposed to clomazone. **Planta Daninha**, Rio de Janeiro, v. 37, p. 1-10, 2019. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1590/s0100-83582019370100032>>. Acesso em: 24 nov. 2023.

STEINER, F. et al. Effects of aluminum on plant growth and nutrient uptake in young physic nut plants. **Semina: Ciências Agrárias**, Londrina, v. 33, n. 5, p. 1779-1788, 2012. Disponível em: <<https://doi.org/10.5433/16790359.2012v33n5p1779>>. Acesso em: 24 nov. 2023.

SUN, Y.; WU, L.H.; LI, X.Y. Experimental determination of silicon isotope fractionation in rice. **PLoS One**, v. 11, n. 12, e0168970, Dec. 2016. doi:10.1371/journal.pone.0168970.

TAIZ, L. et al. **Fisiologia e desenvolvimento vegetal**. 6. ed. Porto Alegre: Artmed, 2017. 888 p.

TEODORO, P.E. et al. Dry mass in soybean in response to application leaf with silicon under conditions of water deficit. **Bioscience Journal**, Uberlândia, v. 31, p. 161-170, 2015.

VEDOVATTO, F. **Silício no controle de *Colletotrichum lindemuthianum* em feijoeiro**. 2017. Disponível em: <<http://repositorio.ufsm.br/handle/1/11642>>. Acesso em: 24 nov. 2023.

WÜRZD, A. et al. foliar de silício reduz a ocorrência de doenças fúngicas na cultura do morangueiro. **Revista Eletrônica Científica da UERGS**, Porto Alegre, v. 6, n. 2, p. 150-154, 2020. Disponível em: <<https://doi.org/10.21674/2448-0479.62.150-154>>. Acesso em: 24 nov. 2023.

ZANON, A.J. et al. Desenvolvimento de cultivares de soja em função do grupo de maturação e tipo de crescimento em terras altas e terras baixas. **Bragantia**, Campinas, v. 74, p. 400-411, 2015.

ZHANG, Q. et al. Effects of silicon on growth, root anatomy, radial oxygen loss (ROL) and Fe/Mn plaque of *Aegiceras corniculatum* (L.) Blanco seedlings exposed to cadmium. **Environmental Nanotechnology, Monitoring & Management**, Amsterdam, v. 4, p. 6-11, 2015. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.enmm.2015.04.001>>. Acesso em: 24 nov. 2023.

ZHOU, S.X.; PRENTICE, I.C.; MEDLYN, B.E. Bridging drought experiment and modeling: representing the differential sensitivities of leaf gas exchange to drought. **Frontiers in Plant Science**, Lausanne, v. 9, p. 1-12, 2019. Disponível em: <<https://doi.org/10.3389/fpls.2018.01965>>. Acesso em: 24 nov. 2023.

ZUFFO, A.M.; AGUILERA, J.G. **Agronomia: avanços e perspectivas**. Nova Xavantina: Pantanal Ed., 2020. 137 p. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.46420/9786599120862>>. Acesso em: 24 nov. 2023.

A Série Produtor Rural é editada desde 1997 pela Divisão de Biblioteca da Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”/USP e tem como objetivo publicar textos acessíveis aos produtores com temas diversificados e informações práticas, contribuindo para a Extensão Rural.

Série Produtor Rural

USP/ESALQ/DIBD