

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA - UNESP

CÂMPUS DE JABOTICABAL

**SILÍCIO E POTÁSSIO MITIGAM OS DANOS CAUSADOS
PELO DÉFICIT HÍDRICO AO ESTIMULAR O MECANISMO
DE DEFESA ANTIOXIDANTE EM PLANTAS DE FEIJÃO E
DE MILHO**

Patrícia Messias Ferreira

Engenheira Agrônoma

**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA - UNESP
CÂMPUS DE JABOTICABAL**

**SILÍCIO E POTÁSSIO MITIGAM OS DANOS CAUSADOS
PELO DÉFICIT HÍDRICO AO ESTIMULAR O MECANISMO
DE DEFESA ANTIOXIDANTE EM PLANTAS DE FEIJÃO E
DE MILHO**

Patrícia Messias Ferreira

Orientador: Prof. Dr. Renato de Mello Prado

Coorientadora: Dra. Gelza Carliane Marques Teixeira

Coorientador: Dr. Luiz Fabiano Palaretti

Tese apresentada à Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias – Unesp, Câmpus de Jaboticabal, como parte das exigências para a obtenção do título de Doutora em Agronomia (Produção Vegetal).

F383s	Ferreira, Patrícia Messias Silício e potássio mitigam os danos causados pelo déficit hídrico ao estimular o mecanismo de defesa antioxidante em plantas de feijão e de milho / Patrícia Messias Ferreira. -- Jaboticabal, 2025 123 p. Tese (doutorado) - Universidade Estadual Paulista (UNESP), Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Jaboticabal Orientador: Renato de Mello Prado Coorientadora: Gelza Carliane Marques Teixeira 1. Cultivo irrigado. 2. Estresse oxidativo. 3. Elemento benéfico. 4. Mecanismos bioquímicos. 5. Metabolismo antioxidativo. I. Título.
-------	---

Impacto potencial desta pesquisa

A presente tese contribui para a agricultura sustentável ao demonstrar que a aplicação de silício, associada ou não ao potássio, aumenta a tolerância de feijoeiro e milho à seca, diminuindo perdas produtivas e fortalecendo a segurança alimentar. Alinha-se à Agenda 2030 da ONU, contribuindo para os ODS 2 (Fome Zero e Agricultura Sustentável), o ODS 12 (Consumo e Produção Responsáveis) e o ODS 13 (Ação Contra a Mudança Global do Clima).

Potential Impact of this Research

This thesis contributes to sustainable agriculture by demonstrating that the application of silicon, with or without potassium, enhances drought tolerance in common bean and maize, reducing yield losses and strengthening food security. It is aligned with the UN 2030 Agenda, contributing to SDG 2 (Zero Hunger and Sustainable Agriculture), SDG 12 (Responsible Consumption and Production), and SDG 13 (Climate Action).

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO DA TESE: SILÍCIO E POTÁSSIO MITIGAM OS DANOS CAUSADOS PELO DÉFICIT HÍDRICO AO ESTIMULAR O MECANISMO DE DEFESA ANTIOXIDANTE EM PLANTAS DE FEIJÃO E DE MILHO

AUTORA: PATRÍCIA MESSIAS FERREIRA

ORIENTADOR: RENATO DE MELLO PRADO

COORIENTADORA: GELZA CARLIANE MARQUES TEIXEIRA

COORIENTADOR: LUIZ FABIANO PALARETTI

Aprovada como parte das exigências para obtenção do Título de Doutora em Agronomia (Produção Vegetal), pela Comissão Examinadora:



Documento assinado digitalmente

RENATO DE MELLO PRADO

Data: 25/07/2025 17:59:41-0300

Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. RENATO DE MELLO PRADO (Participação Virtual)
Departamento de Ciência do Solo / FCAV UNESP Jaboticabal



Documento assinado digitalmente

JONAS PEREIRA DE SOUZA JÚNIOR

Data: 25/07/2025 21:47:05-0300

Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. JONAS PEREIRA DE SOUZA JÚNIOR (Participação Virtual)
University of Florida (UFL) - Citrus Research and Education Center / Gainesville/Flórida/EUA



Documento assinado digitalmente

KAMILA SILVA OLIVEIRA

Data: 31/07/2025 17:27:36-0300

Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Pós-Doutoranda KAMILA SILVA OLIVEIRA (Participação Virtual)
Departamento de Biologia / FFCLRP USP Ribeirão Preto/SP



Documento assinado digitalmente

ALEXANDRE BARCELLOS DALRI

Data: 31/07/2025 22:16:40-0300

Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. ALEXANDRE BARCELLOS DALRI (Participação Virtual)
Departamento de Engenharia / FCAV UNESP Jaboticabal



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA

Câmpus de Jaboticabal



Pós-doutoranda CINTIA CARMEN DE FARIA MELO (Participação Virtual)
Departamento de Ciência do Solo / FCAV UNESP Jaboticabal



Documento assinado digitalmente

CINTIA CARMEN DE FARIA MELO

Data: 31/07/2025 15:15:55-0300

Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Jaboticabal, 24 de julho de 2025

DADOS CURRICULARES DA AUTORA

PATRÍCIA MESSIAS FERREIRA, nascida em Campo Formoso-BA, Brasil, em 17 de julho de 1997, filha de Maria da Paz Messias Ferreira e Basílio Alves Ferreira. Possui título de Técnica Agrícola com Habilitação em Agropecuária (2014), pelo Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Baiano- Câmpus Senhor do Bonfim, de Engenheira Agrônoma (2019) pela Universidade Federal do Recôncavo da Bahia (UFRB)- Cruz das Almas, BA e de Mestra (2022) pela Universidade Estadual Paulista campus de Jaboticabal - SP (Unesp/FCAV) pelo programa de Pós-graduação em Agronomia (Ciência do Solo). Durante a graduação foi membra do grupo de pesquisa Manejo de Nutrientes no Solo e em Plantas Cultivas (GPNMP), onde realizou pesquisas na área de nutrição de plantas com foco em hortaliças não convencionais e plantas medicinais e aromáticas. Foi bolsista de iniciação científica no período de 2017 a 2019. Durante o curso de Mestrado realizou pesquisas relacionadas ao uso do silício aplicado via fertirrigação na mitigação de estresses abióticos, com foco no excesso de micronutrientes metálicos em tratamento de sementes, como membra do Grupo de Estudos em Nutrição de Plantas da FCAV/UNESP (Genplant). Ainda durante o mestrado foi fez parte da Associação de Pós-graduandos da Unesp (APG), exercendo o cargo de segunda secretária sociocultural. Iniciou o curso de Doutorado pela mesma instituição (Unesp/FCAV) em 2022, realizando pesquisas referentes ao emprego da fertilização silicatada no alívio de déficit hídrico em cultivos de campo, com foco no estudo do sistema de defesa antioxidante vegetal. Em 2024 realizou Doutorado Sanduíche no Exterior, financiado pelo CNPq na School of Plant, Environmental, and Soil Sciences da Universidade Estadual da Luisiana (LSU) em Baton Rouge, Louisiana, EUA, por um período de 6 meses. Desenvolveu pesquisas sobre o uso de fontes de silício na produção de culturas de campo na Louisiana, especificamente na introdução de bactérias solubilizadoras de sílica e na aplicação de materiais ricos em silício na produção de arroz e cana-de-açúcar, e aplicação de bioestimulantes à base de Si para melhorar a produtividade e aliviar o estresse biótico em culturas como trigo, soja e milho.

“O sucesso nasce do querer, da determinação e persistência em se chegar a um objetivo. Mesmo não atingindo o alvo, quem busca e vence obstáculos, no mínimo fará coisas admiráveis”.

(José de Alencar)

Aos meus pais, Maria da Paz Messias Ferreira e Basílio Alves Ferreira (*in
memoriam*).

Dedico

AGRADECIMENTOS

Agradeço à Deus e a mãe santíssima Nossa Senhora Aparecida, pelo Dom da vida. Por ouvir e atender minhas orações, sempre me guiando e me dando forças para continuar e nunca desistir.

Agradeço também a minha família do coração, que me mostram todos os dias que os laços de alma são mais fortes que os laços de sangue, em especial a minha mãe, que mesmo com toda a saudade entende que a distância é necessária neste momento da minha vida e que sempre fez de tudo por mim. A minha madrinha Aurivete, a quem considero como minha segunda mãe, por todo carinho e apoio. A minha irmã do coração, Patrícia Chaves por estar comigo em cada etapa da minha vida, compartilhando os sonhos e vibrando a cada conquista.

Agradeço ao meu orientador, Prof. Renato de Mello Prado, pela oportunidade em realizar o mestrado e o Doutorado sob sua orientação, pelos ensinamentos, preocupação e por toda paciência, por sempre me incentivar e mostrar que as dificuldades e os erros são necessários para nosso aprendizado e crescimento. Aos meus coorientadores Prof. Dr. Luiz Fabiano Palaretti e a Dra. Gelza Carliane Marques Teixeira, por toda colaboração nesta pesquisa, sou imensamente grata.

Agradeço aos amigos que tive a oportunidade de encontrar e conhecer através da Unesp e do GENPLANT, como o Milton, Jonas, Edilaine, Cíntia, Paulo, e em especial ao Carlos Vital, por toda parceria e colaboração nos trabalhos de campo e, principalmente na realização das análises bioquímicas. A Kamilla, que foi minha parceira de intercâmbio e dividiu comigo todas as dificuldades e alegrias que essa experiência nos proporcionou. Obrigada por toda ajuda científica e momentos de descontração.

Agradeço ao meu querido namorado Jake, por tanto acreditar em mim e sempre me apoiar, principalmente nos dias mais. Obrigada por sempre me incentivar e nunca me deixar esquecer de que eu consigo sim, e que você sempre estará ao meu lado.

Agradeço ao departamento de Ciências da Produção Agrícola e a técnica do laboratório de Nutrição de Plantas, Claudinha e ao senhor Adalto, pela paciência e colaboração durante as coletas e análises dos experimentos.

Agradeço ao departamento de Biologia, em especial a técnica Sônia Maria (Soninha, carinhosamente), por todo apoio e ensinamentos durante a realização das minhas análises, por sempre ser tão acolhedora, por todo carinho e cuidado e atenção para comigo, sou imensamente grata. Sou grata também a Profa. Priscila Lupino Gratão, pela colaboração na realização das análises, por sempre estar disponível para me ajudar e tirar dúvidas quantos aos resultados e procedimentos das análises. Ao Clebson que tanto me ensinou e me ajudou na realização das análises enzimáticas.

A Fapesp (Fundação de Amparo à Pesquisa do estado de São Paulo) pelo auxílio à pesquisa (Processo 2021/12531-7) e a CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior) pela bolsa de estudos concedida.

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

A todos, muito abrigada!

SUMÁRIO

	Página
RESUMO	iii
ABSTRACT -.....	iv
CAPÍTULO 1 - CONSIDERAÇÕES GERAIS	1
1 Introdução	1
2 Revisão de literatura.....	5
2.1 Avanço da irrigação no cultivo de plantas de feijão e de milho	5
2.2 Déficit hídrico e os impactos no sistema de defesa antioxidante das plantas	8
2.3 O papel do Si e do K na modulação do sistema de defesa antioxidante na tolerância das plantas a restrição hídrica	12
2.4 Perspectivas futuras.....	17
2.5 Conclusões	17
3 Referências	19
CAPÍTULO 2 - SILÍCIO IMPULSIONA EQUILÍBRIO ANTIOXIDANTE PARA ATENUAR OS EFEITOS DA DEFICIÊNCIA HÍDRICA EM FEJOEIRO CULTIVADO EM CAMPO COM E SEM APLICAÇÃO DE POTÁSSIO	35
RESUMO	35
ABSTRACT -.....	36
1 Introdução	37
2 Material e métodos	39
2.1 Condições de crescimento e material vegetal	39
2.2 Tratamentos e delineamento experimental	42
2.3 Análises realizadas.....	45
2.4 Análise estatística.....	47
3. Resultados	48
4. Discussão.....	60
4.1 Danos causados às plantas de feijão expostas ao déficit hídrico	60
4.2 Si mitiga o déficit hídrico no feijoeiro por estimular o sistema antioxidante enzimático e não-enzimático de defesa.....	62
5. Conclusão	64
6 Referências	65
CAPÍTULO 3 - O USO DO SILÍCIO PERMITE DIMINUIR NÍVEL DE IRRIGAÇÃO SEM CAUSAR PREJUÍZO NA CULTURA DO MILHO EM	

CAMPO POR OTIMIZAR O SISTEMA DE DEFESA ANTIOXIDANTE DA PLANTA	80
RESUMO	80
ABSTRACT	81
1 Introdução	82
2 Material e métodos	85
2.1 Condições de crescimento e material vegetal	85
2.2 Tratamentos e delineamento experimental	87
2.3 Análises realizadas	90
2.4 Análise estatística	93
3 Resultados	94
3.1 Conteúdo de MDA, prolina e compostos fenólicos em plantas de milho	94
3.2 Atividade de enzimas antioxidantes em plantas de milho	96
3.3 Acúmulo de Si, K e Biomassa da parte aérea de plantas de milho	99
4. Discussão	105
4.1 Efeito do estresse hídrico em plantas de milho cultivadas em campo	105
4.2 Influência do Si na atividade antioxidante enzimática e não enzimática na diminuição do estresse oxidativo em plantas de milho	106
5 Conclusões	108
6 Referências	110
CAPÍTULO 4 - CONSIDERAÇÕES FINAIS	123

SILÍCIO E POTÁSSIO MITIGAM OS DANOS CAUSADOS PELO DÉFICIT HÍDRICO AO ESTIMULAR O MECANISMO DE DEFESA ANTIOXIDANTE EM PLANTAS DE FEIJÃO E DE MILHO

RESUMO - As plantas de feijão comum e de milho são sensíveis ao déficit hídrico e uma estratégia para reverter esses danos seria com emprego do silício (Si) e potássio (K), mas faltam pesquisas em cultivos em campo explorando os mecanismos antioxidativos envolvidos na diminuição do estresse. Realizou-se essa pesquisa objetivando investigar a resposta bioquímica de plantas de feijão e de milho sob três níveis hídricos e doses de Si via fertirrigação na ausência e na presença da fertilização potássica. Para tanto, foram desenvolvidos dois experimentos em campo em Latossolo Vermelho eutrófico (teor de K: 6,4 mmol_c dm⁻³) com a cultura do feijão e do milho sem (-K) e com (+K) adubação potássica. Ambos os experimentos foram constituídos por um fatorial 3x4: três regimes hídricos: 80%, 60% e 40% da capacidade de retenção de água no solo e quatro doses de Si: 0; 4; 8 e 12 kg⁻¹ fornecidas via fertirrigação, em esquema de parcela sub-dividida, dispostos em delineamento de blocos casualizados, com quatro repetições. As análises bioquímicas realizadas foram: atividade de enzimas antioxidantes (SOD, EC 1.15.1.1; APX, EC 1.11.1.11 e GPOX, EC 1.11.1.7); conteúdo de prolina; compostos fenólicos; peroxidação lipídica; produção de massa seca e acúmulo de Si e K na parte aérea. A fertilização com Si via fertirrigação, mesmo em doses relativamente baixas (4 a 8 kg ha⁻¹), demonstrou ser uma estratégia eficaz para o cultivo sustentável tanto do feijoeiro quanto do milho, especialmente em condições de restrição hídrica moderada a severa, independentemente da fertilização complementar com potássio (K). No feijoeiro, a aplicação de Si favoreceu sua absorção em níveis suficientes para modular os mecanismos de defesa antioxidante, tanto enzimáticos quanto não enzimáticos. De forma semelhante, no milho, a fertirrigação com Si melhorou a tolerância ao déficit hídrico ao aumentar a atividade de enzimas antioxidantes (SOD, APX e GPOX), diminuir a peroxidação lipídica, estimular a síntese de compostos fenólicos e promover o acúmulo de osmólitos protetores, como a prolina. Além disso, contribuiu para o equilíbrio de nutrientes, como o K, resultando em maior acúmulo de matéria seca em plantas submetidas ao estresse hídrico. Assim, a fertirrigação silicatada pode ser considerada uma prática promissora para melhorar os parâmetros bioquímicos e a resiliência de plantas de feijão e milho ao cultivo sob déficit hídrico.

Palavras-chaves: Cultivo irrigado, estresse oxidativo, elemento benéfico, mecanismos bioquímicos, metabolismo antioxidativo

SILICON AND POTASSIUM MITIGATES DAMAGE CAUSED BY WATER DEFICIT BY STIMULATING THE ANTIOXIDANT DEFENSE MECHANISM IN BEAN AND CORN PLANTS

ABSTRACT - Common bean and corn plants are sensitive to water deficit, and one strategy to reverse this damage would be to use silicon (Si) and potassium (K), but there is a lack of research on field crops exploring the antioxidant mechanisms involved in reducing stress. This research was conducted to investigate the biochemical response of bean and corn plants under three water levels and doses of Si via fertigation in the absence and presence of potassium fertilization. To this end, two field experiments were developed in Oxisol (K content: 6.4 mmolc dm⁻³) with bean and corn crops without (-K) and with (+K) potassium fertilization. Both experiments consisted of a 3x4 factorial design: three water regimes: 80%, 60%, and 40% of the soil water retention capacity and four doses of Si: 0; 4; 8, and 12 kg-1 supplied via fertigation, in a split-plot scheme, arranged in a randomized block design, with four replicates. The biochemical analyses performed were: antioxidant enzyme activity (SOD, EC 1.15.1.1; APX, EC 1.11.1.11 and GPOX, EC1.11.1.7); proline content, phenolic compounds; lipid peroxidation; dry mass production and Si and K accumulation in the aerial part. Si fertilization via fertigation, even at relatively low doses (4 to 8 kg ha⁻¹), proved to be an effective strategy for the sustainable cultivation of both beans and corn, especially under moderate to severe water stress conditions, regardless of complementary potassium (K) fertilization. In common bean plants, the application of Si promoted its absorption at levels sufficient to modulate both enzymatic and non-enzymatic antioxidant defense mechanisms. Similarly, in maize, fertigation with Si improved drought tolerance by increasing the activity of antioxidant enzymes (SOD, APX, and GPOX), reducing lipid peroxidation, stimulating the synthesis of phenolic compounds, and promoting the accumulation of protective osmolytes such as proline. In addition, it contributed to the balance of nutrients such as K, resulting in greater dry matter accumulation in plants subjected to water stress. Therefore, silicon fertigation can be considered a promising practice to improve biochemical parameters and enhance the resilience of common bean and maize plants cultivated under water deficit conditions.

Keywords: Irrigated cultivation, oxidative stress, beneficial element, biochemical mechanisms, antioxidant metabolism

CAPÍTULO 1 - Considerações gerais

1 Introdução

A escassez de água doce representa uma ameaça crescente e grave à sustentabilidade global, especialmente em regiões que já enfrentam condições de limitação hídrica (Aqaei et al., 2020; Hejazi et al., 2023). Esse problema tem se agravado de forma alarmante devido as mudanças climáticas, e como consequência tem se observado períodos de escassez hídrica mais longos, intensos e com maior frequência (Fang et al., 2023; Ingrao et al., 2023; Zahra et al., 2023). Esse problema da seca prejudica a produtividade e qualidade das colheitas, por diminuir o teor de água nos tecidos vegetais, limitando as funções metabólicas e os aspectos fisiológicos e bioquímicos nas plantas (Aqaei et al., 2020; Seleiman et al., 2021a).

O déficit hídrico é considerado um estresse abiótico multidimensional de extrema relevância para a agricultura, sendo fator limitante não apenas a produção energética, mas também a segurança alimentar global (Abbas et al., 2023). Esse cenário torna-se particularmente crítico em decorrência do acelerado crescimento populacional, que intensifica progressivamente a demanda por alimentos (O'Connell, 2017; Chieb and Gachomo, 2023).

Os efeitos do estresse pelo déficit hídrico nas plantas são severos pela diminuição no conteúdo de água na planta (Teixeira et al., 2020), do potencial hídrico (de oliveira filho et al., 2021) e pelo desequilíbrio do ajuste osmótico (Pei et al., 2009), principalmente devido ao aumento da transpiração foliar (Verma et al., 2021). Em condições controladas, o déficit hídrico geralmente causa prejuízos ao sistema antioxidante, diminuição na ação de compostos antioxidantes enzimáticos e não-enzimáticos (Seleiman et al., 2021a; Weisany et al., 2023a; Younes et al., 2024a). Esse comprometimento promove o estresse oxidativo, mediado pela produção excessiva de espécies reativas de oxigênio (ERO), como o oxigênio singlete ($^1\text{O}_2$), superóxido (O_2^-), peróxido de hidrogênio (H_2O_2) ou radical hidroxila ($\text{OH}^\cdot$) nas células (GRATÃO *et al.*, 2005). Em

contraste, plantas de milho cultivadas em campo sob déficit hídrico apresentam aumento na atividade de enzimas antioxidantes (SOD, POX, CAT, APX e GR), e no conteúdo de prolina (Yousaf et al., 2022a; Al-Mokadem et al., 2023a). Esse incremento na atividade antioxidante ocorreu mesmo diante do incremento de indicadores de estresse oxidativo (H_2O , conteúdos de MDA e $OH^\cdot$), e da diminuição da eficiência do uso da água (WUE) e da atividade fotossintética. Curiosamente, essa ativação do sistema de defesa antioxidante não foi suficiente para mitigar os efeitos negativos do déficit hídrico, refletidos na diminuição no rendimento e na qualidade dos grãos. Adicionalmente, em plantas de feijão-caupi foi observado que o estresse hídrico em condições de campo diminuiu o potencial hídrico foliar e aumentou a atividade enzimática atingindo 85% na APX e 231% na CAT, além do conteúdo de prolina e açúcares solúveis, (Cavalcante et al., 2024)

O aumento de ERO induz a oxidação de proteínas, DNA e lipídeos (H. A. Hussain et al., 2020a; Shemi et al., 2021a; Yousaf et al., 2022a). Isso ocorre devido a transferência de energia para o O_2 , originando o oxigênio singleto ($^1O_2$) a partir da transferência de até três elétrons para o O_2 , formando superóxido ($O_2^\cdot$), peróxido de hidrogênio (H_2O_2) e radical hidroxila ($OH^\cdot$), levando a peroxidação lipídica das membranas celulares e de outros compostos (Gill and Tuteja, 2010a). Portanto, a desintoxicação celular de ERO é um mecanismo de defesa extremamente importante nas plantas para resiliência ao déficit hídrico (Shehzad and Mustafa, 2023).

O mecanismo de defesa antioxidante da planta é primordial a partir da ação de enzimas como a superóxido dismutase (SOD, EC 1.15.1.1), a ascorbato peroxidase (APX, EC 1.11.1.11) e a guaiacol peroxidase (GPOX, EC1.11.1.7), além de antioxidantes não enzimáticos com a prolina e os compostos fenólicos (Hua et al., 2020; Al-Mokadem et al., 2023a). A SOD atua na dismutase do $O_2^\cdot$ em H_2O_2 enquanto a APX e a GPX na desintoxicação de H_2O_2 transformando-o em H_2O (Gratão et al., 2005; Hua et al., 2020). Além disso, a contribuição de agentes não-enzimáticos de defesa, como a prolina que é um essencial agente osmótico, desempenham papel importante na sinalização metabólica, enquanto os compostos fenólicos que são cruciais na desintoxicação do excesso de

peróxido de hidrogênio em células vegetais (Ahammed et al., 2020; Bashir et al., 2021).

A deficiência hídrica pode desencadear efeitos secundários no metabolismo vegetal, limitando a absorção e o transporte de nutrientes e se destaca o potássio (K^+) (Hu and Schmidhalter, 2005; Qi et al., 2019). Esse cátion desempenha um papel fundamental em diversos processos fisiológicos e bioquímicos nas plantas, incluindo a regulação da abertura e fechamento estomático, ajuste osmótico celular, manutenção do potencial hídrico e estabilidade da pressão de turgor celular (de Mello Prado, 2021a; R. Johnson et al., 2022a), melhorando as relações hídricas e aumentando a eficiência do uso da água (WUE) em plantas estressadas pela seca (Egilla et al., 2005). No entanto, a deficiência de K agravada pela escassez hídrica prejudica muito o metabolismo e a resistência das plantas por desencadear o agravamento do estresse oxidativo (R. Johnson et al., 2022a). Esse efeito ocorre devido ao comprometimento da regulação estomática e fixação fotossintética de CO_2 , limitando a conversão de energia luminosa em energia química. Como consequência, há diminuição no transporte de fotoassimilados pelo floema para os órgãos drenos (Cakmak, 2005; Sardans and Peñuelas, 2021).

As ações para mitigar os efeitos da seca nos cultivos e garantir a segurança alimentar e hídrica no atual e futuro cenário global são urgentes. Dessa forma, é importante buscar meios de intensificar o uso racional da água nos cultivos agrícolas (Besharat et al., 2020) e ao mesmo tempo estratégias para aumentar a resiliência dos cultivos.

Apesar dos diferentes mecanismos que as plantas desenvolvem para garantir a sobrevivência em condições de seca (Shehzad and Mustafa, 2023) tem-se uma estratégia adicional promissora a partir do uso do silício (Rakesh et al., 2024a). O fornecimento de Si é uma estratégia benéfica às plantas sob condições de estresses, porque diminuem os danos oxidativos causados pelas ERO ao diminuir o conteúdo de H_2O_2 , e a peroxidação lipídica (Rakesh et al., 2024a; Younes et al., 2024a). Isso ocorre devido aos múltiplos benefícios proporcionados pelo Si, incluindo o aumento do sistema de defesa enzimático e não enzimático da planta, que atuam conjuntamente para proteger as

membranas celulares, minimizando os danos oxidativos decorrentes da peroxidação lipídica (Zargar et al., 2019).

O Si pode melhorar diferentes aspectos na fisiologia vegetal, como a absorção de nutrientes, a fotossíntese, a regulação hormonal (Pereira et al., 2024) e diminuição do dano oxidativo (Moldes et al., 2013), por induzir a transcrição de genes envolvidos como resposta de defesa (Liang et al., 2007; Khandekar and Leisner, 2011; Alberto Moldes et al., 2013). O Si ainda pode também estimular a absorção de K em plantas de soja (MIAO *et al.*, 2010) e milho (dos Santos Sarah et al., 2021b) e consequentemente aumenta o teor de clorofila e as taxas fotossintéticas em plantas de sorgo (Chen et al., 2016a) e feijão (Gonzalez-Porras et al., 2024), e melhorar a eficiência do uso da água e o equilíbrio nutricional em plantas de feijão cultivado em condições de campo (Teixeira et al., 2024). Nesta situação, o Si é relevante na diminuição do estresse oxidativo (Teixeira et al., 2021) pois diminui as concentrações de H_2O_2 nas células vegetais (Irfan et al., 2023) devido a regulação da expressão de alguns genes como *TaSOD*, *TaCAT* e *TaAPX* (Ma et al., 2016a). Isso induz a ativação enzimática responsáveis por neutralizar e eliminar o excesso de ERO nas células vegetais (Mahmoud et al., 2023; Sharf-Eldin et al., 2023; Li et al., 2024a).

A estratégia ainda pouco discutida é a interação do Si e do K pois esses dois elementos têm envolvimento na eficiência no uso da água ao modular o sistema de defesa antioxidante que é o maior desafio da agricultura com avanço das mudanças climáticas. A estratégia ainda pouco discutida é a interação do Si e do K, pois esses dois elementos têm envolvimento na eficiência no uso da água ao modular o sistema de defesa antioxidante — aspecto que se torna ainda mais crítico diante dos impactos fisiológicos e bioquímicos desencadeados pelo déficit hídrico nas plantas. Esses efeitos, bem como os mecanismos antioxidantes envolvidos, serão abordados em detalhe na seção específica desta revisão.

O objetivo desta revisão é discutir a relevância da seca e da deficiência nutricional em danos oxidativos nos cultivos e o papel do silício e do potássio no sistema de defesa antioxidante para potencializar a eficiência do uso da água e incluir as perspectivas futuras da pesquisa neste tema.

2 Revisão de literatura

2.1 Avanço da irrigação no cultivo de plantas de feijão e de milho

Diante do avanço das mudanças climáticas tem incrementado a frequência de seca nos diferentes cultivos e isso tem ampliado a necessidade de irrigação.

A irrigação é uma prática agrícola essencial para garantir a produtividade e a segurança alimentar, especialmente em regiões onde a distribuição de chuvas é irregular ou insuficiente (Darko et al., 2016). Com o avanço tecnológico e o aumento da demanda por alimentos, os sistemas de irrigação aliados a novas estratégias de economia de água, têm sido amplamente estudados e implementados para otimizar a eficiência do uso desse recurso. Nesse contexto, busca-se cada vez mais desenvolver tecnologias sustentáveis e inovadoras com objetivo de diminuir desperdícios e aumentar o rendimento das colheitas, especialmente em cultivos de feijão e de milho (Darko et al., 2016; Al-Mokadem et al., 2023a; Awad et al., 2024)

No entanto, apesar da sua importância, a agricultura irrigada é responsável por aproximadamente 40% da produção global de alimentos, demandando, no entanto, um volume significativo de água doce – o que corresponde a mais de 70% do total disponível (Elshamly, 2023a; Awad et al., 2024). Esse cenário é ainda mais crítico devido a intensificação da seca consolidando-se como o maior desafio para a produção agrícola em todo o mundo, especialmente em regiões áridas e semiáridas (Ingrao et al., 2023; Awad et al., 2024). Nesse contexto, a irrigação torna-se uma ferramenta indispensável para garantir a estabilidade da produção dessas culturas, sob mudanças climáticas (Darko et al., 2016), tornando-se então essencial desenvolver métodos mais eficientes e sustentáveis para o uso da água na irrigação, garantindo assim a manutenção da produtividade dessas culturas.

A adoção de tecnologias mais eficientes de irrigação permite expandir a área irrigada e otimizar o uso dos recursos hídricos, podendo elevar a produtividade das culturas entre 10% e 30% em comparação com sistemas não

irrigados (Darko et al., 2016), o que representa grande potencial para impulsionar a produção agrícola globalmente, especialmente de cultivos anuais de feijão milho. Pesquisas realizadas sob condições de deficiência hídrica em feijoeiro comum indicam que a escassez de água durante estágios críticos de desenvolvimento, como a floração e o enchimento de grãos, pode diminuir o rendimento próximo de 36% (Rivera, 2024), dado à interferência na formação de vagens e no desenvolvimento dos grãos (Heshmat et al., 2021). Além disso, estudos recentes evidenciaram que a absorção de nutrientes, a taxa fotossintética, o conteúdo relativo de água (CRA), a biomassa da parte aérea e o rendimento de grãos em plantas de feijão, são significativamente diminuídos sob condições de estresse hídrico quando comparados à irrigação ótima (Heshmat et al., 2021; Gonzalez-Porras et al., 2024; Teixeira et al., 2024). Outro aspecto relevante a ser considerado, é a eficiência no uso da água na cultura do feijoeiro (H. A. Webber et al., 2006; Darko et al., 2016), parâmetro fundamental para a sustentabilidade da irrigação. Esses autores observaram que o feijão-comum apresenta menor eficiência no uso da água sob déficit hídrico, o que sugere que essa cultura não é tão adaptada a condições de escassez hídrica quanto outras cultivares.

As poáceas são altamente sensíveis ao estresse hídrico, especialmente durante os estágios vegetativo e reprodutivo (Ge et al., 2012; Al-Mokadem et al., 2023a). A restrição hídrica prejudica o desenvolvimento das plantas, por não atender o consumo hídrico entre 390 e 575 mm de água por ano do cultivo em condição de seca (Çakir, 2004). Existem relatos em cultivos em ambiente controlado que em condições moderadas e severas de déficit hídrico (60% e 40% da capacidade de campo) causam estresse oxidativo, aumentando a produção de espécies reativas de oxigênio (ERO) e diminuindo o crescimento e o rendimento em diferentes híbridos de milho (Anjum et al., 2017a; Parveen et al., 2019), e ainda aumentar a atividade de enzimas antioxidantes (SOD, POD, CAT, APX, GR) e conteúdo de prolina e compostos fenólicos, em comparação com a condição de irrigação ótima (Anjum et al., 2017).

As plantas cultivadas em campo sob déficit hídrico apresentaram maior estresse oxidativo, devido ao incremento nos conteúdos de MDA, H_2O_2 , e $OH^\cdot$ (Yousaf et al., 2022a), diminuição da eficiência no uso da água (WUE) e atraso

na maturação de grãos, sob estresse hídrico severo (35% da capacidade de campo) (Ge et al., 2012). Em adição, a diminuição da água disponível no solo (AW) para 80% e 60% diminuíram a altura das plantas em 23% e 42%, o comprimento e diâmetro da espiga em 43% e 62%; 44% e 70%, o número de grãos por espiga em 14% e 36,08%, e o rendimento em até 10% e 22%, respectivamente, comparado com 100% de AW. Além disso, o déficit hídrico também diminui os teores de clorofila, atividade fotossintética e teores de nutrientes como N, P, K e Si nos grãos (Al-Mokadem et al., 2023a).

Nesse contexto, é necessário adotar práticas que promovam a eficiência no uso da água e a sustentabilidade dos sistemas produtivos, tais como investimentos em pesquisa e desenvolvimento de tecnologias de irrigação, aliados ao manejo adequado das culturas, são cruciais para garantir a segurança alimentar e a resiliência da produção dessas culturas em um contexto de mudanças climáticas.

As técnicas como irrigação suplementar e o manejo adequado da água são essenciais para mitigar esses efeitos, a exemplo da adoção de irrigação deficitária controlada, e de sistemas de irrigação de precisão, como o gotejamento (Sezen et al., 2005, 2008) e o uso de cultivares mais tolerantes ao estresse hídrico (Anjum et al., 2017a; Papathanasiou et al., 2022; Mladenov et al., 2023). Existem outras estratégias promissoras na mitigação do déficit hídrico como a fertirrigação com o Si (Al-Mokadem et al., 2023a; Gonzalez-Porras et al., 2024; Teixeira et al., 2024) e aplicação de nutrientes como o potássio (K) (Heshmat et al., 2021; Weisany et al., 2023a). Isso é benéfico porque induz mecanismos como a ativação de enzimas antioxidantes e o acúmulo de osmoprotetores, bem como melhor assimilação de nutrientes.

Perspectivas futuras incluem a adoção de tecnologias sustentáveis aliadas a métodos mais eficazes de irrigação, que melhora o aproveitamento da água e dos fertilizantes, contribuindo para o aumento da produtividade agrícola (Yan et al., 2021; Elshamly, 2023a; Elshamly and Abaza, 2024a). A combinação de irrigação de precisão com fertilizantes e bioestimulantes como o Si apresenta-se como uma estratégia promissora para revolucionar o manejo hídrico nos cultivos ao diminuir o consumo de água sem comprometer o crescimento e

produção. Isso é essencial para enfrentar os desafios atuais e futuros da agricultura, diante da crescente necessidade de otimizar o uso dos recursos hídricos e garantir a sustentabilidade ambiental.

2.2 Déficit hídrico e os impactos no sistema de defesa antioxidante das plantas

O déficit hídrico é caracterizado pela insuficiência de água doce para atender as demandas das atividades humanas e dos ecossistemas, resultando em um baixo teor de umidade no solo, que é consequência de eventos climáticos naturais, como as secas (Balint et al., 2013). As secas representam um dos maiores desafios para a agricultura atualmente, caracterizando-se como um estresse multidimensional devido a sua natureza recorrente de difícil previsão, não sendo restrito a uma região ou a um período específico (Salehi-Lisar and Bakhshayeshan-Agdam, 2016). É um fenômeno climático associado a períodos prolongados de estiagem e de baixa precipitação comprometendo diretamente a disponibilidade hídrica principalmente para as atividades agrícolas – cenário este que vem se intensificando diante das mudanças climáticas globais (Fang et al., 2023; Ingrao et al., 2023; Zahra et al., 2023).

Na agricultura, o déficit hídrico pode ser classificado em estágios distintos de estresse, leve, moderado e severo baseadas no conteúdo relativo de água (RWC) das plantas (Laxa et al., 2019a). Os autores complementam por exemplo, em condições de estresse leve, o RWC varia entre 60-70%, estresse moderado entre 40–60%, enquanto em estresse severo pode cair para menos de 40%, comparado com o controle que é $\geq 90\%$. Esses estágios refletem a progressão da severidade do déficit hídrico, que pode ser alcançada rapidamente em solos com baixa capacidade de retenção de água.

O agravamento do déficit hídrico inicia quando a perda de água por transpiração excede a absorção pelas raízes, diminuindo o potencial hídrico foliar (Ψ_{md}), a condutância estomática e a assimilação de carbono, comprometendo, portanto, o crescimento e o rendimento das culturas (Avila et al., 2021). O baixo conteúdo hídrico também afeta a atividade de enzimas sacarolíticas, como as invertases ácidas da parede celular, o que reflete em

menor partição de carbono das folhas para os órgãos dreno (Chen et al., 2019; Du et al., 2020). Como resultado, há acúmulo de açúcares redutores, açúcares solúveis e amido nas folhas, enquanto o suprimento de carboidratos para os órgãos reprodutivos é limitado, havendo também maior acúmulo de espécies reativas de oxigênio e consequentemente o dano oxidativo (Avila et al., 2021).

O metabolismo aeróbico naturalmente resulta na formação de moléculas altamente reativas e tóxicas nas células vegetais, denominadas espécies reativas de oxigênio (ERO). Em condições normais, são produzidas em níveis baixos em organelas como cloroplastos, mitocôndrias e peroxissomos, sendo os fotossistemas II (PSII) e I (PSI) nos tilacoides dos cloroplastos as principais fontes desses compostos (Gill and Tuteja, 2010a; Sharma et al., 2012a).

ERO é um termo coletivo que inclui radicais de oxigênio, como o ânion superóxido (O_2^-), radical hidroxila ($OH^\cdot$), peroxila ($ROO^\cdot$), etc., bem como outras não radicais como oxigênio singleto ($^1O_2$), peróxido de hidrogênio (H_2O_2) e o ozônio (O_3), etc., (Gratão et al., 2005; Gill and Tuteja, 2010a; Sharma et al., 2012a; Del Río, 2015). Em condições de déficit hídrico, a superprodução desses compostos leva ao que se conhece por "estresse oxidativo", que ocorre quando os mecanismos de defesa antioxidante não conseguem controlar os níveis de ERO produzidos (Sharma et al., 2012a), indicando que há um desequilíbrio entre a produção e a capacidade do sistema de defesa antioxidante em eliminá-los eficientemente. Em altas concentrações, essas moléculas são extremamente citotóxicas, causando sérios danos oxidativos nas células, por danificar macromoléculas essenciais, ocasionando a peroxidação de lipídios, oxidação de proteínas, danos ao DNA, inibição enzimática, e, em último caso à morte celular programada (H. A. Hussain et al., 2020a; Shemi et al., 2021a; Yousaf et al., 2022a).

Durante condições de estresse por déficit hídrico as plantas tendem a apresentar mecanismo imediatos para lidar com tais condições, sendo a primeira reação o fechamento dos estômatos, que é uma estratégia eficiente para diminuir a perda de água por transpiração (Sharma et al., 2012a; Ahluwalia et al., 2021a). No entanto, essa ação se torna danosa, pois embora o fechamento estomático mitigue a transpiração, ele limita a entrada de CO_2 nas folhas, afetando

negativamente a fotossíntese (Chiappero et al., 2019; Laxa et al., 2019; Abbas et al., 2023). Quando a energia luminosa absorvida excede a capacidade de assimilação de CO₂ em condição de déficit hídrico há uma superprodução de ERO, e isso ocorre porque quando o CO₂ está em baixa concentração ocorre um processo de oxigenação da enzima Rubisco (ribulose-1,5-bisfosfato), conhecido como fotorrespiração, processo este que causa aumento da produção de H₂O₂ nos peroxissomos (Laxa et al., 2019). Além disso, a diminuição de CO₂ afeta as reações do ciclo de Calvin-Benson, por diminuir a oxidação do NADPH e o consumo de ATP, levando ao acúmulo de elétrons e à redução excessiva da cadeia de transporte de elétrons (Chiappero et al., 2019). Isso resulta na redução do oxigênio como acceptor alternativo de elétrons no fotossistema I (PSI), gerando ânion superóxido (O₂•⁻) e H₂O₂, diminuindo a regeneração dos aceitadores de elétrons (NADP⁺, NAD⁺, FAD), o que facilita a transferência de elétrons da cadeia de transporte de elétrons para o oxigênio, acarretando em uma maior produção de ERO. (Robinson and Bunce, 2000; Laxa et al., 2019).

Os danos causados pelos ERO às plantas são altamente severos, incluindo a peroxidação lipídica, danos as proteínas e ao DNA (Gill and Tuteja, 2010a; Sharma et al., 2012). O excesso de ERO causa danos consideráveis às proteínas, levando à inativação de enzimas e aumentando sua susceptibilidade à degradação por meio de processos como nitrosilação, carbonilação, formação de ligações dissulfeto e glutationilação, podendo ainda as proteínas podem sofrerem modificações indiretas ao se conjugarem com produtos resultantes da peroxidação de ácidos graxos (Yamauchi et al., 2008). O DNA também é comprometido pela oxidação da desoxirribose e rupturas nas cadeias, o que pode resultar em mutações e instabilidade genômica, e ainda desencadear processos como apoptose (morte celular programada), necrose, desidratação acelerada e, em situações extremas, a morte da planta (Sharma et al., 2012a).

A peroxidação lipídica representa um dos principais mecanismos de dano oxidativo em sistemas biológicos, caracterizado pela degradação oxidativa de lipídeos de membrana, mediado pelo excesso de ERO (Gill and Tuteja, 2010a; Sharma et al., 2012a). É um processo no qual há a produção de radicais derivados de lipídios como peroxilipídicos e hidroperoxilipídicos, altamente

reativos (Gill and Tuteja, 2010a). Os efeitos dessa peroxidação incluem o aumento da fluidez e da permeabilidade da membrana celular, resultando no rompimento da membrana e no extravasamento de eletrólitos e outros componentes essenciais (Gill and Tuteja, 2010a; Sharma et al., 2012a).

Foi reconhecido que durante a peroxidação lipídica alguns produtos são formados a partir de precursores poliinsaturados que incluem pequenos fragmentos de hidrocarbonetos, como o MDA, um subproduto frequentemente utilizado como indicador de dano celular e como parâmetro para avaliar a tolerância das plantas ao estresse hídrico (Yamauchi et al., 2008; Garg and Manchanda, 2009; Chiappero et al., 2019; Marques et al., 2019). O aumento na peroxidação lipídica também foi relatado em muitas plantas sob estresse por restrição hídrica, como por exemplo, em feijoeiro (Mombeni and Abbasi, 2019), grão de bico (Gunes et al., 2007), girassol (Gunes et al., 2008), lentilha (Biju et al., 2017a), cana-de-açúcar e cana-energia (Teixeira et al., 2022b) e milho (de Sousa Leite et al., 2023).

O acúmulo excessivo de ERO é neutralizado por sofisticados e eficientes sistemas defesa antioxidante, que regulam os níveis intracelulares dessas moléculas, mantendo um equilíbrio entre sua produção e eliminação (Gill and Tuteja, 2010a). Esses sistemas incluem uma variedade de enzimas, como superóxido dismutase (SOD), a ascorbato peroxidase (APX) e a guaiacol peroxidase (GPOX), além de metabolitos não enzimáticos, como a prolina e os compostos fenólicos (Hua et al., 2020; Al-Mokadem et al., 2023a; Shehzad and Mustafa, 2023). O balanço entre a geração de ERO e a atividade das enzimas antioxidantes determina se ocorrerá sinalização celular ou dano oxidativo (sharma et al., 2012; Kaur et al., 2019). De acordo com os mesmos autores, sob condições de déficit hídrico, o desequilíbrio entre o acúmulo de ERO e a capacidade do sistema antioxidante pode levar a danos oxidativos generalizados, comprometendo a sobrevivência celular.

Esses componentes atuam cooperativamente para desintoxicar as células, neutralizando os ERO e protegendo-as dos danos oxidativos, garantindo assim a manutenção das funções metabólicas essenciais e o desenvolvimento vegetal (Shehzad and Mustafa, 2023). A SOD, EC 1.15.1.1 atua na dismutase do O_2^- em H_2O_2 enquanto a APX, EC 1.11.1.11 e a GPOX, EC1.11.1.7 atuam na

desintoxicação de H_2O_2 transformando-o em H_2O (Gratão et al., 2005; Hua et al., 2020). Além disso, existe a contribuição de agentes não-enzimáticos de defesa, como os compostos fenólico e a prolina. O aumento da concentração de prolina é uma resposta notável em plantas expostas ao déficit hídrico, sendo considerado um metabólito vegetal versátil, isso porque além de ser um importante osmoprotetor, a prolina pode desempenhar um papel crucial como um sinal metabólico (Ahammed et al., 2020), ainda atuando no incremento do potencial redox nas células, contribuindo para reposição do suprimento de NADP^+ (Hassine et al., 2008), fornecendo proteção contra diferentes tipos de ERO, como peróxido de hidrogênio, radicais hidroxila e também oxigênio singlete (Rehman et al., 2021). Os compostos fenólicos também contribuem para o controle e eliminação de ERO nas células vegetais, isso acontece porque os fenóis são metabólitos secundários produzidos pelas atividades metabólicas com propriedades antioxidantes, os quais atuam bloqueando diferentes reações oxidativas, eliminando radicais livres, além de servirem como substrato para algumas enzimas como as peroxidases (Mukarram et al., 2022).

2.3 O papel do Si e do K na modulação do sistema de defesa antioxidante na tolerância das plantas a restrição hídrica

O silício (Si) é um dos elementos minerais mais abundantes na crosta terrestre, depois do oxigênio (Zhu et al., 2020), sendo responsável por até 28% do peso da crosta terrestre, e o dióxido de silício (SiO_2) compreende aproximadamente 50-70% da massa do solo (Epstein, 1994). Ocorre em muitas formas no solo, principalmente na forma de minerais de silicato, aluminossilicatos secundários e diferentes formas de dióxido de silício (Tubaña and Heckman, 2015). No tecido vegetal, o teor de Si encontra-se entre 0,1 a 10% do peso seco, variando entre as espécies de plantas (Hodson et al., 2005). E com base nisso, as plantas foram divididas em três grupos: (i) não acumuladoras ou excludentes (ii) acumuladores intermediários; e (iii) acumuladores, as quais devem apresentar respectivamente o teor de Si por massa seca correspondente a: <0,5%; 0,5–1% e >1% (Ma et al., 2002). De modo geral, espécies monocotiledôneas da família Poaceae são conhecidas como acumuladores de Si, por apresentarem níveis mais elevados de acumulação de Si (10-15%) em

comparação com outras espécies eudicotiledôneas (0,5% ou menos) (Hodson et al., 2005).

Embora não seja considerado essencial para o desenvolvimento normal das plantas o Si é reconhecido como um elemento benéfico, atuando de maneira significativa no aumento da resistência das plantas ao estresse hídrico e oxidativo em diversas culturas (Weisany et al., 2024), desempenhando papel semelhante a nutrientes como nitrogênio, fósforo e potássio no reforço dos mecanismos de defesa da planta, contribuindo para a estabilização das membranas celulares, auxiliando na regulação osmótica e modulação de compostos antioxidantes (Li et al., 2024a; Rakesh et al., 2024a; Weisany et al., 2024). Além disso, o Si regula a expressão de genes associados à defesa antioxidante, ajudando a manter o equilíbrio redox em situações de estresse (Singh et al., 2023a; Chen et al., 2024). Isso ocorre porque o Si atua na modulação de enzimas que combatem o estresse oxidativo, induzindo a expressão de genes de defesa em várias espécies vegetais (Liang et al., 2007; Khandekar and Leisner, 2011; Alberto Moldes et al., 2013). Outros benefícios do Si incluem a capacidade de reduzir os efeitos da carência de K ao estimular sua absorção em plantas de soja (Miao et al., 2010) e milho (dos Santos Sarah et al., 2021b), elevar as taxas fotossintéticas e os teores de clorofila em sorgo (Chen et al., 2016a), além de modular o acúmulo de polifenóis e sua ação antioxidante em cevada (Benslima et al., 2022) cultivados em vaso.

Em leguminosa cultivada em condições de campo o fornecimento de Si via fertirrigação foi eficiente em aumentar a eficiência do uso da água nas plantas, promovendo ajuste fotossintético (Gonzalez-Porras et al., 2024) e equilíbrio nutricional (Teixeira et al., 2024). Esse efeito também foi observado em outras plantas da mesma família, como em plantas de canola cultivadas em campo, onde a aplicação de nanopartículas de Si (PSN) aumentou a atividades de enzimas antioxidantes (POD e CAT), diminuiu danos oxidativos, melhorou a condutância estomática, o teor relativo de água foliar e a composição de ácidos graxos, resultando em melhor qualidade do óleo dos grãos (Alghanem et al., 2025). Resultados semelhantes foram observados em plantas da família Poaceae, como trigo, sugerindo que o Si melhorou o uso da água e produtividade

de grãos (S. N. Johnson et al., 2022), enquanto em plantas de milho, o Si melhorou atividades de enzimas antioxidantes (SOD, POD, CAT, APX, GR), substâncias não enzimáticas e atividade fotossintética (Xu et al., 2022). Além disso, o papel benéfico do Si foi demonstrado sendo eficaz em diferentes espécies cultivadas em vaso como cana-de-açúcar e cana-energia (Teixeira et al., 2022b), pepino (Ma et al., 2004); grão de bico (Gunes et al., 2007); girassol (Gunes et al., 2008); soja (Shen et al., 2010); tomate (Shi et al., 2016); a lentilha (Biju et al., 2017a); feijão -caupi (de Sousa Leite et al., 2023).

O interesse da fertilização com Si se deve ao fato que os solos têm baixas concentrações disponíveis do elemento (Gascho, 2001) e sua relevância na mitigação dos efeitos deletérios do déficit hídricos nas plantas. No entanto, a maioria dos estudos foram realizados em ambientes controlados em cultivos em recipientes, sendo ainda limitado as pesquisas desenvolvidas em condições de campo (Barão, 2023). Dentre as fontes de Si disponíveis para uso na agricultura, os silicatos de cálcio provinda de uma rocha (wollasonita) ou de resíduos siderúrgicos que tem solubilidade limitada exigindo a aplicação com incorporação para incrementar o processo de solubilização. Estudos de campos tem demonstrado evidências do potencial do Si na atenuação dos efeitos do déficit hídrico em plantas de trigo (S. N. Johnson et al., 2022). Os autores observaram que a aplicação de sílica amorfa diminuiu significativamente os efeitos negativos do déficit hídrico no crescimento das plantas e na produção de grãos, atribuído aos benefícios mediados pelo Si na melhoria da eficiência do uso da água. Da mesma forma, a aplicação exógena de Si e SA em plantas aumentou as atividades de enzimas antioxidantes e o acúmulo de osmólitos, diminuindo os níveis de H_2O_2 e MDA em plantas de trigo estressadas (Maghsoudi et al., 2019).

Uma estratégia para melhorar a eficiência de absorção do Si pela planta seria com uso de fontes solúveis na forma fluída como os silicatos solúveis (silicato de potássio e silicato de sódio) (Liang et al., 2015). E o uso adequado destas fontes em solução com concentrações que evite polimerização tem sido úteis para potencializar a absorção e os efeitos na fisiologia da planta mesmo em condições de déficit hídrico (Gonzalez-Porras et al., 2024; Teixeira et al., 2024). Para isso, o emprego da fertirrigação pode melhorar o aproveitamento da água e dos fertilizantes, contribuindo para o aumento da produtividade agrícola

(Yan et al., 2021; Elshamly, 2023a; Elshamly and Abaza, 2024a). No entanto, o manejo inadequado dessa prática pode resultar perdas na qualidade do solo e na produtividade associados a impactos ambientais devido a lixiviação de nutrientes e a contaminação de aquíferos (Yan et al., 2021).

É conhecido que o uso do Si otimizada as trocas gasosas ao formar barreira física diminuindo a transpiração sem afetar a assimilação de CO₂ favorecendo a condutância estomática associado com a minimização do estresse oxidativo ao aumentar as enzimas antioxidantes garantindo a integridade celular e ótimo metabolismo celular e da planta.

Um outro elemento relevante no aumento da eficiência de uso da água é o potássio. O potássio (K⁺) é um nutriente para o metabolismo vegetal, atuando como regulador-chave em diversos processos fisiológicos e bioquímicos (Wang et al., 2013; R. Johnson et al., 2022a). Entre suas funções destacam-se o controle da abertura estomática, o equilíbrio osmótico celular, a manutenção do potencial hídrico e a preservação da pressão de turgor, fatores críticos para a integridade estrutural e funcional das plantas (de Mello Prado, 2021a; R. Johnson et al., 2022a). O K⁺ também contribui para a sobrevivência de plantas expostas a vários estresses bióticos e abióticos, como o déficit hídrico (Wang et al., 2013), desempenhando um papel vital na ativação de mecanismos antioxidantes, auxiliando na neutralização de ERO. Essa ação protetora está diretamente associada à sua participação no transporte de solutos através das membranas celulares e na síntese de proteínas, processos fundamentais para o crescimento e desenvolvimento vegetal (Sardans and Peñuelas, 2021; R. Johnson et al., 2022a).

A deficiência de K, especialmente quando combinada com a escassez hídrica, pode desencadear graves desequilíbrios metabólicos, diminuindo a eficiência fotossintética e a resistência das plantas a condições adversas (R. Johnson et al., 2022a). Isso ocorre porque a carência desse nutriente prejudica a regulação estomática, afetando a conversão da energia luminosa em energia química e o transporte de fotoassimilados via floema para os órgãos de reserva (Cakmak, 2005; R. Johnson et al., 2022a). Como consequência, observa-se diminuição da eficiência fotossintética (Verma et al., 2021) causando sérios

danos ao desenvolvimento vegetal, resultando em menor acúmulo de biomassa, impactado negativamente no rendimento dos cultivos.

Estudos destacam a capacidade do K em melhorar a absorção de água e nutrientes, bem como promover maior resiliências das plantas a condições hídricas limitantes (Alghanem et al., 2025). Por exemplo, foi observado que em plantas de beterraba a aplicação de K aumentou o RWC, diminuiu os danos à membrana devido a eficiência do sistema de defesa durante o estresse por déficit hídrico (Aksu and Altay, 2020). Em plantas de milho a aplicação de K^+ foi eficiente no ajuste osmótico, contribuindo para maior qualidade nutricional e rendimento dos grãos (S. Hussain et al., 2020; UI-Allah et al., 2020).

A aplicação conjunta de K e Si pode promover efeitos aditivos ou sinérgicos na eficiência de uso da água ao otimizar o funcionamento estomático (Kaya et al., 2006) pois ao diminuir a transpiração foliar (Gong et al., 2005), aumenta o teor de água relativo nas folhas (Ahmad & Haddad, 2011) sem diminuir a taxa fotossíntese mesmo sob estresse hídrico (Zhu & Gong, 2014; Farooq et al., 2016). Acredita-se que essa sinergia do K e do Si nas trocas gasosas somente ocorre devido a estabilidade no metabolismo da planta graças a atuação do sistema de defesa antioxidante, mas isso precisa ser melhor estudado. Inclusive, o Si pode melhorar a eficiência do uso do potássio pelas plantas, favorecendo seu transporte e uso metabólico (Eneji et al., 2008).

Esses benefícios do Si potencializa o aumento do índice de área foliar, redução da frequência de irrigação e maior produtividade por volume de água aplicado mesmo em áreas de cultivo com deficiência de K. Cabe destacar ainda que o uso conjunto de K e Si pode ter efeito sinérgico no desempenho fisiológico devido ao eficiente sistema de defesa antioxidante resultado ganhos na produtividade mesmo sob condições de limitação hídrica e/ou de irrigação deficitária. Essa sinergia Si e K pode incrementar as culturas a tolerância ao déficit moderados de água e/ou com irrigação com maior economia de água. A principal hipótese é que essa interação do Si e K possa ocorrer pelo fato que o efeito do Si é mais efetivo em condição de estresse ou seja de deficiência de K comparado a cenários de suficiência desse nutriente, potencializando assim seus benefícios fisiológicos.

2.4 Perspectivas futuras

É importante que os pesquisadores do silício possam concentrar esforços no desenvolvimento de estratégias inovadoras a partir da otimização da fertirrigação com Si com doses adequadas para garantir maior eficiência nutricional, minimizando riscos ambientais e ainda incrementando a resiliência dos cultivos e a produtividade sustentável;

Ainda são necessários mais estudos envolvendo os efeitos do Si nos mecanismos antioxidativos enzimáticos em cultivos em campo pois normalmente diferentes fatores não nutricionais estão interagindo com sistema solo-planta e esses aspectos são poucos conhecidos;

A maioria dos estudos envolvendo o Si estão associados a espécies acumuladoras de Si embora haja indicativos claros dos benefícios do Si na defesa antioxidantes de espécies não acumuladoras, mas são necessárias mais pesquisas nestas espécies para maior compreensão dos mecanismos envolvidos;

Os estudos envolvendo a sinergia do Si e do K na eficiência de uso da água é deficitário a nível fisiológico e bioquímico havendo necessidade de avanço das pesquisas. É necessário testar se essa sinergia é mais evidenciada na condição que o K esteja abaixo do ótimo na planta;

É necessário avanço das pesquisas para maior compreensão do papel do Si a nível transcriptômico para identificar os genes ativados que promovem maior tolerância dos cultivos a seca e a deficiência nutricional.

2.5 Conclusões

Os principais danos da limitação hídrica induzem a nutricional com destaque para o potássio e ambas potencializam o estresse oxidativo e consequentemente limita o crescimento e a produtividade dos cultivos. O uso do silício e/ou potássio é capaz de reverter esses danos por incrementar o sistema de defesa

antioxidante enzimático induzindo incremento da tolerância a seca e/ou nutricional.

O uso do Si em sistemas irrigados pode reduzir a pressão sobre os recursos hídricos, minimizar a lixiviação de nutrientes além de contribuir para maior resiliência do sistema produtivo frente às mudanças climáticas. Portanto, o silício representa uma ferramenta agronômica promissora para melhorar a eficiência do uso da água em sistemas irrigados, favorecendo maior produtividade com menor consumo hídrico.

A sinergia entre potássio e silício representa uma estratégia agronômica eficaz para aumentar a eficiência do uso da água em culturas agrícolas. A aplicação conjunta desses nutrientes melhora o desempenho fisiológico induzido por eficiente sistema de defesa antioxidante das plantas, reduz os efeitos negativos do estresse hídrico e contribui para sistemas produtivos mais sustentáveis. A adoção dessa abordagem, especialmente via fertirrigação, pode ser decisiva para o enfrentamento dos desafios hídricos da agricultura no futuro.

3 Referências

- Abbas, K.; Li, J.; Gong, B.; Lu, Y.; Wu, X.; Lü, G.; Gao, H. (2023). Drought stress tolerance in vegetables: The functional role of structural features, key gene pathways, and exogenous hormones. **International Journal of Molecular Sciences**, 24:13876. <https://doi.org/10.3390/IJMS241813876>
- Afshari, M.; Pazoki, A.; Sadeghipour, O. (2021). Foliar-applied silicon and its nanoparticles stimulate physio-chemical changes to improve growth, yield and active constituents of *Coriandrum sativum* L. essential oil under different irrigation regimes. **Silicon**, 13:4177-4188. <https://doi.org/10.1007/S12633-021-01101-8>
- Ahammed, G.J.; Li, X.; Wan, H.; Zhou, G.; Cheng, Y. (2020). SIWRKY81 reduces drought tolerance by attenuating proline biosynthesis in tomato. **Scientia Horticulturae**, 270:109444. <https://doi.org/10.1016/J.SCIENTA.2020.109444>
- Ahluwalia, O.; Singh, P.C.; Bhatia, R. (2021). A review on drought stress in plants: Implications, mitigation and the role of plant growth promoting rhizobacteria. **Resources, Environment and Sustainability**, 5:100032. <https://doi.org/10.1016/J.RESENV.2021.100032>
- Aksu, G.; Altay, H. (2020). The effects of potassium applications on drought stress in sugar beet. **Sugar Tech**, 22:1092-1102. <https://doi.org/10.1007/S12355-020-00851-W>
- Alberto Moldes, C.; Fontão de Lima Filho, O.; Manuel Camiña, J.; Gabriela Kiriachek, S.; Lia Molas, M.; Mui Tsai, S. (2013). Assessment of the effect of silicon on antioxidant enzymes in cotton plants by multivariate analysis. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, 61:11243-11249. <https://doi.org/10.1021/JF4039088>
- Alghanem, S.M.S.; Alnusaie, T.S.; Al-Balawi, S.M.; Alayafi, A.A.M.; Alharbi, B.M.; Abdulmajeed, A.M.; Alrashidi, A.A.; Anazi, H.K.; Alharbi, K.; Soliman, M.H. (2025). Potassium silica nanoparticles enhanced growth, yield, and stress tolerance in canola (*Brassica napus* L.) under drought conditions. **Journal of Soil Science and Plant Nutrition**, 1-18. <https://doi.org/10.1007/S42729-025-02356-5>
- Al-Mokadem, A.Z.; Sheta, M.H.; Mancy, A.G.; Hussein, H.A.A.; Kenawy, S.K.M.; Sofy, A.R.; Abu-Shahba, M.S.; Mahdy, H.M.; Sofy, M.R.; Al Bakry, A.F.; Agha, M.S. (2023). Synergistic effects of kaolin and silicon nanoparticles for ameliorating deficit irrigation stress in maize plants by upregulating antioxidant defense systems. **Plants**, 12:2221. <https://doi.org/10.3390/PLANTS12112221>
- Andrioli, I.; Centurion, J.F. (1999). Levantamento detalhado dos solos da Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias de Jaboticabal. Brasília.
- Anjum, S.A.; Ashraf, U.; Tanveer, M.; Khan, I.; Hussain, S.; Shahzad, B.; Zohaib, A.; Abbas, F.; Saleem, M.F.; Ali, I.; Wang, L.C. (2017). Drought induced changes

in growth, osmolyte accumulation and antioxidant metabolism of three maize hybrids. **Frontiers in Plant Science**, 8:233731. <https://doi.org/10.3389/FPLS.2017.00069>

Aqaei, P.; Weisany, W.; Diyanat, M.; Razmi, J.; Struik, P.C. (2020). Response of maize (*Zea mays* L.) to potassium nano-silica application under drought stress. **Journal of Plant Nutrition**, 43:1205-1216. <https://doi.org/10.1080/01904167.2020.1727508>

Avila, R.G.; Magalhães, P.C.; da Silva, E.M.; de Souza, K.R.D.; Campos, C.N.; de Alvarenga, A.A.; de Souza, T.C. (2021). Application of silicon to irrigated and water deficit sorghum plants increases yield via the regulation of primary, antioxidant, and osmoregulatory metabolism. **Agricultural Water Management**, 255:107004. <https://doi.org/10.1016/J.AGWAT.2021.107004>

Awad, A.E.; Abuarab, M.E.; Abdelraouf, R.E.; Bakeer, G.A.; El-Shawadfy, M.A.; Ragab, R. (2024). Improving yield and irrigation water productivity of green beans under water stress with agricultural solid waste-based material of compacted rice straw as a sustainable organic soil mulch. **Irrigation Science**, 1-26. <https://doi.org/10.1007/S00271-024-00973-Z>

Babiker, A.G.T.; Duncan, H.J. (1974). Penetration of bracken fronds by asulam as influenced by the addition of surfactant to the spray solution and by pH. **Weed Research**, 14:375-377. <https://doi.org/10.1111/j.1365-3180.1974.tb01078.x>

Balint, Z.; Mutua, F.; Muchiri, P.; Omuto, C.T. (2013). Monitoring drought with the Combined Drought Index in Kenya. **Developments in Earth Surface Processes**, 16:341-356. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-59559-1.00023-2>

Barão, L. (2023). The use of Si-based fertilization to improve agricultural performance. **Journal of Soil Science and Plant Nutrition**, 23:1096-1108. <https://doi.org/10.1007/S42729-022-01106-1>

Bashir, S.S.; Hussain, A.; Hussain, S.J.; Wani, O.A.; Zahid Nabi, S.; Dar, N.A.; Baloch, F.S.; Mansoor, S. (2021). Plant drought stress tolerance: Understanding its physiological, biochemical and molecular mechanisms. **Biotechnology & Biotechnological Equipment**, 35:1912-1925. <https://doi.org/10.1080/13102818.2021.2020161>

Basu, S.; Kumar, G. (2021). Exploring the significant contribution of silicon in regulation of cellular redox homeostasis for conferring stress tolerance in plants. **Plant Physiology and Biochemistry**, 166:393-404. <https://doi.org/10.1016/J.PLAPHY.2021.06.005>

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

Bates, L.S.; Waldren, R.P.; Teare, I.D. (1973). Rapid determination of free proline for water-stress studies. **Plant and Soil**, 39:205-207. <https://doi.org/10.1007/BF00018060>

Benslimam, W.; Zorrigh, W.; Bagues, M.; Abdelly, C.; Hafsi, C. (2022). Silicon mitigates potassium deficiency in *Hordeum vulgare* by improving growth and photosynthetic activity but not through polyphenol accumulation and the related antioxidant potential. **Plant and Soil**, 477:153-170. <https://doi.org/10.1007/S11104-021-05188-1>

Besharat, S.; Barão, L.; Cruz, C. (2020). New strategies to overcome water limitation in cultivated maize: Results from sub-surface irrigation and silicon fertilization. **Journal of Environmental Management**, 263:110398. <https://doi.org/10.1016/J.JENVMAN.2020.110398>

Biju, S.; Fuentes, S.; Gupta, D. (2017). Silicon improves seed germination and alleviates drought stress in lentil crops by regulating osmolytes, hydrolytic enzymes and antioxidant defense system. **Plant Physiology and Biochemistry**, 119:250-264. <https://doi.org/10.1016/J.PLAPHY.2017.09.001>

Blum, A. (2017). Osmotic adjustment is a prime drought stress adaptive engine in support of plant production. **Plant, Cell & Environment**, 40:4-10. <https://doi.org/10.1111/PCE.12800>

Bradford, M.M. (1976). A rapid and sensitive method for the quantitation of microgram quantities of protein utilizing the principle of protein-dye binding. **Analytical Biochemistry**, 72:248-254.

Çakir, R. (2004). Effect of water stress at different development stages on vegetative and reproductive growth of corn. **Field Crops Research**, 89:1-16. <https://doi.org/10.1016/J.FCR.2004.01.005>

Cakmak, I. (2005). The role of potassium in alleviating detrimental effects of abiotic stresses in plants. **Journal of Plant Nutrition and Soil Science**, 168:521-530. <https://doi.org/10.1002/JPLN.200420485>

Camargo, O.A. de; Moniz, A.C.; Jorge, J.A.; Valadares, J.M.A.S. (1986). Métodos de análise química, mineralógica e física de solos do Instituto Agronômico de Campinas. Campinas: Instituto Agronômico de Campinas – IAC.

Carbas, B.; Machado, N.; Oppolzer, D.; Ferreira, L.; Queiroz, M.; Brites, C.; Rosa, E.A.S.; Barros, A.I.R.N.A. (2020). Nutrients, antinutrients, phenolic composition, and antioxidant activity of common bean cultivars and their potential for food applications. **Antioxidants**, 9:186. <https://doi.org/10.3390/ANTIOX9020186>

Carneiro-Carvalho, A.; Pinto, T.; Gomes-Laranjo, J.; Anjos, R. (2023). The potential of SiK® fertilization in the resilience of chestnut plants to drought – a biochemical study. **Frontiers in Plant Science**, 14:1120226. <https://doi.org/10.3389/FPLS.2023.1120226>

Cavalcante, I.E.; Soares de Melo, A.; Luciano de Souza Ferraz, R.; Silva de Alencar, R.; Dias, G.F.; Marques de Oliveira Viana, P.; Moura Rocha, M.; Ndhlala, A.R.; Vanies, F.; Sá, S.; Feitosa de Lacerda, C.; Roberto, P.; Vié, A.; Blume, Y.B.; Nery, F.C. (2024). Salicylic acid improves cowpea productivity under water restriction in the field by modulating metabolism. **Frontiers in Plant Science**, 15:1415682. <https://doi.org/10.3389/FPLS.2024.1415682>

Chen, D.; Cao, B.; Qi, L.; Yin, L.; Wang, S.; Deng, X. (2016). Silicon-moderated K-deficiency-induced leaf chlorosis by decreasing putrescine accumulation in sorghum. **Annals of Botany**, 118:305-315. <https://doi.org/10.1093/AOB/MCW111>

Chen, D.; Cao, B.; Wang, S.; Liu, P.; Deng, X.; Yin, L.; Zhang, S. (2016). Silicon moderated the K deficiency by improving the plant-water status in sorghum. **Scientific Reports**, 6:22882. <https://doi.org/10.1038/srep22882>

Chen, J.; Li, Y.; Zeng, Z.; Zhao, X.; Zhang, Y.; Li, X.; Chen, J.; Shen, W. (2024). Silicon induces ROS scavengers, hormone signalling, antifungal metabolites, and silicon deposition against brown stripe disease in sugarcane. **Physiologia Plantarum**, 176:e14313. <https://doi.org/10.1111/PPL.14313>

Chen, L.; Liu, X.; Huang, X.; Luo, W.; Long, Y.; Greiner, S.; Rausch, T.; Zhao, H. (2019). Functional characterization of a drought-responsive invertase inhibitor from maize (*Zea mays* L.). **International Journal of Molecular Sciences**, 20:4081. <https://doi.org/10.3390/IJMS20174081>

Chiappero, J.; Cappellari, L. del R.; Sosa Alderete, L.G.; Palermo, T.B.; Banchio, E. (2019). Plant growth promoting rhizobacteria improve the antioxidant status in *Mentha piperita* grown under drought stress leading to an enhancement of plant growth and total phenolic content. **Industrial Crops and Products**, 139:111553. <https://doi.org/10.1016/J.INDCROP.2019.111553>

Chieb, M.; Gachomo, E.W. (2023). The role of plant growth promoting rhizobacteria in plant drought stress responses. **BMC Plant Biology**, 23:1-23. <https://doi.org/10.1186/S12870-023-04403-8>

Cuong, T.X.; Ullah, H.; Datta, A.; Hanh, T.C. (2017). Effects of silicon-based fertilizer on growth, yield and nutrient uptake of rice in tropical zone of Vietnam. **Rice Science**, 24:283-290. <https://doi.org/10.1016/J.RSCI.2017.06.002>

Darko, R.O.; Yuan, S.; Hong, L.; Liu, J.; Yan, H. (2016). Irrigation, a productive tool for food security – a review. **Acta Agriculturae Scandinavica, Section B — Soil & Plant Science**, 66:191-206. <https://doi.org/10.1080/09064710.2015.1093654>

Du, Y.; Zhao, Q.; Chen, L.; Yao, X.; Zhang, H.; Wu, J.; Xie, F. (2020). Effect of drought stress during soybean R2–R6 growth stages on sucrose metabolism in leaf and seed. **International Journal of Molecular Sciences**, 21:618. <https://doi.org/10.3390/IJMS21020618>

Duarte, A.P.; Cantarella, H.; Quaggio, J.A. (2022). Milho (*Zea mays*). In: Cantarella, H.; Quaggio, J.A.; Mattos Jr., D.; Boaretto, R.M.; Van Raij, B. (eds.). *Recomendações de adubação e calagem para o Estado de São Paulo*. Campinas: Instituto Agrônomo, p. 199-208.

Egilla, J.N.; Davies, F.T.; Boutton, T.W. (2005). Drought stress influences leaf water content, photosynthesis, and water-use efficiency of *Hibiscus rosa-sinensis* at three potassium concentrations. **Photosynthetica**, 43:135-140. <https://doi.org/10.1007/S11099-005-5140-2>

El-Saadony, M.T.; Desoky, E.S.M.; Saad, A.M.; Eid, R.S.M.; Selem, E.; Elrys, A.S. (2021). Biological silicon nanoparticles improve *Phaseolus vulgaris* L. yield and minimize its contaminant contents on a heavy metals-contaminated saline soil. **Journal of Environmental Sciences**, 106:1-14. <https://doi.org/10.1016/J.JES.2021.01.012>

Elshamly, A.M.S. (2023). Interaction effects of sowing date, irrigation levels, chitosan, and potassium silicate on yield and water use efficiency for maize grown under arid climate. **Gesunde Pflanzen**, 75:1601-1613. <https://doi.org/10.1007/S10343-023-00836-1>

Elshamly, A.M.S.; Abaza, A.S. (2024). Precise partial root-zone irrigation technique and potassium-zinc fertigation management improve maize physio-biochemical responses, yield, and water use in arid climate. **BMC Plant Biology**, 24:1-27. <https://doi.org/10.1186/S12870-024-05467-W>

Epstein, E. (1994). The anomaly of silicon in plant biology. **Proceedings of the National Academy of Sciences**, 91:11-17. <https://doi.org/10.1073/PNAS.91.1.11>

Fang, K.; He, J.; Liu, Q.; Wang, S.; Geng, Y.; Heijungs, R.; Du, Y.; Yue, W.; Xu, A.; Fang, C. (2023). Water footprint of nations amplified by scarcity in the Belt and Road Initiative. **Heliyon**, 9:e12957. <https://doi.org/10.1016/J.HELİYON.2023.E12957>

Garg, N.; Manchanda, G. (2009). ROS generation in plants: Boon or bane? **Plant Biosystems**, 143:81-96. <https://doi.org/10.1080/11263500802633626>

Gascho, G.J. (2001). Silicon sources for agriculture. In: Datnoff, L.E.; Snyder, G.H.; Korndörfer, G.H. (eds.). **Studies in Plant Science**, 8:197-207. <https://doi.org/10.1016/S>

Ge, T.; Sui, F.; Bai, L.; Tong, C.; Sun, N. (2012). Effects of water stress on growth, biomass partitioning, and water-use efficiency in summer maize (*Zea mays* L.) throughout the growth cycle. **Acta Physiologiae Plantarum**, 34:1043-1053. <https://doi.org/10.1007/S11738-011-0901-Y>

Giannopolitis, C.N.; Ries, S.K. (1977). Superoxide dismutases. I. Occurrence in higher plants. **Plant Physiology**, 59:309-314. <https://doi.org/10.1104/pp.59.2.309>

Gill, S.S.; Tuteja, N. (2010). Reactive oxygen species and antioxidant machinery in abiotic stress tolerance in crop plants. **Plant Physiology and Biochemistry**, 48:909-930. <https://doi.org/10.1016/J.PLAPHY.2010.08.016>

Gomes-Junior, R.A.; Gratão, P.L.; Gaziola, S.A.; Mazzafera, P.; Lea, P.J.; Azevedo, R.A. (2007). Selenium-induced oxidative stress in coffee cell suspension cultures. **Functional Plant Biology**, 34:449-456. <https://doi.org/10.1071/FP07010>

Gong, Z.; Xiong, L.; Shi, H.; Yang, S.; Herrera-Estrella, L.R.; Xu, G.; Chao, D.Y.; Li, J.; Wang, P.Y.; Qin, F.; Li, J.; Ding, Y.; Shi, Y.; Wang, Y.; Yang, Y.; Guo, Y.; Zhu, J.K. (2020). Plant abiotic stress response and nutrient use efficiency. **Science China Life Sciences**, 63:635-674. <https://doi.org/10.1007/S11427-020-1683-X>

Gonzalez-Porras, C.V.; Teixeira, G.C.M.; Prado, R. de M.; Ferreira, P.M.; Palaretti, L.F.; Oliveira, K.S. (2024). Silicon via fertigation with and without potassium application improves physiological aspects of common beans cultivated under three water regimes in field. **Scientific Reports**, 14:1-19. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-52503-8>

Gratão, P.L.; Monteiro, C.C.; Carvalho, R.F.; Tezotto, T.; Piotto, F.A.; Peres, L.E.P.; Azevedo, R.A. (2012). Biochemical dissection of *diageotropica* and *Never ripe* tomato mutants to Cd-stressful conditions. **Plant Physiology and Biochemistry**, 56:79-96. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2012.04.009>

Gratão, P.L.; Polle, A.; Lea, P.J.; Azevedo, R.A. (2005). Making the life of heavy metal-stressed plants a little easier. **Functional Plant Biology**, 32:481-494. <https://doi.org/10.1071/FP05016>

Gunes, A.; Pilbeam, D.J.; Inal, A.; Bagci, E.G.; Coban, S. (2007). Influence of silicon on antioxidant mechanisms and lipid peroxidation in chickpea (*Cicer arietinum* L.) cultivars under drought stress. **Journal of Plant Interactions**, 2:105-113. <https://doi.org/10.1080/17429140701529399>

Gunes, A.; Pilbeam, D.J.; Inal, A.; Coban, S. (2008). Influence of silicon on sunflower cultivars under drought stress, I: Growth, antioxidant mechanisms, and lipid peroxidation. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, 39:1885-1903. <https://doi.org/10.1080/00103620802134651>

Hassine, A. Ben; Ghanem, M.E.; Bouzid, S.; Lutts, S. (2008). An inland and a coastal population of the Mediterranean xero-halophyte species *Atriplex halimus* L. differ in their ability to accumulate proline and glycinebetaine in response to salinity and water stress. **Journal of Experimental Botany**, 59:1315-1326. <https://doi.org/10.1093/JXB/ERN040>

Heath, R.L.; Packer, L. (1968). Photoperoxidation in isolated chloroplasts I. Kinetics and stoichiometry of fatty acid peroxidation. **Archives of Biochemistry and Biophysics**, 125:189-198. [https://doi.org/10.1016/0003-9861\(68\)90654-1](https://doi.org/10.1016/0003-9861(68)90654-1)

Hejazi, M.; Santos da Silva, S.R.; Miralles-Wilhelm, F.; Kim, S.; Kyle, P.; Liu, Y.; Vernon, C.; Delgado, A.; Edmonds, J.; Clarke, L. (2023). Impacts of water scarcity on agricultural production and electricity generation in the Middle East and North Africa. **Frontiers in Environmental Science**, 11:1082930. <https://doi.org/10.3389/FENVS.2023.1082930>

Heshmat, K.; Asgari Lajayer, B.; Shakiba, M.R.; Astatkie, T. (2021). Assessment of physiological traits of common bean cultivars in response to water stress and molybdenum levels. **Journal of Plant Nutrition**, 44:366-372. <https://doi.org/10.1080/01904167.2020.1822395>

Hodson, M.J.; White, P.J.; Mead, A.; Broadley, M.R. (2005). Phylogenetic variation in the silicon composition of plants. **Annals of Botany**, 96:1027-1046. <https://doi.org/10.1093/AOB/MCI255>

Hu, W.; Lu, Z.; Gu, H.; Ye, X.; Li, X.; Cong, R.; Ren, T.; Lu, J. (2022). Potassium availability influences the mesophyll structure to coordinate the conductance of CO₂ and H₂O during leaf expansion. **Plant, Cell & Environment**, 45:2987-3000. <https://doi.org/10.1111/PCE.14405>

Hu, Y.; Schmidhalter, U. (2005). Drought and salinity: A comparison of their effects on mineral nutrition of plants. **Journal of Plant Nutrition and Soil Science**, 168:541-549. <https://doi.org/10.1002/JPLN.200420516>

Hua, T.; Zhang, R.; Sun, H.; Liu, C. (2020). Alleviation of boron toxicity in plants: Mechanisms and approaches. **Critical Reviews in Environmental Science and Technology**, 51:2975-3015. <https://doi.org/10.1080/10643389.2020.1807451>

Hussain, H.A.; Men, S.; Hussain, S.; Chen, Y.; Ali, S.; Zhang, S.; Zhang, K.; Li, Y.; Xu, Q.; Liao, C.; Wang, L. (2019). Interactive effects of drought and heat stresses on morpho-physiological attributes, yield, nutrient uptake and oxidative status in maize hybrids. **Scientific Reports**, 9:1-12. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-40362-7>

Hussain, H.A.; Men, S.; Hussain, S.; Zhang, Q.; Ashraf, U.; Anjum, S.A.; Ali, I.; Wang, L. (2020). Maize tolerance against drought and chilling stresses varied with root morphology and antioxidative defense system. **Plants**, 9:720. <https://doi.org/10.3390/PLANTS9060720>

Hussain, S.; Maqsood, M.; Ijaz, M.; Ul-Allah, S.; Sattar, A.; Sher, A.; Nawaz, A. (2020). Combined application of potassium and zinc improves water relations, stay green, irrigation water use efficiency, and grain quality of maize under drought stress. **Journal of Plant Nutrition**, 43:2214-2225. <https://doi.org/10.1080/01904167.2020.1765181>

Ingrao, C.; Strippoli, R.; Lagioia, G.; Huisinigh, D. (2023). Water scarcity in agriculture: An overview of causes, impacts and approaches for reducing the risks. **Heliyon**, 9:e18507. <https://doi.org/10.1016/J.HELIYON.2023.E18507>

Irfan, M.; Maqsood, M.A.; Rehman, H. ur; Mahboob, W.; Sarwar, N.; Hafeez, O.B.A.; Hussain, S.; Ercisli, S.; Akhtar, M.; Aziz, T. (2023). Silicon nutrition in plants under water-deficit conditions: Overview and prospects. **Water**, 15:739. <https://doi.org/10.3390/W15040739>

IRRI – International Rice Research Institute. (1993). *Rice research in a time change: IRRI's medium-term plan for 1994–1998*. Los Baños, Philippines.

Johnson, R.; Vishwakarma, K.; Hossen, M.S.; Kumar, V.; Shackira, A.M.; Puthur, J.T.; Abdi, G.; Sarraf, M.; Hasanuzzaman, M. (2022). Potassium in plants: Growth regulation, signaling, and environmental stress tolerance. **Plant Physiology and Biochemistry**, 172:56-69. <https://doi.org/10.1016/J.PLAPHY.2022.01.001>

Johnson, S.N.; Chen, Z.H.; Rowe, R.C.; Tissue, D.T. (2022). Field application of silicon alleviates drought stress and improves water use efficiency in wheat. **Frontiers in Plant Science**, 13:1030620. <https://doi.org/10.3389/FPLS.2022.1030620>

Khandekar, S.; Leisner, S. (2011). Soluble silicon modulates expression of *Arabidopsis thaliana* genes involved in copper stress. **Journal of Plant Physiology**, 168:699-705. <https://doi.org/10.1016/J.JPLPH.2010.09.009>

Klute, A. (2018). Water retention: Laboratory methods. In: Klute, A. (ed.). **Methods of Soil Analysis, Part 1: Physical and Mineralogical Methods**. Madison: SSSA, p. 635-662. <https://doi.org/10.2136/SSSABOOKSER5.1.2ED.C26>

Korndörfer, G.H.; Pereira, H.S.; Nolla, A. (2004). Análise de silício no solo, planta e fertilizantes. 2. ed. Uberlândia: UFU.

Kraska, J.E.; Breitenbeck, G.A. (2010). Simple, robust method for quantifying silicon in plant tissue. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, 41:2075-2085. <https://doi.org/10.1080/00103624.2010.498537>

Laxa, M.; Liebthal, M.; Telman, W.; Chibani, K.; Dietz, K.J. (2019). The role of the plant antioxidant system in drought tolerance. **Antioxidants**, 8:94. <https://doi.org/10.3390/ANTIOX8040094>

Li, G.; Ma, Z.; Zhang, N.; Li, M.; Li, W.; Mo, Z. (2024). Foliar application of silica nanoparticles positively influences the early growth stage and antioxidant defense of maize under low light stress. **Journal of Soil Science and Plant Nutrition**, 24:2276-2294. <https://doi.org/10.1007/S42729-024-01789-8>

Liang, Y.; Nikolic, M.; Bélanger, R.; Gong, H.; Song, A. (2015). Silicon sources for agriculture. In: Liang, Y.; Nikolic, M.; Bélanger, R.; Gong, H.; Song, A. (eds.). **Silicon in Agriculture**. Dordrecht: Springer, p. 225-232. https://doi.org/10.1007/978-94-017-9978-2_12

Liang, Y.; Sun, W.; Zhu, Y.G.; Christie, P. (2007). Mechanisms of silicon-mediated alleviation of abiotic stresses in higher plants: A review. **Environmental Pollution**, 147:422-428. <https://doi.org/10.1016/J.ENVPOL.2006.06.008>

Ma, C.C.; Gao, Y.B.; Xin, T.R.; Ma, C.C.; Li, Q.F. (2004). Effects of silicon application on drought resistance of cucumber plants. **Soil Science and Plant Nutrition**, 50:623-632. <https://doi.org/10.1080/00380768.2004.10408520>

Ma, D.; Sun, D.; Wang, C.; Qin, H.; Ding, H.; Li, Y.; Guo, T. (2016). Silicon application alleviates drought stress in wheat through transcriptional regulation of multiple antioxidant defense pathways. **Journal of Plant Growth Regulation**, 35:1-10. <https://doi.org/10.1007/S00344-015-9500-2>

Ma, J.F.; Tamai, K.; Ichii, M.; Wu, G.F. (2002). A rice mutant defective in Si uptake. **Plant Physiology**, 130:2111-2117. <https://doi.org/10.1104/PP.010348>

Maghsoudi, K.; Emam, Y.; Ashraf, M.; Arvin, M.J. (2019). Alleviation of field water stress in wheat cultivars by using silicon and salicylic acid applied separately or in combination. **Crop and Pasture Science**, 70:36-43. <https://doi.org/10.1071/CP18213>

Mahmoud, A.W.M.; Rashad, H.M.; Esmail, S.E.A.; Alsamadany, H.; Abdeldaym, E.A. (2023). Application of silicon, zinc, and zeolite nanoparticles—A tool to enhance drought stress tolerance in coriander plants for better growth performance and productivity. **Plants**, 12:2838. <https://doi.org/10.3390/PLANTS12152838>

Makhadmeh, I.; Albalasmeh, A.A.; Ali, M.; Thabet, S.G.; Darabseh, W.A.; Jaradat, S.; Alqudah, A.M. (2022). Molecular characterization of tomato (*Solanum lycopersicum* L.) accessions under drought stress. **Horticulturae**, 8:600. <https://doi.org/10.3390/HORTICULTURAE8070600>

Malik, M.A.; Wani, A.H.; Mir, S.H.; Rehman, I.U.; Tahir, I.; Ahmad, P.; Rashid, I. (2021). Elucidating the role of silicon in drought stress tolerance in plants. **Plant Physiology and Biochemistry**, 165:187-195. <https://doi.org/10.1016/J.PLAPHY.2021.04.021>

Mandlik, R.; Thakral, V.; Raturi, G.; Shinde, S.; Nikolić, M.; Tripathi, D.K.; Sonah, H.; Deshmukh, R. (2020). Significance of silicon uptake, transport, and deposition in plants. **Journal of Experimental Botany**, 71:6703-6718. <https://doi.org/10.1093/jxb/eraa301>

Marques, D.M.; da Silva, A.B.; Mantovani, J.R.; Magalhães, P.C.; de Souza, T.C. (2019). Root morphology and leaf gas exchange in *Peltophorum dubium* (Spreng.) Taub. (Caesalpinioideae) exposed to copper-induced toxicity. **South African Journal of Botany**, 121:186-192. <https://doi.org/10.1016/J.SAJB.2018.11.007>

Meena, V.D.; Dotaniya, M.L.; Coumar, V.; Rajendiran, S.; Ajay; Kundu, S.; Subba Rao, A. (2014). A case for silicon fertilization to improve crop yields in tropical soils. **Proceedings of the National Academy of Sciences, India Section B: Biological Sciences**, 84:505-518. <https://doi.org/10.1007/S40011-013-0270-Y>

de Mello Prado, R. (2021). *Mineral nutrition of tropical plants*. Cham: Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-71262-4>

Melo, L.C.; Pereira, H.S.; Faria, L.C. de; Souza, T.L.P.O. de; Wendland, A.; Díaz, J.L.C.; Carvalho, H.W.L. de; Costa, A.F. da; Magaldi, M.C. de S.; Costa, J.G.C. da; Aguiar, M.S. de; et al (2017). BRS FC402: cultivar de feijão-comum carioca com alta produtividade, resistência à antracnose e murcha-de-fusário. Santo Antônio de Goiás: Embrapa.

Miao, B.H.; Han, X.G.; Zhang, W.H. (2010). The ameliorative effect of silicon on soybean seedlings grown in potassium-deficient medium. **Annals of Botany**, 105:967-973. <https://doi.org/10.1093/AOB/MCQ063>

Mitani, N.; Yamaji, N.; Ma, J.F. (2009). Identification of maize silicon influx transporters. **Plant and Cell Physiology**, 50:5-12. <https://doi.org/10.1093/pcp/pcn110>

Mittler, R. (2002). Oxidative stress, antioxidants and stress tolerance. **Trends in Plant Science**, 7:405-410. [https://doi.org/10.1016/S1360-1385\(02\)02312-9](https://doi.org/10.1016/S1360-1385(02)02312-9)

Mladenov, P.; Aziz, S.; Topalova, E.; Renaut, J.; Planchon, S.; Raina, A.; Tomlekova, N. (2023). Physiological responses of common bean genotypes to drought stress. **Agronomy**, 13:1022. <https://doi.org/10.3390/AGRONOMY13041022>

Moldes, C.A.; Medici, L.O.; Abrahão, O.S.; Tsai, S.M.; Azevedo, R.A. (2008). Biochemical responses of glyphosate resistant and susceptible soybean plants exposed to glyphosate. **Acta Physiologiae Plantarum**, 30:469-479. <https://doi.org/10.1007/s11738-008-0144-8>

Mombeni, M.; Abbasi, A. (2019). Biochemical responses of some common bean (*Phaseolus vulgaris* L.) genotypes to drought stress. **Journal of Agricultural Science and Technology**, 21:407-421.

Monteiro, C.C.; Carvalho, R.F.; Gratão, P.L.; Carvalho, G.; Tezotto, T.; Medici, L.O.; Peres, L.E.P.; Azevedo, R.A. (2011). Biochemical responses of the ethylene-insensitive *Never ripe* tomato mutant subjected to cadmium and sodium stresses. **Environmental and Experimental Botany**, 71:306-320. <https://doi.org/10.1016/J.ENVEXPBOT.2010.12.020>

Mukarram, M.; Petrik, P.; Mushtaq, Z.; Khan, M.M.A.; Gulfishan, M.; Lux, A. (2022). Silicon nanoparticles in higher plants: Uptake, action, stress tolerance, and crosstalk with phytohormones, antioxidants, and other signalling molecules. **Environmental Pollution**, 310:119855. <https://doi.org/10.1016/J.ENVPOL.2022.119855>

Ning, D.; Qin, A.; Liu, Z.; Duan, A.; Xiao, J.; Zhang, J.; Liu, Z.; Zhao, B.; Liu, Z. (2020). Silicon-mediated physiological and agronomic responses of maize to drought stress imposed at the vegetative and reproductive stages. **Agronomy**, 10:1136. <https://doi.org/10.3390/AGRONOMY10081136>

Nisar, M.; Aqeel, M.; Sattar, A.; Sher, A.; Ijaz, M.; Ul-Allah, S.; Rasheed, U.; Al-Qahtani, S.M.; Al-Harbi, N.A.; Alzuaibr, F.M.; Ibrahim, M.F.M. (2023). Exogenous application of silicon and sulfate improved drought tolerance in sunflowers through modulation of morpho-physiological and antioxidant defense mechanisms. **Journal of Soil Science and Plant Nutrition**, 1:1-10. <https://doi.org/10.1007/S42729-023-01396-Z>

O'Connell, E. (2017). Towards adaptation of water resource systems to climatic and socio-economic change. **Water Resources Management**, 31:2965-2984. <https://doi.org/10.1007/S11269-017-1734-2>

Papathanasiou, F.; Ninou, E.; Mylonas, I.; Baxevanos, D.; Papadopoulou, F.; Avdikos, I.; Sistanis, I.; Koskosidis, A.; Vlachostergios, D.N.; Stefanou, S.; Tigka, E.; Kargiotidou, A. (2022). The evaluation of common bean (*Phaseolus vulgaris* L.) genotypes under water stress based on physiological and agronomic parameters. **Plants**, 11:2432. <https://doi.org/10.3390/PLANTS11182432>

Parveen, A.; Liu, W.; Hussain, S.; Asghar, J.; Perveen, S.; Xiong, Y. (2019). Silicon priming regulates morpho-physiological growth and oxidative metabolism in maize under drought stress. **Plants**, 8:431. <https://doi.org/10.3390/>

Peña Calzada, K.; Calero Hurtado, A.; Olivera Viciado, D.; Habermann, E.; de Mello Prado, R.; de Oliveira, R.; Ajila, G.; Tenesaca, L.F.L.; Rodríguez, J.C.; Gratão, P.L. (2023). 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**, 42:4528-4540. <https://doi.org/10.1007/S00344-023-10921-4>

Pereira, S.; Monteiro, A.; Moutinho-Pereira, J.; Dinis, L.T. (2024). Silicon, an emergent strategy to lighten the effects of (a)biotic stresses on crops: A review. **Journal of Agronomy and Crop Science**, 210:e12762. <https://doi.org/10.1111/JAC.12762>

Qi, J.; Sun, S.; Yang, L.; Li, M.; Ma, F.; Zou, Y. (2019). Potassium uptake and transport in apple roots under drought stress. **Horticultural Plant Journal**, 5:10-16. <https://doi.org/10.1016/J.HPJ.2018.10.001>

Quaggio, J.A.; Cantarella, H.; Zambrosi, F.C.B. (2022). Leguminosas e oleaginosas. In: Cantarella, H.; Quaggio, J.A.; Mattos Jr., D.; Boaretto, R.M.; Van Raij, B. (eds.). *Recomendações de adubação e calagem para o Estado de São Paulo*, vol. B-100. Campinas: Instituto Agrônômico, p. 239-258.

Raij, B.; Andrade, J.; Cantarella, H.; Quaggio, J. (2001). *Análise química para avaliação da fertilidade de solos tropicais*. Campinas: IAC.

Rakesh, B.; T, C.; G, M. (2024). Fascinating role of nanosilica in mitigating drought and nutrient stress – A review. **Plant Stress**, 14:100672. <https://doi.org/10.1016/J.STRESS.2024.100672>

Rehman, A.U.; Bashir, F.; Ayaydin, F.; Kóta, Z.; Páli, T.; Vass, I. (2021). Proline is a quencher of singlet oxygen and superoxide both in in vitro systems and isolated thylakoids. **Physiologia Plantarum**, 172:7-18. <https://doi.org/10.1111/PPL.13265>

Del Río, L.A. (2015). ROS and RNS in plant physiology: an overview. **Journal of Experimental Botany**, 66:2827-2837. <https://doi.org/10.1093/JXB/ERV099>

Rivera, M.F. (2024). Response of improved common bean (*Phaseolus vulgaris* L.) varieties to intermittent drought. **Agro Productividad**, 17(5). <https://doi.org/10.32854/AGROP.V17I5.2573>

Robinson, J.M.; Bunce, J.A. (2000). Influence of drought-induced water stress on soybean and spinach leaf ascorbate-dehydroascorbate level and redox status. **Plant Physiology**, 161:271-279. <https://doi.org/10.1086/314257>

Salehi-Lisar, S.Y.; Bakhshayeshan-Agdam, H. (2016). Drought stress in plants: Causes, consequences, and tolerance. In: Hossain, M.A.; Wani, S.H.; Bhattacharjee, S.; Burritt, D.J.; Tran, L.S.P. (eds.). **Drought Stress Tolerance in Plants, Vol. 1: Physiology and Biochemistry**. Cham: Springer, p. 1-16. https://doi.org/10.1007/978-3-319-28899-4_1

dos Santos, S.M.M.; de Mello Prado, R.; de Souza Júnior, J.P.; Teixeira, G.C.M.; dos Santos Duarte, J.C.; de Medeiros, R.L.S. (2021). Silicon supplied via foliar application and root to attenuate potassium deficiency in common bean plants. **Scientific Reports**, 11:1-13. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-99194-z>

dos Santos, S.M.M.; de Mello Prado, R.; Teixeira, G.C.M.; de Souza Júnior, J.P.; de Medeiros, R.L.S.; Barreto, R.F. (2021). Silicon supplied via roots or leaves relieves potassium deficiency in maize plants. **Silicon**, 14:773-782. <https://doi.org/10.1007/S12633-020-00908-1>

Sardans, J.; Peñuelas, J. (2021). Potassium control of plant functions: Ecological and agricultural implications. **Plants**, 10:419. <https://doi.org/10.3390/PLANTS10020419>

Schaller, J.; Cramer, A.; Carminati, A.; Zarebanadkouki, M. (2020). Biogenic amorphous silica as main driver for plant available water in soils. **Scientific Reports**, 10:1-7. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-59437-x>

Seleiman, M.F.; Al-Suhaibani, N.; Ali, N.; Akmal, M.; Alotaibi, M.; Refay, Y.; Dindaroglu, T.; Abdul-Wajid, H.H.; Battaglia, M.L. (2021). Drought stress impacts on plants and different approaches to alleviate its adverse effects. **Plants**, 10:259. <https://doi.org/10.3390/PLANTS10020259>

Sezen, S.M.; Yazar, A.; Akyildiz, A.; Dasgan, H.Y.; Gencel, B. (2008). Yield and quality response of drip irrigated green beans under full and deficit irrigation. **Scientia Horticulturae**, 117:95-102. <https://doi.org/10.1016/J.SCIENTA.2008.03.032>

Sezen, S.M.; Yazar, A.; Canbolat, M.; Eker, S.; Çelikel, G. (2005). Effect of drip irrigation management on yield and quality of field grown green beans. **Agricultural Water Management**, 71:243-255. <https://doi.org/10.1016/J.AGWAT.2004.09.004>

Sharf-Eldin, A.A.; Alwutayd, K.M.; El-Yazied, A.A.; El-Beltagi, H.S.; Alharbi, B.M.; Eisa, M.A.M.; Alqurashi, M.; Sharaf, M.; Al-Harbi, N.A.; Al-Qahtani, S.M.; Ibrahim, M.F.M. (2023). Response of maize seedlings to silicon dioxide nanoparticles (SiO₂NPs) under drought stress. **Plants**, 12:2592. <https://doi.org/10.3390/PLANTS12142592>

Sharma, P.; Jha, A.B.; Dubey, R.S.; Pessarakli, M. (2012). Reactive oxygen species, oxidative damage, and antioxidative defense mechanism in plants under stressful conditions. **Journal of Botany**, 2012:217037. <https://doi.org/10.1155/2012/217037>

Shehzad, J.; Mustafa, G. (2023). Mechanism of reactive oxygen species regulation in plants. In: **Reactive Oxygen Species: Prospects in Plant Metabolism**, p. 17-41. https://doi.org/10.1007/978-981-19-9794-5_2

Shemi, R.; Wang, R.; Gheith, E.S.M.S.; Hussain, H.A.; Hussain, S.; Irfan, M.; Cholidah, L.; Zhang, K.; Zhang, S.; Wang, L. (2021). Effects of salicylic acid, zinc and glycine betaine on morpho-physiological growth and yield of maize under drought stress. **Scientific Reports**, 11:1-14. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-82264-7>

Shen, X.; Zhou, Y.; Duan, L.; Li, Z.; Eneji, A.E.; Li, J. (2010). Silicon effects on photosynthesis and antioxidant parameters of soybean seedlings under drought and ultraviolet-B radiation. **Journal of Plant Physiology**, 167:1248-1252. <https://doi.org/10.1016/J.JPLPH.2010.04.011>

Shi, Y.; Zhang, Y.; Han, W.; Feng, R.; Hu, Y.; Guo, J.; Gong, H. (2016). Silicon enhances water stress tolerance by improving root hydraulic conductance in *Solanum lycopersicum* L. **Frontiers in Plant Science**, 7:179870. <https://doi.org/10.3389/FPLS.2016.00196>

Singh, P.; Kumar, V.; Sharma, J.; Saini, S.; Sharma, P.; Kumar, S.; Sharma, A. (2023). Multifaceted mechanisms of silicon in alleviation of drought stress in plants. In: **Salinity and Drought Tolerance in Plants: Physiological Perspectives**, p. 437-463. https://doi.org/10.1007/978-981-99-4669-3_22

Singleton, V.L.; Rossi, J.A. Jr. (1965). Colorimetry of total phenolics with phosphomolybdic-phosphotungstic acid reagents. **American Journal of Enology and Viticulture**, 16:144-158.

de Sousa Leite, W.; de Souza Miranda, R.; de Moura Rocha, M.; Dutra, A.F.; Santos, A.S.; da Silva, A.C.; de Brito, F.M.; de Sousa, R.S.; de Araújo, A.S.F.; do Nascimento, C.W.A.; Zuffo, A.M.; de Alcântara Neto, F. (2023). Silicon alleviates drought damage by increasing antioxidant and photosynthetic performance in cowpea. **Journal of Agronomy and Crop Science**. <https://doi.org/10.1111/JAC.12659>

Sulaiman, A.A.; Noor Hassim, M.F. (2024). Effects of silica nanoparticles on morpho-histological and antioxidant activities of rice seedlings under drought stress. **South African Journal of Botany**, 168:497-508. <https://doi.org/10.1016/J.SAJB.2024.03.052>

Teixeira, G.C.M.; Gonzalez-Porras, C.V.; Messias Ferreira, P.; Prado, R. de M.; Silva Oliveira, K.; Carvalho, L.T. da S.; Palaretti, L.F. (2024). Increased absorption and use of nutrients induced by Si is an indicator for tolerance to water deficit in a common bean cultivar cultivated in the field with and without application of K. **Frontiers in Plant Science**, 15:1421615. <https://doi.org/10.3389/FPLS.2024.1421615>

Teixeira, G.C.M.; de Mello Prado, R.; Rocha, A.M.S. (2022). 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**, 208:805-814. <https://doi.org/10.1111/JAC.12511>

Teixeira, G.C.M.; de Prado, R.M.; Rocha, A.M.S.; de Oliveira Filho, A.S.B.; da Sousa Junior, G.S.; Gratão, P.L. (2022). Action of silicon on the activity of antioxidant enzymes and on physiological mechanisms mitigates water deficit in sugarcane and energy cane plants. **Scientific Reports**, 12:1-18. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-21680-9>

Tubaña, B.S.; Heckman, J.R. (2015). Silicon in soils and plants. In: Rodrigues, F.A.; Datnoff, L.E. (eds.). **Silicon and Plant Diseases**. Cham: Springer, p. 7-51. https://doi.org/10.1007/978-3-319-22930-0_2

Ul-Allah, S.; Ijaz, M.; Nawaz, A.; Sattar, A.; Sher, A.; Naeem, M.; Shahzad, U.; Farooq, U.; Nawaz, F.; Mahmood, K. (2020). Potassium application improves grain yield and alleviates drought susceptibility in diverse maize hybrids. **Plants**, 9:75. <https://doi.org/10.3390/PLANTS9010075>

Vanitha, C.; Kathiravan, M.; Umarani, R.; Sathiya, K.; Menaka, C.; Yuvaraj, M.; Cyriac, J. (2024). Seed priming with nano silica alleviates drought stress through regulating antioxidant defense system and osmotic adjustment in soybean (*Glycine max* L.). **Silicon**, 16:2157-2170. <https://doi.org/10.1007/S12633-023-02826-4>

Verma, K.K.; Song, X.P.; Zeng, Y.; Guo, D.J.; Singh, M.; Rajput, V.D.; Malviya, M.K.; Wei, K.J.; Sharma, A.; Li, D.P.; Chen, G.L.; Li, Y.R. (2021). Foliar application of silicon boosts growth, photosynthetic leaf gas exchange, antioxidative response and resistance to limited water irrigation in sugarcane (*Saccharum officinarum* L.). **Plant Physiology and Biochemistry**, 166:582-592. <https://doi.org/10.1016/J.PLAPHY.2021.06.032>

Wang, M.; Zheng, Q.; Shen, Q.; Guo, S. (2013). The critical role of potassium in plant stress response. **International Journal of Molecular Sciences**, 14:7370-7390. <https://doi.org/10.3390/IJMS14047370>

Webber, H.A.; Madramootoo, C.A.; Bourgault, M.; Horst, M.G.; Stulina, G.; Smith, D.L. (2006). Water use efficiency of common bean and green gram grown using alternate furrow and deficit irrigation. **Agricultural Water Management**, 86:259-268. <https://doi.org/10.1016/J.AGWAT.2006.05.012>

Weisany, W.; Razmi, J.; Eshaghabadi, A.H.; Pashang, D. (2024). Silicon nanoparticles (SiNP): A novel and sustainable strategy for mitigating environmental stresses in plants. **Journal of Soil Science and Plant Nutrition**, 24:2167-2191. <https://doi.org/10.1007/S42729-024-01790-1>

Weisany, W.; Razmi, J.; Pashang, D. (2023). Improving seed germination and physiological characteristics of maize seedlings under osmotic stress through potassium nano-silicate treatment. **Frontiers in Plant Science**, 14:1274396. <https://doi.org/10.3389/FPLS.2023.1274396>

Xu, J.; Guo, L.; Liu, L. (2022). Exogenous silicon alleviates drought stress in maize by improving growth, photosynthetic and antioxidant metabolism. **Environmental and Experimental Botany**, 201:104974. <https://doi.org/10.1016/J.ENVEXPBOT.2022.104974>

Yamauchi, Y.; Furutera, A.; Seki, K.; Toyoda, Y.; Tanaka, K.; Sugimoto, Y. (2008). Malondialdehyde generated from peroxidized linolenic acid causes protein modification in heat-stressed plants. **Plant Physiology and Biochemistry**, 46:786-793. <https://doi.org/10.1016/J.PLAPHY.2008.04.018>

Yan, F.; Zhang, F.; Fan, X.; Fan, J.; Wang, Y.; Zou, H.; Wang, H.; Li, G. (2021). Determining irrigation amount and fertilization rate to simultaneously optimize grain yield, grain nitrogen accumulation and economic benefit of drip-fertigated spring maize in northwest China. **Agricultural Water Management**, 243:106440. <https://doi.org/10.1016/J.AGWAT.2020.106440>

Younes, N.A.; El-Sherbiny, M.; Alkharpotly, A.A.; Sayed, O.A.; Dawood, A.F.A.; Hossain, M.A.; Abdelrhim, A.S.; Dawood, M.F.A. (2024). Rice-husks synthesized-silica nanoparticles modulate silicon content, ionic homeostasis, and antioxidants defense under limited irrigation regime in eggplants. **Plant Stress**, 11:100330. <https://doi.org/10.1016/J.STRESS.2023.100330>

Yousaf, M.I.; Riaz, M.W.; Jiang, Y.; Yasir, M.; Aslam, M.Z.; Hussain, S.; Sajid Shah, S.A.; Shehzad, A.; Riasat, G.; Manzoor, M.A.; Akhtar, I. (2022). Concurrent effects of drought and heat stresses on physio-chemical attributes, antioxidant status and kernel quality traits in maize (*Zea mays* L.) hybrids. **Frontiers in Plant Science**, 13:898823. <https://doi.org/10.3389/FPLS.2022.898823>

Yousaf, M.I.; Riaz, M.W.; Shehzad, A.; Jamil, S.; Shahzad, R.; Kanwal, S.; Ghani, A.; Ali, F.; Abdullah, M.; Ashfaq, M.; Hussain, Q. (2023). Responses of maize hybrids to water stress conditions at different developmental stages: accumulation of reactive oxygen species, activity of enzymatic antioxidants and degradation in kernel quality traits. **PeerJ**, 11:e14983. <https://doi.org/10.7717/PEERJ.14983>

Zahra, N.; Hafeez, M.B.; Wahid, A.; Al Masruri, M.H.; Ullah, A.; Siddique, K.H.M.; Farooq, M. (2023). Impact of climate change on wheat grain composition and quality. **Journal of the Science of Food and Agriculture**, 103:2745-2751. <https://doi.org/10.1002/JSFA.12289>

Zargar, S.M.; Mahajan, R.; Bhat, J.A.; Nazir, M.; Deshmukh, R. (2019). Role of silicon in plant stress tolerance: Opportunities to achieve a sustainable cropping system. **3 Biotech**, 9:1-16. <https://doi.org/10.1007/S13205-019-1613-Z>

Zhu, Y.; Jiang, X.; Zhang, J.; He, Y.; Zhu, X.; Zhou, X.; Gong, H.; Yin, J.; Liu, Y. (2020). Silicon confers cucumber resistance to salinity stress through regulation of proline and cytokinins. **Plant Physiology and Biochemistry**, 156:209-220. <https://doi.org/10.1016/J.PLAPHY.2020.09.014>

CAPÍTULO 2 - Silício impulsiona equilíbrio antioxidante para atenuar os efeitos da deficiência hídrica em feijoeiro cultivado em campo com e sem aplicação de potássio

RESUMO - As plantas de feijão comum são sensíveis ao déficit hídrico e uma estratégia para reverter esses danos seria com emprego do silício (Si) e potássio (K). O Si impulsiona a produção de substâncias orgânicas para mitigação de estresse abiótico, como o déficit hídrico. Contudo, faltam pesquisas com o feijoeiro cultivado em campo focando os mecanismos de ação antioxidantes envolvidos. Além disso, não se sabe se o fornecimento adequado de K melhora a rota bioquímica de mitigação do Si, e tão pouco se o uso combinado, é uma estratégia para uso eficiente da água em sistema de cultivo irrigado. Realizou-se essa pesquisa objetivando investigar a resposta bioquímica de plantas de feijão sob três níveis hídricos e doses de Si, via fertirrigação, na ausência e na presença da fertilização potássica. Para tanto, foram desenvolvidos dois experimentos em campo com o feijoeiro sem (-K) e com (+K) adubação potássica, sendo o teor de K no solo correspondente a $6,4 \text{ mmol}_c \text{ dm}^{-3}$. Ambos os experimentos foram constituídos por um fatorial 3×4 : três regimes hídricos: 80%, 60% e 40% da capacidade de retenção de água no solo e quatro doses de Si: 0; 4; 8 e 12 kg ha^{-1} fornecidas via fertirrigação, em esquema de parcela subdividida, dispostos em delineamento de blocos casualizados, com quatro repetições. As análises bioquímicas realizadas foram: atividade de enzimas antioxidantes (SOD, APX e GPOX), conteúdo de prolina, compostos fenólicos, peroxidação lipídica, produção de massa seca e acúmulo de Si e K na parte aérea. A fertilização com Si via fertirrigação em doses relativamente baixa (4 a 8 kg ha^{-1}) evidenciou uma estratégia importante para o cultivo sustentável do feijoeiro, especialmente em áreas com restrição hídrica moderada e até severa, com ou sem fertilização complementar de K. Os efeitos se devem pela modulação da atividade das enzimas SOD, APX e GPOX, além de aumentar o conteúdo de prolina e compostos fenólicos. Estes resultados estão relacionados ao potencial da fertirrigação com Si em promover absorção de Si o suficiente para modular mecanismos de defesa antioxidante enzimático e não enzimático na leguminosa.

Palavras-chave: Fabaceae, defesa antioxidante, fertirrigação silicatada, estresse abiótico

Silicon promotes biochemical balance to mitigate the effects of water deficiency in beans grown in fields with and without K application

ABSTRACT - Common bean plants are sensitive to water deficit, and one strategy to reverse this damage would be to use silicon (Si) and potassium (K). Si enhances the production of organic compounds involved in the mitigation of abiotic stress, such as water deficit. However, there is a lack of research on beans grown in the field focusing on the antioxidant mechanisms involved. Furthermore, it is not known whether adequate K supply improves the biochemical route of Si mitigation, nor whether combined use is a strategy for efficient water use in irrigated cropping systems. This research was conducted to investigate the biochemical response of bean plants under three water levels and Si doses, via fertigation, in the absence and presence of potassium fertilization. To this end, two field experiments were developed with bean plants without (-K) and with (+K) potassium fertilization, with the K content in the soil corresponding to 6.4 mmolc dm⁻³. Both experiments consisted of a 3x4 factorial design: three water regimes: 80%, 60%, and 40% of the soil water retention capacity and four doses of Si: 0, 4, 8, and 12 kg-1 supplied via fertigation, in a split-plot scheme, arranged in a randomized block design, with four replicates. The biochemical analyses performed were: antioxidant enzyme activity (SOD, APX, and GPOX), proline content, phenolic compounds, lipid peroxidation, dry mass production, and Si and K accumulation in the aerial part. Fertilization with Si via fertigation at relatively low doses (4 to 8 kg ha⁻¹) proved to be an important strategy for sustainable bean cultivation, especially in areas with moderate to severe water restrictions, with or without complementary K fertilization. The effects are due to the modulation of SOD, APX, and GPOX enzyme activity, in addition to increasing the content of proline and phenolic compounds. These results are related to the potential of Si fertigation to promote sufficient Si absorption to modulate enzymatic and non-enzymatic antioxidant defense mechanisms in legumes.

Keywords: Fabaceae, antioxidant defense, silicate fertigation, abiotic stress

1 Introdução

O déficit hídrico se destaca como um dos estresses abióticos mais críticos e mais limitantes para agricultura, pois prejudica o metabolismo das plantas e compromete a produção agrícola e a segurança alimentar (Gong et al., 2020; Basu e Kumar, 2021). O estresse por déficit hídrico impulsiona a diminuição de pigmentos fotossintéticos (*Chl b* e *Chl total*), trocas gasosas (fotossíntese líquida, transpiração e condutância estomática) e incrementa o conteúdo de H_2O_2 e MDA, e especialmente, menor atividade de enzimas antioxidantes e conteúdo de prolina (de Sousa Leite et al., 2023; Teixeira et al., 2022; Ning et al., 2020; Teixeira et al., 2022; Makhadmeh et al., 2022; Nisar et al., 2023).

As plantas possuem um sistema eficiente de desintoxicação com mecanismos enzimáticos de eliminação de espécies reativas de oxigênio (ERO), que incluem enzimas, como a superóxido dismutase (SOD, EC 1.15.1.1), a ascorbato peroxidase (APX, EC 1.11.1.11) e a guaiacol peroxidase (GPOX, EC1.11.1.7), que atuam em conjunto para proteger as células de danos oxidativos. A SOD, EC 1.15.1.1 atua na dismutase do O_2^- em H_2O_2 enquanto a APX, EC 1.11.1.11 e a GPOX, EC1.11.1.7 atuam na desintoxicação de H_2O_2 transformando-o em H_2O (Gratão et al., 2005; Hua et al., 2020). Além disso, existe a contribuição de agentes não-enzimáticos de defesa, como os compostos fenólicos e a prolina. O aumento da concentração de prolina é uma resposta notável diante de condições de estresse abiótico. Além de sua função primordial como agente osmótico, a prolina pode desempenhar um papel crucial como um sinal metabólico (Ahammed et al., 2020). A prolina também incrementa o potencial redox nas células, atuando na reposição do suprimento de $NADP^+$, um processo essencial na defesa antioxidante das plantas (Hassine et al., 2008).

A deficiência hídrica pode causar efeitos secundários, limitando a absorção de nutrientes como o potássio (K) (Hu e Schmidhalter, 2005; Qi et al., 2019). A deficiência de K amplifica os efeitos prejudiciais relacionados ao equilíbrio hídrico e ao estresse oxidativo nas plantas. Tal efeito, deve-se ao fato de o K ser fundamental para a ativação de diversas enzimas, estando diretamente envolvido em processos bioquímicos e fisiológicos essenciais para

o desenvolvimento e resistência ao estresse das plantas (Qi et al., 2019; R. Johnson et al., 2022a). A falta de K também agrava o déficit hídrico pois ele é responsável pela otimização da abertura e fechamento dos estômatos diminuindo a eficiência do uso da água (de Mello Prado, 2021b).

Nesse contexto, o uso de fertilizantes, como o silício (Si) pode impulsionar a produção de substâncias orgânicas para mitigação de estresse abiótico, como o déficit hídrico. Plantas cultivadas com o fornecimento de Si sob estresse diminuem os danos oxidativos causados pelas ERO, devido ao seu papel benéfico na diminuição do conteúdo de H_2O_2 , da peroxidação lipídica e do extravasamento de eletrólitos (Moldes et al., 2013). O Si após ser absorvido é depositado na forma de opala nos espaços extracelulares e na parede celular aumentando a resistência das células e diminuindo a taxa de transpiração (Irfan et al., 2023). O Si pode ainda atenuar a deficiência de K, potencializando a eficiência do uso da água e de uso do K, bem como, a atividade enzimática antioxidante (Santos Sarah et al., 2021a, 2021b) e polifenóis (Benslima et al., 2022) favorecendo incremento dos pigmentos e taxas fotossintéticas (Chen et al., 2016b, 2016a). Esse efeito do Si na atenuação da deficiência de K é importante porque é comum a diminuição da absorção de K em plantas com restrição hídrica, especialmente em solos de regiões sob clima tropical, que em geral apresentam baixos níveis de K disponível (Manning, 2012).

A maioria dos estudos que envolve déficit hídrico e Si tem se concentrado em monocotiledôneas, que tendem a acumular grandes quantidades de Si, enquanto a pesquisa em plantas eudicotiledôneas, tais como as leguminosas (Meena et al., 2014), que geralmente possuem menor capacidade de acumulação do elemento, tem sido limitada (Biju et al., 2017a). Uma estratégia para potencializar absorção de Si nas leguminosas seria com uso de fonte solúvel em solução, fornecido via fertirrigação (Peña Calzada et al., 2023) e consequentemente pode favorecer as respostas das plantas. O Si aumenta a eficiência do uso da água em plantas de feijão cultivado em condições de campo, promovendo ajuste fotossintético (Gonzalez-Porras et al., 2024) e equilíbrio nutricional (Teixeira et al., 2024), contudo, não se conhece efeitos similares sobre a rota bioquímica de defesa. Portanto, investigar o papel do Si em leguminosas, como o feijão, poderia fornecer uma compreensão mais precisa

dos mecanismos subjacentes e da função real da resistência à seca mediada por Si nas plantas em condições de campo, bem como elucidar se essas respostas poderiam ser alteradas pelo aumento do K no cultivo.

Deste modo, hipotetizou-se que: i) havendo ótima absorção do Si pelo feijoeiro o elemento pode mitigar danos causados pelo déficit hídrico em plantas de feijão, com ou sem fertilização potássica complementar, e ii) e a ação do Si como agente atenuador do déficit hídrico envolve mecanismos bioquímicos de defesa antioxidante, fato ainda não descrito em plantas de feijão cultivado em condições de campo. Para testar as hipóteses, objetivou-se avaliar o efeito de doses de Si via fertirrigação, na ausência e na presença da fertilização potássica, em três regimes hídricos para fundamentar estratégia para uso eficiente da água em sistema de cultivo irrigado de feijão, bem como, desvendar os mecanismos bioquímicos envolvidos.

Se estas hipóteses forem corroboradas, será evidenciado com bases bioquímicas que o uso otimizado do Si via fertirrigação pode ser uma nova estratégia para potencializar o crescimento desta leguminosa mesmo em áreas com solo sob restrição hídrica. Isso é importante devido impacto socioeconômico, considerando que o feijão comum é a fonte de proteína de custo mais baixo do mundo (Carbas et al., 2020). Além disso, os resultados desse estudo fortalecerão a sustentabilidade deste cultivo frente ao aumento da frequência de seca com as mudanças climáticas (Schaller et al., 2020), que se agrava a cada ano.

2 Material e métodos

2.1 Condições de crescimento e material vegetal

O experimento foi realizado em condições de campo na Fazenda de Ensino, Pesquisa e Extensão da Universidade Estadual Paulista (UNESP), localizada em Jaboticabal ($-21^{\circ} 14' 50.7''$ de latitude e $48^{\circ} 17' 01.8''$ de longitude, 546 m de altitude), São Paulo, Brasil.

Foi cultivado feijão durante a safra de 2022, sendo monitorado na área experimental os dados de temperatura do ar, umidade do ar, radiação global e precipitação pluvial (Figura 1).

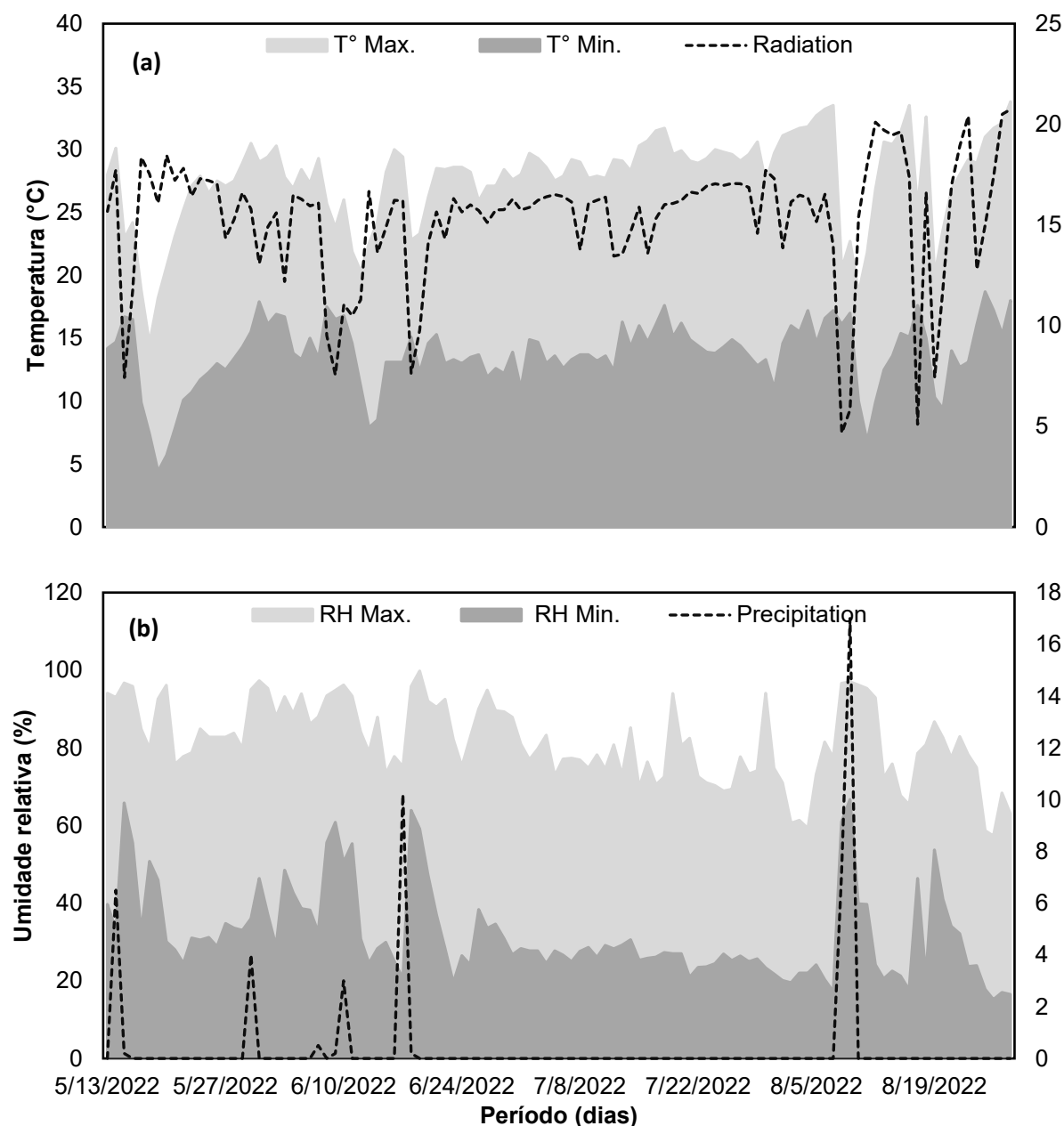


Figura 1. Dados meteorológicos da área experimental durante o cultivo de feijão. Temperatura máxima (T° Max.), temperatura mínima (T° Min.) e radiação global (a) umidade relativa máxima (RH Max.), umidade relativa mínima (RH Min.) e precipitação (P) (b).

O solo da área experimental foi classificado como um Latossolo Vermelho eutroférico (LVef) (Andrioli and Centurion, 1999). Previamente à instalação dos experimentos, foram coletadas amostras de solos da camada de 0-20 e 20-40 cm de profundidade para análise química para fins de fertilidade do solo (Raij et

al., 2001), para determinação do teor de Si disponível (Korndörfer et al., 2004) e para análise granulométrica (Camargo et al., 1986).

A análise química do solo nas camadas de 0-20 e 20-40cm de profundidade respectivamente, apresentou os seguintes resultados: pH (CaCl₂)= 6.2 e 5.6; matéria orgânica = 20.5 e 19 g dm⁻³; P= 59 e 36 mg dm⁻³, S= 11 e 13 mg dm⁻³; Ca= 37 e 40 mg dm⁻³; Mg= 17 e 18mmol_c dm⁻³; K= 6.2 e 6.4 mmol_c dm⁻³; H + Al= 22.5 e 23 mmol_c dm⁻³; soma de bases (SB = Ca²⁺ + Mg²⁺ + K⁺)= 60.6 e 64 mmol_c dm⁻³, capacidade de troca catiônica (CTC= SB + H+Al)= 82.9 e 87.2 mmol_c dm⁻³ e saturação de bases (V= SBx100/CTC)= 73 e 73%. O teor de Si disponível foi de 3,0 mg dm⁻³ e foi considerado como baixo no solo. Os teores de micronutrientes do solo foram determinados na camada de 0-20 cm de profundidade: B= 0.41mg dm⁻³; Cu= 6.4mg dm⁻³; Fe= 11 mg dm⁻³; Mn= 23.6 mg dm⁻³; Zn= 3.9 mg dm⁻³.

Os resultados da análise granulométrica do solo (%) nas camadas de 0-20 e 20-40 cm de profundidade, respectivamente foram iguais a: argila 60 e 62; silte 23 e 20; areia total 17 e 17; areia grossa 7 e 8; areia fina 10 e 9.

O preparo do solo foi realizado em sistema de plantio convencional a partir da roçagem de plantas daninhas da área, seguido de subsolagem e duas operações de gradagem com grade com disco de 32 polegadas e a outra com disco de 24 polegadas. Foi instalado um sistema de irrigação por gotejamento autocompensante com espaçamento de 0,5 m entre emissores e vazão de 1,6 L h⁻¹, utilizando uma linha de gotejo para cada linha de cultivo.

Sementes de feijão da cultivar Carioca BSR FC 402 foram utilizadas porque possuem elevado potencial produtivo, alto valor nutricional, uniformidade de coloração e tamanho dos grãos, resistência ao mosaico comum e resistência moderada à antracnose, à ferrugem e à murcha-de-fusário (Melo et al., 2017). A semeadura foi realizada com espaçamento entre linhas de 0,45 m e 15 sementes por m, totalizando uma população de 333 mil plantas por ha. O feijão foi utilizado por ser uma planta da família Fabaceae e por tanto, possui mecanismo passivo de absorção de Si, seguindo o gradiente de transpiração (Mitani et al., 2009).

2.2 Tratamentos e delineamento experimental

A pesquisa corresponde a dois experimentos com o feijoeiro contendo dois níveis de K no solo, ou seja, uma área sem adubação (-K) (Experimento 1) e outra área adjacente com adubação (+K) (Experimento 2). Os dois experimentos foram constituídos por um fatorial 3x4, sendo: três regimes hídricos: 80% (sem déficit hídrico - WWD), 60% (déficit hídrico moderado - MWD) e 40% (déficit hídrico severo - SWD) da capacidade de retenção de água no solo (CRA) combinado com quatro doses de Si fornecidas via fertirrigação: 0, 4, 8 e 12 kg ha⁻¹.

Os experimentos foram instalados em esquema de parcela sub-dividida dispostos em delineamento de blocos casualizados, com quatro repetições. As parcelas experimentais tiveram dimensões de 2,25 m de largura com espaçamento entre linhas de 0,45 m e 6 m de comprimento, tendo área total de 13,5 m² e área útil para as avaliações de 5,4 m².

As doses de Si foram determinadas considerando indicação do International Rice Research Institute (IRRI) que recomenda o uso de doses de 40 a 60 kg ha⁻¹ de silicato de potássio (15% de Si) (equivalente a 6 a 9 kg ha⁻¹ de Si) (IRRI, 1993). As doses foram aplicadas em seis parcelamentos, aos 22, 32, 38, 41, 44 e 47 dias após da emergência plena (DAE) com auxílio de uma bomba injetora de 1500 MPa de pressão permitindo injetar o Si na linha principal de irrigação.

A fonte de Si utilizada foi o silicato de sódio estabilizado com sorbitol (Si 115,2 g L⁻¹, Na₂O = 60,5 g L⁻¹). O sorbitol presente nessa fonte possui propriedades estabilizantes que permitem maior concentração de formas monoméricas de Si (Babiker e Duncan, 1974), diminuindo os riscos de polimerização da solução aplicada. As doses aplicadas foram fracionadas para favorecer a absorção do Si e para que as concentrações usadas em cada aplicação fossem menores que 3,5 mmol L⁻¹ e, portanto, sem risco de polimerização do elemento. O parcelamento foi realizado conforme o número de aplicações, sendo usadas as concentrações de 0; 0,67; 1,33 e 2,00 kg ha⁻¹ de Si. Na lâmina de 2,5 mm (2,5 L m²) essas concentrações correspondem a 0; 0,96; 1,90 e 2,85 mmol L⁻¹ de Si na solução em cada aplicação.

As adubações foram realizadas baseando-se nos teores do solo e seguindo recomendação de adubação para o estado de São Paulo para a cultura do feijão (Quaggio et al., 2022). A adubação fosfatada foi realizada aplicando dose de 40 kg ha^{-1} de P_2O_5 na forma de superfosfato simples no sulco de semeadura. A adubação nitrogenada foi realizada via fertirrigação utilizando ureia de forma parcelada, aplicando-se 20, 30, 45 e 45 kg ha^{-1} de N aos 7, 20, 31 e 43 DAE, respectivamente. Para as plantas cultivadas com adubação de K foi aplicada dose de 50 kg ha^{-1} de K_2O na forma de KCl aplicado à lanço e manualmente aos 14 DAE. Na condição de cultivo sem adubação potássica, as plantas não receberam fornecimento de K, mas receberam a adubação dos demais nutrientes.

Os níveis de capacidade de retenção de água no solo (CRA) foram determinados utilizando técnicas de coleta de amostras indeformadas do solo. A curva de retenção de água foi construída por meio de testes em mesa de tensão e câmara de pressão de Richards (Klute, 2018). A partir da curva de retenção de água determinou-se a capacidade de campo (CC) em $0,41 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ e o ponto de murcha permanente (PMP) em $0,13 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$. A partir da CC e PMP, determinou-se a quantidade de água disponível (AD) em $0,28 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ e, consequentemente, a capacidade total de água disponível (CAD) utilizando AD e sistema radicular efetivo do feijão em 0,4 m, sendo a CAD = 112 mm. A partir da CAD, ajustou-se os níveis de capacidade de retenção de CRA à 89,6 mm, 67,2 mm e 44,8 mm para os regimes hídricos de 80%, 60% e 40% da CRA, respectivamente.

Inicialmente, as plantas foram mantidas em condições hídricas adequadas (80% da CRA), enquanto os níveis de déficit hídrico moderado e severo foram impostos no período pré-floração (R). O volume de água aplicado para manter os níveis de CRA foram determinados por meio de balanços hídricos diários, que levaram em consideração o excesso ou o déficit de água no solo em relação à CRA de cada regime hídrico. As entradas consideradas nesse sistema incluíram a água de irrigação e a precipitação pluvial, enquanto a única saída de água considerada foi a evapotranspiração da cultura (ETc), assumindo-se que a percolação profunda e o escoamento foram insignificantes (H.A. Webber et al., 2006)

Para monitoramento da umidade volumétrica do solo (θ) durante o experimento, diariamente realizou-se leituras da umidade do solo pelo método indireto do Reflectômetro no Domínio do Tempo (TDR) (HydroSencell). Para uso do TDR, inicialmente foram coletadas amostras de solo nos mesmos pontos para determinação direta da umidade do solo em base de massa. A precisão do TDR com umidade do solo foi considerada suficiente considerando o $R^2 = 0.84$ ($y = 1,0294x - 3,2562$) em que a leitura do TDR subestimou a umidade do solo (θ) em 2.2% com desvio padrão de 1%. As umidades do solo estabelecida para cada regime hídrico foram de 0.354, 0,283 e 0,212 $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ para os regimes hídricos de 80%, 60% e 40% da CRA, respectivamente.

As irrigações foram aplicadas quando o déficit hídrico atingiu o esgotamento máximo permitido da água disponível no solo. Para o manejo de irrigação recomendado pela FAO, na condição sem déficit hídrico, as parcelas experimentais foram irrigadas quando 45% da água disponível no solo foi esgotada, portanto, a umidade do solo (θ) chegou em 0,2864 $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ e armazenamento de água em 49.58 mm. Os fatores de esgotamento para os tratamentos de déficit moderado e severo foram de 60% e 80%, com umidade do solo (θ) em 0,242 e 0,184 $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ e armazenamento de 26,88 e 13,44 mm, respectivamente (H.A. Webber et al., 2006)

Foi realizado manejo fitossanitário para controle para lagarta rosca (*Agrotis ipsilon*) aos 6 DAE usando Chlorantraniliprole and Lambda-cyhalothrin (250 mL) + Mineral oil (150 mL adjuvante) em 150 L de calda aplicado com vazão de 335 L ha⁻¹. Para o controle da mosca branca (*Bemisia tabaci*) e fungos, uma aplicação preventiva foi realizado aos 14 DAE utilizando Thiamethoxam (100 g L⁻¹) + Fluxapyroxad and Pyraclostrobin (150 mL) + Mineral oil (150 mL) em 120 L de calda aplicado com vazão de 250 L ha⁻¹. Aos 30 e 42 DAE foram realizadas aplicações para controle da mosca branca usando Thiamethoxam (100 g L⁻¹) + Mineral oil (150 mL) em 120 L de calda aplicado com vazão de 250 L ha⁻¹. O controle das plantas daninhas foi feito de maneira manual até o fechamento das linhas pelas plantas nas parcelas.

As plantas foram cultivadas até completar-se o ciclo fenológico e as análises foram realizadas na fase de formação de vagens (estádio fenológico R7), utilizando-se 10 plantas coletadas na área útil de cada parcela.

2.3 Análises realizadas

2.3.1 Compostos fenólicos

A extração dos compostos fenólicos totais foi realizada utilizando dez discos foliares frescos (26,4 mm² cada) coletados da quarta folha completamente desenvolvida. As amostras foram imediatamente pesadas e inseridas em metanol concentrado por um período de 3 horas em condição escura. O teor de fenóis foi determinado por reação colorimétrica induzida por folin-ciocalteau 2 N e carbonato de sódio 20%, com leitura em espectrofotômetro (B442, Micronal, BR) a 765 nm (Singleton e Rossi, 1965).

2.3.2 Peroxidação lipídica

A quarta folha completamente desenvolvida de plantas de feijão foi coletada e imediatamente armazenada em N₂ líquido e as amostras transportadas do campo até o laboratório. Seguidamente, foram acondicionadas em ultrafreezer na temperatura de -80°C até o momento da realização da análise.

A determinação da peroxidação lipídica foi realizada a partir da estimativa do conteúdo de substâncias reativas ao ácido tiobarbitúrico, conforme descrito por (Heath e Packer, 1968). A concentração de malondialdeído (MDA) foi determinada em espectrofotômetro (DU640, Beckman, EUA) a 535 e 600 nm. Os dados foram calculados usando um coeficiente de extinção de $1,55 \times 10^{-5}$ mol⁻¹ cm⁻¹ (Gratão et al., 2012), sendo expressos em nMol g⁻¹ de matéria fresca.

2.3.3 Conteúdo de prolina

Determinado em amostras previamente armazenadas em N₂ líquido, usando a reação nihidrina (Bates et al., 1973). A concentração de prolina foi medida a 520 nm em espectrofotômetro (DU640, Beckman, EUA) sendo estimada usando uma curva padrão e expressa em µmol g⁻¹ de massa fresca.

2.3.4 Extração de proteínas

Inicialmente foi obtido os extratos proteicos amostras previamente armazenadas em N₂ líquido (Gomes-Junior et al., 2007). O material vegetal foi macerado em N₂ líquido, homogeneizado em tampão de fosfato de potássio contendo ácido etileno diaminotetracético, ditioneitol e polivinilpolipirrolidona. O homogenato foi centrifugado, o sobrenadante armazenado em alíquotas a -80°C, e posteriormente utilizado para determinação das enzimas antioxidantes. A atividade enzimática específica foi expressa a partir da concentração de proteínas totais previamente determinada, segundo Bradford (1976).

2.3.5 Superóxido dismutase (SOD, EC 1.15.1.1)

A atividade da SOD, EC 1.15.1.1 foi determinada a partir da medida da inibição da redução fotoquímica do cloreto de nitro azul tetrazólio, realizado em uma câmara de reação iluminada por uma lâmpada fluorescente de 15 W, a 25°C. A medição foi realizada utilizando um espectrofotômetro a 560 nm e os resultados expressos em SOD U mg⁻¹ de proteína (Giannopolitis e Ries, 1977).

2.3.6 Guaiacol peroxidase (GPOX, EC1.11.1.7)

A atividade da GPOX, EC1.11.1.7 foi determinada em uma mistura de reação contendo tampão fosfato-citrato (fosfato de sódio dibásico 0,2 M e ácido cítrico 0,1 M) (pH 5,0), guaiacol (0,5%) e extrato vegetal. A mistura foi agitada com a adição de H₂O₂ e incubada a 30°C por 15 min. As amostras foram transferidas imediatamente para um banho de gelo, para interromper a reação, em seguida adicionou-se uma solução de metabissulfito de sódio (2%) (Monteiro et al., 2011). A absorbância foi monitorada no comprimento de onda de 450 nm, os resultados foram expressos em U g proteína⁻¹.

2.3.7 Ascorbato peroxidase (APX, EC 1.11.1.11)

A atividade da APX EC 1.11.1.11 foi determinada seguindo-se a decomposição de peróxido de hidrogênio por 1 minuto, por alterações na absorbância a 290 nm (Moldes et al., 2008). Para tal, foi adicionado 50 µL do extrato enzimático bruto em 950 µL de um meio de reação. O tampão de incubação foi composto por fosfato de potássio 80 mM, pH 7,0, ácido ascórbico

5 mM, EDTA 1 mM e H₂O₂ 1 mM. Os resultados foram expressos em nmol min⁻¹ mg⁻¹ proteína.

2.3.8 Produção de massa seca

A parte aérea das plantas foi coletada e lavada em água corrente, solução detergente (0,1% v/v), solução de HCl (0,3% v/v) e posteriormente em água deionizada. O material vegetal foi seco em estufa de circulação forçada de ar (TE-394/3-MP, Tecnal, BR) a 65±5°C, até atingir uma massa constante sendo obtido a massa seca. Cada unidade experimental foi constituída por 10 plantas coletada aleatoriamente na área útil das parcelas.

2.3.9 Acúmulo de Si e K na parte aérea

As amostras de tecido vegetal coletadas para determinação da massa seca parte aérea foram lavadas conforme descrito anteriormente, e em seguida as amostras de folhas foram secas em estufa de circulação forçada de ar (TE-394/3-MP, Tecnal, BR) a 65±5°C, e previamente moídas em moinho do tipo Willey e utilizadas para determinação dos teores de Si e nutrientes.

O teor de Si foi obtido pela extração do elemento com solução de peróxido de hidrogênio e hidróxido de sódio em estufa de circulação forçada de ar (TE-394/3-MP, Tecnal, BR) a 120±5°C (Kraska e Breitenbeck, 2010) e a leitura realizada por colorimétrica com molibdato de amônio, ácido oxálico e HCl usando espectrofotômetro (B442, Micronal, BR) a 410 nm (Korndörfer et al., 2004).

O teor foliar de K foi determinado a partir da digestão das amostras com ácido perclórico e ácido nítrico (2:1) (Bataglia et al., 1983) e a leitura foi realizada por espectrofotometria de absorção atômica.

O acúmulo dos elementos na parte aérea foi determinado a partir da relação dos teores obtidos com a massa seca das plantas, utilizando a equação abaixo:

$$\begin{aligned} & \text{Acúmulo de elemento (g ou mg por planta)} \\ &= \frac{\text{Teor do elemento (g ou mg kg}^{-1}\text{)}}{\text{Massa seca (kg por planta)}} \end{aligned}$$

2.4 Análise estatística

Os dados foram submetidos a uma análise de variância pelo teste F ($p \leq 0,05$), após verificação da normalidade e homocedasticidade das variâncias (teste W de Shapiro-Wilks e teste de Bartlett). Os dados quantitativos, correspondentes as doses de Si, foram analisados por meio de modelos matemáticos de regressão. Os dados qualitativos, correspondentes aos regimes hídricos, foram analisados usando teste de comparação de médias de Tukey ($p \leq 0,05$).

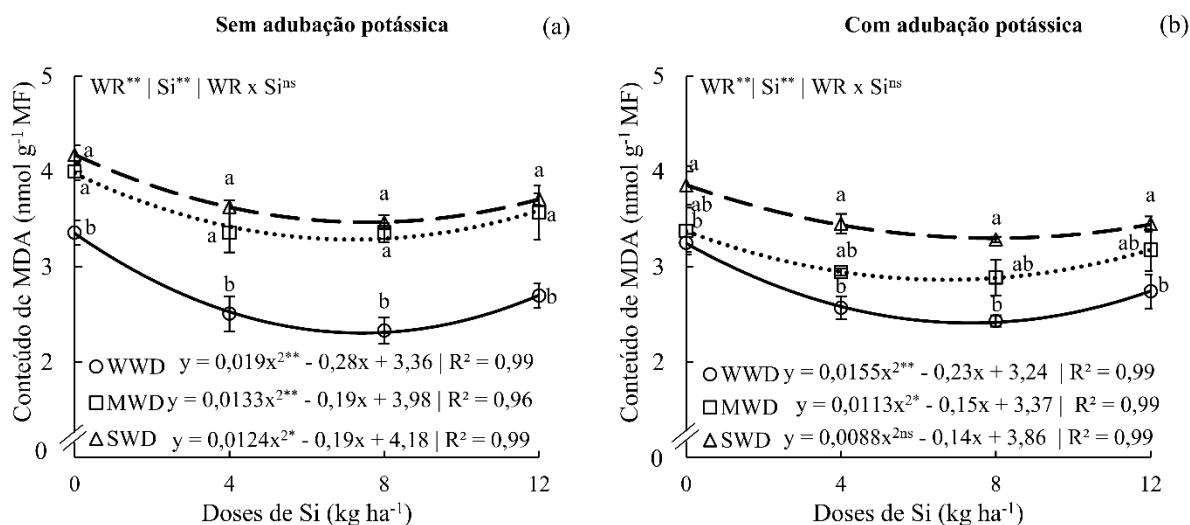
Para investigar as relações entre as variáveis e explicar a variância com base nas dimensões principais (componentes), foi realizada uma análise de componentes principais (PCA) utilizando uma matriz de covariância como referência. Além disso, a estrutura dos dados foi examinada por meio de uma análise de agrupamento hierárquico, empregando a distância euclidiana como métrica e o método de ligação simples para formar os agrupamentos. Ambas as análises, PCA e agrupamento hierárquico, foram incluídas com o suporte da linguagem de programação Python (versão 3.9.7; Python Software Foundation).

3. Resultados

O conteúdo de MDA nas plantas foi influenciado pelos fatores isolados regime hídrico (WWD, MWD e SWD) e doses de Si (ambos a $p < 0,01$) nas duas condições de adubação potássica (Figura 2a, b). As doses de Si apresentaram efeito com ajuste polinomial quadrático para os três regimes hídricos avaliados em ambas as condições de K. Plantas sem adubação com K apresentaram os mínimos conteúdos de MDA de 2,33; 3,30 e 3,45 nmol g⁻¹ nas doses de Si iguais a 7,37; 7,14 e 7,66 kg ha⁻¹ respectivamente, para os regimes hídricos WWD, MWD e SWD (Figura 2a). Plantas com adubação potássica nas doses de Si de 7,42; 6,64 e 7,95 kg ha⁻¹ apresentaram os mínimos conteúdos de MDA de 2,39; 2,87 e 3,30 nmol g⁻¹, para os regimes hídricos WWD, MWD e SWD, respectivamente (Figura 2b). O conteúdo de MDA em plantas cultivadas sob

MWD não diferiram das plantas sob SWD em todos os níveis de Si nas condições sem e com adubação potássica (Figura 2a, b).

Figura 2. Conteúdo de MDA (a, b) na parte aérea de plantas de feijão cultivada sem déficit hídrico – WWD (80% da capacidade de retenção de água - WRC), com déficit hídrico moderado – MWD (60% de WRC) e com déficit hídrico severo – SWD (40% de WRC); combinado com doses de Si fornecidas via fertirrigação: 0, 4, 8 e 12 kg ha⁻¹, sem e com adubação potássica. Letras mostram diferenças para os regimes hídricos (WR) em cada dose de Si ($p < 0,05$, teste de Tukey). * e **: significativo a 1 e 5% de probabilidade, respectivamente, e ^{ns}: não significativo pelo teste F.



A atividade da SOD, EC 1.15.1.1 na parte aérea das plantas sem e com adubação potássica apresentou efeito da interação entre os fatores (WR x Si) (ambos $p < 0,01$) (Figura 3a, b). Em ambas as condições de adubação potássica as doses de Si apresentaram efeito com ajuste polinomial quadrático para os três regimes hídricos.

Plantas sem adubação com K apresentaram as máximas atividades da SOD de 94,23; 111,98 e 120,89 U mg⁻¹ de proteína, nas doses de Si iguais a 10,38; 4,36 e 6,29 kg ha⁻¹ para WWD, MWD e SWD, respectivamente (Figura 3a). Plantas com adubação potássica nas doses de Si iguais a 4,14; 5,37 e 5,97 kg ha⁻¹ apresentaram as máximas atividades da SOD, EC 1.15.1.1 de 69,37;

54,58; 97,52 U mg⁻¹ de proteína, respectivamente para WWD, MWD e SWD (Figura 3b).

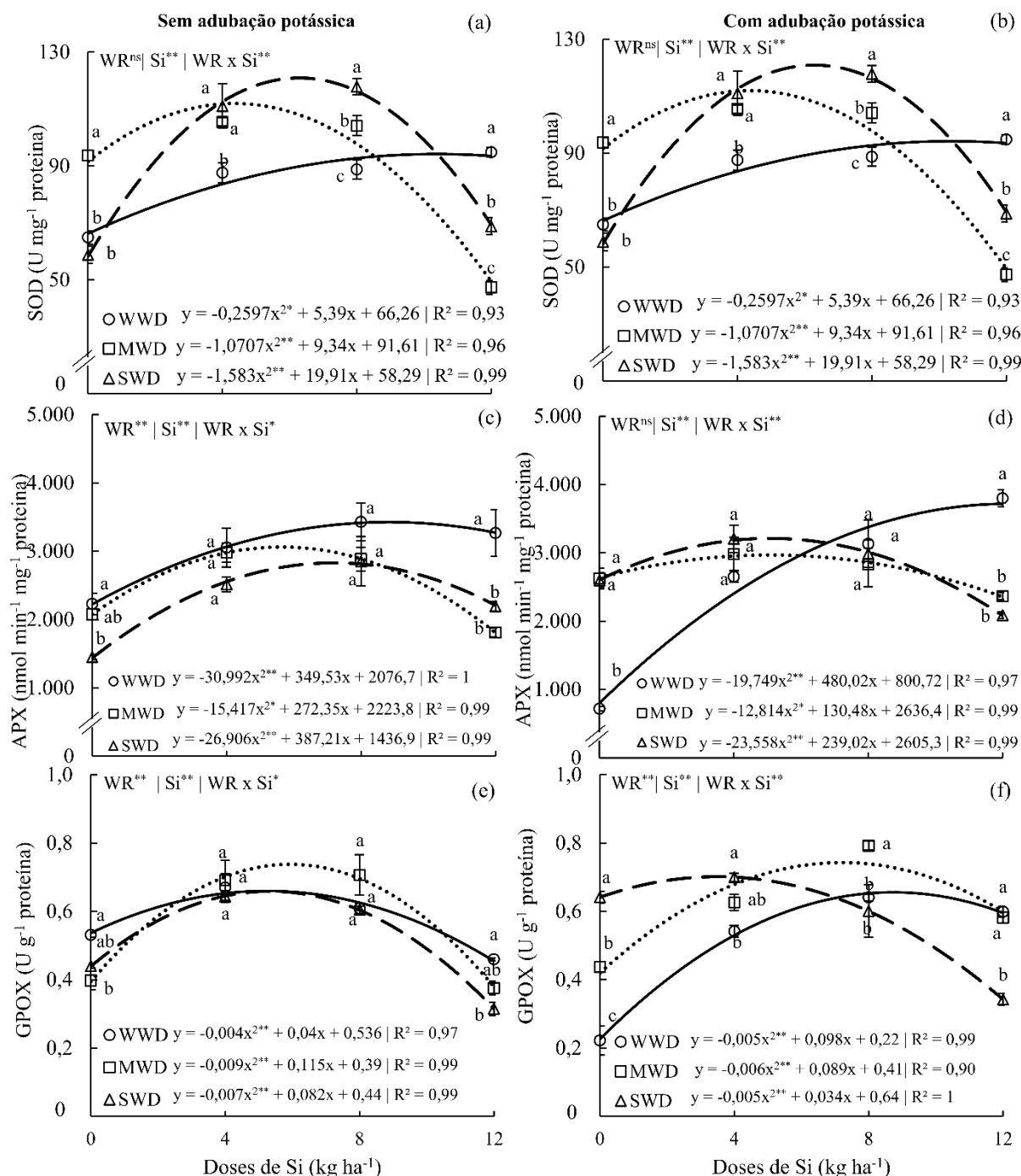


Figura 3. A atividade da (SOD, EC 1.15.1.1) (a, b), APX, EC 1.11.1.11 (c, d) e GPOX, EC 1.11.1.7 (e, f) na parte aérea de plantas de feijão cultivada sem déficit hídrico – WWD (80% da capacidade de retenção de água - WRC), com déficit hídrico moderado – MWD (60% de WRC) e com déficit hídrico severo – SWD (40% de WRC); combinado com doses de Si fornecidas via fertirrigação: 0, 4, 8 e 12 kg ha⁻¹, sem e com adubação potássica. Letras mostram diferenças para os regimes hídricos (WR) em cada dose de Si ($p < 0,05$, teste de Tukey). * e **: significativo a 1 e 5% de probabilidade, respectivamente, e ^{ns}: não significativo pelo teste F.

Plantas sem adubação potássica sob SWD apresentaram maior atividade da (SOD, EC 1.15.1.1) independente das doses de Si, em relação às plantas sob WWD e MWD com exceção na dose 4 kg ha⁻¹ de Si. Plantas cultivadas sob MWD não diferiram das plantas sob SWD.

A atividade da APX, EC 1.11.1.11 na parte aérea das plantas foi influenciada pela interação entre os fatores (WR x Si) em plantas sem ($p < 0,05$) e com adubação potássica ($p < 0,01$) (Figura 3c, d). a atividade da APX apresentou efeito com ajuste polinomial quadrático em resposta às doses crescentes de Si nos três regimes hídricos em ambas as condições de K.

Plantas sem e com adubação potássica nas doses de Si iguais a 5,6; 8,8; 7,2 e 12,2; 5,1; 5,1 kg ha⁻¹ apresentaram as máximas atividade da APX, EC 1.11.1.11 de 3062,206; 3426,604; 2830,005 e 3717,566; 2968,557; 3211,576 nmol min⁻¹ mg⁻¹ proteína, para os regimes hídricos WWD, MWD e SWD, respectivamente (Figura 3c, d). Plantas sob WWD em ambas condições de K apresentaram maiores atividade da APX, EC 1.11.1.11 na maior dose de Si (12 kg ha⁻¹) em relação a MWD e SWD (Figura 3d).

A atividade da GPOX, EC1.11.1.7 nas plantas sem e com adubação potássica, foi influenciada pela interação entre os fatores (WR x Si) (ambos a $p < 0,01$). As doses de Si causaram efeito com ajuste polinomial quadrático para os três regimes hídricos, no cultivo sem e com adubação potássica (Figura 3e, f).

As máximas atividades da GPOX, EC1.11.1.7 correspondentes a 2,362; 2,318; 1,661 e 2,305; 2,093; 1,981 U g proteína⁻¹, foram observadas nas doses de Si iguais a 4,6; 5,1; 4,5 e 5,6; 5,2; 4,2 kg ha⁻¹ para os regimes hídricos WWD, MWD e SWD, respectivamente sem e com adubação potássica, respectivamente (Figura 3e, f). Plantas cultivadas sem adubação potássica sob WWD não diferiram de plantas sob MWD com fornecimento de 4 e 8 kg ha⁻¹ de Si (Figura 3e), e plantas sob SWD apresentaram atividade da GPOX, EC1.11.1.7 semelhante às das plantas cultivadas sob MWD com fornecimento de 4 kg ha⁻¹ de Si (Figura 3f).

A interação entre os fatores (WR x Si) ($p < 0,01$) influenciou o conteúdo de prolina na parte aérea das plantas nas duas condições de K. As doses de Si causaram efeito com ajuste polinomial quadrático para os regimes hídricos MWD e SWD e linear para o WWD em ambas as condições de K (Figura 4a, b).

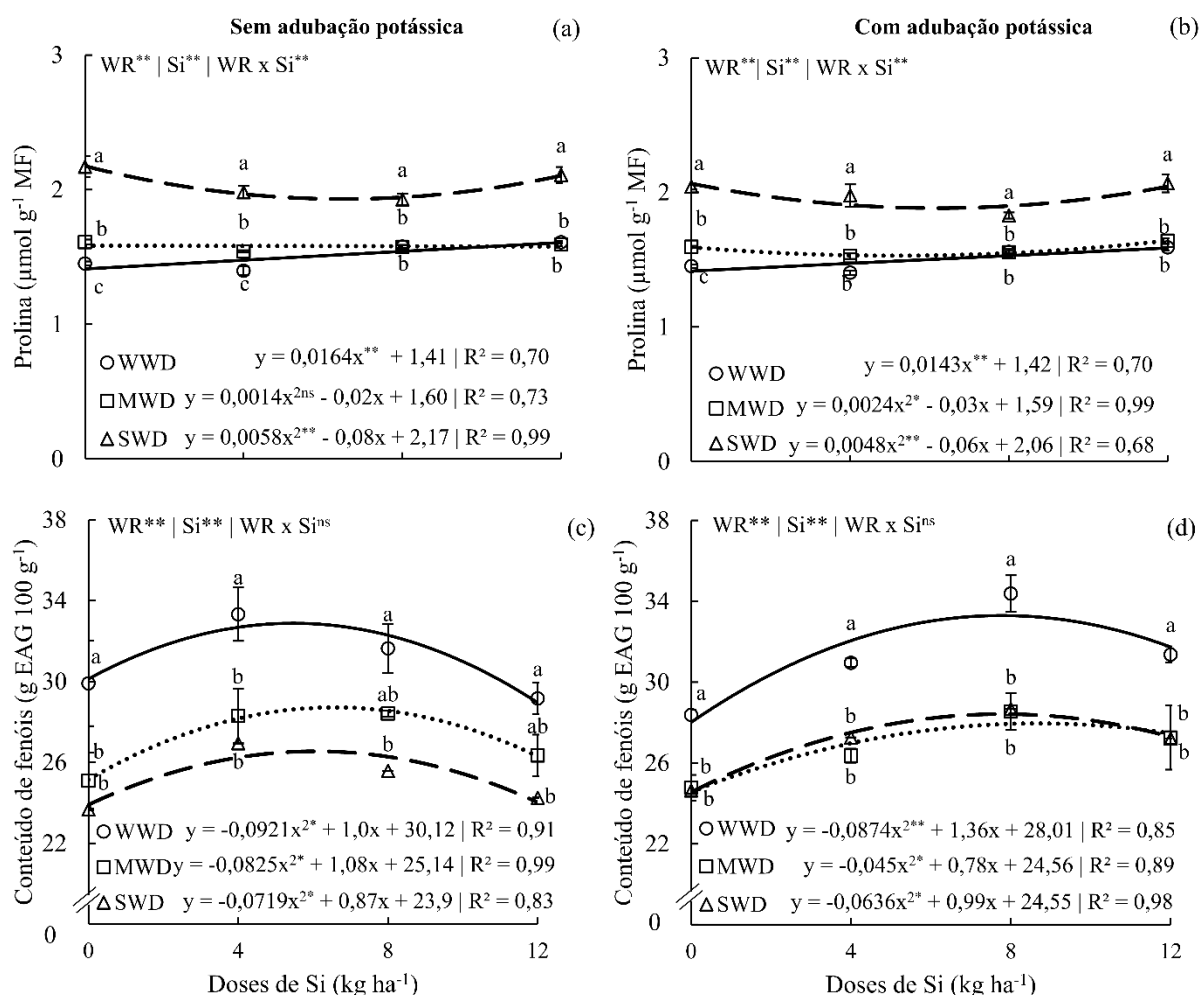


Figura 4. Conteúdo de prolina (a, b) e fenóis (c, d) na parte aérea de plantas de feijão cultivada sem déficit hídrico – WWD (80% da capacidade de retenção de água – WRC), com déficit hídrico moderado – MWD (60% de WRC) e com déficit hídrico severo – SWD (40% de WRC); combinado com doses de Si fornecidas via fertirrigação: 0, 4, 8 e 12 kg ha^{-1} , sem e com adubação potássica. Letras mostram diferenças para os regimes hídricos (WR) em cada dose de Si ($p < 0,05$, teste de Tukey). * e **: significativo a 1 e 5% de probabilidade, respectivamente, e ^{ns}: não significativo pelo teste F.

Plantas sem adubação com K apresentaram os máximos conteúdos de prolina correspondente a 1,529; 1,894 $\mu\text{mol g}^{-1}$, nas doses de Si iguais a 7,1; 6,9 kg ha^{-1} para os regimes hídricos MWD e SWD, respectivamente (Figura 4a). Por outro lado, plantas com adubação potássica nas doses de Si iguais a 6,3; 6,3 kg ha^{-1}

ha⁻¹ apresentaram os maiores conteúdos de prolina de 1,496; 1,873 $\mu\text{mol g}^{-1}$ MF, respectivamente para os MWD e SWD (Figura 4b). Plantas sob SWD, apresentaram maior prolina independente das doses de Si, em ambas as condições potássicas, em relação aos regimes WWD e MWD (Figura 4a, b).

O conteúdo de fenóis nas plantas sem adubação potássica foi influenciado apenas pelos fatores isolados (regimes hídricos e doses de Si) (ambos a $p < 0,01$) (Figura 4c). Contudo, as plantas com adubação com K apresentaram efeito da interação (WR x Si) ($p < 0,01$) (Figura 4d). Nas duas condições de K, as plantas apresentaram efeito com ajuste polinomial quadrático às doses de Si para os três regimes hídricos (Figura 4c, d).

Plantas sem adubação com K nas doses de Si iguais a 5,42; 6,54 e 6,05 kg ha⁻¹ apresentaram os máximos valores para conteúdo de fenóis de 32,83; 28,67 e 26,50 g EAG 100 g⁻¹, respectivamente, para WWD, MWD e SWD (Figura 4c). Plantas com adubação potássica, apresentaram os máximos conteúdo de fenóis de 33,30; 27,93 e 28,40 g EAG 100 g⁻¹, nas doses 7,78; 8,66 e 7,78 kg ha⁻¹ de Si (Figura 4d). Plantas sob WWD, independente da condição de K, apresentaram maior conteúdo de fenóis em todas as doses de Si, em relação às condições de MWD e SWD.

O acúmulo de Si na parte aérea das plantas sem adubação com K apresentou efeito da interação entre os fatores (WR x Si) ($p < 0,01$) (Figura 5a), enquanto nas plantas com adubação potássica ocorreu apenas efeito dos fatores isolados regime hídrico e doses de Si (ambos a $p < 0,01$) (Figura 5b). As doses de Si proporcionaram efeito com ajuste de regressão polinomial quadrático nos três regimes hídricos, independente da condição potássica.

Plantas sem adubação potássica obtiveram seus máximos acúmulos de 68,7; 38,2 e 21,4 mg por planta de Si nas doses de 6,8; 6,7 e 6,5 kg ha⁻¹ de Si, respectivamente, para os regimes hídricos WWD, MWD e SWD (Figura 5a). Plantas com adubação potássica apresentaram os máximos acúmulos de 59,8; 37,8 e 21,1 mg por planta, obtidos nas doses 5,8; 6,2 e 7,0 kg ha⁻¹, respectivamente (Figura 5b). O menor acúmulo de Si foi observado nos regimes MWD e SWD em todas as doses de Si, em relação à condição WWD, e independente da condição de K.

Os fatores isolados regime hídrico e doses de Si (ambos a $p < 0,01$), influenciaram acúmulo de K na parte aérea das plantas em ambas as condições de adubação potássica. As doses de Si causaram efeito com ajuste polinomial quadrático para todos os regimes hídricos (Figura 5c, d) no cultivo sem e com adubação potássica. Plantas sem adubação potássica apresentaram máximos acúmulos de K de 0,6; 0,4 e 0,3 g por planta, nas doses de 6,9; 8,7 e 6,4 kg ha⁻¹, respectivamente, para WWD, MWD e SWD (Figura 5c).

Os acúmulos máximos de K nas plantas que receberam adubação potássica foram de 0,6; 0,5 e 0,4 g por planta, nas doses de 6,9; 9,0 e 9,2 kg ha⁻¹ de Si respectivamente, para WWD, MWD e SWD (Figura 5d). Plantas cultivadas sem adubação potássica e sem déficit hídrico tiveram os maiores acúmulos de K em todas as doses de Si, em relação as plantas sob MWD e SWD. Esse fato também ocorreu quando as plantas receberam adubação com K, exceto na maior dose de Si (12 kg ha⁻¹).

A massa seca da parte aérea das plantas sem e com adubação potássica, foi influenciado pelos fatores isolados regime hídrico e doses de Si (ambos a $p < 0,01$). As doses de Si causaram efeito com ajuste polinomial quadrático para os três regimes hídricos, no cultivo sem e com adubação potássica (Figura 5e, f).

Os máximos valores de massa seca da parte aérea obtidos em plantas sem adubação potássica foram de (24,5; 20,01 e 15,78 g) e com adubação potássica (27,81; 21,59 e 17,63 g) nas doses de Si iguais a 5,78; 7,50 e 7,23; 6,08; 7,31 e 8,21 kg ha⁻¹, respectivamente, para os regimes hídricos WWD, MWD e SWD (Figura 5e, f). Na dose 12 kg ha⁻¹ plantas cultivadas sob MWD, não diferiram das plantas sob WWD na condição sem adubação potássica, e plantas sob SWD com fornecimento de 4 kg ha⁻¹ de Si apresentaram massa seca semelhante às das plantas sob MWD (Figura 5e). Por outro lado, plantas adubadas com K e sob SWD, mas que receberam Si em doses maiores (8 e 12 kg ha⁻¹) apresentaram a mesma massa seca de plantas sob MWD (Figura 5f).

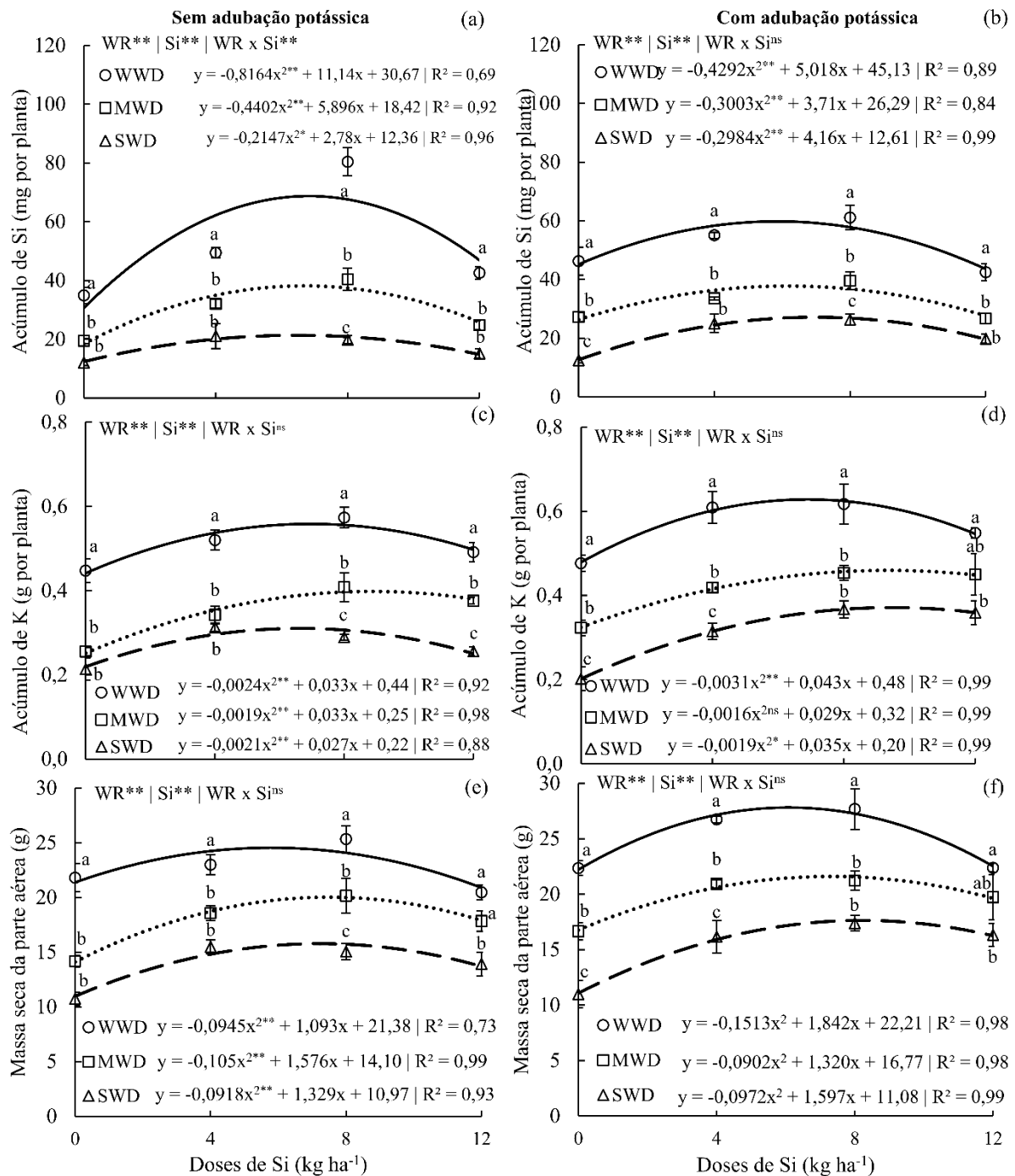


Figura 5. Acúmulo de silício (Si) (a, b) e de potássio (C) (c, d) e massa seca (e, f) na parte aérea de plantas de feijão cultivada sem déficit hídrico – WWD (80% da capacidade de retenção de água - WRC), com déficit hídrico moderado – MWD (60% de WRC) e com déficit hídrico severo – SWD (40% de WRC); combinado com doses de Si fornecidas via fertirrigação: 0, 4, 8 e 12 kg ha⁻¹, sem e com adubação potássica. Letras mostram diferenças para os regimes hídricos (WR) em cada dose de Si (p<0,05, teste de Tukey). * e **: significativo a 1 e 5% de probabilidade, respectivamente, e ^{ns}: não significativo pelo teste F.

A análise de agrupamento hierárquico revelou correlações específicas contribuindo para maior compreensão das relações das variáveis fisiológicas e bioquímicas com as doses de Si sob as diferentes condições de manejo hídrico e fertilização potássica. Na condição com fertilização potássica (Figura 6a).

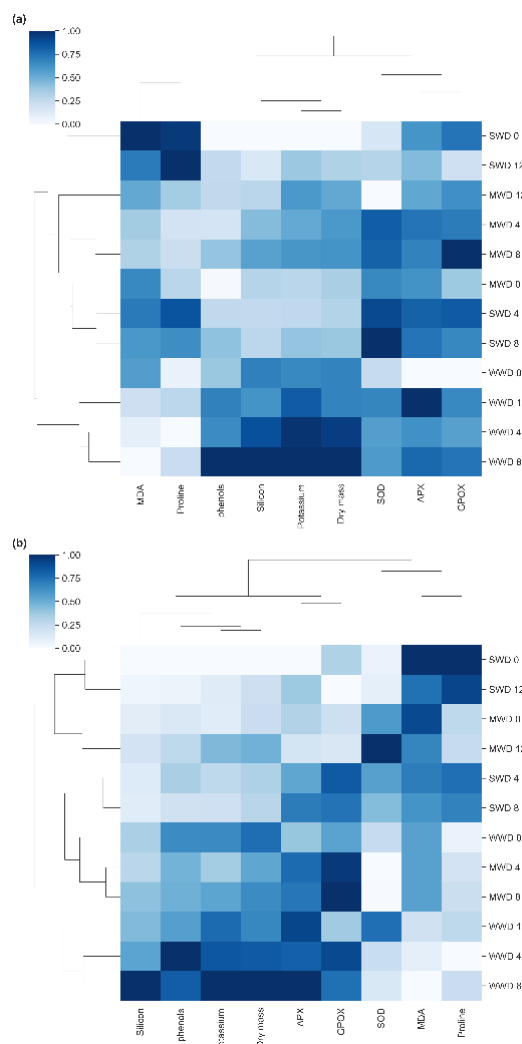


Figura 6. Mapa de calor de agrupamento hierárquico entre as variáveis MDA, prolina, SOD, APX, GPOX, fenóis, acúmulo de potássio e Si, e massa seca de plantas de feijão cultivada sem déficit hídrico – WWD (80% da capacidade de retenção de água - WRC), com déficit hídrico moderado – MWD (60% de WRC) e com déficit hídrico severo – SWD (40% de WRC); combinado com doses de Si fornecidas via fertirrigação: 0, 4, 8 e 12 kg ha⁻¹, com (a) e sem adubação potássica (b).

Foi observado um padrão de agrupamento consistente entre as variáveis SOD, APX, GPOX, que apresentaram forte correlação positiva sob MWD 4, MWD 8 e MWD 12, indicando que o déficit hídrico moderado, aliado à aplicação

de Si, promoveu um incremento na atividade do sistema antioxidante enzimático e na absorção mineral. Esse comportamento sugere um estado fisiológico equilibrado, em que o silício potencializou a defesa oxidativa e contribuiu para a manutenção da massa seca.

Sob WWD 0, WWD 4 e WWD 8, os valores de MDA permaneceram baixos e correlacionaram-se negativamente com os parâmetros antioxidantes, demonstrando que as plantas em condições de boa disponibilidade hídrica sofreram menor estresse oxidativo. Nessas condições, a massa seca manteve-se elevada e associada positivamente a fertilização silicatada, refletindo a eficiência metabólica e o bom estado nutricional.

Por outro lado, sob SWD 8, SWD 0 e SWD 12, verificou-se forte correlação positiva entre prolina e MDA, e correlação negativa destas variáveis com a massa seca e as enzimas antioxidantes. Esse padrão indica acúmulo de compostos osmoprotetores e antioxidantes não enzimáticos, característico de plantas sob estresse hídrico severo. Em SWD 4, a presença de Si amenizou parcialmente esses efeitos, observando-se maior associação entre Si, enzimas antioxidantes e massa seca, sugerindo uma resposta intermediária de tolerância.

Na condição sem fertilização potássica (Figura 6b), os resultados evidenciam que o fornecimento de Si, principalmente nas doses intermediárias ($4-8 \text{ kg ha}^{-1}$), promoveu correlações positivas entre Si, atividade antioxidante (SOD, APX, GPOX) e massa seca em todos os regimes hídricos, especialmente sob MWD. Em contrapartida, MDA manteve correlação inversa com essas variáveis, refletindo a redução do dano oxidativo.

De forma geral, o conjunto de correlações demonstra que o déficit hídrico moderado (MWD), associado à aplicação de Si estimulou um equilíbrio entre crescimento e defesa antioxidante, enquanto o déficit severo (SWD) levou à ativação predominante de mecanismos de estresse. O Si, portanto, atuou como elemento mitigador do déficit hídrico, reforçando tanto as defesas enzimáticas quanto a integridade celular, resultando em maior eficiência metabólica e sustentabilidade fisiológica do feijoeiro sob condições de déficit hídrico progressivo.

Em ambas as condições de K, as análises de agrupamento hierárquico confirmam que indicadores de estresse oxidativo (MDA e prolina) e enzimas antioxidantes (SOD, APX e GPOX) têm alta correlação com condições de déficit hídrico moderado a severo. Por outro lado, variáveis relacionadas ao crescimento e nutrição, como massa seca, acúmulo de potássio e silício, estão mais associadas a condições menos severas de estresse (Figura 6ab).

A Análise de Componentes Principais (ACP) na condição com fertilização potássica foi responsável por 74% da variação total observada, com 18% atribuídos ao Componente Principal 1 e 56% ao Componente Principal 2 (Figura 7a). MDA, prolina e SOD, que estão associadas aos tratamentos sob déficit hídrico mais severo (SWD). Por outro lado, variáveis como massa seca, acúmulo de potássio e Si estão associadas a tratamentos sob condições sem déficit hídrico (MWD) ou de déficit moderado (MWD).

Para a condição sem fertilização potássica (Figura 7b), os dois primeiros componentes explicam 76% da variância total, com 62% associados ao componente principal 1 e 14% ao Componente Principal 2. MDA, prolina e SOD são altamente correlacionados com os tratamentos de déficit severo (SWD), enquanto massa seca e potássio estão mais associados aos tratamentos sem déficit hídrico (MWD e WWD).

Esses resultados indicam que os tratamentos sob déficit hídrico severo (SWD) induzem uma maior ativação dos mecanismos de defesa antioxidante, evidenciada pela associação de variáveis como MDA, prolina, SOD, APX e GPOX. Por outro lado, os tratamentos sem déficit hídrico (MWD) estão mais correlacionados com variáveis ligadas ao crescimento e nutrição, como massa seca, acúmulo de K e Si, proporcionando menor comprometimento metabólico nessas condições.

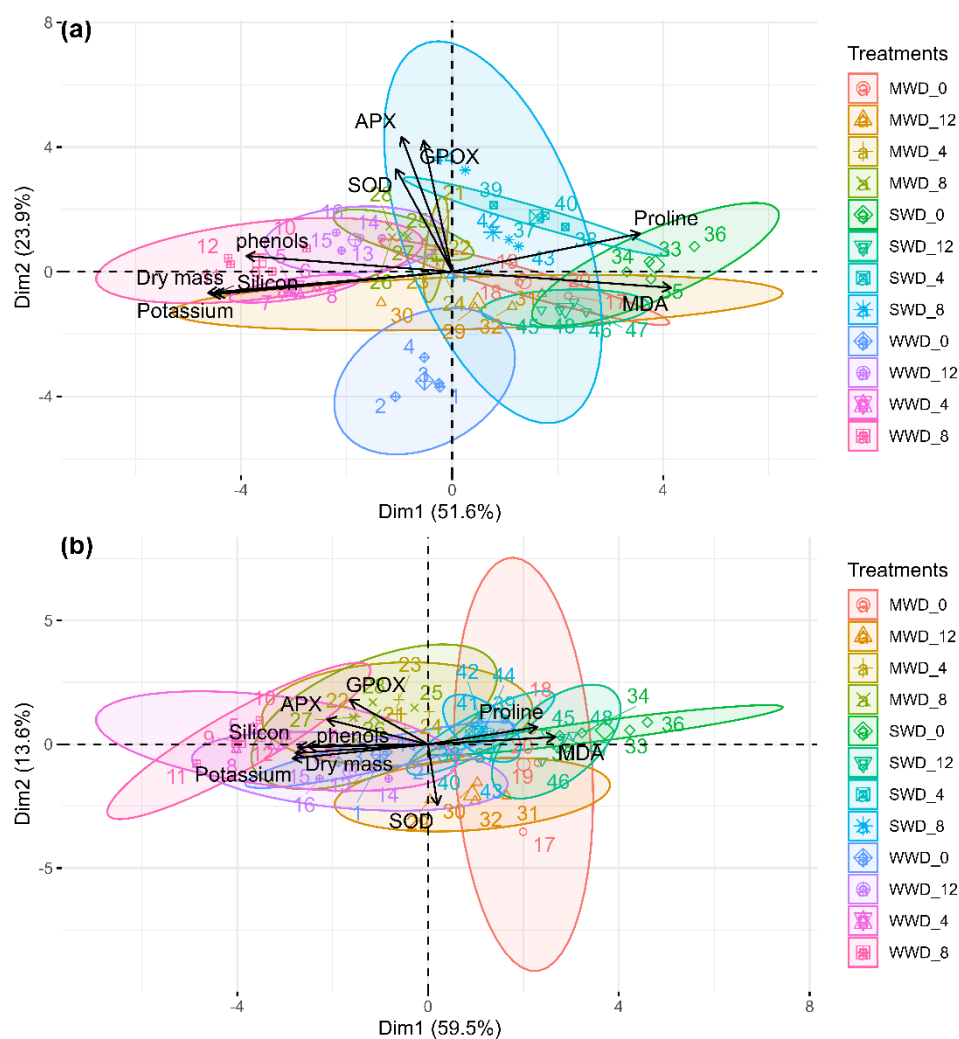


Figura 7. Análise de componentes principais das variáveis MDA, prolina, SOD, APX, GPOX, fenóis, acúmulo de potássio e Si, e massa seca de plantas de feijão cultivada sem déficit hídrico – WWD (80% da capacidade de retenção de água - WRC), com déficit hídrico moderado – MWD (60% de WRC) e com déficit hídrico severo – SWD (40% de WRC); combinado com doses de Si fornecidas via fertirrigação: 0, 4, 8 e 12 kg ha⁻¹, com (a) e sem adubação potássica (b).

4. Discussão

4.1 Danos causados às plantas de feijão expostas ao déficit hídrico

A restrição hídrica é um dos principais entraves à produção agrícola sustentável mundial, principalmente nas regiões áridas e semiáridas (Irfan et al., 2023) e em outras regiões devido as mudanças climáticas (Schaller et al., 2020). A falta de água pode restringir o crescimento das plantas em várias fases de seu desenvolvimento, causando modificações em aspectos fisiológicos e bioquímicos (Afshari et al., 2021).

Os estudos sobre os efeitos da seca na cultura do feijão cultivado em campo são restritos tendo alguns relatos avaliando a interação da restrição hídrica com elementos como Si (Gonzalez-Porras et al., 2024; Teixeira et al., 2024) e molibdênio (Heshmat et al., 2021) ou com diferentes genótipos (Papathanasiou et al., 2022; Mladenov et al., 2023). Observa-se que além do número de estudos ser muito restrito, as pesquisas se limitavam a avaliar apenas os efeitos da restrição hídrica na fisiologia da planta não considerando as respostas antioxidantes. Por isso, esta pesquisa foi desenvolvida no feijoeiro cultivado em campo e possibilitou conhecer os impactos negativos do déficit hídrico em variáveis bioquímicas que se refletiram na diminuição da matéria seca das plantas.

As condições hídricas MWD e SWD induziram estresse oxidativo nas plantas nos dois experimentos, ou seja, em ambas as condições de adubação potássica, causando inicialmente maior peroxidação lipídica, evidenciado pelo aumento do conteúdo de malondialdeído (MDA) (Fig. 2a, b). Estes resultados evidenciaram no feijoeiro cultivado em solo tropical que o déficit hídrico severo (SWD) causou danos oxidativo nas plantas devido a menor atividade da SOD, EC 1.15.1.1 (Fig. 3a, b) e da GPOX, EC1.11.1.7 (Fig. 3e, f) em ambas as condições de K, o que tornou as plantas mais suscetíveis a esses distúrbios. O MDA é gerado como um subproduto da degradação de ácidos graxos poliinsaturados, sendo frequentemente empregado como um biomarcador específico para avaliar a peroxidação lipídica (Mittler, 2002), o processo mais prejudicial que ocorre em todos os organismos vivos (Gill and Tuteja, 2010).

O aumento na peroxidação lipídica também foi relatado em muitas plantas sob estresse por restrição hídrica, no entanto esses estudos foram conduzidos em ambientes controlados, como por exemplo, em feijoeiro (Mombeni e Abbasi, 2019) e outras espécies como o grão de bico (Gunes et al., 2007), girassol (Gunes et al., 2008), lentilha (Biju et al., 2017a), cana-de-açúcar e cana-energia (Teixeira et al., 2022b) e milho (de Sousa Leite et al., 2023). O nível desta peroxidação lipídica pode variar com as espécies pois existem plantas que possuem concentrações elevadas de antioxidantes e apresentam uma resistência superior contra esse dano oxidativo (Biju et al., 2017a) a partir da eliminação das ERO (Biju et al., 2017a; Malik et al., 2021a). Os resultados evidenciaram no feijoeiro cultivado em solo tropical que o déficit hídrico severo (SWD) causou danos oxidativo nas plantas devido a menor atividade da SOD, EC 1.15.1.1 (Fig. 3a, b) e da GPOX, EC1.11.1.7 (Fig. 3e, f) em ambas as condições de K, o que tornou as plantas mais suscetíveis a esses distúrbios.

A SOD, EC 1.15.1.1 é a principal enzima do complexo antioxidante enzimático, atua na linha de frente da defesa antioxidante, dismutando O_2^- ao H_2O_2 nos cloroplastos, mitocôndrias, citoplasma e peroxissoma, para evitar o dano celular (Malik et al., 2021a), fato esse também relatado em outras espécies, como a cana-de-açúcar sob déficit hídrico (Verma et al., 2021). Neste estudo, ficou claro que o regime hídrico SWD diminuiu também a atividade da APX, EC 1.11.1.11 nas plantas de feijão, quando cultivadas sem a fertilização potássica (Fig. 3c), enquanto plantas que receberam a fertilização potássica apresentaram atividade desta enzima superior em relação as plantas que não estavam sob condições de déficit hídrico (Fig. 3d). A APX, EC 1.11.1.11, atua consumindo o H_2O_2 (Gill e Tuteja, 2010).

Ficou evidenciado também aumento nos teores de prolina nas plantas de feijão submetidas ao estresse hídrico severo, tanto nas plantas sem adubação potássica quanto com adubação potássica (Fig. 4a, b). As concentrações de prolina foram notavelmente mais elevadas nas plantas sob condições de déficit hídrico severo, em comparação com aquelas cultivadas em condições hídricas adequadas. Resultados semelhantes foram observados anteriormente em outras espécies como cana-de-açúcar e cana-energia (Teixeira et al., 2022b), milho

(Ning et al., 2020; Teixeira et al., 2022a), feijão-caupi (de Sousa Leite et al., 2023) e lentilha (Biju et al., 2017a).

Um mecanismo comum de resistência ao estresse em plantas é a superprodução de diferentes tipos de osmólitos, como prolina (Biju et al., 2017a). O acúmulo desses osmólitos nas plantas pode desempenhar um papel em diversos processos, incluindo ajuste osmótico, neutralização de ERO, preservação da integridade da membrana e estabilização de proteínas/enzimas. Portanto, esse acúmulo contribui para aumentar a resistência das plantas à seca (Blum, 2017).

Portanto, esta pesquisa elucidou que o feijoeiro comum cultivado em campo é relativamente sensível a restrição hídrica, principalmente ao déficit hídrico severo, porque o sistema de defesa antioxidante enzimático a partir da atividade da SOD, EC 1.15.1.1 e da GPOX, EC1.11.1.7 e aumento na indução na produção de osmólitos, como a prolina não foi suficiente para diminuir o dano na planta. Futuras pesquisas com feijoeiro comum sejam realizadas para selecionar cultivares associadas com maior atividade de enzimas antioxidantes e favorecer a tolerância desta espécie à seca. Uma alternativa de solução mais rápida seria com o uso do Si, que possibilita melhorar o sistema de defesa antioxidante do feijoeiro.

4.2 Si mitiga o déficit hídrico no feijoeiro por estimular o sistema antioxidante enzimático e não-enzimático de defesa

O Si desempenha um papel na diminuição de danos e na melhoria da capacidade de resistência à seca pela mitigação do estresse oxidativo, que está bem documentado em plantas monocotiledôneas (Malik et al., 2021; Teixeira et al., 2022a, 2022b) e pouco compreendido em eudicotiledônea, como o feijoeiro.

A aplicação de Si promoveu um aumento nas atividades enzimáticas da SOD, EC 1.15.1.1, APX, EC 1.11.1.11 e GPOX, EC1.11.1.7, nas plantas de feijão sob déficit hídrico moderado e severo, nas condições de K estudadas (Fig. 3a, f), diminuindo a peroxidação lipídica (Fig. 2a, b), possivelmente por diminuir as concentrações de peróxido de hidrogênio (H_2O_2) (Irfan et al., 2023). Os mecanismos envolvidos na ativação de sistemas antioxidantes sob estresse

hídrico mediado pelo Si ainda não estão totalmente elucidados, mas sabe-se que aplicação de Si promove o aumento da atividade da GPOX e da APX em plantas sob estresse hídrico, mediante estímulo do ciclo ascorbato-glutationa, mecanismo essencial para converter peróxido de hidrogênio em água e minimizar os danos oxidativos (Sharf-Eldin et al., 2023).

Pesquisas recentes indicam ainda efeito do Si na regulação da expressão de alguns genes como *TaSOD*, *TaCAT* e *TaAPX* (Ma et al., 2016a) relacionados à produção e ativação de enzimas antioxidantes como SOD, APX, CAT e GPOX, que neutralizam ERO em condições de estresse, contribuindo para a diminuição do estresse oxidativo (Mahmoud et al., 2023; Sharf-Eldin et al., 2023; Li et al., 2024a), e pode justificar a melhoria na tolerância do feijoeiro ao estresse oxidativo sob déficit hídrico.

Na presente pesquisa ficou claro que a aplicação de Si proporcionou aumento nos teores de prolina e compostos fenólicos nas plantas de feijão, independente da condição de adubação potássica em condições estressantes e não estressantes (Fig. 4a-d) fato observado em outras espécies como grão de bico e girassol (Gunes et al., 2007, 2008), e que são estratégias atuam na linha de frente de defesa contra o estresse em várias espécies vegetais (Carneiro-Carvalho et al., 2023).

Assim, é possível afirmar que as plantas de feijão que receberam Si também foram beneficiadas pela atuação do Si ao melhorar a atividade de agentes antioxidantes não-enzimáticos, como a prolina e os compostos fenólicos, diminuindo o dano oxidativo induzido pelo déficit hídrico. Ressalta-se que o Si também aumentou os teores desses compostos antioxidantes não-enzimáticos mesmo em condições não estressantes, o que é um fato positivo da aplicação de Si as plantas de feijão. Isso deve colaborar para explicar estudos que indicam que o Si pode favorecer o crescimento de cultivos em campo (Cuong et al., 2017) mesmo sem estresse aparente.

De forma geral, nosso estudo evidenciou pela primeira vez na leguminosa que doses intermediárias de Si (4 a 8 kg ha⁻¹) via fertirrigação são suficientes para mitigar o déficit hídrico severo e moderado em plantas de feijão, por modular o sistema antioxidante, possivelmente ao estimular a transcrição de genes

responsáveis pela síntese de enzimas antioxidantes, como SOD, APX e GPOX. Essa modulação diminui o estresse oxidativo, preserva as membranas celulares e conseqüentemente aumenta o incremento de matéria seca das plantas independente da adubação complementar com K, tornando o Si uma ferramenta promissora para uma agricultura sustentável.

Portanto, fica demonstrado que o Si quando aplicado de forma otimizada via fertirrigação mesmo em leguminosa é uma estratégia válida para fortalecer a sustentabilidade do feijoeiro, estando a pesquisa alinhada com a "Agenda 2030" da Organização das Nações Unidas para promover os "Objetivos de Desenvolvimento Sustentável". Assim, as informações deste trabalho podem ter implicações globais dado fato que as mudanças climáticas causadoras da seca é uma realidade frequente em diferentes países que cultivam o feijoeiro.

Os estudos indicam que a ativação do sistema de defesa antioxidante causado pelo Si pode depender de diferentes fatores, dentre eles do nível de estresse ambiental e das condições de cultivo (Irfan et al., 2023). Cabe destacar que nesta pesquisa as respostas das plantas ao fornecimento de Si na atenuação do déficit hídrico foram semelhantes nas duas áreas cultivadas, que recebeu ou não a adubação potássica suplementar, possivelmente devido ao fato que os teores iniciais de K no solo ($6,2 \text{ mmol}_c \text{ dm}^{-3}$ camada 0-20 cm de profundidade) nas áreas estudadas não estavam limitando o crescimento da cultura. Portanto, acredita-se que nas duas áreas as plantas apresentaram processos semelhantes de abertura e fechamento dos estômatos dado fato que o K otimiza esse processo fisiológico (Qi et al., 2019; Johnson et al., 2022). Uma implicação prática disso é que se recomenda o uso do Si para melhorar eficiência de uso da água mesmo em áreas de cultivo sem limitação de K, pois o benefício do Si ocorreu independentemente do nível de K no solo.

5. Conclusão

A fertilização com Si via fertirrigação em doses relativamente baixa (4 a 8 kg ha^{-1}) é uma estratégia importante para o cultivo sustentável do feijoeiro especialmente em áreas com restrição hídrica moderada e até severa com ou sem fertilização complementar de K pois o Si otimizou mecanismos antioxidantes enzimáticos e não enzimáticos na leguminosa.

6 Referências

- Abbas, K.; Li, J.; Gong, B.; Lu, Y.; Wu, X.; Lü, G.; Gao, H. (2023). Drought stress tolerance in vegetables: The functional role of structural features, key gene pathways, and exogenous hormones. **International Journal of Molecular Sciences**, 24:13876. <https://doi.org/10.3390/IJMS241813876>
- Afshari, M.; Pazoki, A.; Sadeghipour, O. (2021). Foliar-applied silicon and its nanoparticles stimulate physio-chemical changes to improve growth, yield and active constituents of *Coriandrum sativum* L. essential oil under different irrigation regimes. **Silicon**, 13:4177-4188. <https://doi.org/10.1007/S12633-021-01101-8>
- Ahammed, G.J.; Li, X.; Wan, H.; Zhou, G.; Cheng, Y. (2020). SIWRKY81 reduces drought tolerance by attenuating proline biosynthesis in tomato. **Scientia Horticulturae**, 270:109444. <https://doi.org/10.1016/J.SCIENTA.2020.109444>
- Ahluwalia, O.; Singh, P.C.; Bhatia, R. (2021). A review on drought stress in plants: Implications, mitigation and the role of plant growth promoting rhizobacteria. **Resources, Environment and Sustainability**, 5:100032. <https://doi.org/10.1016/J.RESENV.2021.100032>
- Aksu, G.; Altay, H. (2020). The effects of potassium applications on drought stress in sugar beet. **Sugar Tech**, 22:1092-1102. <https://doi.org/10.1007/S12355-020-00851-W>
- Alberto Moldes, C.; Fontão de Lima Filho, O.; Manuel Camiña, J.; Gabriela Kiriachek, S.; Lia Molas, M.; Mui Tsai, S. (2013). Assessment of the effect of silicon on antioxidant enzymes in cotton plants by multivariate analysis. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, 61:11243-11249. <https://doi.org/10.1021/JF4039088>
- Alghanem, S.M.S.; Alnusaire, T.S.; Al-Balawi, S.M.; Alayafi, A.A.M.; Alharbi, B.M.; Abdulmajeed, A.M.; Alrashidi, A.A.; Anazi, H.K.; Alharbi, K.; Soliman, M.H. (2025). Potassium silica nanoparticles enhanced growth, yield, and stress tolerance in canola (*Brassica napus* L.) under drought conditions. **Journal of Soil Science and Plant Nutrition**, 1-18. <https://doi.org/10.1007/S42729-025-02356-5>
- Al-Mokadem, A.Z.; Sheta, M.H.; Mancy, A.G.; Hussein, H.A.A.; Kenawy, S.K.M.; Sofy, A.R.; Abu-Shahba, M.S.; Mahdy, H.M.; Sofy, M.R.; Al Bakry, A.F.; Agha, M.S. (2023). Synergistic effects of kaolin and silicon nanoparticles for ameliorating deficit irrigation stress in maize plants by upregulating antioxidant defense systems. **Plants**, 12:2221. <https://doi.org/10.3390/PLANTS12112221>
- Andrioli, I.; Centurion, J.F. (1999). Levantamento detalhado dos solos da Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias de Jaboticabal. Brasília.

Anjum, S.A.; Ashraf, U.; Tanveer, M.; Khan, I.; Hussain, S.; Shahzad, B.; Zohaib, A.; Abbas, F.; Saleem, M.F.; Ali, I.; Wang, L.C. (2017). Drought induced changes in growth, osmolyte accumulation and antioxidant metabolism of three maize hybrids. **Frontiers in Plant Science**, 8:233731. <https://doi.org/10.3389/FPLS.2017.00069>

Aqaei, P.; Weisany, W.; Diyanat, M.; Razmi, J.; Struik, P.C. (2020). Response of maize (*Zea mays* L.) to potassium nano-silica application under drought stress. **Journal of Plant Nutrition**, 43:1205-1216. <https://doi.org/10.1080/01904167.2020.1727508>

Avila, R.G.; Magalhães, P.C.; da Silva, E.M.; de Souza, K.R.D.; Campos, C.N.; de Alvarenga, A.A.; de Souza, T.C. (2021). Application of silicon to irrigated and water deficit sorghum plants increases yield via the regulation of primary, antioxidant, and osmoregulatory metabolism. **Agricultural Water Management**, 255:107004. <https://doi.org/10.1016/J.AGWAT.2021.107004>

Awad, A.E.; Abuarab, M.E.; Abdelraouf, R.E.; Bakeer, G.A.; El-Shawadfy, M.A.; Ragab, R. (2024). Improving yield and irrigation water productivity of green beans under water stress with agricultural solid waste-based material of compacted rice straw as a sustainable organic soil mulch. **Irrigation Science**, 1-26. <https://doi.org/10.1007/S00271-024-00973-Z>

Babiker, A.G.T.; Duncan, H.J. (1974). Penetration of bracken fronds by asulam as influenced by the addition of surfactant to the spray solution and by pH. **Weed Research**, 14:375-377. <https://doi.org/10.1111/j.1365-3180.1974.tb01078.x>

Balint, Z.; Mutua, F.; Muchiri, P.; Omuto, C.T. (2013). Monitoring drought with the Combined Drought Index in Kenya. **Developments in Earth Surface Processes**, 16:341-356. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-59559-1.00023-2>

Barão, L. (2023). The use of Si-based fertilization to improve agricultural performance. **Journal of Soil Science and Plant Nutrition**, 23:1096-1108. <https://doi.org/10.1007/S42729-022-01106-1>

Bashir, S.S.; Hussain, A.; Hussain, S.J.; Wani, O.A.; Zahid Nabi, S.; Dar, N.A.; Baloch, F.S.; Mansoor, S. (2021). Plant drought stress tolerance: understanding its physiological, biochemical and molecular mechanisms. **Biotechnology & Biotechnological Equipment**, 35:1912-1925. <https://doi.org/10.1080/13102818.2021.2020161>

Basu, S.; Kumar, G. (2021). Exploring the significant contribution of silicon in regulation of cellular redox homeostasis for conferring stress tolerance in plants. **Plant Physiology and Biochemistry**, 166:393-404. <https://doi.org/10.1016/J.PLAPHY.2021.06.005>

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

Bates, L.S.; Waldren, R.P.; Teare, I.D. (1973). Rapid determination of free proline for water-stress studies. **Plant and Soil**, 39:205-207. <https://doi.org/10.1007/BF00018060>

Benslimam, W.; Zorrig, W.; Bagues, M.; Abdelly, C.; Hafsi, C. (2022). Silicon mitigates potassium deficiency in *Hordeum vulgare* by improving growth and photosynthetic activity but not through polyphenol accumulation and the related antioxidant potential. **Plant and Soil**, 477:153-170. <https://doi.org/10.1007/S11104-021-05188-1>

Besharat, S.; Barão, L.; Cruz, C. (2020). New strategies to overcome water limitation in cultivated maize: Results from sub-surface irrigation and silicon fertilization. **Journal of Environmental Management**, 263:110398. <https://doi.org/10.1016/J.JENVMAN.2020.110398>

Biju, S.; Fuentes, S.; Gupta, D. (2017). Silicon improves seed germination and alleviates drought stress in lentil crops by regulating osmolytes, hydrolytic enzymes and antioxidant defense system. **Plant Physiology and Biochemistry**, 119:250-264. <https://doi.org/10.1016/J.PLAPHY.2017.09.001>

Blum, A. (2017). Osmotic adjustment is a prime drought stress adaptive engine in support of plant production. **Plant, Cell & Environment**, 40:4-10. <https://doi.org/10.1111/PCE.12800>

Bradford, M.M. (1976). A rapid and sensitive method for the quantitation of microgram quantities of protein utilizing the principle of protein-dye binding. **Analytical Biochemistry**, 72:248-254.

Çakir, R. (2004). Effect of water stress at different development stages on vegetative and reproductive growth of corn. **Field Crops Research**, 89:1-16. <https://doi.org/10.1016/J.FCR.2004.01.005>

Cakmak, I. (2005). The role of potassium in alleviating detrimental effects of abiotic stresses in plants. **Journal of Plant Nutrition and Soil Science**, 168:521-530. <https://doi.org/10.1002/JPLN.200420485>

Camargo, O.A. de; Moniz, A.C.; Jorge, J.A.; Valadares, J.M.A.S. (1986). Métodos de análise química, mineralógica e física de solos do Instituto Agronômico de Campinas. Campinas: Instituto Agronômico de Campinas – IAC.

Carbas, B.; Machado, N.; Oppolzer, D.; Ferreira, L.; Queiroz, M.; Brites, C.; Rosa, E.A.S.; Barros, A.I.R.N.A. (2020). Nutrients, antinutrients, phenolic composition, and antioxidant activity of common bean cultivars and their potential for food applications. **Antioxidants**, 9:186. <https://doi.org/10.3390/ANTIOX9020186>

Carneiro-Carvalho, A.; Pinto, T.; Gomes-Laranjo, J.; Anjos, R. (2023). The potential of SiK® fertilization in the resilience of chestnut plants to drought – a biochemical study. **Frontiers in Plant Science**, 14:1120226. <https://doi.org/10.3389/FPLS.2023.1120226>

Cavalcante, I.E.; Soares de Melo, A.; Luciano de Souza Ferraz, R.; Silva de Alencar, R.; Dias, G.F.; Marques de Oliveira Viana, P.; Moura Rocha, M.; Ndhlala, A.R.; Vanies, F.; Sá, S.; Feitosa de Lacerda, C.; Roberto, P.; Vié, A.; Blume, Y.B.; Nery, F.C. (2024). Salicylic acid improves cowpea productivity under water restriction in the field by modulating metabolism. **Frontiers in Plant Science**, 15:1415682. <https://doi.org/10.3389/FPLS.2024.1415682>

- Chen, D.; Cao, B.; Qi, L.; Yin, L.; Wang, S.; Deng, X. (2016). Silicon-moderated K-deficiency-induced leaf chlorosis by decreasing putrescine accumulation in sorghum. **Annals of Botany**, 118:305-315. <https://doi.org/10.1093/AOB/MCW111>
- Chen, D.; Cao, B.; Wang, S.; Liu, P.; Deng, X.; Yin, L.; Zhang, S. (2016). Silicon moderated the K deficiency by improving the plant-water status in sorghum. **Scientific Reports**, 6:22882. <https://doi.org/10.1038/srep22882>
- Chen, J.; Li, Y.; Zeng, Z.; Zhao, X.; Zhang, Y.; Li, X.; Chen, J.; Shen, W. (2024). Silicon induces ROS scavengers, hormone signalling, antifungal metabolites, and silicon deposition against brown stripe disease in sugarcane. **Physiologia Plantarum**, 176:e14313. <https://doi.org/10.1111/PPL.14313>
- Chen, L.; Liu, X.; Huang, X.; Luo, W.; Long, Y.; Greiner, S.; Rausch, T.; Zhao, H. (2019). Functional characterization of a drought-responsive invertase inhibitor from maize (*Zea mays* L.). **International Journal of Molecular Sciences**, 20:4081. <https://doi.org/10.3390/IJMS20174081>
- Chiappero, J.; Cappellari, L. del R.; Sosa Alderete, L.G.; Palermo, T.B.; Banchio, E. (2019). Plant growth promoting rhizobacteria improve the antioxidant status in *Mentha piperita* grown under drought stress leading to an enhancement of plant growth and total phenolic content. **Industrial Crops and Products**, 139:111553. <https://doi.org/10.1016/J.INDCROP.2019.111553>
- Chieb, M.; Gachomo, E.W. (2023). The role of plant growth promoting rhizobacteria in plant drought stress responses. **BMC Plant Biology**, 23:1-23. <https://doi.org/10.1186/S12870-023-04403-8>
- Cuong, T.X.; Ullah, H.; Datta, A.; Hanh, T.C. (2017). Effects of silicon-based fertilizer on growth, yield and nutrient uptake of rice in tropical zone of Vietnam. **Rice Science**, 24:283-290. <https://doi.org/10.1016/J.RSCI.2017.06.002>
- Darko, R.O.; Yuan, S.; Hong, L.; Liu, J.; Yan, H. (2016). Irrigation, a productive tool for food security – a review. **Acta Agriculturae Scandinavica, Section B — Soil & Plant Science**, 66:191-206. <https://doi.org/10.1080/09064710.2015.1093654>
- Du, Y.; Zhao, Q.; Chen, L.; Yao, X.; Zhang, H.; Wu, J.; Xie, F. (2020). Effect of drought stress during soybean R2–R6 growth stages on sucrose metabolism in leaf and seed. **International Journal of Molecular Sciences**, 21:618. <https://doi.org/10.3390/IJMS21020618>
- Duarte, A.P.; Cantarella, H.; Quaggio, J.A. (2022). Milho (*Zea mays*). In: Cantarella, H.; Quaggio, J.A.; Mattos Jr., D.; Boaretto, R.M.; Van Raij, B. (eds.). *Recomendações de adubação e calagem para o Estado de São Paulo*. Campinas: Instituto Agrônômico, p. 199-208.
- Egilla, J.N.; Davies, F.T.; Boutton, T.W. (2005). Drought stress influences leaf water content, photosynthesis, and water-use efficiency of *Hibiscus rosa-sinensis* at three potassium concentrations. **Photosynthetica**, 43:135-140. <https://doi.org/10.1007/S11099-005-5140-2>

El-Saadony, M.T.; Desoky, E.S.M.; Saad, A.M.; Eid, R.S.M.; Selem, E.; Elrys, A.S. (2021). Biological silicon nanoparticles improve *Phaseolus vulgaris* L. yield and minimize its contaminant contents on a heavy metals-contaminated saline soil. **Journal of Environmental Sciences**, 106:1-14. <https://doi.org/10.1016/J.JES.2021.01.012>

Elshamly, A.M.S. (2023). Interaction effects of sowing date, irrigation levels, chitosan, and potassium silicate on yield and water use efficiency for maize grown under arid climate. **Gesunde Pflanzen**, 75:1601-1613. <https://doi.org/10.1007/S10343-023-00836-1>

Elshamly, A.M.S.; Abaza, A.S. (2024). Precise partial root-zone irrigation technique and potassium-zinc fertigation management improve maize physio-biochemical responses, yield, and water use in arid climate. **BMC Plant Biology**, 24:1-27. <https://doi.org/10.1186/S12870-024-05467-W>

Epstein, E. (1994). The anomaly of silicon in plant biology. **Proceedings of the National Academy of Sciences**, 91:11-17. <https://doi.org/10.1073/PNAS.91.1.11>

Fang, K.; He, J.; Liu, Q.; Wang, S.; Geng, Y.; Heijungs, R.; Du, Y.; Yue, W.; Xu, A.; Fang, C. (2023). Water footprint of nations amplified by scarcity in the Belt and Road Initiative. **Heliyon**, 9:e12957. <https://doi.org/10.1016/J.HELİYON.2023.E12957>

Garg, N.; Manchanda, G. (2009). ROS generation in plants: Boon or bane? **Plant Biosystems**, 143:81-96. <https://doi.org/10.1080/11263500802633626>

Gascho, G.J. (2001). Silicon sources for agriculture. In: Datnoff, L.E.; Snyder, G.H.; Korndörfer, G.H. (eds.). **Studies in Plant Science**, 8:197-207. [https://doi.org/10.1016/S0928-3420\(01\)80016-1](https://doi.org/10.1016/S0928-3420(01)80016-1)

Ge, T.; Sui, F.; Bai, L.; Tong, C.; Sun, N. (2012). Effects of water stress on growth, biomass partitioning, and water-use efficiency in summer maize (*Zea mays* L.) throughout the growth cycle. **Acta Physiologiae Plantarum**, 34:1043-1053. <https://doi.org/10.1007/S11738-011-0901-Y>

Giannopolitis, C.N.; Ries, S.K. (1977). Superoxide dismutases. I. Occurrence in higher plants. **Plant Physiology**, 59:309-314. <https://doi.org/10.1104/pp.59.2.309>

Gill, S.S.; Tuteja, N. (2010). Reactive oxygen species and antioxidant machinery in abiotic stress tolerance in crop plants. **Plant Physiology and Biochemistry**, 48:909-930. <https://doi.org/10.1016/J.PLAPHY.2010.08.016>

Gomes-Junior, R.A.; Gratão, P.L.; Gaziola, S.A.; Mazzafera, P.; Lea, P.J.; Azevedo, R.A. (2007). Selenium-induced oxidative stress in coffee cell suspension cultures. **Functional Plant Biology**, 34:449-456. <https://doi.org/10.1071/FP07010>

Gong, Z.; Xiong, L.; Shi, H.; Yang, S.; Herrera-Estrella, L.R.; Xu, G.; Chao, D.Y.; Li, J.; Wang, P.Y.; Qin, F.; Li, J.; Ding, Y.; Shi, Y.; Wang, Y.; Yang, Y.; Guo, Y.; Zhu, J.K. (2020). Plant abiotic stress response and nutrient use efficiency. **Science China Life Sciences**, 63:635-674. <https://doi.org/10.1007/S11427-020-1683-X>

Gonzalez-Porras, C.V.; Teixeira, G.C.M.; Prado, R. de M.; Ferreira, P.M.; Palaretti, L.F.; Oliveira, K.S. (2024). Silicon via fertigation with and without potassium application improves physiological aspects of common beans cultivated under three water regimes in field. **Scientific Reports**, 14:1-19. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-52503-8>

Gratão, P.L.; Monteiro, C.C.; Carvalho, R.F.; Tezotto, T.; Piotto, F.A.; Peres, L.E.P.; Azevedo, R.A. (2012). Biochemical dissection of diageotropica and Never ripe tomato mutants to Cd-stressful conditions. **Plant Physiology and Biochemistry**, 56:79-96. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2012.04.009>

Gratão, P.L.; Polle, A.; Lea, P.J.; Azevedo, R.A. (2005). Making the life of heavy metal-stressed plants a little easier. **Functional Plant Biology**, 32:481-494. <https://doi.org/10.1071/FP05016>

Gunes, A.; Pilbeam, D.J.; Inal, A.; Bagci, E.G.; Coban, S. (2007). Influence of silicon on antioxidant mechanisms and lipid peroxidation in chickpea (*Cicer arietinum* L.) cultivars under drought stress. **Journal of Plant Interactions**, 2:105-113. <https://doi.org/10.1080/17429140701529399>

Gunes, A.; Pilbeam, D.J.; Inal, A.; Coban, S. (2008). Influence of silicon on sunflower cultivars under drought stress, I: Growth, antioxidant mechanisms, and lipid peroxidation. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, 39:1885-1903. <https://doi.org/10.1080/00103620802134651>

Hassine, A. Ben; Ghanem, M.E.; Bouzid, S.; Lutts, S. (2008). An inland and a coastal population of the Mediterranean xero-halophyte species *Atriplex halimus* L. differ in their ability to accumulate proline and glycinebetaine in response to salinity and water stress. **Journal of Experimental Botany**, 59:1315-1326. <https://doi.org/10.1093/JXB/ERN040>

Heath, R.L.; Packer, L. (1968). Photoperoxidation in isolated chloroplasts I. Kinetics and stoichiometry of fatty acid peroxidation. **Archives of Biochemistry and Biophysics**, 125:189-198. [https://doi.org/10.1016/0003-9861\(68\)90654-1](https://doi.org/10.1016/0003-9861(68)90654-1)

Hejazi, M.; Santos da Silva, S.R.; Miralles-Wilhelm, F.; Kim, S.; Kyle, P.; Liu, Y.; Vernon, C.; Delgado, A.; Edmonds, J.; Clarke, L. (2023). Impacts of water scarcity on agricultural production and electricity generation in the Middle East and North Africa. **Frontiers in Environmental Science**, 11:1082930. <https://doi.org/10.3389/FENVS.2023.1082930>

Heshmat, K.; Asgari Lajayer, B.; Shakiba, M.R.; Astatkie, T. (2021). Assessment of physiological traits of common bean cultivars in response to water stress and molybdenum levels. **Journal of Plant Nutrition**, 44:366-372. <https://doi.org/10.1080/01904167.2020.1822395>

Hussain, H.A.; Men, S.; Hussain, S.; Chen, Y.; Ali, S.; Zhang, S.; Zhang, K.; Li, Y.; Xu, Q.; Liao, C.; Wang, L. (2019). Interactive effects of drought and heat stresses on morpho-physiological attributes, yield, nutrient uptake and oxidative status in maize hybrids. **Scientific Reports**, 9:1-12. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-40362-7>

Hussain, H.A.; Men, S.; Hussain, S.; Zhang, Q.; Ashraf, U.; Anjum, S.A.; Ali, I.; Wang, L. (2020). Maize tolerance against drought and chilling stresses varied with root morphology and antioxidative defense system. **Plants**, 9:720. <https://doi.org/10.3390/PLANTS9060720>

Hussain, S.; Maqsood, M.; Ijaz, M.; Ul-Allah, S.; Sattar, A.; Sher, A.; Nawaz, A. (2020). Combined application of potassium and zinc improves water relations, stay green, irrigation water use efficiency, and grain quality of maize under drought stress. **Journal of Plant Nutrition**, 43:2214-2225. <https://doi.org/10.1080/01904167.2020.1765181>

Ingrao, C.; Strippoli, R.; Lagioia, G.; Huisin, D. (2023). Water scarcity in agriculture: An overview of causes, impacts and approaches for reducing the risks. **Heliyon**, 9:e18507. <https://doi.org/10.1016/J.HELIYON.2023.E18507>

Irfan, M.; Maqsood, M.A.; Rehman, H. ur; Mahboob, W.; Sarwar, N.; Hafeez, O.B.A.; Hussain, S.; Ercisli, S.; Akhtar, M.; Aziz, T. (2023). Silicon nutrition in plants under water-deficit conditions: Overview and prospects. **Water**, 15:739. <https://doi.org/10.3390/W15040739>

IRRI – International Rice Research Institute. (1993). Rice research in a time change: IRRI's medium-term plan for 1994–1998. Los Baños, Philippines.

Johnson, R.; Vishwakarma, K.; Hossen, M.S.; Kumar, V.; Shackira, A.M.; Puthur, J.T.; Abdi, G.; Sarraf, M.; Hasanuzzaman, M. (2022). Potassium in plants: Growth regulation, signaling, and environmental stress tolerance. **Plant Physiology and Biochemistry**, 172:56-69. <https://doi.org/10.1016/J.PLAPHY.2022.01.001>

Johnson, S.N.; Chen, Z.H.; Rowe, R.C.; Tissue, D.T. (2022). Field application of silicon alleviates drought stress and improves water use efficiency in wheat. **Frontiers in Plant Science**, 13:1030620. <https://doi.org/10.3389/FPLS.2022.1030620>

Khandekar, S.; Leisner, S. (2011). Soluble silicon modulates expression of *Arabidopsis thaliana* genes involved in copper stress. **Journal of Plant Physiology**, 168:699-705. <https://doi.org/10.1016/J.JPLPH.2010.09.009>

Klute, A. (2018). Water retention: Laboratory methods. In: Klute, A. (ed.). **Methods of Soil Analysis, Part 1: Physical and Mineralogical Methods**. Madison: SSSA, p. 635-662. <https://doi.org/10.2136/SSSABOOKSER5.1.2ED.C26>

Korndörfer, G.H.; Pereira, H.S.; Nolla, A. (2004). Análise de silício no solo, planta e fertilizantes. 2. ed. Uberlândia: UFU.

- Kraska, J.E.; Breitenbeck, G.A. (2010). Simple, robust method for quantifying silicon in plant tissue. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, 41:2075-2085. <https://doi.org/10.1080/00103624.2010.498537>
- Laxa, M.; Liebthal, M.; Telman, W.; Chibani, K.; Dietz, K.J. (2019). The role of the plant antioxidant system in drought tolerance. **Antioxidants**, 8:94. <https://doi.org/10.3390/ANTIOX8040094>
- Li, G.; Ma, Z.; Zhang, N.; Li, M.; Li, W.; Mo, Z. (2024). Foliar application of silica nanoparticles positively influences the early growth stage and antioxidant defense of maize under low light stress. **Journal of Soil Science and Plant Nutrition**, 24:2276-2294. <https://doi.org/10.1007/S42729-024-01789-8>
- Liang, Y.; Nikolic, M.; Bélanger, R.; Gong, H.; Song, A. (2015). Silicon sources for agriculture. In: Liang, Y.; Nikolic, M.; Bélanger, R.; Gong, H.; Song, A. (eds.). **Silicon in Agriculture**. Dordrecht: Springer, p. 225-232. https://doi.org/10.1007/978-94-017-9978-2_12
- Liang, Y.; Sun, W.; Zhu, Y.G.; Christie, P. (2007). Mechanisms of silicon-mediated alleviation of abiotic stresses in higher plants: A review. **Environmental Pollution**, 147:422-428. <https://doi.org/10.1016/J.ENVPOL.2006.06.008>
- Ma, C.C.; Gao, Y.B.; Xin, T.R.; Ma, C.C.; Li, Q.F. (2004). Effects of silicon application on drought resistance of cucumber plants. **Soil Science and Plant Nutrition**, 50:623-632. <https://doi.org/10.1080/00380768.2004.10408520>
- Ma, D.; Sun, D.; Wang, C.; Qin, H.; Ding, H.; Li, Y.; Guo, T. (2016). Silicon application alleviates drought stress in wheat through transcriptional regulation of multiple antioxidant defense pathways. **Journal of Plant Growth Regulation**, 35:1-10. <https://doi.org/10.1007/S00344-015-9500-2>
- Ma, J.F.; Tamai, K.; Ichii, M.; Wu, G.F. (2002). A rice mutant defective in Si uptake. **Plant Physiology**, 130:2111-2117. <https://doi.org/10.1104/PP.010348>
- Maghsoudi, K.; Emam, Y.; Ashraf, M.; Arvin, M.J. (2019). Alleviation of field water stress in wheat cultivars by using silicon and salicylic acid applied separately or in combination. **Crop and Pasture Science**, 70:36-43. <https://doi.org/10.1071/CP18213>
- Mahmoud, A.W.M.; Rashad, H.M.; Esmail, S.E.A.; Alsamadany, H.; Abdeldaym, E.A. (2023). Application of silicon, zinc, and zeolite nanoparticles—A tool to enhance drought stress tolerance in coriander plants for better growth performance and productivity. **Plants**, 12:2838. <https://doi.org/10.3390/PLANTS12152838>
- Makhadmeh, I.; Albalasmeh, A.A.; Ali, M.; Thabet, S.G.; Darabseh, W.A.; Jaradat, S.; Alqudah, A.M. (2022). Molecular characterization of tomato (*Solanum lycopersicum* L.) accessions under drought stress. **Horticulturae**, 8:600. <https://doi.org/10.3390/HORTICULTURAE8070600>

Malik, M.A.; Wani, A.H.; Mir, S.H.; Rehman, I.U.; Tahir, I.; Ahmad, P.; Rashid, I. (2021). Elucidating the role of silicon in drought stress tolerance in plants. **Plant Physiology and Biochemistry**, 165:187-195. <https://doi.org/10.1016/J.PLAPHY.2021.04.021>

Mandlik, R.; Thakral, V.; Raturi, G.; Shinde, S.; Nikolić, M.; Tripathi, D.K.; Sonah, H.; Deshmukh, R. (2020). Significance of silicon uptake, transport, and deposition in plants. **Journal of Experimental Botany**, 71:6703-6718. <https://doi.org/10.1093/jxb/eraa301>

Marques, D.M.; da Silva, A.B.; Mantovani, J.R.; Magalhães, P.C.; de Souza, T.C. (2019). Root morphology and leaf gas exchange in *Peltophorum dubium* (Spreng.) Taub. (Caesalpin

Marques, D.M.; da Silva, A.B.; Mantovani, J.R.; Magalhães, P.C.; de Souza, T.C. (2019). Root morphology and leaf gas exchange in *Peltophorum dubium* (Spreng.) Taub. (Caesalpinioideae) exposed to copper-induced toxicity. **South African Journal of Botany**, 121:186-192. <https://doi.org/10.1016/J.SAJB.2018.11.007>

Meena, V.D.; Dotaniya, M.L.; Coumar, V.; Rajendiran, S.; Ajay, Kundu, S.; Subba Rao, A. (2014). A case for silicon fertilization to improve crop yields in tropical soils. **Proceedings of the National Academy of Sciences, India Section B: Biological Sciences**, 84:505-518. <https://doi.org/10.1007/S40011-013-0270-Y>

de Mello Prado, R. (2021). Mineral nutrition of tropical plants. Cham: Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-71262-4>

Melo, L.C.; Pereira, H.S.; Faria, L.C. de; Souza, T.L.P.O. de; Wendland, A.; Díaz, J.L.C.; Carvalho, H.W.L. de; Costa, A.F. da; Magaldi, M.C. de S.; Costa, J.G.C. da; Aguiar, M.S. de; Abreu, Â. de F.B.; Pereira Filho, I.A.; Posse, S.C.P.; Martins, M.; Albrecht, J.C.; Souza Filho, B.F. de; Carneiro, G.E. de S.; Guimarães, C.M.; Braz, A.J.B.P.; Marangon, M.A.; Trindade, N.L.S.R.; Souza, N.P. de; Faria, J.C. de; Peloso, M.J. Del. (2017). BRS FC402: cultivar de feijão-comum carioca com alta produtividade, resistência à antracnose e murcha-de-fusário. Santo Antônio de Goiás: Embrapa.

Miao, B.H.; Han, X.G.; Zhang, W.H. (2010). The ameliorative effect of silicon on soybean seedlings grown in potassium-deficient medium. **Annals of Botany**, 105:967-973. <https://doi.org/10.1093/AOB/MCQ063>

Mitani, N.; Yamaji, N.; Ma, J.F. (2009). Identification of maize silicon influx transporters. **Plant and Cell Physiology**, 50:5-12. <https://doi.org/10.1093/pcp/pcn110>

Mittler, R. (2002). Oxidative stress, antioxidants and stress tolerance. **Trends in Plant Science**, 7:405-410. [https://doi.org/10.1016/S1360-1385\(02\)02312-9](https://doi.org/10.1016/S1360-1385(02)02312-9)

Mladenov, P.; Aziz, S.; Topalova, E.; Renaut, J.; Planchon, S.; Raina, A.; Tomlekova, N. (2023). Physiological responses of common bean genotypes to drought stress. **Agronomy**, 13:1022. <https://doi.org/10.3390/AGRONOMY13041022>

Moldes, C.A.; Medici, L.O.; Abrahão, O.S.; Tsai, S.M.; Azevedo, R.A. (2008). Biochemical responses of glyphosate resistant and susceptible soybean plants exposed to glyphosate. **Acta Physiologiae Plantarum**, 30:469-479. <https://doi.org/10.1007/s11738-008-0144-8>

Mombeni, M.; Abbasi, A. (2019). Biochemical responses of some common bean (*Phaseolus vulgaris* L.) genotypes to drought stress. **Journal of Agricultural Science and Technology**, 21:407-421.

Monteiro, C.C.; Carvalho, R.F.; Gratão, P.L.; Carvalho, G.; Tezotto, T.; Medici, L.O.; Peres, L.E.P.; Azevedo, R.A. (2011). Biochemical responses of the ethylene-insensitive *Never ripe* tomato mutant subjected to cadmium and sodium stresses. **Environmental and Experimental Botany**, 71:306-320. <https://doi.org/10.1016/J.ENVEXPBOT.2010.12.020>

Mukarram, M.; Petrik, P.; Mushtaq, Z.; Khan, M.M.A.; Gulfishan, M.; Lux, A. (2022). Silicon nanoparticles in higher plants: Uptake, action, stress tolerance, and crosstalk with phytohormones, antioxidants, and other signalling molecules. **Environmental Pollution**, 310:119855. <https://doi.org/10.1016/J.ENVPOL.2022.119855>

Ning, D.; Qin, A.; Liu, Z.; Duan, A.; Xiao, J.; Zhang, J.; Liu, Z.; Zhao, B.; Liu, Z. (2020). Silicon-mediated physiological and agronomic responses of maize to drought stress imposed at the vegetative and reproductive stages. **Agronomy**, 10:1136. <https://doi.org/10.3390/AGRONOMY10081136>

Nisar, M.; Aqeel, M.; Sattar, A.; Sher, A.; Ijaz, M.; Ul-Allah, S.; Rasheed, U.; Al-Qahtani, S.M.; Al-Harbi, N.A.; Alzuaibr, F.M.; Ibrahim, M.F.M. (2023). Exogenous application of silicon and sulfate improved drought tolerance in sunflowers through modulation of morpho-physiological and antioxidant defense mechanisms. **Journal of Soil Science and Plant Nutrition**, 1:1-10. <https://doi.org/10.1007/S42729-023-01396-Z>

O'Connell, E. (2017). Towards adaptation of water resource systems to climatic and socio-economic change. **Water Resources Management**, 31:2965-2984. <https://doi.org/10.1007/S11269-017-1734-2>

Papathanasiou, F.; Ninou, E.; Mylonas, I.; Baxevanos, D.; Papadopoulou, F.; Avdikos, I.; Sistanis, I.; Koskosidis, A.; Vlachostergios, D.N.; Stefanou, S.; Tigka, E.; Kargiotidou, A. (2022). The evaluation of common bean (*Phaseolus vulgaris* L.) genotypes under water stress based on physiological and agronomic parameters. **Plants**, 11:2432. <https://doi.org/10.3390/PLANTS11182432>

Parveen, A.; Liu, W.; Hussain, S.; Asghar, J.; Perveen, S.; Xiong, Y. (2019). Silicon priming regulates morpho-physiological growth and oxidative metabolism in maize under drought stress. **Plants**, 8:431. <https://doi.org/10.3390/PLANTS8100431>

Peña Calzada, K.; Calero Hurtado, A.; Olivera Viciado, D.; Habermann, E.; de Mello Prado, R.; de Oliveira, R.; Ajila, G.; Tenesaca, L.F.L.; Rodríguez, J.C.; Gratão, P.L. (2023). 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**, 42:4528-4540. <https://doi.org/10.1007/S00344-023-10921-4>

Pereira, S.; Monteiro, A.; Moutinho-Pereira, J.; Dinis, L.T. (2024). Silicon, an emergent strategy to lighten the effects of (a)biotic stresses on crops: A review. **Journal of Agronomy and Crop Science**, 210:e12762. <https://doi.org/10.1111/JAC.12762>

Qi, J.; Sun, S.; Yang, L.; Li, M.; Ma, F.; Zou, Y. (2019). Potassium uptake and transport in apple roots under drought stress. **Horticultural Plant Journal**, 5:10-16. <https://doi.org/10.1016/J.HPJ.2018.10.001>

Quaggio, J.A.; Cantarella, H.; Zambrosi, F.C.B. (2022). Leguminosas e oleaginosas. In: Cantarella, H.; Quaggio, J.A.; Mattos Jr., D.; Boaretto, R.M.; Van Raij, B. (eds.). *Recomendações de adubação e calagem para o Estado de São Paulo*, vol. B-100. Campinas: Instituto Agrônômico, p. 239-258.

Raij, B.; Andrade, J.; Cantarella, H.; Quaggio, J. (2001). *Análise química para avaliação da fertilidade de solos tropicais*. Campinas: IAC.

Rakesh, B.; T, C.; G, M. (2024). Fascinating role of nanosilica in mitigating drought and nutrient stress – A review. **Plant Stress**, 14:100672. <https://doi.org/10.1016/J.STRESS.2024.100672>

Rehman, A.U.; Bashir, F.; Ayaydin, F.; Kóta, Z.; Páli, T.; Vass, I. (2021). Proline is a quencher of singlet oxygen and superoxide both in in vitro systems and isolated thylakoids. **Physiologia Plantarum**, 172:7-18. <https://doi.org/10.1111/PPL.13265>

Del Río, L.A. (2015). ROS and RNS in plant physiology: an overview. **Journal of Experimental Botany**, 66:2827-2837. <https://doi.org/10.1093/JXB/ERV099>

Rivera, M.F. (2024). Response of improved common bean (*Phaseolus vulgaris* L.) varieties to intermittent drought. **Agro Productividad**, 17(5). <https://doi.org/10.32854/AGROP.V17I5.2573>

Robinson, J.M.; Bunce, J.A. (2000). Influence of drought-induced water stress on soybean and spinach leaf ascorbate-dehydroascorbate level and redox status. **Plant Physiology**, 161:271-279. <https://doi.org/10.1086/314257>

Salehi-Lisar, S.Y.; Bakhshayeshan-Agdam, H. (2016). Drought stress in plants: Causes, consequences, and tolerance. In: Hossain, M.A.; Wani, S.H.; Bhattacharjee, S.; Burritt, D.J.; Tran, L.S.P. (eds.). **Drought Stress Tolerance in Plants, Vol. 1: Physiology and Biochemistry**. Cham: Springer, p. 1-16. https://doi.org/10.1007/978-3-319-28899-4_1

dos Santos, S.M.M.; de Mello Prado, R.; de Souza Júnior, J.P.; Teixeira, G.C.M.; dos Santos Duarte, J.C.; de Medeiros, R.L.S. (2021). Silicon supplied via foliar application and root to attenuate potassium deficiency in common bean plants. **Scientific Reports**, 11:1-13. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-99194-z>

dos Santos, S.M.M.; de Mello Prado, R.; Teixeira, G.C.M.; de Souza Júnior, J.P.; de Medeiros, R.L.S.; Barreto, R.F. (2021). Silicon supplied via roots or leaves relieves potassium deficiency in maize plants. **Silicon**, 14:773-782. <https://doi.org/10.1007/S12633-020-00908-1>

Sardans, J.; Peñuelas, J. (2021). Potassium control of plant functions: Ecological and agricultural implications. **Plants**, 10:419. <https://doi.org/10.3390/PLANTS10020419>

Schaller, J.; Cramer, A.; Carminati, A.; Zarebanadkouki, M. (2020). Biogenic amorphous silica as main driver for plant available water in soils. **Scientific Reports**, 10:1-7. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-59437-x>

Seleiman, M.F.; Al-Suhaibani, N.; Ali, N.; Akmal, M.; Alotaibi, M.; Refay, Y.; Dindaroglu, T.; Abdul-Wajid, H.H.; Battaglia, M.L. (2021). Drought stress impacts on plants and different approaches to alleviate its adverse effects. **Plants**, 10:259. <https://doi.org/10.3390/PLANTS10020259>

Sezen, S.M.; Yazar, A.; Akyildiz, A.; Dasgan, H.Y.; Gencel, B. (2008). Yield and quality response of drip irrigated green beans under full and deficit irrigation. **Scientia Horticulturae**, 117:95-102. <https://doi.org/10.1016/J.SCIENTA.2008.03.032>

Sezen, S.M.; Yazar, A.; Canbolat, M.; Eker, S.; Çelikel, G. (2005). Effect of drip irrigation management on yield and quality of field grown green beans. **Agricultural Water Management**, 71:243-255. <https://doi.org/10.1016/J.AGWAT.2004.09.004>

Sharf-Eldin, A.A.; Alwutayd, K.M.; El-Yazied, A.A.; El-Beltagi, H.S.; Alharbi, B.M.; Eisa, M.A.M.; Alqurashi, M.; Sharaf, M.; Al-Harbi, N.A.; Al-Qahtani, S.M.; Ibrahim, M.F.M. (2023). Response of maize seedlings to silicon dioxide nanoparticles (SiO₂NPs) under drought stress. **Plants**, 12:2592. <https://doi.org/10.3390/PLANTS12142592>

Sharma, P.; Jha, A.B.; Dubey, R.S.; Pessarakli, M. (2012). Reactive oxygen species, oxidative damage, and antioxidative defense mechanism in plants under stressful conditions. **Journal of Botany**, 2012:217037. <https://doi.org/10.1155/2012/217037>

Shehzad, J.; Mustafa, G. (2023). Mechanism of reactive oxygen species regulation in plants. In: **Reactive Oxygen Species: Prospects in Plant Metabolism**, p. 17-41. https://doi.org/10.1007/978-981-19-9794-5_2

Shemi, R.; Wang, R.; Gheith, E.S.M.S.; Hussain, H.A.; Hussain, S.; Irfan, M.; Cholidah, L.; Zhang, K.; Zhang, S.; Wang, L. (2021). Effects of salicylic acid, zinc and glycine betaine on morpho-physiological growth and yield of maize under drought stress. **Scientific Reports**, 11:1-14. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-82264-7>

Shen, X.; Zhou, Y.; Duan, L.; Li, Z.; Eneji, A.E.; Li, J. (2010). Silicon effects on photosynthesis and antioxidant parameters of soybean seedlings under drought and ultraviolet-B radiation. **Journal of Plant Physiology**, 167:1248-1252. <https://doi.org/10.1016/J.JPLPH.2010.04.011>

Shi, Y.; Zhang, Y.; Han, W.; Feng, R.; Hu, Y.; Guo, J.; Gong, H. (2016). Silicon enhances water stress tolerance by improving root hydraulic conductance in *Solanum lycopersicum* L. **Frontiers in Plant Science**, 7:179870. <https://doi.org/10.3389/FPLS.2016.00196>

Singh, P.; Kumar, V.; Sharma, J.; Saini, S.; Sharma, P.; Kumar, S.; Sharma, A. (2023). Multifaceted mechanisms of silicon in alleviation of drought stress in plants. In: **Salinity and Drought Tolerance in Plants: Physiological Perspectives**, p. 437-463. https://doi.org/10.1007/978-981-99-4669-3_22

Singleton, V.L.; Rossi, J.A. Jr. (1965). Colorimetry of total phenolics with phosphomolybdic-phosphotungstic acid reagents. **American Journal of Enology and Viticulture**, 16:144-158.

de Sousa Leite, W.; de Souza Miranda, R.; de Moura Rocha, M.; Dutra, A.F.; Santos, A.S.; da Silva, A.C.; de Brito, F.M.; de Sousa, R.S.; de Araújo, A.S.F.; do Nascimento, C.W.A.; Zuffo, A.M.; de Alcântara Neto, F. (2023). Silicon alleviates drought damage by increasing antioxidant and photosynthetic performance in cowpea. **Journal of Agronomy and Crop Science**. <https://doi.org/10.1111/JAC.12659>

Sulaiman, A.A.; Noor Hassim, M.F. (2024). Effects of silica nanoparticles on morpho-histological and antioxidant activities of rice seedlings under drought stress. **South African Journal of Botany**, 168:497-508. <https://doi.org/10.1016/J.SAJB.2024.03.052>

Teixeira, G.C.M.; Gonzalez-Porras, C.V.; Messias Ferreira, P.; Prado, R. de M.; Silva Oliveira, K.; Carvalho, L.T. da S.; Palaretti, L.F. (2024). Increased absorption and use of nutrients induced by Si is an indicator for tolerance to water deficit in a common bean cultivar cultivated in the field with and without application of K. **Frontiers in Plant Science**, 15:1421615. <https://doi.org/10.3389/FPLS.2024.1421615>

Teixeira, G.C.M.; de Mello Prado, R.; Rocha, A.M.S. (2022). 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**, 208:805-814. <https://doi.org/10.1111/JAC.12511>

Teixeira, G.C.M.; de Prado, R.M.; Rocha, A.M.S.; de Oliveira Filho, A.S.B.; da Sousa Junior, G.S.; Grato, P.L. (2022). Action of silicon on the activity of antioxidant enzymes and on physiological mechanisms mitigates water deficit in sugarcane and energy cane plants. **Scientific Reports**, 12:1-18. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-21680-9>

Tubã, B.S.; Heckman, J.R. (2015). Silicon in soils and plants. In: Rodrigues, F.A.; Datnoff, L.E. (eds.). **Silicon and Plant Diseases**. Cham: Springer, p. 7-51. https://doi.org/10.1007/978-3-319-22930-0_2

Ul-Allah, S.; Ijaz, M.; Nawaz, A.; Sattar, A.; Sher, A.; Naeem, M.; Shahzad, U.; Farooq, U.; Nawaz, F.; Mahmood, K. (2020). Potassium application improves grain yield and alleviates drought susceptibility in diverse maize hybrids. **Plants**, 9:75. <https://doi.org/10.3390/PLANTS9010075>

Vanitha, C.; Kathiravan, M.; Umarani, R.; Sathiyaraj, K.; Menaka, C.; Yuvaraj, M.; Cyriac, J. (2024). Seed priming with nano silica alleviates drought stress through regulating antioxidant defense system and osmotic adjustment in soybean (*Glycine max* L.). **Silicon**, 16:2157-2170. <https://doi.org/10.1007/S12633-023-02826-4>

Verma, K.K.; Song, X.P.; Zeng, Y.; Guo, D.J.; Singh, M.; Rajput, V.D.; Malviya, M.K.; Wei, K.J.; Sharma, A.; Li, D.P.; Chen, G.L.; Li, Y.R. (2021). Foliar application of silicon boosts growth, photosynthetic leaf gas exchange, antioxidative response and resistance to limited water irrigation in sugarcane (*Saccharum officinarum* L.). **Plant Physiology and Biochemistry**, 166:582-592. <https://doi.org/10.1016/J.PLAPHY.2021.06.032>

Wang, M.; Zheng, Q.; Shen, Q.; Guo, S. (2013). The critical role of potassium in plant stress response. **International Journal of Molecular Sciences**, 14:7370-7390. <https://doi.org/10.3390/IJMS14047370>

Webber, H.A.; Madramootoo, C.A.; Bourgault, M.; Horst, M.G.; Stulina, G.; Smith, D.L. (2006). Water use efficiency of common bean and green gram grown using alternate furrow and deficit irrigation. **Agricultural Water Management**, 86:259-268. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2006.05.012>

Weisany, W.; Razmi, J.; Eshaghabadi, A.H.; Pashang, D. (2024). Silicon nanoparticles (SiNP): A novel and sustainable strategy for mitigating environmental stresses in plants. **Journal of Soil Science and Plant Nutrition**, 24:2167-2191. <https://doi.org/10.1007/S42729-024-01790-1>

Weisany, W.; Razmi, J.; Pashang, D. (2023). Improving seed germination and physiological characteristics of maize seedlings under osmotic stress through potassium nano-silicate treatment. **Frontiers in Plant Science**, 14:1274396. <https://doi.org/10.3389/FPLS.2023.1274396>

Xu, J.; Guo, L.; Liu, L. (2022). Exogenous silicon alleviates drought stress in maize by improving growth, photosynthetic and antioxidant metabolism. **Environmental and Experimental Botany**, 201:104974. <https://doi.org/10.1016/J.ENVEXPBOT.2022.104974>

Yamauchi, Y.; Furutera, A.; Seki, K.; Toyoda, Y.; Tanaka, K.; Sugimoto, Y. (2008). Malondialdehyde generated from peroxidized linolenic acid causes protein modification in heat-stressed plants. **Plant Physiology and Biochemistry**, 46:786-793. <https://doi.org/10.1016/J.PLAPHY.2008.04.018>

Yan, F.; Zhang, F.; Fan, X.; Fan, J.; Wang, Y.; Zou, H.; Wang, H.; Li, G. (2021). Determining irrigation amount and fertilization rate to simultaneously optimize grain yield, grain nitrogen accumulation and economic benefit of drip-fertigated spring maize in northwest China. **Agricultural Water Management**, 243:106440. <https://doi.org/10.1016/J.AGWAT.2020.106440>

Younes, N.A.; El-Sherbiny, M.; Alkharpotly, A.A.; Sayed, O.A.; Dawood, A.F.A.; Hossain, M.A.; Abdelrhim, A.S.; Dawood, M.F.A. (2024). Rice-husks synthesized-silica nanoparticles modulate silicon content, ionic homeostasis, and antioxidants defense under limited irrigation regime in eggplants. **Plant Stress**, 11:100330. <https://doi.org/10.1016/J.STRESS.2023.100330>

Yousaf, M.I.; Riaz, M.W.; Jiang, Y.; Yasir, M.; Aslam, M.Z.; Hussain, S.; Sajid Shah, S.A.; Shehzad, A.; Riasat, G.; Manzoor, M.A.; Akhtar, I. (2022). Concurrent effects of drought and heat stresses on physio-chemical attributes, antioxidant status and kernel quality traits in maize (*Zea mays* L.) hybrids. **Frontiers in Plant Science**, 13:898823. <https://doi.org/10.3389/FPLS.2022.898823>

Yousaf, M.I.; Riaz, M.W.; Shehzad, A.; Jamil, S.; Shahzad, R.; Kanwal, S.; Ghani, A.; Ali, F.; Abdullah, M.; Ashfaq, M.; Hussain, Q. (2023). Responses of maize hybrids to water stress conditions at different developmental stages: accumulation of reactive oxygen species, activity of enzymatic antioxidants and degradation in kernel quality traits. **PeerJ**, 11:e14983. <https://doi.org/10.7717/PEERJ.14983>

Zahra, N.; Hafeez, M.B.; Wahid, A.; Al Masruri, M.H.; Ullah, A.; Siddique, K.H.M.; Farooq, M. (2023). Impact of climate change on wheat grain composition and quality. **Journal of the Science of Food and Agriculture**, 103:2745-2751. <https://doi.org/10.1002/JSFA.12289>

Zargar, S.M.; Mahajan, R.; Bhat, J.A.; Nazir, M.; Deshmukh, R. (2019). Role of silicon in plant stress tolerance: Opportunities to achieve a sustainable cropping system. **3 Biotech**, 9:1-16. <https://doi.org/10.1007/S13205-019-1613-Z>

Zhu, Y.; Jiang, X.; Zhang, J.; He, Y.; Zhu, X.; Zhou, X.; Gong, H.; Yin, J.; Liu, Y. (2020). Silicon confers cucumber resistance to salinity stress through regulation of proline and cytokinins. **Plant Physiology and Biochemistry**, 156:209-220. <https://doi.org/10.1016/J.PLAPHY.2020.09.014>

CAPÍTULO 3 - O uso do silício permite diminuir nível de irrigação sem causar prejuízo na cultura do milho em campo por otimizar o sistema de defesa antioxidante da planta

RESUMO - O déficit hídrico é um dos principais estresses ambientais que mais prejudica os cultivos no mundo especialmente o sistema de defesa antioxidante do milho (*Zea mays* L.). O fornecimento de Si e de K para estimular a tolerância ao déficit hídrico em plantas têm sido estudados, mas faltam pesquisas em cultivos em campo explorando os mecanismos antioxidativos envolvidos na diminuição do estresse. Realizou-se essa pesquisa objetivando investigar a resposta bioquímica de plantas de milho sob três níveis hídricos e doses de Si via fertirrigação na ausência e na presença da fertilização potássica. Para tanto, foram desenvolvidos dois experimentos em campo em Latossolo Vermelho eutroférico (teor de K: 6,4 mmol_c dm⁻³) com a cultura do milho sem (-K) e com (+K) adubação potássica. Ambos os experimentos foram constituídos por um fatorial 3x4: três regimes hídricos: 80%, 60% e 40% da capacidade de retenção de água no solo e quatro doses de Si: 0; 4; 8 e 12 kg ha⁻¹ fornecidas via fertirrigação, em esquema de parcela sub-dividida, dispostos em delineamento de blocos casualizados, com quatro repetições. As análises bioquímicas realizadas foram: atividade de enzimas antioxidantes (SOD, APX e GPOX), conteúdo de prolina, compostos fenólicos, peroxidação lipídica, produção de massa seca e acúmulo de Si e de K na parte aérea. O fornecimento de Si via fertirrigação melhorou a tolerância ao déficit hídrico tanto moderado (MWD) quanto severo (SWD) na cultura do milho, independente da fertilização K complementar. O efeito de aumento da tolerância foi atribuído pelo aumento das atividades de enzimas antioxidantes (SOD, APX), menor peroxidação lipídica e aumento no acúmulo de osmólitos protetores, como a prolina, estímulo a síntese de compostos fenólicos. Além disso, foi evidenciado o equilíbrio de nutrientes como K, incrementando a produção de matéria seca das plantas de milho estressadas pelo déficit hídrico. A fertirrigação com Si é uma estratégia que permite diminuir o nível de irrigação sem causar danos oxidativos na planta fortalecendo o cultivo sustentável da cultura do milho a nível de campo.

Palavras-chave: Tolerância ao estresse abiótico, seca, fertirrigação silicatada, estresse oxidativo, espécies reativas de oxigênio

The use of silicon can reduce irrigation levels without harming corn crops in the field by modulating the plant's antioxidant defense system

ABSTRACT - Water deficit is one of the main environmental stresses that most harms crops worldwide, especially the antioxidant defense system of corn (*Zea mays* L.). The supply of Si and K to stimulate water deficit tolerance in plants has been studied, but there is a lack of research on field crops exploring the antioxidant mechanisms involved in reducing stress. This research was conducted to investigate the biochemical response of corn plants under three water levels and doses of Si via fertigation in the absence and presence of potassium fertilization. To this end, two field experiments were developed in Oxisol (K content: $6.4 \text{ mmolc dm}^{-3}$) with corn crops without (-K) and with (+K) potassium fertilization. Both experiments consisted of a 3x4 factorial design: three water regimes: 80%, 60%, and 40% of the soil water retention capacity and four doses of Si: 0, 4, 8, and 12 kg ha^{-1} supplied via fertigation, in a split-plot scheme, arranged in a randomized block design, with four replicates. The biochemical analyses performed were: antioxidant enzyme activity (SOD, APX, and GPOX), proline content, phenolic compounds, lipid peroxidation, dry matter production, and Si and K accumulation in the aerial part. The supply of Si via fertigation improved tolerance to both moderate (MWD) and severe (SWD) water deficit in corn crops, regardless of complementary K fertilization. The effect of increased tolerance was attributed to increased antioxidant enzyme activities (SOD, APX), lower lipid peroxidation, and increased accumulation of protective osmolytes, such as proline, stimulating the synthesis of phenolic compounds. In addition, nutrient balance, particularly of K, was observed, leading to increased dry matter production in maize plants subjected to water deficit stress. Silicon fertigation is a strategy that allows for reduced irrigation levels without causing oxidative damage to the plants, thereby strengthening the sustainable cultivation of maize under field conditions.

Keywords: Abiotic stress tolerance, drought, silicate fertigation, oxidative s

1 Introdução

O déficit hídrico é o estresse abiótico que mais limita a produção agrícola das culturas de campo, especialmente em regiões áridas e semiáridas, (Chieb and Gachomo, 2023), comprometendo o desempenho de culturas de grande importância econômica, como o milho (*Zea mays* L.), que é altamente sensível a restrição hídrica (Hussain et al., 2019; Yousaf et al., 2022). Essa sensibilidade à seca pode diminuir a eficiência do uso de água e comprometer o metabolismo antioxidante (Anjum et al., 2017b; Shemi et al., 2021b), resultando em perdas significativas de produtividade. Embora a irrigação seja essencial para a produção agrícola, especialmente no cultivo de milho, essa prática consome cerca de 70% da água doce disponível globalmente e representa um alto custo para os produtores (Elshamly, 2023a). Deste modo, em regiões onde os recursos hídricos são escassos e os custos de irrigação elevados, a produção de milho é frequentemente prejudicada.

Estudos apontam para uma diminuição significativa na produção e no rendimento do milho em escala global nos próximos anos, em decorrência de eventos cada vez mais frequente de condições adversas, como a restrição hídrica, ocasionado por períodos mais longos de seca devido as mudanças climáticas (Seleiman et al., 2021), associados a menor disponibilidade de água para irrigação, (Elshamly and Abaza, 2024). As projeções indicam uma queda média de produção entre 15 e 20% ao ano devido ao déficit hídrico, configurando-se assim como um sério entrave à produção desse cereal e à segurança alimentar global (Hussain et al., 2019; Seleiman et al., 2021). Diante desse cenário, torna-se urgente a adoção de estratégias que otimizem o uso da água e garantam a sustentabilidade agrícola frente ao crescimento populacional e à crescente competição por recursos hídricos.

Estudos anteriores evidenciam que o estresse por déficit hídrico causou danos significativos em plantas de milho, principalmente por comprometer aspectos bioquímicos, com a geração excessiva de espécies reativas de oxigênio (ERO) (Yousaf et al., 2023), responsável pelo estresse oxidativo e, consequentemente, gerando danos aos lipídeos, proteínas e ácidos nucleicos

das células vegetais (Hussain et al., 2020a; Shemi et al., 2021a; Yousaf et al., 2022).

Para mitigar esses efeitos negativos as plantas ativam mecanismos de defesa antioxidante enzimáticos, que consiste em enzimas que atuam em conjunto para proteger as células de danos oxidativos, como a superóxido dismutase (SOD, EC 1.15.1.1), a ascorbato peroxidase (APX, EC 1.11.1.11) e a guaiacol peroxidase (GPOX, EC 1.11.1.7), além de antioxidantes não enzimáticos com a prolina e os compostos fenólicos (Hua et al., 2020; Al-Mokadem et al., 2023b). Esses antioxidantes atuam cooperativamente em diferentes reações redox para diminuir o dano oxidativo. Por exemplo, a SOD, atua na primeira linha de defesa dismutando O_2^- em H_2O_2 . APX, e a GPOX, desintoxicam H_2O_2 transformando-o em H_2O (Gratão et al., 2005; Hua et al., 2020; Bashir et al., 2021). Além disso, os agentes não-enzimáticos de defesa como os compostos fenólicos são cruciais na desintoxicação do excesso de peróxido de hidrogênio em células vegetais e a prolina tem importante papel como agente osmótico e na sinalização metabólica (Ahammed et al., 2020; Bashir et al., 2021).

No entanto, sob condições de estresse hídrico intenso, esses mecanismos podem se tornar insuficientes, diminuindo assim a atividade dessas enzimas e comprometendo sua capacidade de regular os níveis de ERO celular, prejudicando o desempenho das culturas (Ahluwalia et al., 2021). Nesse contexto, os pesquisadores têm se concentrado ao desenvolvimento de estratégias inovadoras como a irrigação deficitária controlada, aliadas a métodos mais eficazes de irrigação, como o gotejamento, que melhora o aproveitamento da água e dos fertilizantes, contribuindo para o aumento da produtividade agrícola (Yan et al., 2021; Elshamly, 2023b; Elshamly e Abaza, 2024a), tendo em vista a necessidade do uso racional da água de doce.

Além da irrigação, o manejo nutricional com silício (Si) e potássio (K) tem se destacado como uma estratégia eficaz para melhorar a tolerância das plantas ao déficit hídrico em especial por aumentar a concentração e melhorar atividade dos agentes de defesa antioxidativos, a fim de diminuir o acúmulo de ERO (dos Santos Sarah et al., 2021a; Rakesh et al., 2024b; Sulaiman et al., 2024a; Vanitha et al., 2024; Younes et al., 2024).

O Si, é considerado um elemento benéfico e desempenha um papel essencial na melhoria da resistência ao estresse hídrico e oxidativo em diferentes culturas, promovendo a estabilização das membranas celulares, regulação osmótica e a modulação das atividades antioxidantes (Li et al., 2024; Rakesh et al., 2024). Além disso, o Si influencia a expressão de genes relacionados à defesa antioxidante, contribuindo para a homeostase redox sob condições de estresse (Singh et al., 2023; Chen et al., 2024). No entanto, o Si disponível em solos tropicais é geralmente baixo, sendo necessário sua aplicação, por exemplo, via fertirrigação utilizando fontes solúveis e estabilizadas (Gonzalez-Porras et al., 2024).

Sob estresse hídrico, a suplementação com Si em plantas de milho pode melhorar a eficiência fotossintética, elevando os teores de carotenoides e clorofila, aumentando o conteúdo relativo de água a partir incremento de osmólitos essenciais como prolina, tendo estimulado a atividade de enzimas antioxidantes e fenóis, diminuindo o dano oxidativo e eliminando ERO (Shemi et al., 2021; Al-Mokadem et al., 2023; Weisany et al., 2023).

Entre os elementos essenciais o K se destaca crucial para diversas funções metabólicas nas plantas, o que se deve ao seu papel na ativação enzimática e ajuste osmótico, uma vez que é responsável no controle da abertura e fechamento estomático, e atuar no transporte de solutos e síntese de proteínas (de Mello Prado, 2021; Sardans and Peñuelas, 2021; R. Johnson et al., 2022). Sua deficiência agrava os efeitos do déficit hídrico, aumentando a vulnerabilidade ao estresse oxidativo (Cakmak, 2005). Estudos indicam que a aplicação de K em condições de déficit hídrico pode intensificar a eficiência dos mecanismos antioxidantes e melhorar a capacidade fotossintética das plantas aumentando a tolerância da planta ao estresse hídrico (Cakmak, 2005; R. Johnson et al., 2022), porque uma maior concentração de íons K^+ nas células do mesofilo pode melhorar a eficiência do uso da água (Hu et al., 2022).

A interação sinérgica entre o Si e o K tem sido objeto de interesse crescente na literatura, por ambos atuarem de forma complementar para mitigar os danos causados pelo déficit hídrico. No entanto, estudos sobre essa interação em condições de campo ainda são escassos, especialmente em cultivo de milho. Sendo assim, avaliar a influência combinada do Si e do K na mitigação do

estresse oxidativo e na tolerância ao déficit hídrico pode fornecer bases científicas fundamentadas para o desenvolvimento de estratégias de manejo mais eficientes e sustentáveis. Deste modo avaliou-se as seguintes hipóteses: i) A fertirrigação com Si é eficiente para estimular o sistema antioxidativo em plantas de milho cultivado em campo sob diferentes déficits hídrico; ii) O fornecimento de Si no cultivo de milho irrigado pode diminuir a demanda hídrica, promovendo a economia de água sem induzir o estresse oxidativo nas plantas, devido aos seus efeitos benéficos no fortalecimento dos sistemas de defesa vegetal. Para testar essas hipóteses objetivou-se avaliar a influência de doses de Si via fertirrigação com e sem fertilização de K no sistema antioxidante de plantas de milho cultivadas sob três condições hídricas. Além disso, buscou-se desvendar o papel do Si como um indicador de tolerância ao déficit hídrico, fornecendo insights sobre os mecanismos bioquímicos subjacentes à tolerância das plantas em condições de estresse.

Se essas hipóteses forem confirmadas, as respostas bioquímicas evidenciarão que o fornecimento de Si via fertirrigação pode ser uma estratégia eficaz para diminuir o consumo de água em cultivos irrigados, sem comprometer o crescimento do milho. Isso é importante diante da crescente necessidade de otimizar o uso dos recursos hídricos e garantir a sustentabilidade ambiental. Nesse contexto, os pesquisadores têm se concentrado ao desenvolvimento de estratégias inovadoras, aliadas a métodos mais eficazes de irrigação, como a técnica por gotejamento, que melhora o aproveitamento da água e dos fertilizantes, contribuindo para o aumento da produtividade agrícola (Yan et al., 2021; Elshamly, 2023; Elshamly and Abaza, 2024).

2 Material e métodos

2.1 Condições de crescimento e material vegetal

O experimento foi realizado em condições de campo na Fazenda de Ensino, Pesquisa e Extensão da Universidade Estadual Paulista (UNESP), localizada em Jaboticabal (-21° 14' 50.7" de latitude e 48° 17' 01.8" de longitude, 546 m de altitude), São Paulo, Brasil. Foi utilizado o cultivo de milho durante a

safra de 2022, sendo monitorado na área experimental os dados de temperatura do ar, umidade do ar, radiação global e precipitação pluvial (Figura 1).

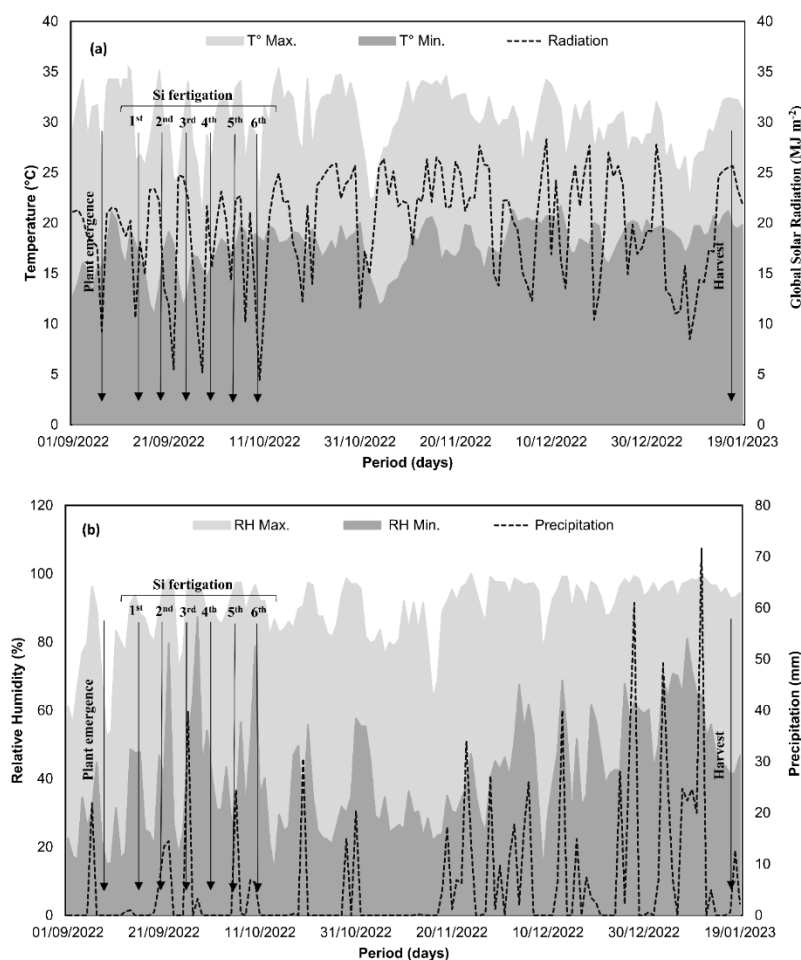


Figura 1. Condições experimentais na área de realização do experimento em campo durante o cultivo de milho. Temperatura máxima (T° Max.), temperatura mínima (T° Min.) e radiação global (a) umidade relativa máxima (RH Max.), umidade relativa mínima (RH Min.) e precipitação (P) (b).

Sementes de milho da cultivar FS575PWU foram utilizadas na semeadura, com espaçamento entre linhas de 0,45 m e 3,5 sementes por m, totalizando uma população de 77.777 plantas por ha⁻¹. O milho (*Zea mays* L.) foi utilizado por ser uma planta da família Poaceae que possui mecanismo ativo de absorção de Si, através da ação de transportadores especializados (Lsi1 e Lsi2 são responsáveis pela absorção radicular de Si, enquanto Lsi6 está localizado nas células do parênquima das folhas e é responsável pela descarga do xilema) (Mandlik et al., 2020).

Foi instalado um sistema de irrigação por gotejamento autocompensante com espaçamento de 0,5 m entre emissores e vazão de $1,6 \text{ L h}^{-1}$, utilizando uma linha de gotejo para cada linha de cultivo.

O solo da área experimental foi classificado como um Latossolo Vermelho eutroférico (LVef) (Andrioli e Centurion, 1999). Previamente à instalação dos experimentos foram coletadas amostras de solos da camada de 0-20 e 20-40 cm de profundidade para análise química para fins de fertilidade do solo (Raij et al., 2001), para determinação do teor de Si disponível (Korndörfer et al., 2004) e para análise granulométrica (Camargo et al., 1986).

Os resultados da análise química do solo na camada de 0-20 e 20-40cm de profundidade, respectivamente, foram: pH (CaCl_2)= 6.2 e 5.6; matéria orgânica= 20.5 e 19 g dm^{-3} ; P= 59 e 36 mg dm^{-3} ; S= 11 e 13 mg dm^{-3} ; Ca= 37 e 40 mg dm^{-3} ; Mg= 17 e 18 $\text{mmol}_c \text{ dm}^{-3}$; K= 6.2 e 6.4 $\text{mmol}_c \text{ dm}^{-3}$; H + Al= 22.5 e 23 $\text{mmol}_c \text{ dm}^{-3}$; soma de bases ($\text{SB} = \text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+} + \text{K}^+$)= 60.6 e 64 $\text{mmol}_c \text{ dm}^{-3}$, capacidade de troca catiônica ($\text{CTC} = \text{SB} + \text{H} + \text{Al}$)= 82.9 e 87.2 $\text{mmol}_c \text{ dm}^{-3}$ e saturação de bases ($\text{V} = \text{SB} \times 100 / \text{CTC}$)= 73 e 73%. Os teores de micronutrientes do solo foram determinados na camada de 0-20 cm de profundidade: B= 0.41 mg dm^{-3} ; Cu= 6.4 mg dm^{-3} ; Fe= 11 mg dm^{-3} ; Mn= 23.6 mg dm^{-3} ; Zn= 3.9 mg dm^{-3} .

As adubações foram realizadas baseando-se nos teores do solo e seguindo recomendação de adubação para o estado de São Paulo para a cultura do milho (Duarte et al., 2022). A adubação fosfatada foi realizada aplicando dose de 50 kg ha^{-1} de P_2O_5 na forma de superfosfato simples no sulco de semeadura. A adubação nitrogenada foi realizada via fertirrigação utilizando ureia e sendo parcelada aplicando-se 70, 70 e 70 kg ha^{-1} de N aos 7, 14 e 21 DAE, respectivamente. Para as plantas cultivadas com adubação de K foi aplicado dose 70 kg ha^{-1} de K_2O na forma de KCl aplicado à lanço e manualmente aos 9 DAE. Na condição de ausência de adubação potássica, as plantas não receberão fornecimento de K, mas receberam a adubação dos demais nutrientes.

2.2 Tratamentos e delineamento experimental

A pesquisa corresponde a dois experimentos na mesma área de cultivo do feijoeiro contendo dois status de K, sendo o cultivo realizado em sistema de plantio direto na palhada do feijão. Os dois experimentos foram constituídos por um fatorial 3x4, sendo: 80% (sem déficit hídrico - WWD), 60% (déficit hídrico moderado - MWD) e 40% (déficit hídrico severo - SWD) da capacidade de retenção de água no solo (CRA) combinado com quatro doses de Si fornecidas via fertirrigação: 0; 4; 8 e 12 kg ha⁻¹. Os tratamentos foram avaliados sob duas condições potássicas: sem adubação (-K) (Experimento 1) e com adubação (+K) (Experimento 2).

Os experimentos foram instalados em esquema de parcela sub-dividida dispostos em delineamento de blocos casualizados, com quatro repetições. As parcelas experimentais tiveram dimensões de 2,25 m de largura com espaçamento entre linhas de 0,45 m e 6 m de comprimento, tendo área total de 13,5 m² e área útil para as avaliações de 5,4 m².

As doses de Si foram determinadas considerando indicação do International Rice Research Institute (IRRI) que recomenda o uso de doses de 40 a 60 kg ha⁻¹ de silicato de potássio (15% de Si) (equivalente a 6 a 9 kg ha⁻¹ de Si) (IRRI, 1993). As doses foram aplicadas em seis parcelamentos, aos 8, 12, 16, 20, 23 e 28 dias após da emergência plena (DAE). As doses de Si aplicadas foram fracionadas conforme o número de aplicações, sendo usadas as concentrações de 0; 0,67; 1,33 e 2,00 kg ha⁻¹ de Si. Na lâmina de 2,5 mm (2,5 L m²) essas concentrações correspondem a 0; 0,96; 1,90 e 2,85 mmol L⁻¹ de Si na solução em cada aplicação. O parcelamento foi realizado para induzir aumento na absorção de Si e para que as concentrações usadas em cada aplicação fossem menores que 3,5 mmol L⁻¹ e, portanto, sem risco de polimerização do elemento.

As aplicações de Si foram realizadas aos 8, 12, 20, 24 e 28 DAE. A fonte de Si utilizada foi o silicato de sódio estabilizado com sorbitol (Si = 115,2 g L⁻¹, Na₂O = 60,5 g L⁻¹). O sorbitol presente nessa fonte possui propriedades estabilizantes que permitem maior concentração de formas monoméricas de Si (Babiker and Duncan, 1974), diminuindo os riscos de polimerização da solução aplicada.

As adubações foram realizadas baseando-se nos teores do solo e seguindo recomendação de adubação para o estado de São Paulo para a cultura do milho (Duarte et al., 2022). A adubação fosfatada foi realizada aplicando dose de 50 kg ha^{-1} de P_2O_5 na forma de superfosfato simples no sulco de semeadura. A adubação nitrogenada foi realizada via fertirrigação utilizando ureia e sendo parcelada aplicando-se 70, 70 e 70 kg ha^{-1} de N aos 7, 14 e 21 DAE, respectivamente. Para as plantas cultivadas com adubação de K foi aplicado dose 70 kg ha^{-1} de K_2O na forma de KCl aplicado à lanço e manualmente aos 9 DAE. Na condição de ausência de adubação potássica, as plantas não receberão fornecimento de K, mas receberam a adubação dos demais nutrientes.

Para estabelecer os tratamentos de déficits hídricos, os níveis de capacidade de retenção de água no solo (CRA) foram determinados utilizando técnicas de coleta de amostras indeformadas do solo. A curva de retenção de água foi construída por meio de testes em mesa de tensão e câmara de pressão de Richards (Klute, 2018). A partir da curva de retenção de água determinou-se a capacidade de campo (CC) em $0,41 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ e o ponto de murcha permanente (PMP) em $0,13 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$. A partir da CC e PMP, determinou-se a quantidade de água disponível (AD) em $0,28 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ e, conseqüentemente, a capacidade total de água disponível (CAD) utilizando AD e sistema radicular efetivo do feijão e do milho em 0,4 m, sendo a CAD = 112 mm. A partir da CAD, ajustou-se os níveis de capacidade de retenção de água no solo (CRA) à 89,6 mm, 67,2 mm e 44,8 mm para os regimes hídricos de 80%, 60% e 40% da CRA, respectivamente.

Inicialmente, as plantas foram mantidas em condições hídricas adequadas (80% da CRA), enquanto os níveis de déficit hídrico moderado e severo foram impostos no período vegetativo (V8 a V10). O volume de água aplicado para manter os níveis de CRA foram determinados por meio de balanços hídricos diários, que levaram em consideração o excesso ou o déficit de água no solo em relação à CRA de cada regime hídrico. As entradas consideradas nesse sistema incluíram a água de irrigação e a precipitação pluvial, enquanto a única saída de água considerada foi a evapotranspiração da cultura (ETc), assumindo-se que a percolação profunda e o escoamento foram insignificantes (H.A. Webber et al., 2006)

Para monitoramento da umidade volumétrica do solo (θ) durante o experimento, diariamente realizou-se leituras da umidade do solo pelo método indireto do Reflectômetro no Domínio do Tempo (TDR) (HydroSencell). Para uso do TDR, inicialmente foram coletadas amostras de solo nos mesmos pontos para determinação direta da umidade do solo em base de massa. A precisão do TDR com umidade do solo foi considerada suficiente considerando o $R^2 = 0.84$ ($y = 1,0294x - 3,2562$) em que a leitura do TDR subestimou a umidade do solo (θ) em 2.2% com desvio padrão de 1%. As umidades do solo estabelecida para cada regime hídrico foram de 0.354, 0,283 e 0,212 $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ para os regimes hídricos de 80%, 60% e 40% da CRA, respectivamente.

As irrigações foram aplicadas quando o déficit hídrico atingiu o esgotamento máximo permitido da água disponível no solo utilizando manejo de irrigação recomendado pela FAO, na condição sem déficit hídrico as parcelas experimentais foram irrigadas quando 45% da água disponível no solo foi esgotada, portanto, a umidade do solo (θ) chegou em 0,2864 $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ e armazenamento de água em 49.58 mm. Os fatores de esgotamento para os tratamentos de déficit moderado e severo foram de 60% e 80%, com umidade do solo (θ) em 0,242 e 0,184 $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ e armazenamento de 26,88 e 13,44 mm, respectivamente (H.A. Webber et al., 2006).

2.3 Análises realizadas

As plantas foram cultivadas durante todo o ciclo fenológico e as análises nutricionais foram realizadas na fase de espigamento (R1-R3). As análises foram determinadas utilizando a coleta de 5 plantas por parcela coletadas na área útil.

2.3.1 Compostos fenólicos

A extração dos compostos fenólicos totais foi realizada utilizando dez discos foliares frescos (26,4 mm^2 cada) coletados do terço central da folha da base da inserção da espiga. As amostras foram imediatamente pesadas e inseridas em metanol concentrado por um período de 3 horas em condição escura. O teor de fenóis foi determinado por reação colorimétrica induzida por folin-ciocalteau 2 N e carbonato de sódio 20%, com leitura em espectrofotômetro (B442, Micronal, BR) a 765 nm (Singleton e Rossi, 1965).

2.3.2 Peroxidação lipídica

O terço central da folha da base da inserção da espiga nas plantas de milho foi coletada e imediatamente armazenada em N₂ líquido do campo até o laboratório e seguidamente, foram acondicionadas em freezer -80°C até o momento da realização da análise.

A determinação da peroxidação lipídica foi realizada a partir da estimativa do conteúdo de substâncias reativas ao ácido tiobarbitúrico, conforme descrito por (Heath and Packer, 1968). A concentração de malondialdeído (MDA) foi determinada em espectrofotômetro (DU640, Beckman, EUA) a 535 e 600 nm. Os dados foram calculados usando um coeficiente de extinção de $1,55 \times 10^{-5} \text{ mol}^{-1} \text{ cm}^{-1}$ (Gratão et al., 2012), sendo expressos em nMol g⁻¹ de matéria fresca.

2.3.3 Conteúdo de prolina

Foi determinado nas amostras que foram previamente armazenadas em freezer -80°C. O conteúdo de prolina foi determinado usando a reação nihidrina (Bates et al., 1973). A concentração de prolina será medida a 520 nm em espectrofotômetro (DU640, Beckman, EUA) sendo estimada usando uma curva padrão e expressa em µmol g⁻¹ de massa fresca.

2.3.4 Extração de proteínas

Inicialmente foi obtido os extratos proteicos amostras previamente armazenadas em N₂ líquido (Gomes-Junior et al., 2007). O material vegetal foi macerado em N₂ líquido, homogeneizado em tampão de fosfato de potássio contendo ácido etileno diaminotetracético, ditiotreitol e polivinilpolipirrolidona. O homogenato foi centrifugado, o sobrenadante armazenado em alíquotas a -80°C, e posteriormente utilizado para determinação das enzimas antioxidantes. A atividade enzimática específica foi expressa a partir da concentração de proteínas totais previamente determinada, segundo Bradford, 1976.

2.3.5 Superóxido dismutase (SOD, EC 1.15.1.1)

A atividade da SOD foi determinada a partir da medida da inibição da redução fotoquímica do cloreto de nitro azul tetrazólio, realizado em uma câmara

de reação iluminada por uma lâmpada fluorescente de 15 W, a 25°C. A medição foi realizada utilizando um espectrofotômetro a 560 nm e os resultados expressos em SOD U mg⁻¹ de proteína (Giannopolitis and Ries, 1977).

2.3.6 Ascorbato peroxidase (APX, EC 1.11.1.11)

A atividade APX foi determinada seguindo-se a decomposição de peróxido de hidrogênio por 1 minuto, por alterações na absorbância a 290 nm (Moldes et al., 2008). Para tal, foi adicionado 50 µL do extrato enzimático bruto em 950 µL de um meio de reação. O tampão de incubação foi composto por fosfato de potássio 80 mM, pH 7,0, ácido ascórbico 5 mM, EDTA 1 mM e H₂O₂ 1 mM. Os resultados foram expressos em nmol min⁻¹ mg⁻¹ proteína.

2.3.7 Guaiacol peroxidase (GPOX, EC1.11.1.7)

A atividade da GPOX, EC1.11.1.7 foi determinada em uma mistura de reação contendo tampão fosfato-citrato (fosfato de sódio dibásico 0,2 M e ácido cítrico 0,1 M) (pH 5,0), guaiacol (0,5%) e extrato vegetal. A mistura foi agitada com a adição de H₂O₂ e incubada a 30°C por 15 min. As amostras foram transferidas imediatamente para um banho de gelo, para interromper a reação, em seguida adicionou-se uma solução de metabissulfito de sódio (2%) (Monteiro et al., 2011). A absorbância foi monitorada no comprimento de onda de 450 nm, os resultados foram expressos em U g proteína⁻¹.

2.3.8 Produção de massa seca

A parte aérea das plantas foi coletada e lavada em água corrente, solução detergente (0,1% v/v), solução de HCl (0,3% v/v) e posteriormente em água deionizada. O material vegetal foi seco em estufa de circulação forçada de ar (TE-394/3-MP, Tecnal, BR) a 65±5°C, até atingir uma massa constante sendo obtido a massa seca. Cada unidade experimental foi constituída por 5 plantas coletada aleatoriamente na área útil das parcelas.

2.3.9 Acúmulo de Si e K na parte aérea

As amostras secas de tecido vegetal foram moídas em moinho do tipo Willey e utilizadas para determinação dos teores de Si e K.

O teor de Si foi obtido pela extração do elemento com solução de peróxido de hidrogênio e hidróxido de sódio em estufa de circulação forçada de ar (TE-394/3-MP, Tecnal, BR) a $120\pm5^{\circ}\text{C}$ (Kraska e Breitenbeck, 2010) e a leitura realizada por colorimétrica com molibdato de amônio, ácido oxálico e HCl usando espectrofotômetro (B442, Micronal, BR) a 410 nm (Korndörfer et al., 2004).

O teor foliar de K foi determinado a partir da digestão das amostras com ácido perclórico e ácido nítrico (2:1) (Bataglia et al., 1983) e a leitura foi realizada por espectrofotometria de absorção atômica.

O acúmulo dos elementos na parte aérea foi determinado a partir da relação dos teores obtidos com a massa seca das plantas, utilizando a equação abaixo:

$$\text{Acúmulo de elemento (g ou mg por planta)} = \frac{\text{Teor do elemento (g ou mg kg}^{-1}\text{)}}{\text{Massa seca (kg por planta)}}$$

2.4 Análise estatística

Os dados foram submetidos a uma análise de variância pelo teste F ($p\leq 0,05$), após verificação da normalidade e homocedasticidade das variâncias (teste W de Shapiro-Wilks e teste de Bartlett). Os dados quantitativos, correspondentes as doses de Si, foram analisados por meio de modelos matemáticos de regressão. Os dados qualitativos, correspondentes aos regimes hídricos, foram analisados usando teste de comparação de médias de Tukey ($p\leq 0,05$).

Para investigar as relações entre as variáveis e explicar a variância com base nas dimensões principais (componentes), foi realizada uma análise de componentes principais (PCA) utilizando uma matriz de covariância como referência. Além disso, a estrutura dos dados foi examinada por meio de uma análise de agrupamento hierárquico, empregando a distância euclidiana como métrica e o método de ligação simples para formar os agrupamentos. Ambas as análises, PCA e agrupamento hierárquico, foram incluídas com o suporte da linguagem de programação Python (versão 3.9.7; Python Software Foundation).

3 Resultados

3.1 Conteúdo de MDA, prolina e compostos fenólicos em plantas de milho

Os fatores isolados regime hídrico e doses de Si (ambos a $p < 0,01$), influenciaram o conteúdo de MDA na parte aérea das plantas em ambas as condições de adubação potássica. As doses de Si apresentaram efeito com ajuste polinomial quadrático para os três regimes hídricos avaliados em ambas as condições de K (Figura 2a,b).

Plantas sem adubação potássica apresentaram mínimos conteúdos de MDA de 3,80; 4,73 e 5,85 nmol g^{-1} , nas doses de Si 5,92; 7,83 e 8,64 kg ha^{-1} , respectivamente, para WWD, MWD e SWD (Figura 2a). Os conteúdos mínimos de MDA nas plantas que receberam adubação potássica foram de 3,49; 4,68 e 5,77 nmol g^{-1} nas doses de 5,76; 6,42 e 5,35 kg ha^{-1} de Si, para WWD, MWD e SWD, respectivamente (Figura 2b). Plantas cultivadas sob SWD diferiram das plantas sob WWD em todos os níveis de Si nas condições sem e com adubação potássica (Figura 2a,b), e plantas sob MWD nas doses 8 e 12 kg ha^{-1} de Si não diferiram das plantas sob WWD e SWD na condição sem adubação potássica (Figura 2a).

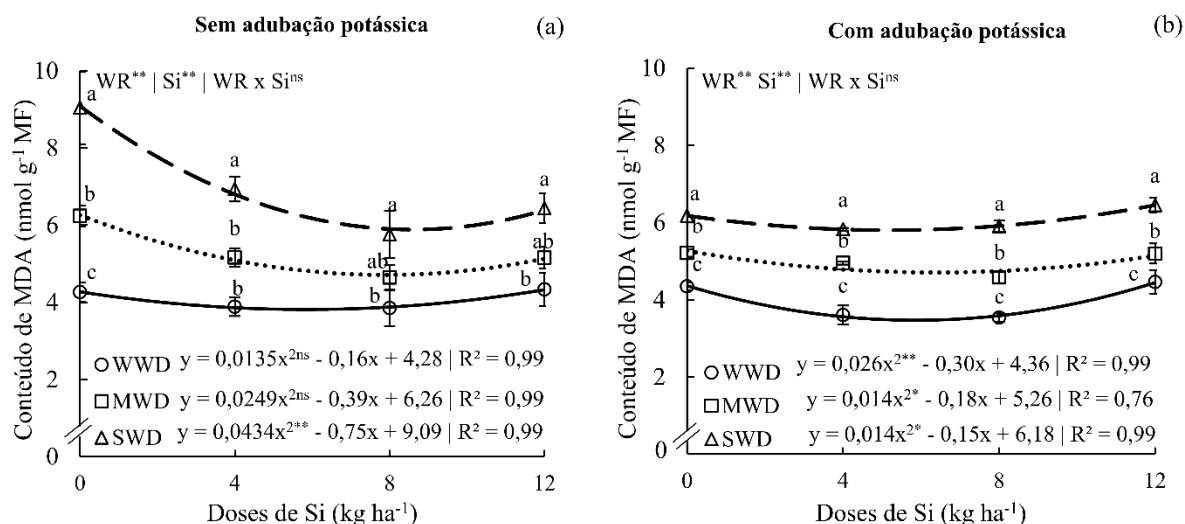


Figura 2. Conteúdo de MDA (a, b) na parte aérea de plantas de milho cultivada sem déficit hídrico – WWD (80% da capacidade de retenção de água - WRC), com déficit hídrico moderado – MWD (60% de WRC) e com déficit hídrico severo – SWD (40% de WRC); combinado com doses de Si fornecidas via fertirrigação: 0, 4, 8 e 12 kg ha^{-1} , sem e com adubação potássica. Letras mostram diferenças para os regimes hídricos (WR) em cada dose de Si ($p < 0,05$, teste de Tukey). * e **: significativo a 1 e 5% de probabilidade, respectivamente e ns: não significativo pelo teste F.

A interação entre os fatores (WR x Si) ($p < 0,01$), influenciou a concentração da prolina na parte aérea das plantas com adubação potássica (Figura 3a). Para as plantas sem adubação com K apenas os fatores regime hídrico e doses de Si (ambos a $p < 0,01$), influenciaram na concentração da prolina na parte aérea das plantas (Figura 3b). As doses de Si causaram efeito com ajuste polinomial quadrático para todos os regimes hídricos em ambas as condições de K (Figura 3a,b).

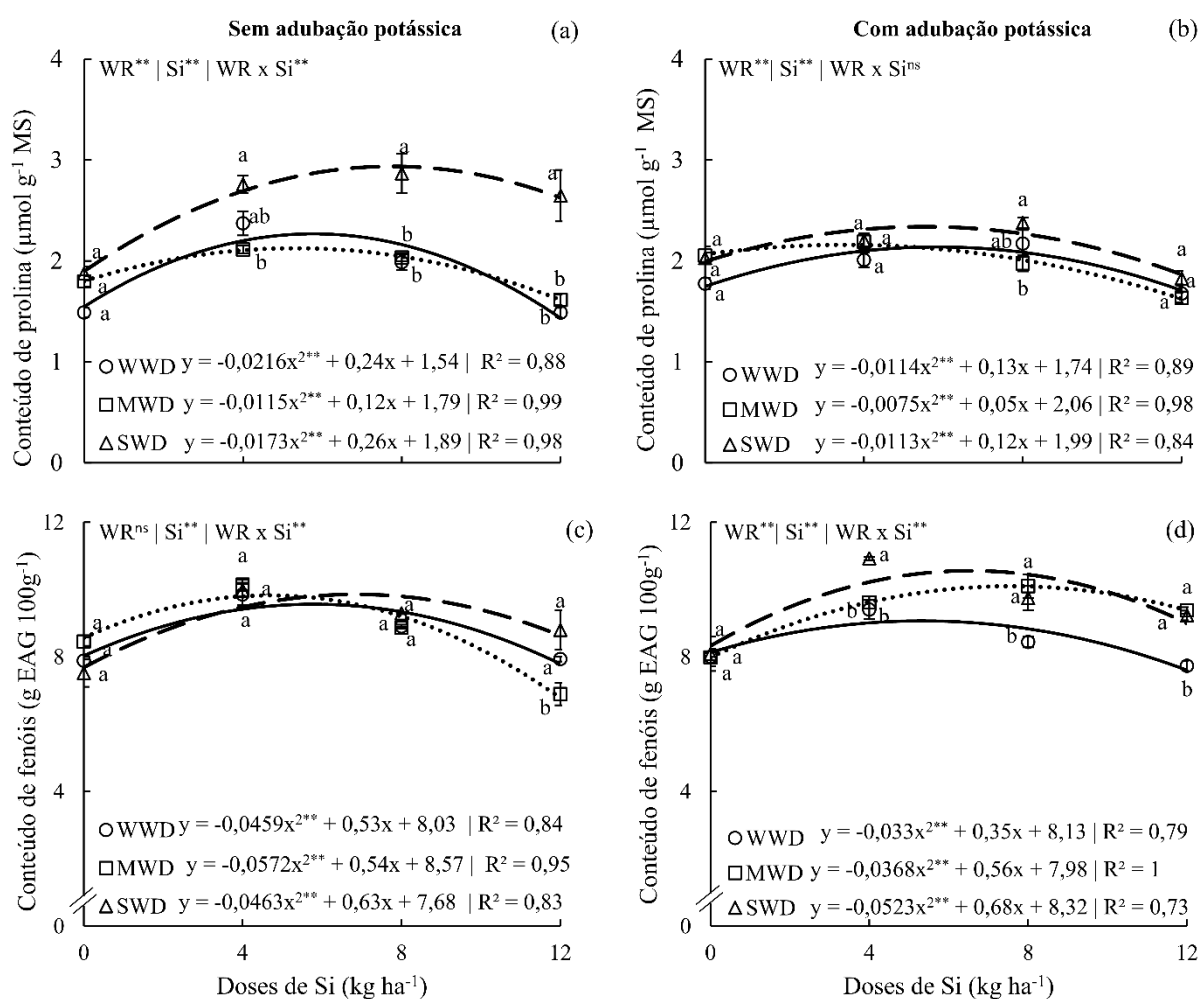


Figura 3. Conteúdo de prolina (a,b) e fenóis (b, c) na parte aérea de plantas de milho cultivada sem déficit hídrico – WWD (80% da capacidade de retenção de água - WRC), com déficit hídrico moderado – MWD (60% de WRC) e com déficit hídrico severo – SWD (40% de WRC); combinado com doses de Si fornecidas via fertirrigação: 0, 4, 8 e 12 kg ha^{-1} , sem e com adubação potássica. Letras mostram diferenças para os regimes hídricos (WR) em cada dose de Si ($p < 0,05$, teste de Tukey). * e **: significativo a 1 e 5% de probabilidade, respectivamente, e ^{ns}: não significativo pelo teste F.

Plantas sem adubação com K nas doses de Si 5,6; 5,2; 7,5 kg ha⁻¹ apresentaram os máximas conteúdos de prolina correspondente a 2,207; 2,103; 2,867 µmol g⁻¹, para os regimes hídricos WWD, MWD e SWD, respectivamente (Figura 3a). Plantas com adubação potássica apresentaram as máximas atividades das prolina de 2,111; 2,143; 2,309 µmol g⁻¹ nas doses de Si 5,7; 3,3; 5,3 kg ha⁻¹, respectivamente para os regimes hídricos WWD, MWD e SWD (Figura 3b). Plantas sob SWD, apresentaram maior conteúdo de prolina com o fornecimento de 8 e 12 kg ha⁻¹ de Si, na condição sem adubação potássica em relação a WWD e MWD (Figura 3a). Na condição com adubação potássica, plantas sob SWD diferiram de plantas sob as demais condições hídricas apenas com o fornecimento de 8 kg ha⁻¹ de Si (Figura 3b).

O conteúdo de fenóis nas plantas sem e com adubação potássica foi influenciado pelo efeito da interação entre os fatores (WR x Si) (ambos a p<0,01) (Figura 4c, d). Em ambas as condições de K nos três regimes hídricos, as plantas apresentaram efeito com ajuste polinomial quadrático às doses crescentes de Si (Figura 3c, d).

Plantas sem adubação com K nas doses de Si 5,8; 4,7 e 6,8 kg ha⁻¹ apresentaram os máximos conteúdo de fenóis de 9,6; 9,8 e 9,9 g EAG 100 g⁻¹, respectivamente, para os regimes hídricos WWD, MWD e SWD (Figura 3a). Plantas com adubação potássica, apresentaram os máximos conteúdo de fenóis de 9,1; 10,1; 10,6 g EAG 100 g⁻¹, nas doses 5,3; 7,6 e 6,5 kg ha⁻¹ de Si (Figura 3d). Plantas sob SWD, na condição sem K, apresentaram maior conteúdo de fenóis na maior dose de Si (12 kg ha⁻¹), em relação a condições de MWD (Figura 3c). Contudo, plantas sob SWD, na condição com K, apresentaram maior conteúdo de fenóis em relação ao regime WWD com fornecimento de 4, 8 e 12 kg ha⁻¹ de Si nas (Figura 3d).

3.2 Atividade de enzimas antioxidantes em plantas de milho

A atividade da SOD na parte aérea das plantas sem e com adubação potássica apresentou efeito da interação entre os fatores (WR x Si) (ambos a p<0,01) (Figura 4a,b). Em ambas as condições de adubação potássica as doses de Si apresentaram efeito com ajuste polinomial quadrático para os três regimes hídricos.

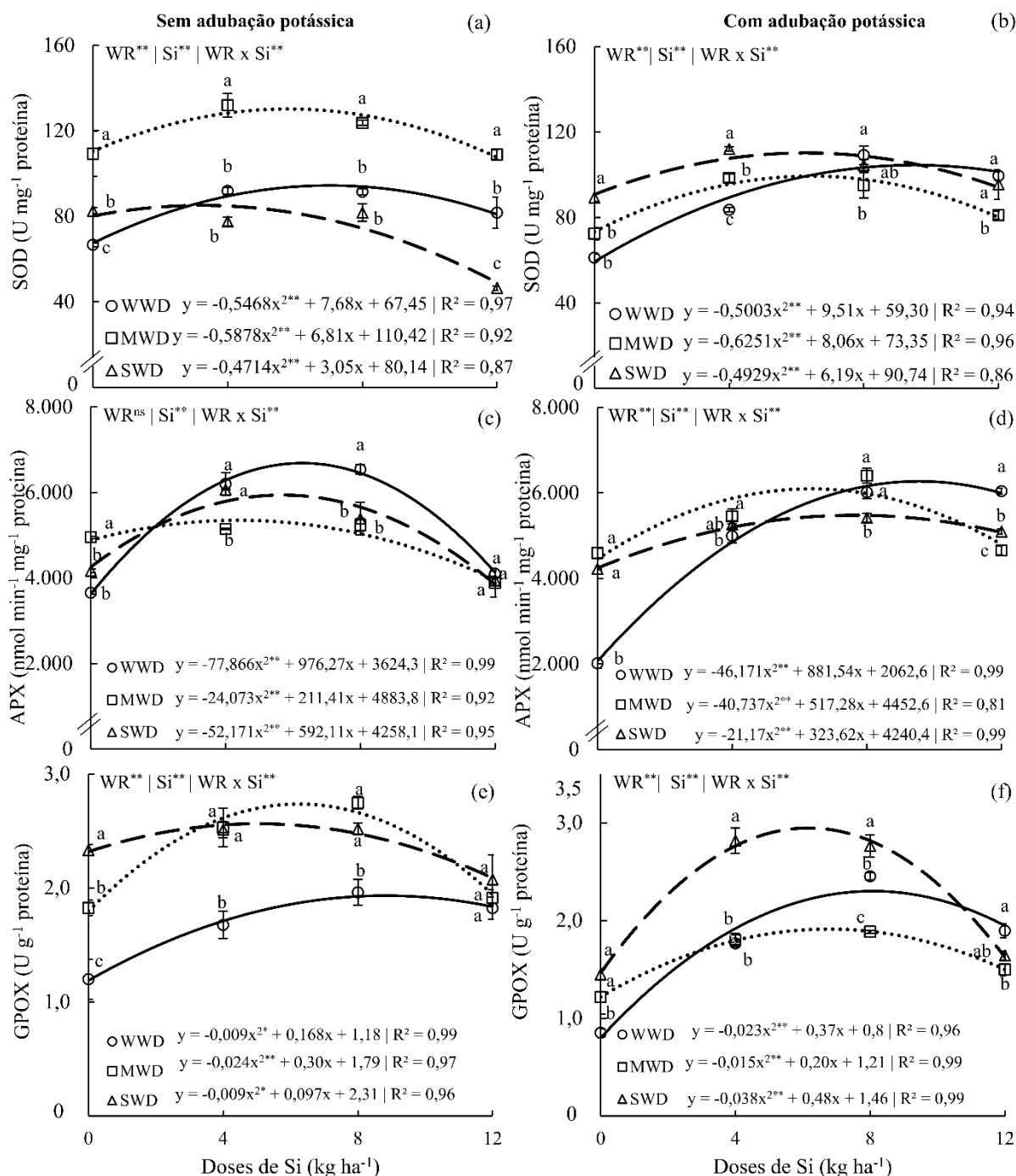


Figura 4. A atividade da SOD (a, b), APX (c,d) e GPOX (e,f) na parte aérea de plantas de milho cultivada sem déficit hídrico – WWD (80% da capacidade de retenção de água - WRC), com déficit hídrico moderado – MWD (60% de WRC) e com déficit hídrico severo – SWD (40% de WRC); combinado com doses de Si fornecidas via fertirrigação: 0, 4, 8 e 12 kg ha⁻¹, sem e com adubação potássica. Letras mostram diferenças para os regimes hídricos (WR) em cada dose de Si ($p < 0,05$, teste de Tukey). * e **: significativo a 1 e 5% de probabilidade, respectivamente, e ^{ns}: não significativo pelo teste F.

As máximas atividades da SOD em plantas sem adubação com K foram de 94,417; 130,144 e 85,073 U mg⁻¹ de proteína, nas doses de Si 7,0; 5,8 e 3,2

kg ha⁻¹ para os regimes hídricos WWD, MWD e SWD, respectivamente (Figura 4a), e de 104,493; 99,331 e 110,174 U mg⁻¹ de proteína nas doses de Si 9,5; 6,4 e 6,3 kg ha⁻¹ em plantas adubadas com K, respectivamente para os regimes hídricos WWD, MWD e SWD (Figura 4b). Plantas sem adubação potássica sob regime hídrico MWD apresentaram maior atividade da SOD independente das doses de Si, em relação às condições de WWD e SWD, e plantas com adubação potássica sob SWD apresentaram maior atividade da SOD em relação aos regimes WWD e MWD, com fornecimento de 4 kg ha⁻¹ de Si.

A atividade da APX na parte aérea das plantas foi influenciada pela interação entre os fatores (WR x Si) em ambas as condições de K (ambos a $p < 0,01$) (Figura 4c,d). A atividade da APX plantas de milho apresentaram efeito com ajuste polinomial quadrático em resposta às doses crescentes de Si nos três regimes hídricos em ambas as condições de K.

Plantas sem e com adubação potássica apresentaram as máximas atividade da APX de 6684,38; 5347,95; 5938,13 e 6270,39; 6094,71; 5477,17 nmol min⁻¹ mg⁻¹ proteína nas doses de Si 6,3; 4,4; 5,7 e 9,5; 6,3; 7,6 kg ha⁻¹, para os regimes hídricos WWD, MWD e SWD, respectivamente (Figura 4c,d). Plantas sob SWD em ambas as condições de K apresentaram atividade da APX semelhante às plantas sob WWD com fornecimento de 4 kg ha⁻¹ de Si (Figura 4c,d).

A atividade da GPOX, na parte aérea do milho foi significativamente influenciada pela interação entre o regime hídrico (WR) e a aplicação de silício (Si), tanto na presença quanto na ausência de adubação potássica ($p < 0,01$) (Figura 3e, f). Em ambas as condições, observou-se ajuste polinomial quadrático da atividade da GPOX em resposta às doses crescentes de Si, sob os três níveis de disponibilidade hídrica. Sob adubação potássica (Figura 3e), as maiores atividades de GPOX foram observadas nas doses de Si de aproximadamente 7 kg ha⁻¹ (SWD), 4 kg ha⁻¹ (MWD) e 3 kg ha⁻¹ (WWD), com valores aproximados de 62; 39 e 38 U mg⁻¹ de proteína, respectivamente.

Na ausência de adubação potássica (Figura 3f), a GPOX apresentou respostas ainda mais intensas. As atividades máximas foram registradas nas

doses de Si 6 kg ha⁻¹ (SWD), 5 kg ha⁻¹ (MWD) e 7 kg ha⁻¹ (WWD), com picos de atividade de 82; 66 e 57 U mg⁻¹ de proteína, respectivamente.

3.3 Acúmulo de Si, K e Biomassa da parte aérea de plantas de milho

O acúmulo de Si na parte aérea das plantas sem adubação potássica apresentou efeito da interação entre os fatores (WR x Si) ($p < 0,05$) (Figura 5a) e nas plantas com adubação potássica, o acúmulo de Si foi influenciado apenas pelos fatores isolados (regimes hídricos e doses de Si) ($p < 0,01$) (Figura 5b). As plantas apresentaram efeito com ajuste polinomial quadrático às doses crescentes de Si nos três regimes hídricos, em ambas as condições de K (Figura 5a, b).

Plantas sem e com adubação potássica obtiveram seus máximos acúmulos de 1,3; 1,1; 0,5 e 1,3; 1,0; 0,6 mg por planta de Si nas doses de 6,4; 6,5; 5,4 e 6,3; 6,3; 6,0 kg ha⁻¹ de Si, respectivamente, para os regimes hídricos WWD, MWD e SWD (Figura 5a,b). Os menores acúmulos de Si foram observados em plantas sob MWD e SWD, em todas as doses de Si avaliadas e nas duas condições de adubação potássica.

Os fatores isolados regime hídrico e doses de Si (ambos a $p < 0,01$), influenciaram acúmulo de K na parte aérea das plantas em ambas as condições de adubação potássica. As doses de Si causaram efeito com ajuste polinomial quadrático para todos os regimes hídricos em ambas as condições de K (Figura 5c,d). Plantas sem adubação com K nas doses de Si 6,6; 6,4 e 6,9 kg ha⁻¹ apresentaram acúmulos máximos de K de 3,9; 3,6 e 2,7 g por planta, respectivamente, para WWD, MWD e SWD (Figura 5c). Plantas com adubação potássica apresentaram máximos acúmulos de K de 3,8; 3,4 e 3,19 g por planta, nas doses de 6,6; 7,0 e 6,7 kg ha⁻¹, respectivamente, para WWD, MWD e SWD (Figura 5d).

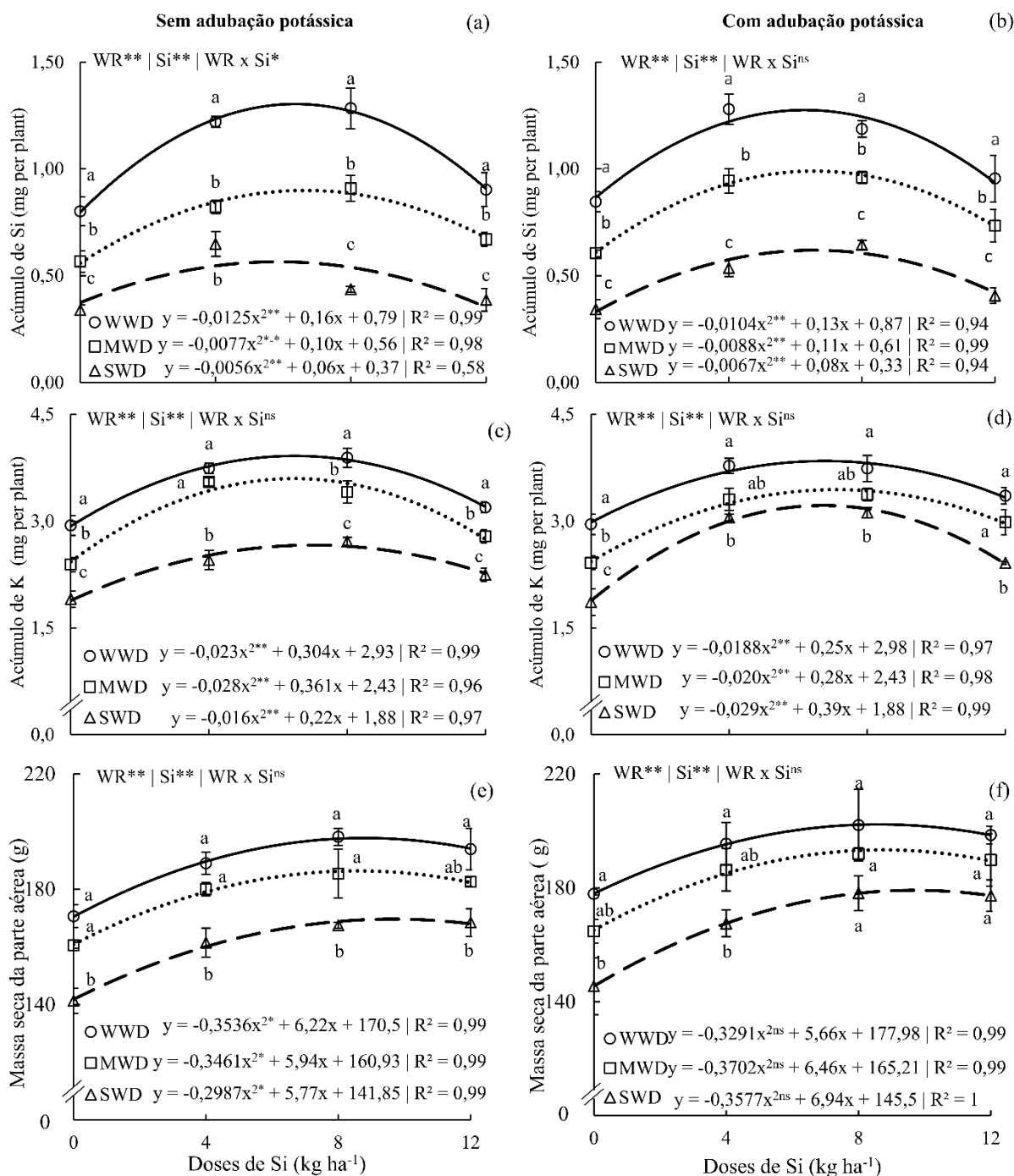


Figura 5. Acúmulo de silício (Si) (a, b) e de potássio (c, d) e massa seca (e, f) da parte aérea de plantas de milho cultivada sem déficit hídrico – WWD (80% da capacidade de retenção de água – WRC), com déficit hídrico moderado – MWD (60% de WRC) e com déficit hídrico severo – SWD (40% de WRC); combinado com doses de Si fornecidas via fertirrigação: 0, 4, 8 e 12 kg ha⁻¹, sem e com adubação potássica. Letras mostram diferenças para os regimes hídricos (WR) em cada dose de Si ($p < 0,05$, teste de Tukey). * e **: significativo a 1 e 5% de probabilidade, respectivamente, e ^{ns}: não significativo pelo teste F.

Plantas cultivadas sob WWD sem adubação potássica apresentaram os maiores acúmulos de K em todas as doses de Si, não diferindo das plantas cultivadas sob MWD com o fornecimento de 4 kg ha⁻¹ de Si, em relação as plantas sob SWD (Figura 5c). As plantas que receberam adubação com K, cultivadas sob WWD e MWD não diferiram entre si, apresentando maiores acúmulos de K com o fornecimento a partir de 4 kg ha⁻¹ de Si em relação as plantas sob SWD (Figura 5d).

Os fatores isolados regime hídrico e doses de Si (ambos a $p < 0,01$) influenciaram na massa seca da parte aérea das plantas sem e com adubação com K. As doses de Si causaram efeito com ajuste polinomial quadrático para os três regimes hídricos, em ambas as condições de K (Figura 5e, f). Os máximos valores de massa seca da parte aérea obtidos em plantas sem adubação potássica foram de 197,9; 186,4 e 169,7 nas doses de Si de 8,8; 8,6 e 9,7 kg ha⁻¹, respectivamente, para os regimes hídricos WWD, MWD e SWD (Figura 5e, f).

Na dose 12 kg ha⁻¹ plantas cultivadas sob MWD, não diferiram das plantas sob WWD na condição sem adubação potássica, e plantas sob SWD com fornecimento de 12 kg ha⁻¹ de Si apresentaram massa seca semelhante às das plantas sob MWD (Figura 5e). Por outro lado, plantas adubadas com K e sob SWD, mas que receberam Si em doses maiores (8 e 12 kg ha⁻¹) apresentaram massa seca semelhante de plantas sob WWD e MWD em todas as doses de Si (Figura 5f).

A análise de agrupamento hierárquico (Figura 6) revelou padrões distintos de resposta metabólica do milho em relação aos diferentes níveis e intensidade de déficit hídrico sob as duas condições de adubação potássica. Sob a condição com adubação potássica (Figura 6a), observa-se um agrupamento consistente entre as variáveis SOD, APX, GPOX, Si, K e massa seca, especialmente nas condições de MWD 4, MWD 8 e MWD 12, evidenciando forte correlação positiva, enquanto apresenta baixa correlação com variáveis como MDA. Isso indica que o déficit hídrico moderado, associado à aplicação de silício, favoreceu a ativação do sistema antioxidante enzimático e a eficiência na absorção de nutrientes, resultando em menor dano oxidativo e maior acúmulo de biomassa.

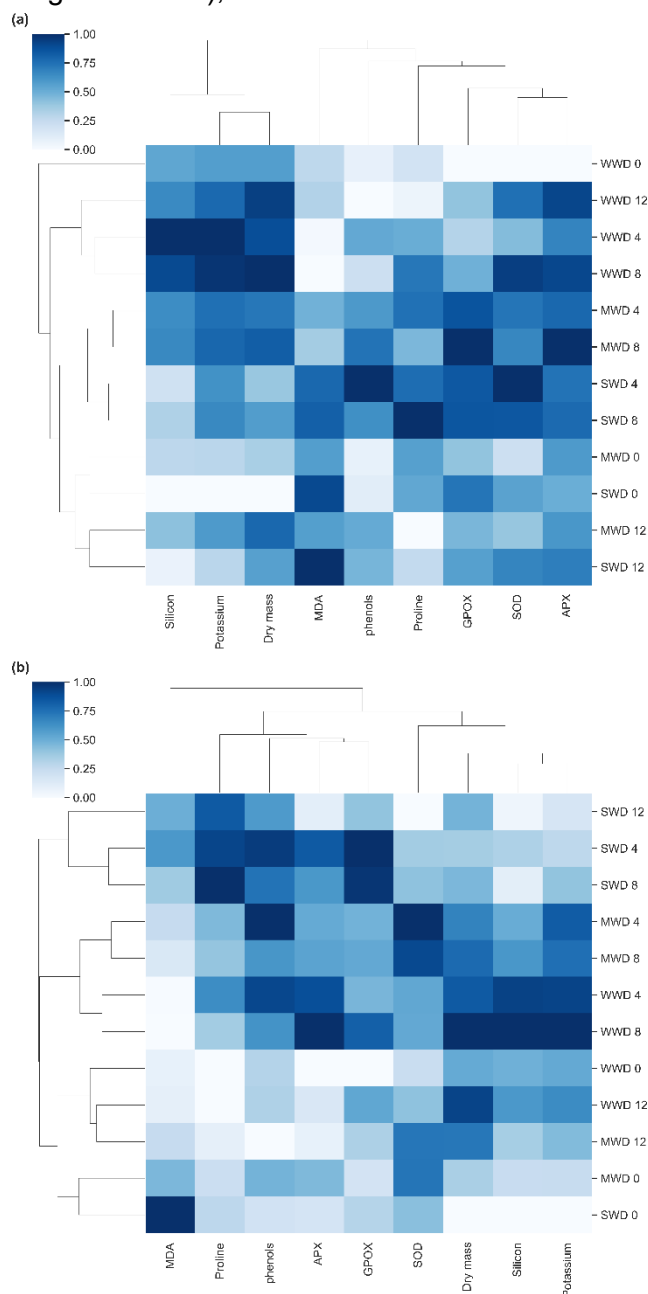
Em WWD 4, WWD 8 e WWD 12, nota-se correlação negativa de MDA com as variáveis antioxidantes, refletindo que o suprimento hídrico adequado e de Si mantiveram baixos níveis de estresse oxidativo. Em contrapartida, sob SWD 0 e SWD 12, há alta correlação positiva com MDA, e negativa destas com massa seca, Si e potássio, enquanto em SWD 4 e SWD 8 houve uma correlação positiva com enzimas antioxidantes, prolina e fenóis, indicando um deslocamento do metabolismo para mecanismos osmoprotetores e não enzimáticos, característico de plantas sob estresse hídrico severo.

No gráfico (6b), referente à ausência de fertilização potássica, observa-se uma mudança nos padrões de correlação. Em MWD 4 e MWD 8, ainda há associação positiva entre Si, APX, GPOX, SOD e massa seca, embora com menor intensidade do que no tratamento com K, sugerindo que o potássio potencializa o efeito benéfico do silício sobre a defesa antioxidante. Sob WWD (bem irrigado), as correlações entre SOD, massa seca e Si se mantêm positivas, refletindo um metabolismo equilibrado mesmo sem o aporte adicional de K.

No entanto, sob SWD 8 e SWD 12, verifica-se predomínio de correlações positivas entre MDA, fenóis e prolina, associadas negativamente à massa seca, indicando maior acúmulo de produtos de peroxidação lipídica e ativação de respostas osmoprotetoras frente à limitação hídrica. A ausência de K diminuiu a eficiência da mitigação do estresse promovida pelo silício, como demonstrado pela menor associação entre Si, enzimas antioxidantes e biomassa observados no SWD 0 e SWD 12 (Figura 6b).

De forma geral, os resultados evidenciam que o potássio exerce papel sinérgico com o silício na indução da tolerância ao déficit hídrico em milho, favorecendo tanto o metabolismo antioxidante quanto a manutenção da integridade celular. O déficit hídrico moderado (MWD), combinado à adubação com Si e K, proporcionou o melhor equilíbrio entre crescimento e defesa antioxidativa, enquanto o déficit severo (SWD) intensificou o estresse oxidativo, especialmente na ausência de K.

Figura 6. Mapa de calor de agrupamento hierárquico entre as variáveis MDA, prolina, SOD, APX, GPOX, fenóis, acúmulo de potássio e Si, e massa seca de plantas de milho cultivada sem déficit hídrico – WWD (80% da capacidade de retenção de água – WRC), com déficit hídrico moderado – MWD (60% de



WRC) e com déficit hídrico severo – SWD (40% de WRC); combinado com doses de Si fornecidas via fertirrigação: 0, 4, 8 e 12 kg ha⁻¹, com (a) e sem adubação potássica (b).

A Análise de Componentes Principais (PCA) na condição com fertilização potássica (Figura 7a), foi responsável explicar mais de 70% da variância total, evidenciando que poucas variáveis explicam grande parte da resposta fisiológica. Os tratamentos com estresse severo (SWD) foram associados a maiores níveis de MDA, prolina, fenóis e GPOX, o que evidenciou que as plantas de milho estavam sob estresse oxidativo e osmótico. Em contrapartida, os tratamentos com irrigação adequada (WWD) apresentaram associação positiva com massa seca, potássio e silício, sugerindo manutenção da homeostase fisiológica e crescimento. Essas análises multivariadas confirmam a eficácia dos parâmetros bioquímicos selecionados como discriminantes da intensidade do estresse e da eficiência adaptativa das plantas.

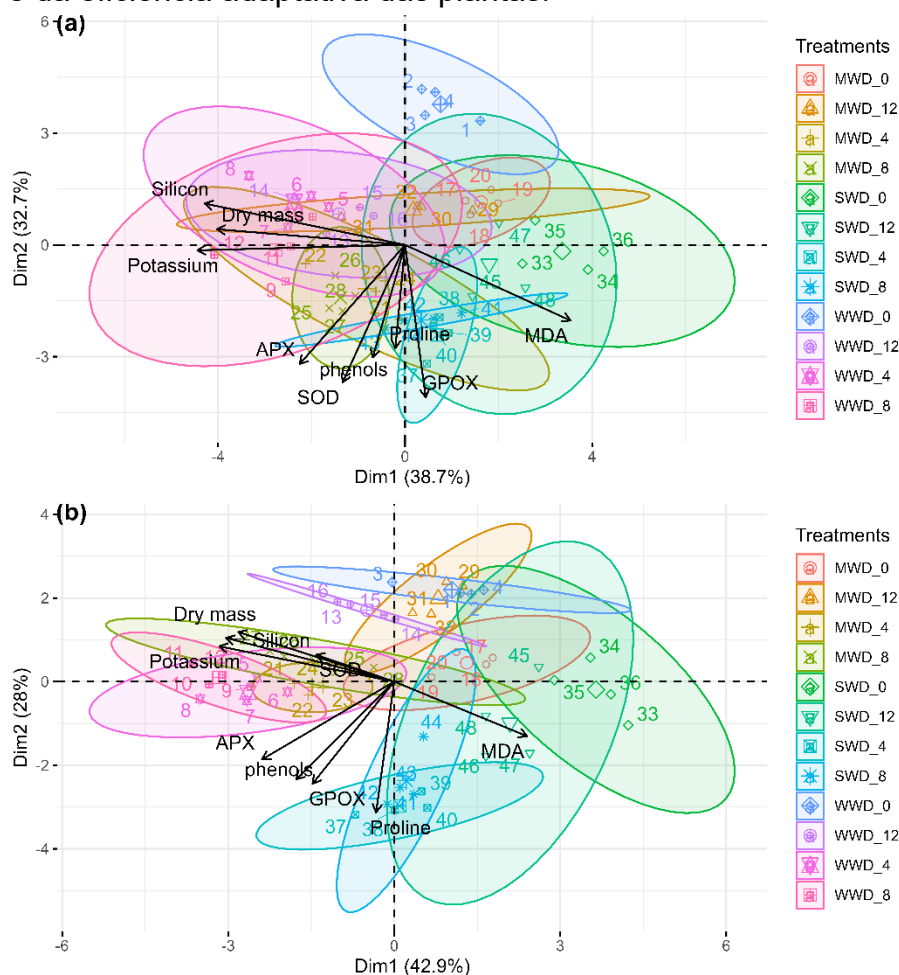


Figura 7. Análise de componentes principais das variáveis MDA, prolina, SOD, APX, GPOX, fenóis, acúmulo de potássio e Si, e massa seca de plantas de milho cultivada sem déficit hídrico – WWD (80% da capacidade de retenção de água – WRC), com déficit hídrico moderado – MWD (60% de WRC) e com déficit hídrico severo – SWD (40% de WRC); combinado com doses de Si fornecidas via fertirrigação: 0, 4, 8 e 12 kg ha⁻¹, com (a) e sem adubação potássica (b).

Para a condição sem fertilização potássica (Figura 7b), os dois primeiros componentes principais explicam 70,9% da variância total, sendo 42,9% atribuídos à Dimensão 1 e 28% à Dimensão 2. Assim como no gráfico anterior, as variáveis MDA, prolina, fenóis e GPOX foram altamente associadas aos tratamentos sob déficit severo (SWD 8 e SWD 12), denotando resposta ao estresse. Enquanto massa seca, acúmulo de silício e potássio se correlacionaram com os tratamentos bem irrigados (WWD e MWD).

4. Discussão

4.1 Efeito do estresse hídrico em plantas de milho cultivadas em campo

A restrição hídrica tem impactos negativos sobre as plantas de milho, diminuindo atividade enzimática, prejudicando parâmetros fotossintéticos e absorção de nutrientes (Anjum et al., 2017; Hussain et al., 2019; Shemi et al., 2021).

Os estudos sobre os efeitos da seca na cultura do milho são limitados a condições controladas, ainda são poucos os estudos em condição de campo, especialmente considerando as respostas antioxidantes. Alguns relatos avaliam a interação da restrição hídrica com diferentes híbridos (Anjum et al., 2017d), diferentes estresses como calor (Hussain et al., 2019c) e frio (Hussain et al., 2020) e estágios iniciais de crescimento (Weisany et al., 2023), sendo essas pesquisas conduzidas em condições controladas. Há portanto, necessidade de novas pesquisas que elucidem os mecanismos de defesa antioxidante de plantas de milho em cultivo de campo, especialmente em solos sob condições tropicais.

O presente estudo desenvolvido com plantas de milho cultivadas em campo, evidenciou os principais impactos negativos do déficit hídrico no sistema de defesa antioxidante enzimático e não enzimático e nos aspectos nutricionais, como menor acúmulo de K e Si (Figura 5 a,d) o que acarretou diminuição da matéria seca das plantas (Figura 5 e,f). As plantas de milho que foram cultivadas sob estresse hídrico, tanto moderado (MWD) quanto severo (SWD) apresentaram aumento do conteúdo de malondialdeído (MDA), o que indica a ocorrência de estresse oxidativo que se deve à peroxidação nas plantas, que foi

observada independente da condição de adubação potássica (Figura 2a, b). O MDA é um importante sinalizador do dano celular, sendo um hidrocarboneto, produto da peroxidação lipídica, utilizado como um parâmetro para estimar a tolerância da planta ao estresse por seca (Ahluwalia et al., 2021). Assim, a adubação potássica não foi determinante para a peroxidação lipídica, possivelmente porque o nível de K no solo já era adequado ao milho.

O aumento do conteúdo de MDA foi relatado em diferentes estudos em plantas de milho sob estresse por restrição hídrica. Em estudos onde o déficit hídrico foi induzido limitando a umidade do solo a 50% da capacidade de campo por 15 e 28 dias foi observado aumento da peroxidação lipídica (Hussain et al., 2019; Shemi et al., 2021). Além disso, estudos com diferentes híbridos de milho em diferentes estágios de desenvolvimento o conteúdo de MDA também se apresentou elevado em comparação a condição sem estresse (Yousaf et al., 2023). Efeito semelhante foi observado em outras culturas como o girassol (Gunes et al., 2008) cana-de-açúcar e cana-energia (Teixeira et al., 2022b).

Os resultados observados indicaram que o déficit hídrico severo (SWD) causou danos oxidativos nas plantas de milho decorrente da menor atividade de enzimas antioxidantes como a SOD, EC 1.15.1.1 (Fig. 3a, b) e APX, EC1.11.1.7 (Figura 3e, f) em ambas as condições de K. Essas enzimas atuam de forma correlacionada para superar o dano oxidativo, seja a SOD dismutando o O_2^- ao H_2O_2 nos cloroplastos, mitocôndrias, citoplasma e peroxissoma (Malik et al., 2021a), ou a APX degradando o peróxido de hidrogênio em água e oxigênio (Gratão et al., 2005; Hua et al., 2020). Suas baixas atividades podem desencadear alto dano oxidativo e, conseqüentemente uma baixa produção de biomassa dessas plantas.

4.2 Influência do Si na atividade antioxidante enzimática e não enzimática na diminuição do estresse oxidativo em plantas de milho

O Si é um elemento multifacetário que se mostrou eficiente contra estresses ambientais, em especial estresse por restrição hídrica em diferentes espécies vegetais (Singh et al., 2023b). Um dos principais mecanismos pelos quais o Si opera é promovendo a síntese de compostos antioxidantes, que ajudam a neutralizar as ERO geradas sob estresse. Esses antioxidantes,

incluindo a SOD, APX e GPOX eliminam efetivamente as ERO, diminuindo os danos celulares e mantendo a integridade da membrana (Li et al., 2024; Rakesh et al., 2024). Esse efeito positivo está bem documentado em plantas monocotiledôneas (Malik et al., 2021b; Teixeira et al., 2022a, 2022b), no entanto ainda faltam estudos que investiguem os efeitos do Si fornecido via fertirrigação em plantas de milho cultivado em campo.

Este estudo revelou que o fornecimento de Si as plantas de milho cultivadas sob déficit hídrico moderado e severo e independente da condição de K melhorou a atividade das enzimas SOD, EC 1.15.1.1, APX, EC 1.11.1.11 (Fig. 3a, f). Tal efeito foi observado pela diminuição do dano oxidativo das membranas que foi correlacionado com a significativa diminuição do conteúdo de MDA (Fig. 2a, b), o que pode ser atribuído à diminuição do acúmulo H_2O_2 e O_2^- nas células (Irfan et al., 2023). Além disso, os mecanismos envolvidos na ativação de sistemas antioxidantes sob déficit hídrico mediado pelo Si podem estar envolvidos com a modulação na expressão de genes relacionados à defesa antioxidante, agindo como uma molécula de sinalização e melhorando o estado hídrico das plantas em situações de estresse por seca (Singh et al., 2023a; Chen et al., 2024).

Além do complexo enzimático, o sistema de defesa das plantas também conta com um complexo não enzimático, que combate de maneira eficiente o dano oxidativo. A prolina e os compostos fenólicos são exemplos. A prolina, em particular, é um dos principais osmoprotetores citoplasmáticos em situações de déficit hídrico, auxiliando na estabilização das membranas e na ativação dos sistemas antioxidantes (El-Saadony et al., 2021). Os resultados indicaram um aumento de prolina com o fornecimento de Si em ambas as condições de K. Os resultados de estudos recentes indicaram um papel significativo da prolina em plantas sob estresse hídrico porque as plantas produzem muitos aminoácidos livres, que atuam como precursores da produção de prolina e sua degradação é reduzida sob estresse hídrico (Wasaya et al., 2022).

Os compostos fenólicos, por sua vez, representam uma gama diversificada de metabólitos secundários que têm propriedades antioxidantes e auxiliam na quelação de íons metálicos, bloqueando reações oxidativas por meio da eliminação de radicais livres e servem como substrato para a enzima

peroxidase (Mukarram et al., 2022). No presente estudo, os compostos fenólicos nas folhas de milho foram substancialmente aumentados em função do fornecimento de Si, sob as duas condições de déficit hídrico e independente da condição de K. Estudos recentes corroboram com esses achados que evidenciaram que o conteúdo de prolina e compostos fenólicos foram aumentados com fornecimento de Si em diferentes plantas cultivadas sob estresse de seca (Shemi et al., 2021; Sulaiman et al., 2024b).

Este experimento revelou que fornecimento de Si via fertirrigação melhorou a tolerância ao déficit hídrico tanto moderado quanto severo na cultura do milho, independente da fertilização complementar de K. Esse efeito foi atribuído ao fortalecimento do sistema de defesa da planta ao aumentar as atividades de enzimas antioxidantes (SOD, APX) e por incrementar acúmulo de osmólitos protetores, como a prolina, e estimular a síntese de compostos fenólicos. Esse mecanismo induzido pelo Si foi efetivo por ter diminuído o estresse oxidativo comprovado pela diminuição da peroxidação lipídica, além de proporcionar equilíbrio de nutrientes como K, aumentando o incremento de matéria seca em plantas estressadas pelo déficit hídrico.

A pesquisa revelou que é possível aumentar a tolerância da cultura do milho ao déficit hídrico devido a melhoria do sistema de defesa antioxidante causado pelo uso do Si tendo uma implicação prática relevante para a sustentabilidade desta espécie. O uso da irrigação para manter 60% de WRC se adicionado o Si permite ótimo crescimento da planta de milho devido à manutenção do sistema de defesa antioxidante. Dessa forma, é possível reduzir a quantidade de água (doce) na irrigação provendo ganhos ambientais relevantes. A água doce é um recurso vital para a saúde do ecossistema e a sobrevivência humana, e é o recurso natural mais extraído em nível global (Ingrao et al., 2023) e uso do Si pode contribuir para preservação deste recurso natural finito com implicações globais, sendo oportunas mais pesquisas sobre esse benefício do Si em diferentes espécies irrigadas.

5 Conclusões

O presente estudo evidenciou que a aplicação de Si pode aumentar a tolerância a restrição hídrica moderada e até severa, por modular o sistema

antioxidantes de plantas milho cultivadas em campo, não havendo necessidade da adubação complementar com K.

Além disso, a fertilização silicatada configura-se como uma prática sustentável e ambientalmente segura para o manejo de cultivos de milho em regiões com restrição hídrica, sem causar danos ao ambiente.

6 Referências

- Abbas, K.; Li, J.; Gong, B.; Lu, Y.; Wu, X.; Lü, G.; Gao, H. (2023). Drought Stress Tolerance in Vegetables: The Functional Role of Structural Features, Key Gene Pathways, and Exogenous Hormones. **International Journal of Molecular Sciences**, 24:13876. <https://doi.org/10.3390/IJMS241813876>
- Afshari, M.; Pazoki, A.; Sadeghipour, O. (2021). Foliar-applied Silicon and its Nanoparticles Stimulate Physio-chemical Changes to Improve Growth, Yield and Active Constituents of *Coriandrum sativum* L. Essential Oil Under Different Irrigation Regimes. **Silicon**, 13:4177-4188. <https://doi.org/10.1007/S12633-021-01101-8>
- Ahammed, G.J.; Li, X.; Wan, H.; Zhou, G.; Cheng, Y. (2020). SIWRKY81 reduces drought tolerance by attenuating proline biosynthesis in tomato. **Scientia Horticulturae**, 270:109444. <https://doi.org/10.1016/J.SCIENTA.2020.109444>
- Ahluwalia, O.; Singh, P.C.; Bhatia, R. (2021). A review on drought stress in plants: Implications, mitigation and the role of plant growth promoting rhizobacteria. **Resources, Environment and Sustainability**, 5:100032. <https://doi.org/10.1016/J.RESENV.2021.100032>
- Aksu, G.; Altay, H. (2020). The Effects of Potassium Applications on Drought Stress in Sugar Beet. **Sugar Tech**, 22:1092-1102. <https://doi.org/10.1007/S12355-020-00851-W>
- Alberto Moldes, C.; Fontão de Lima Filho, O.; Manuel Camiña, J.; Gabriela Kiriachek, S.; Lia Molas, M.; Mui Tsai, S. (2013). Assessment of the effect of silicon on antioxidant enzymes in cotton plants by multivariate analysis. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, 61:11243-11249. <https://doi.org/10.1021/JF4039088>
- Alghanem, S.M.S.; Alnusaie, T.S.; Al-Balawi, S.M.; Alayafi, A.A.M.; Alharbi, B.M.; Abdulmajeed, A.M.; Alrashidi, A.A.; Anazi, H.K.; Alharbi, K.; Soliman, M.H. (2025). Potassium Silica Nanoparticles Enhanced Growth, Yield, and Stress Tolerance in Canola (*Brassica napus* L.) Under Drought Conditions. **Journal of Soil Science and Plant Nutrition**, 1-18. <https://doi.org/10.1007/S42729-025-02356-5>
- Al-Mokadem, A.Z.; Sheta, M.H.; Mancy, A.G.; Hussein, H.A.A.; Kenawy, S.K.M.; Sofy, A.R.; Abu-Shahba, M.S.; Mahdy, H.M.; Sofy, M.R.; Al Bakry, A.F.; Agha, M.S. (2023). Synergistic Effects of Kaolin and Silicon Nanoparticles for Ameliorating Deficit Irrigation Stress in Maize Plants by Upregulating Antioxidant Defense Systems. **Plants**, 12:2221. <https://doi.org/10.3390/PLANTS12112221>

Andrioli, I.; Centurion, J.F. (1999). Levantamento detalhado dos solos da Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias de Jaboticabal. Brasília.

Anjum, S.A.; Ashraf, U.; Tanveer, M.; Khan, I.; Hussain, S.; Shahzad, B.; Zohaib, A.; Abbas, F.; Saleem, M.F.; Ali, I.; Wang, L.C. (2017). Drought induced changes in growth, osmolyte accumulation and antioxidant metabolism of three maize hybrids. **Frontiers in Plant Science**, 8:69. <https://doi.org/10.3389/FPLS.2017.00069>

Aqaei, P.; Weisany, W.; Diyanat, M.; Razmi, J.; Struik, P.C. (2020). Response of maize (*Zea mays* L.) to potassium nano-silica application under drought stress. **Journal of Plant Nutrition**, 43:1205-1216. <https://doi.org/10.1080/01904167.2020.1727508>

Avila, R.G.; Magalhães, P.C.; da Silva, E.M.; de Souza, K.R.D.; Campos, C.N.; de Alvarenga, A.A.; de Souza, T.C. (2021). Application of silicon to irrigated and water deficit sorghum plants increases yield via the regulation of primary, antioxidant, and osmoregulatory metabolism. **Agricultural Water Management**, 255:107004. <https://doi.org/10.1016/J.AGWAT.2021.107004>

Awad, A.E.; Abuarab, M.E.; Abdelraouf, R.E.; Bakeer, G.A.; El-Shawadfy, M.A.; Ragab, R. (2024). Improving yield and irrigation water productivity of green beans under water stress with agricultural solid waste-based material of compacted rice straw as a sustainable organic soil mulch. **Irrigation Science**, 1-26. <https://doi.org/10.1007/S00271-024-00973-Z>

Babiker, A.G.T.; Duncan, H.J. (1974). Penetration of bracken fronds by asulam as influenced by the addition of surfactant to the spray solution and by pH. **Weed Research**, 14:375-377. <https://doi.org/10.1111/j.1365-3180.1974.tb01078.x>

Balint, Z.; Mutua, F.; Muchiri, P.; Omuto, C.T. (2013). Monitoring Drought with the Combined Drought Index in Kenya. **Developments in Earth Surface Processes**, 16:341-356. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-59559-1.00023-2>

Barão, L. (2023). The Use of Si-Based Fertilization to Improve Agricultural Performance. **Journal of Soil Science and Plant Nutrition**, 23:1096-1108. <https://doi.org/10.1007/S42729-022-01106-1>

Bashir, S.S.; Hussain, A.; Hussain, S.J.; Wani, O.A.; Zahid Nabi, S.; Dar, N.A.; Baloch, F.S.; Mansoor, S. (2021). Plant drought stress tolerance: understanding its physiological, biochemical and molecular mechanisms. **Biotechnology & Biotechnological Equipment**, 35:1912-1925. <https://doi.org/10.1080/13102818.2021.2020161>

Basu, S.; Kumar, G. (2021). Exploring the significant contribution of silicon in regulation of cellular redox homeostasis for conferring stress tolerance in plants. **Plant Physiology and Biochemistry**, 166:393-404. <https://doi.org/10.1016/J.PLAPHY.2021.06.005>

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

Bates, L.S.; Waldren, R.P.; Teare, I.D. (1973). Rapid determination of free proline for water-stress studies. **Plant and Soil**, 39:205-207. <https://doi.org/10.1007/BF00018060>

Benslima, W.; Zorrig, W.; Bagues, M.; Abdelly, C.; Hafsi, C. (2022). Silicon mitigates potassium deficiency in *Hordeum vulgare* by improving growth and photosynthetic activity but not through polyphenol accumulation and the related antioxidant potential. **Plant and Soil**, 477:153-170. <https://doi.org/10.1007/S11104-021-05188-1>

Besharat, S.; Barão, L.; Cruz, C. (2020). New strategies to overcome water limitation in cultivated maize: Results from sub-surface irrigation and silicon fertilization. **Journal of Environmental Management**, 263:110398. <https://doi.org/10.1016/J.JENVMAN.2020.110398>

Biju, S.; Fuentes, S.; Gupta, D. (2017). Silicon improves seed germination and alleviates drought stress in lentil crops by regulating osmolytes, hydrolytic enzymes and antioxidant defense system. **Plant Physiology and Biochemistry**, 119:250-264. <https://doi.org/10.1016/J.PLAPHY.2017.09.001>

Blum, A. (2017). Osmotic adjustment is a prime drought stress adaptive engine in support of plant production. **Plant, Cell & Environment**, 40:4-10. <https://doi.org/10.1111/PCE.12800>

Bradford, M.M. (1976). A rapid and sensitive method for the quantitation of microgram quantities of protein utilizing the principle of protein-dye binding. **Analytical Biochemistry**, 72:248-254.

Çakir, R. (2004). Effect of water stress at different development stages on vegetative and reproductive growth of corn. **Field Crops Research**, 89:1-16. <https://doi.org/10.1016/J.FCR.2004.01.005>

Cakmak, I. (2005). The role of potassium in alleviating detrimental effects of abiotic stresses in plants. **Journal of Plant Nutrition and Soil Science**, 168:521-530. <https://doi.org/10.1002/JPLN.200420485>

Camargo, O.A. de; Moniz, A.C.; Jorge, J.A.; Valadares, J.M.A.S. (1986). Métodos de análise química, mineralógica e física de solos do Instituto Agrônômico de Campinas. Campinas: Instituto Agrônômico de Campinas – IAC.

Carbas, B.; Machado, N.; Oppolzer, D.; Ferreira, L.; Queiroz, M.; Brites, C.; Rosa, E.A.S.; Barros, A.I.R.N.A. (2020). Nutrients, Antinutrients, Phenolic Composition, and Antioxidant Activity of Common Bean Cultivars and their Potential for Food Applications. **Antioxidants**, 9:186. <https://doi.org/10.3390/ANTIOX9020186>

Carneiro-Carvalho, A.; Pinto, T.; Gomes-Laranjo, J.; Anjos, R. (2023). The potential of SiK® fertilization in the resilience of chestnut plants to drought – a biochemical study. **Frontiers in Plant Science**, 14:1120226. <https://doi.org/10.3389/FPLS.2023.1120226>

Cavalcante, I.E.; Soares de Melo, A.; Luciano de Souza Ferraz, R.; Silva de Alencar, R.; Dias, G.F.; Marques de Oliveira Viana, P.; Moura Rocha, M.; Ndhlala, A.R.; Vanies, F.; Sá, S.; Feitosa de Lacerda, C.; Roberto, P.; Vié, A.; Blume, Y.B.; Ukraine, N.; Nery, F.C. (2024). Salicylic acid improves cowpea productivity under water restriction in the field by modulating metabolism. **Frontiers in Plant Science**, 15:1415682. <https://doi.org/10.3389/FPLS.2024.1415682>

Chen, D.; Cao, B.; Qi, L.; Yin, L.; Wang, S.; Deng, X. (2016). Silicon-moderated K-deficiency-induced leaf chlorosis by decreasing putrescine accumulation in sorghum. **Annals of Botany**, 118:305-315. <https://doi.org/10.1093/AOB/MCW111>

Chen, D.; Cao, B.; Wang, S.; Liu, P.; Deng, X.; Yin, L.; Zhang, S. (2016). Silicon moderated the K deficiency by improving the plant-water status in sorghum. **Scientific Reports**, 6:22882. <https://doi.org/10.1038/srep22882>

Chen, J.; Li, Y.; Zeng, Z.; Zhao, X.; Zhang, Y.; Li, X.; Chen, J.; Shen, W. (2024). Silicon induces ROS scavengers, hormone signalling, antifungal metabolites, and silicon deposition against brown stripe disease in sugarcane. **Physiologia Plantarum**, 176:e14313. <https://doi.org/10.1111/PPL.14313>

Chen, L.; Liu, X.; Huang, X.; Luo, W.; Long, Y.; Greiner, S.; Rausch, T.; Zhao, H. (2019). Functional Characterization of a Drought-Responsive Invertase Inhibitor from Maize (*Zea mays* L.). **International Journal of Molecular Sciences**, 20:4081. <https://doi.org/10.3390/IJMS20174081>

Chiappero, J.; Cappellari, L. del R.; Sosa Alderete, L.G.; Palermo, T.B.; Banchio, E. (2019). Plant growth promoting rhizobacteria improve the antioxidant status in *Mentha piperita* grown under drought stress leading to an enhancement of plant growth and total phenolic content. **Industrial Crops and Products**, 139:111553. <https://doi.org/10.1016/J.INDCROP.2019.111553>

Chieb, M.; Gachomo, E.W. (2023). The role of plant growth promoting rhizobacteria in plant drought stress responses. **BMC Plant Biology**, 23:1-23. <https://doi.org/10.1186/S12870-023-04403-8>

Cuong, T.X.; Ullah, H.; Datta, A.; Hanh, T.C. (2017). Effects of Silicon-Based Fertilizer on Growth, Yield and Nutrient Uptake of Rice in Tropical Zone of Vietnam. **Rice Science**, 24:283-290. <https://doi.org/10.1016/J.RSC.2017.05.001>

Darko, R.O.; Yuan, S.; Hong, L.; Liu, J.; Yan, H. (2016). Irrigation, a productive tool for food security – a review. **Acta Agriculturae Scandinavica, Section B — Soil & Plant Science**, 66:191-206. <https://doi.org/10.1080/09064710.2015.1093654>

Du, Y.; Zhao, Q.; Chen, L.; Yao, X.; Zhang, H.; Wu, J.; Xie, F. (2020). Effect of drought stress during soybean R2–R6 growth stages on sucrose metabolism in leaf and seed. **International Journal of Molecular Sciences**, 21:618. <https://doi.org/10.3390/IJMS21020618>

Duarte, A.P.; Cantarella, H.; Quaggio, J.A. (2022). Milho (*Zea mays*). In: Cantarella, H.; Quaggio, J.A.; Mattos Jr., D.; Boaretto, R.M.; Van Raij, B. (eds.). *Recomendações de adubação e calagem para o Estado de São Paulo*. Campinas: Instituto Agrônômico, p. 199-208.

Egilla, J.N.; Davies, F.T.; Boutton, T.W. (2005). Drought stress influences leaf water content, photosynthesis, and water-use efficiency of *Hibiscus rosa-sinensis* at three potassium concentrations. **Photosynthetica**, 43:135-140. <https://doi.org/10.1007/S11099-005-5140-2>

El-Saadony, M.T.; Desoky, E.S.M.; Saad, A.M.; Eid, R.S.M.; Selem, E.; Elrys, A.S. (2021). Biological silicon nanoparticles improve *Phaseolus vulgaris* L. yield and minimize its contaminant contents on a heavy metals-contaminated saline soil. **Journal of Environmental Sciences**, 106:1-14. <https://doi.org/10.1016/J.JES.2021.01.012>

Elshamly, A.M.S. (2023). Interaction effects of sowing date, irrigation levels, chitosan, and potassium silicate on yield and water use efficiency for maize grown under arid climate. **Gesunde Pflanzen**, 75:1601-1613. <https://doi.org/10.1007/S10343-023-00836-1>

Elshamly, A.M.S.; Abaza, A.S. (2024). Precise partial root-zone irrigation technique and potassium-zinc fertigation management improve maize physio-biochemical responses, yield, and water use in arid climate. **BMC Plant Biology**, 24:1-27. <https://doi.org/10.1186/S12870-024-05467-W>

Epstein, E. (1994). The anomaly of silicon in plant biology. **Proceedings of the National Academy of Sciences**, 91:11-17. <https://doi.org/10.1073/PNAS.91.1.11>

Fang, K.; He, J.; Liu, Q.; Wang, S.; Geng, Y.; Heijungs, R.; Du, Y.; Yue, W.; Xu, A.; Fang, C. (2023). Water footprint of nations amplified by scarcity in the Belt and Road Initiative. **Heliyon**, 9:e12957. <https://doi.org/10.1016/J.HELİYON.2023.E12957>

Garg, N.; Manchanda, G. (2009). ROS generation in plants: Boon or bane? **Plant Biosystems**, 143:81-96. <https://doi.org/10.1080/11263500802633626>

Gascho, G.J. (2001). Chapter 12. Silicon sources for agriculture. *Studies in Plant Science*, 8:197-207. [https://doi.org/10.1016/S0928-3420\(01\)80016-1](https://doi.org/10.1016/S0928-3420(01)80016-1)

Ge, T.; Sui, F.; Bai, L.; Tong, C.; Sun, N. (2012). Effects of water stress on growth, biomass partitioning, and water-use efficiency in summer maize (*Zea mays* L.) throughout the growth cycle. **Acta Physiologiae Plantarum**, 34:1043-1053. <https://doi.org/10.1007/S11738-011-0901-Y>

Giannopolitis, C.N.; Ries, S.K. (1977). Superoxide dismutases. I. Occurrence in higher plants. **Plant Physiology**, 59:309-314. <https://doi.org/10.1104/pp.59.2.309>

Gill, S.S.; Tuteja, N. (2010). Reactive oxygen species and antioxidant machinery in abiotic stress tolerance in crop plants. **Plant Physiology and Biochemistry**, 48:909-930. <https://doi.org/10.1016/J.PLAPHY.2010.08.016>

Gomes-Junior, R.A.; Gratão, P.L.; Gaziola, S.A.; Mazzafera, P.; Lea, P.J.; Azevedo, R.A. (2007). Selenium-induced oxidative stress in coffee cell suspension cultures. **Functional Plant Biology**, 34:449-456. <https://doi.org/10.1071/FP07010>

Gong, Z.; Xiong, L.; Shi, H.; Yang, S.; Herrera-Estrella, L.R.; Xu, G.; Chao, D.Y.; Li, J.; Wang, P.Y.; Qin, F.; Li, J.; Ding, Y.; Shi, Y.; Wang, Y.; Yang, Y.; Guo, Y.; Zhu, J.K. (2020). Plant abiotic stress response and nutrient use efficiency. **Science China Life Sciences**, 63:635-674. <https://doi.org/10.1007/S11427-020-1683-X>

Gonzalez-Porras, C.V.; Teixeira, G.C.M.; Prado, R. de M.; Ferreira, P.M.; Palaretti, L.F.; Oliveira, K.S. (2024). Silicon via fertigation with and without potassium application improves physiological aspects of common beans cultivated under three water regimes in field. **Scientific Reports**, 14:1-19. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-52503-8>

Gratão, P.L.; Monteiro, C.C.; Carvalho, R.F.; Tezotto, T.; Piotto, F.A.; Peres, L.E.P.; Azevedo, R.A. (2012). Biochemical dissection of diageotropica and Never ripe tomato mutants to Cd-stressful conditions. **Plant Physiology and Biochemistry**, 56:79-96. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2012.04.009>

Gratão, P.L.; Polle, A.; Lea, P.J.; Azevedo, R.A. (2005). Making the life of heavy metal-stressed plants a little easier. **Functional Plant Biology**, 32:481-494. <https://doi.org/10.1071/FP05016>

Gunes, A.; Pilbeam, D.J.; Inal, A.; Bagci, E.G.; Coban, S. (2007). Influence of silicon on antioxidant mechanisms and lipid peroxidation in chickpea (*Cicer arietinum* L.) cultivars under drought stress. **Journal of Plant Interactions**, 2:105-113. <https://doi.org/10.1080/17429140701529399>

Gunes, A.; Pilbeam, D.J.; Inal, A.; Coban, S. (2008). Influence of silicon on sunflower cultivars under drought stress, I: Growth, antioxidant mechanisms, and lipid peroxidation. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, 39:1885-1903. <https://doi.org/10.1080/00103620802134651>

Hassine, A. Ben; Ghanem, M.E.; Bouzid, S.; Lutts, S. (2008). An inland and a coastal population of the Mediterranean xero-halophyte species *Atriplex halimus* L. differ in their ability to accumulate proline and glycinebetaine in response to salinity and water stress. **Journal of Experimental Botany**, 59:1315-1326. <https://doi.org/10.1093/JXB/ERN040>

Heath, R.L.; Packer, L. (1968). Photoperoxidation in isolated chloroplasts I. Kinetics and stoichiometry of fatty acid peroxidation. **Archives of Biochemistry and Biophysics**, 125:189-198. [https://doi.org/10.1016/0003-9861\(68\)90654-1](https://doi.org/10.1016/0003-9861(68)90654-1)

Hejazi, M.; Santos da Silva, S.R.; Miralles-Wilhelm, F.; Kim, S.; Kyle, P.; Liu, Y.; Vernon, C.; Delgado, A.; Edmonds, J.; Clarke, L. (2023). Impacts of water scarcity on agricultural production and electricity generation in the Middle East and North Africa. **Frontiers in Environmental Science**, 11:1082930. <https://doi.org/10.3389/FENVS.2023.1082930>

Heshmat, K.; Asgari Lajayer, B.; Shakiba, M.R.; Astatkie, T. (2021). Assessment of physiological traits of common bean cultivars in response to water stress and molybdenum levels. **Journal of Plant Nutrition**, 44:366-372. <https://doi.org/10.1080/01904167.2020.1822395>

Hodson, M.J.; White, P.J.; Mead, A.; Broadley, M.R. (2005). Phylogenetic Variation in the Silicon Composition of Plants. **Annals of Botany**, 96:1027-1046. <https://doi.org/10.1093/AOB/MCI255>

Hu, W.; Lu, Z.; Gu, H.; Ye, X.; Li, X.; Cong, R.; Ren, T.; Lu, J. (2022). Potassium availability influences the mesophyll structure to coordinate the conductance of CO₂ and H₂O during leaf expansion. **Plant, Cell & Environment**, 45:2987-3000. <https://doi.org/10.1111/PCE.14405>

Hu, Y.; Schmidhalter, U. (2005). Drought and salinity: A comparison of their effects on mineral nutrition of plants. **Journal of Plant Nutrition and Soil Science**, 168:541-549. <https://doi.org/10.1002/JPLN.200420516>

Hua, T.; Zhang, R.; Sun, H.; Liu, C. (2020). Alleviation of boron toxicity in plants: Mechanisms and approaches. **Critical Reviews in Environmental Science and Technology**, 51:2975-3015. <https://doi.org/10.1080/10643389.2020.1807451>

Hussain, H.A.; Men, S.; Hussain, S.; Chen, Y.; Ali, S.; Zhang, S.; Zhang, K.; Li, Y.; Xu, Q.; Liao, C.; Wang, L. (2019). Interactive effects of drought and heat stresses on morpho-physiological attributes, yield, nutrient uptake and oxidative status in maize hybrids. **Scientific Reports**, 9:40362. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-40362-7>

Hussain, H.A.; Men, S.; Hussain, S.; Zhang, Q.; Ashraf, U.; Anjum, S.A.; Ali, I.; Wang, L. (2020). Maize tolerance against drought and chilling stresses varied with root morphology and antioxidative defense system. **Plants**, 9:720. <https://doi.org/10.3390/PLANTS9060720>

Hussain, S.; Maqsood, M.; Ijaz, M.; Ul-Allah, S.; Sattar, A.; Sher, A.; Nawaz, A. (2020). Combined Application of Potassium and Zinc Improves Water Relations, Stay Green, Irrigation Water Use Efficiency, and Grain Quality of Maize under Drought Stress. **Journal of Plant Nutrition**, 43:2214-2225. <https://doi.org/10.1080/01904167.2020.1765181>

Ingrao, C.; Strippoli, R.; Lagioia, G.; Huisin, D. (2023). Water scarcity in agriculture: An overview of causes, impacts and approaches for reducing the risks. **Heliyon**, 9:e18507. <https://doi.org/10.1016/J.HELIYON.2023.E18507>

Irfan, M.; Maqsood, M.A.; Rehman, H. ur; Mahboob, W.; Sarwar, N.; Hafeez, O.B.A.; Hussain, S.; Ercisli, S.; Akhtar, M.; Aziz, T. (2023). Silicon Nutrition in Plants under Water-Deficit Conditions: Overview and Prospects. **Water**, 15:739. <https://doi.org/10.3390/W15040739>

IRRI – International Rice Research Institute. (1993). Rice research in a time change: IRRI's medium-term plan for 1994–1998. Los Baños, Philippines.

Johnson, R.; Vishwakarma, K.; Hossen, M.S.; Kumar, V.; Shackira, A.M.; Puthur, J.T.; Abdi, G.; Sarraf, M.; Hasanuzzaman, M. (2022). Potassium in plants: Growth regulation, signaling, and environmental stress tolerance. **Plant Physiology and Biochemistry**, 172:56-69. <https://doi.org/10.1016/J.PLAPHY.2022.01.001>

Johnson, S.N.; Chen, Z.H.; Rowe, R.C.; Tissue, D.T. (2022). Field application of silicon alleviates drought stress and improves water use efficiency in wheat. **Frontiers in Plant Science**, 13:1030620. <https://doi.org/10.3389/FPLS.2022.1030620>

Khandekar, S.; Leisner, S. (2011). Soluble silicon modulates expression of *Arabidopsis thaliana* genes involved in copper stress. **Journal of Plant Physiology**, 168:699-705. <https://doi.org/10.1016/J.JPLPH.2010.09.009>

Klute, A. (2018). Water Retention: Laboratory Methods. In: Methods of Soil Analysis, Part 1: Physical and Mineralogical Methods. Madison: SSSA, p. 635-662. <https://doi.org/10.2136/SSSABOOKSER5.1.2ED.C26>

Korndörfer, G.H.; Pereira, H.S.; Nolla, A. (2004). Análise de silício no solo, planta e fertilizantes. 2. ed. Uberlândia: UFU.

Kraska, J.E.; Breitenbeck, G.A. (2010). Simple, robust method for quantifying silicon in plant tissue. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, 41:2075-2085. <https://doi.org/10.1080/00103624.2010.498537>

Laxa, M.; Liebthal, M.; Telman, W.; Chibani, K.; Dietz, K.J. (2019). The Role of the Plant Antioxidant System in Drought Tolerance. **Antioxidants**, 8:94. <https://doi.org/10.3390/ANTIOX8040094>

Li, G.; Ma, Z.; Zhang, N.; Li, M.; Li, W.; Mo, Z. (2024). Foliar Application of Silica Nanoparticles Positively Influences the Early Growth Stage and Antioxidant Defense of Maize under Low Light Stress. **Journal of Soil Science and Plant Nutrition**, 24:2276-2294. <https://doi.org/10.1007/S42729-024-01789-8>

Liang, Y.; Nikolic, M.; Bélanger, R.; Gong, H.; Song, A. (2015). Silicon Sources for Agriculture. In: Silicon in Agriculture. Dordrecht: Springer, p. 225-232. https://doi.org/10.1007/978-94-017-9978-2_12

- Liang, Y.; Sun, W.; Zhu, Y.G.; Christie, P. (2007). Mechanisms of silicon-mediated alleviation of abiotic stresses in higher plants: A review. **Environmental Pollution**, 147:422-428. <https://doi.org/10.1016/J.ENVPOL.2006.06.008>
- Ma, C.C.; Gao, Y.B.; Xin, T.R.; Ma, C.C.; Li, Q.F. (2004). Effects of silicon application on drought resistance of cucumber plants. **Soil Science and Plant Nutrition**, 50:623-632. <https://doi.org/10.1080/00380768.2004.10408520>
- Ma, D.; Sun, D.; Wang, C.; Qin, H.; Ding, H.; Li, Y.; Guo, T. (2016). Silicon Application Alleviates Drought Stress in Wheat Through Transcriptional Regulation of Multiple Antioxid
- Ma, D.; Sun, D.; Wang, C.; Qin, H.; Ding, H.; Li, Y.; Guo, T. (2016). Silicon Application Alleviates Drought Stress in Wheat Through Transcriptional Regulation of Multiple Antioxidant Defense Pathways. **Journal of Plant Growth Regulation**, 35:1-10. <https://doi.org/10.1007/S00344-015-9500-2>
- Ma, J.F.; Tamai, K.; Ichii, M.; Wu, G.F. (2002). A Rice Mutant Defective in Si Uptake. **Plant Physiology**, 130:2111-2117. <https://doi.org/10.1104/PP.010348>
- Maghsoudi, K.; Emam, Y.; Ashraf, M.; Arvin, M.J. (2019). Alleviation of field water stress in wheat cultivars by using silicon and salicylic acid applied separately or in combination. **Crop and Pasture Science**, 70:36-43. <https://doi.org/10.1071/CP18213>
- Mahmoud, A.W.M.; Rashad, H.M.; Esmail, S.E.A.; Alsamadany, H.; Abdeldaym, E.A. (2023). Application of Silicon, Zinc, and Zeolite Nanoparticles—A Tool to Enhance Drought Stress Tolerance in Coriander Plants for Better Growth Performance and Productivity. **Plants**, 12:2838. <https://doi.org/10.3390/PLANTS12152838>
- Makhadmeh, I.; Albalasmeh, A.A.; Ali, M.; Thabet, S.G.; Darabseh, W.A.; Jaradat, S.; Alqudah, A.M. (2022). Molecular Characterization of Tomato (*Solanum lycopersicum* L.) Accessions under Drought Stress. **Horticulturae**, 8:600. <https://doi.org/10.3390/HORTICULTURAE8070600>
- Malik, M.A.; Wani, A.H.; Mir, S.H.; Rehman, I.U.; Tahir, I.; Ahmad, P.; Rashid, I. (2021). Elucidating the role of silicon in drought stress tolerance in plants. **Plant Physiology and Biochemistry**, 165:187-195. <https://doi.org/10.1016/J.PLAPHY.2021.04.021>
- Mandlik, R.; Thakral, V.; Raturi, G.; Shinde, S.; Nikolić, M.; Tripathi, D.K.; Sonah, H.; Deshmukh, R. (2020). Significance of silicon uptake, transport, and deposition in plants. **Journal of Experimental Botany**, 71:6703-6718. <https://doi.org/10.1093/jxb/eraa301>

Marques, D.M.; da Silva, A.B.; Mantovani, J.R.; Magalhães, P.C.; de Souza, T.C. (2019). Root morphology and leaf gas exchange in *Peltophorum dubium* (Spreng.) Taub. (Caesalpinioideae) exposed to copper-induced toxicity. **South African Journal of Botany**, 121:186-192. <https://doi.org/10.1016/J.SAJB.2018.11.007>

Meena, V.D.; Dotaniya, M.L.; Coumar, V.; Rajendiran, S.; Ajay, Kundu, S.; Subba Rao, A. (2014). A case for silicon fertilization to improve crop yields in tropical soils. **Proceedings of the National Academy of Sciences, India Section B: Biological Sciences**, 84:505-518. <https://doi.org/10.1007/S40011-013-0270-Y>

de Mello Prado, R. (2021). Mineral nutrition of tropical plants. Cham: Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-71262-4>

Melo, L.C.; Pereira, H.S.; Faria, L.C. de; Souza, et al (2017). BRS FC402: cultivar de feijão-comum carioca com alta produtividade, resistência à antracnose e murcha-de-fusário. Santo Antônio de Goiás: Embrapa.

Miao, B.H.; Han, X.G.; Zhang, W.H. (2010). The ameliorative effect of silicon on soybean seedlings grown in potassium-deficient medium. **Annals of Botany**, 105:967-973. <https://doi.org/10.1093/AOB/MCQ063>

Mitani, N.; Yamaji, N.; Ma, J.F. (2009). Identification of maize silicon influx transporters. **Plant and Cell Physiology**, 50:5-12. <https://doi.org/10.1093/pcp/pcn110>

Mittler, R. (2002). Oxidative stress, antioxidants and stress tolerance. **Trends in Plant Science**, 7:405-410. [https://doi.org/10.1016/S1360-1385\(02\)02312-9](https://doi.org/10.1016/S1360-1385(02)02312-9)

Mladenov, P.; Aziz, S.; Topalova, E.; Renaut, J.; Planchon, S.; Raina, A.; Tomlekova, N. (2023). Physiological Responses of Common Bean Genotypes to Drought Stress. **Agronomy**, 13:1022. <https://doi.org/10.3390/AGRONOMY13041022>

Moldes, C.A.; Medici, L.O.; Abrahão, O.S.; Tsai, S.M.; Azevedo, R.A. (2008). Biochemical responses of glyphosate resistant and susceptible soybean plants exposed to glyphosate. **Acta Physiologiae Plantarum**, 30:469-479. <https://doi.org/10.1007/s11738-008-0144-8>

Mombeni, M.; Abbasi, A. (2019). Biochemical Responses of Some Common Bean (*Phaseolus vulgaris* L.) Genotypes to Drought Stress. **Journal of Agricultural Science and Technology**, 21:407-421.

Monteiro, C.C.; Carvalho, R.F.; Gratão, P.L.; Carvalho, G.; Tezotto, T.; Medici, L.O.; Peres, L.E.P.; Azevedo, R.A. (2012). Biochemical dissection of diageotropica and Never ripe tomato mutants to Cd-stressful conditions. **Plant Physiology and Biochemistry**,

Gratão, P.L.; Polle, A.; Lea, P.J.; Azevedo, R.A. (2005). Making the life of heavy metal-stressed plants a little easier. **Functional Plant Biology**, 32:481-494. <https://doi.org/10.1071/FP05016>

Gunes, A.; Pilbeam, D.J.; Inal, A.; Bagci, E.G.; Coban, S. (2007). Influence of silicon on antioxidant mechanisms and lipid peroxidation in chickpea (*Cicer arietinum* L.) cultivars under drought stress. **Journal of Plant Interactions**, 2:105-113. <https://doi.org/10.1080/17429140701529399>

Gunes, A.; Pilbeam, D.J.; Inal, A.; Coban, S. (2008). Influence of silicon on sunflower cultivars under drought stress, I: Growth, antioxidant mechanisms, and lipid peroxidation. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, 39:1885-1903. <https://doi.org/10.1080/00103620802134651>

Hassine, A. Ben; Ghanem, M.E.; Bouzid, S.; Lutts, S. (2008). An inland and a coastal population of the Mediterranean xero-halophyte species *Atriplex halimus* L. differ in their ability to accumulate proline and glycinebetaine in response to salinity and water stress. **Journal of Experimental Botany**, 59:1315-1326. <https://doi.org/10.1093/JXB/ERN040>

Hejazi, M.; Santos da Silva, S.R.; Miralles-Wilhelm, F.; Kim, S.; Kyle, P.; Liu, Y.; Vernon, C.; Delgado, A.; Edmonds, J.; Clarke, L. (2023). Impacts of water scarcity on agricultural production and electricity generation in the Middle East and North Africa. **Frontiers in Environmental Science**, 11:1082930. <https://doi.org/10.3389/FENVS.2023.1082930>

Heshmat, K.; Asgari Lajayer, B.; Shakiba, M.R.; Astatkie, T. (2021). Assessment of physiological traits of common bean cultivars in response to water stress and molybdenum levels. **Journal of Plant Nutrition**, 44:366-372. <https://doi.org/10.1080/01904167.2020.1822395>

Moldes, C.A.; Medici, L.O.; Abrahão, O.S.; Tsai, S.M.; Azevedo, R.A. (2008). Biochemical responses of glyphosate resistant and susceptible soybean plants exposed to glyphosate. **Acta Physiologiae Plantarum**, 30:469-479. <https://doi.org/10.1007/s11738-008-0144-8>

Mombeni, M.; Abbasi, A. (2019). Biochemical Responses of Some Common Bean (*Phaseolus vulgaris* L.) Genotypes to Drought Stress. **Journal of Agricultural Science and Technology**, 21:407-421.

Monteiro, C.C.; Carvalho, R.F.; Gratão, P.L.; Carvalho, G.; Tezotto, T.; Medici, L.O.; Peres, L.E.P.; Azevedo, R.A. (2012). Biochemical dissection of diageotropica and Never ripe tomato mutants to Cd-stressful conditions. **Plant Physiology and Biochemistry**, 56:79-96. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2012.04.009>

Nunes, J.C.; Silva, R.A.; Oliveira, F.A.; Santos, L.M.; Almeida, C.C. (2020). Silicon fertilization improves drought tolerance in maize by modulating antioxidant metabolism. **Journal of Plant Physiology**, 252:153246. <https://doi.org/10.1016/j.jplph.2020.153246>

Oliveira, K.S.; Prado, R. de M.; Ferreira, P.M.; Palaretti, L.F.; Teixeira, G.C.M. (2024). Silicon via fertigation with and without potassium application improves physiological aspects of common beans cultivated under three water regimes in field. **Scientific Reports**, 14:52503. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-52503-8>

Prado, R. de M.; Caione, G.; Campos, C.N.; Avila, R.G.; Magalhães, P.C. (2021). Silicon fertilization enhances drought tolerance in tropical crops. **Journal of Soil Science and Plant Nutrition**, 21:1234-1245. <https://doi.org/10.1007/s42729-021-00456-7>

Qin, F.; Li, J.; Shi, H.; Wang, Y.; Yang, S.; Xu, G.; Zhu, J.K. (2020). Plant abiotic stress response and nutrient use efficiency. **Science China Life Sciences**, 63:635-674. <https://doi.org/10.1007/S11427-020-1683-X>

Ragab, R.; Bakeer, G.A.; El-Shawadfy, M.A.; Abuarab, M.E.; Awad, A.E. (2024). Improving irrigation water productivity of green beans under water stress with rice straw mulch. **Irrigation Science**, 42:1-26. <https://doi.org/10.1007/S00271-024-00973-Z>

Ramesh, K.; Chandrasekaran, B.; Balasubramanian, T.N.; Bangarusamy, U.; Sivasamy, R.; Sankaran, N. (2004). Soil-plant-water relations and nutrient management in maize under drought. **Field Crops Research**, 89:1-12. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2004.01.005>

Raturi, G.; Mandlik, R.; Thakral, V.; Tripathi, D.K.; Deshmukh, R. (2020). Silicon uptake and deposition in plants: physiological and molecular perspectives. **Journal of Experimental Botany**, 71:6703-6718. <https://doi.org/10.1093/jxb/eraa301>

Sattar, A.; Sher, A.; Nawaz, A.; Hussain, S.; Maqsood, M.; Ijaz, M.; Ul-Allah, S. (2020). Combined application of potassium and zinc improves water relations, stay green, irrigation water use efficiency, and grain quality of maize under drought stress. **Journal of Plant Nutrition**, 43:2214-2225. <https://doi.org/10.1080/01904167.2020.1765181>

Shakiba, M.R.; Heshmat, K.; Asgari Lajayer, B.; Astatkie, T. (2021). Physiological traits of common bean cultivars in response to water stress and molybdenum levels. **Journal of Plant Nutrition**, 44:366-372. <https://doi.org/10.1080/01904167.2020.1822395>

Silva, E.M.; Magalhães, P.C.; Avila, R.G.; Campos, C.N.; de Souza, T.C. (2021). Silicon application improves yield of sorghum under water deficit by regulating antioxidant metabolism. **Agricultural Water Management**, 255:107004. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2021.107004>

Sun, W.; Liang, Y.; Zhu, Y.G.; Christie, P. (2007). Mechanisms of silicon-mediated alleviation of abiotic stresses in higher plants: A review. **Environmental Pollution**, 147:422-428. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2006.06.008>

Tamai, K.; Ma, J.F.; Ichii, M.; Wu, G.F. (2002). A rice mutant defective in Si uptake. **Plant Physiology**, 130:2111-2117. <https://doi.org/10.1104/pp.010348>

Teixeira, G.C.M.; Prado, R. de M.; Ferreira, P.M.; Palaretti, L.F.; Oliveira, K.S. (2024). Silicon via fertigation with and without potassium application improves physiological aspects of common beans cultivated under three water regimes in field. **Scientific Reports**, 14:52503. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-52503-8>

Tripathi, D.K.; Singh, V.P.; Kumar, D.; Chauhan, D.K. (2020). Silicon uptake and deposition in plants: physiological and molecular perspectives. **Journal of Experimental Botany**, 71:6703-6718. <https://doi.org/10.1093/jxb/eraa301>

Ul-Allah, S.; Ijaz, M.; Maqsood, M.; Hussain, S.; Nawaz, A.; Sattar, A.; Sher, A. (2020). Potassium and zinc improve maize water use efficiency and grain quality under drought stress. **Journal of Plant Nutrition**, 43:2214-2225. <https://doi.org/10.1080/01904167.2020.1765181>

Vernon, C.; Delgado, A.; Edmonds, J.; Clarke, L.; Hejazi, M.; Santos da Silva, S.R.; Miralles-Wilhelm, F. (2023). Impacts of water scarcity on agriculture and energy in MENA. **Frontiers in Environmental Science**, 11:1082930. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2023.1082930>

Wang, L.C.; Anjum, S.A.; Ashraf, U.; Hussain, H.A.; Ali, I.; Zohaib, A.; Saleem, M.F. (2017). Drought induced changes in growth, osmolyte accumulation and antioxidant metabolism of maize hybrids. **Frontiers in Plant Science**, 8:69. <https://doi.org/10.3389/fpls.2017.00069>

Xu, G.; Gong, Z.; Xiong, L.; Shi, H.; Yang, S.; Herrera-Estrella, L.R.; Li, J.; Wang, P.Y.; Qin, F.; Ding, Y.; Shi, Y.; Wang, Y.; Yang, Y.; Guo, Y.; Zhu, J.K. (2020). Plant abiotic stress response and nutrient use efficiency. **Science China Life Sciences**, 63:635-674. <https://doi.org/10.1007/s11427-020-1683-x>

Yamaji, N.; Mitani, N.; Ma, J.F. (2009). Identification of maize silicon influx transporters. **Plant and Cell Physiology**, 50:5-12. <https://doi.org/10.1093/pcp/pcn110>

Zorrig, W.; Benslimam, W.; Bagues, M.; Abdely, C.; Hafsi, C. (2022). Silicon mitigates potassium deficiency in *Hordeum vulgare* by improving growth and photosynthetic activity. **Plant and Soil**, 477:153-170. <https://doi.org/10.1007/s11104-021-05188-1>

CAPÍTULO 4 - Considerações finais

A presente pesquisa evidenciou que a restrição hídrica constitui um desafio crítico para a produção agrícola sustentável, afetando negativamente plantas de milho quanto e de feijão, ao diminuir a atividade de enzimas antioxidantes (SOD, APX e GPOX), aumentar a peroxidação lipídica (MDA), limitar a absorção de nutrientes e diminuir a biomassa das plantas. Os efeitos observados destacam a vulnerabilidade dessas culturas a condições de déficit hídrico, especialmente em solos tropicais e sob cenários de mudanças climáticas.

Os resultados obtidos demonstraram que a aplicação de silício via fertirrigação, mesmo em doses relativamente baixas é uma estratégia eficaz para amenizar os efeitos do déficit hídrico em ambas as espécies.

O uso do Si via fertirrigação apresenta implicações práticas relevantes para a agricultura sustentável, contribuindo para a diminuição do consumo de água doce, aumento da produtividade e resiliência das culturas em condições de déficit hídrico, com potencial de aplicação em sistemas agrícolas tropicais e semiáridos. Além disso, esta pesquisa está alinhada à Agenda 2030 da ONU, promovendo o alcance de alguns dos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS), especialmente: ODS 2 (Fome Zero e Agricultura Sustentável), ao garantir maior disponibilidade de alimentos; ODS 12 (Consumo e Produção Responsáveis), ao otimizar o uso de recursos naturais; e ODS 13 (Ação Contra a Mudança Global do Clima), ao oferecer estratégias para adaptação das culturas frente a eventos climáticos adversos.

Por fim, os achados deste trabalho fornecem subsídios para o desenvolvimento de práticas agrícolas inovadoras e sustentáveis, destacando o silício como ferramenta promissora para melhorar a tolerância de culturas essenciais ao déficit hídrico e fortalecer a segurança alimentar em nível nacional e global. Estudos futuros poderão explorar diferentes doses e fontes de Si, cultivares e condições de campo, ampliando a aplicabilidade desta estratégia para outras espécies e ecossistemas agrícolas.