

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA – UNESP

CAMPUS DE JABOTICABAL

**SILÍCIO VIA FERTIRRIGAÇÃO, COM E SEM FERTILIZAÇÃO
POTÁSSICA SOB TRÊS REGIMES HÍDRICOS EM CAMPO, NA
MITIGAÇÃO DE ESTRESSES FISIOLÓGICOS EM FEIJOEIRO**

Carlos Vital Gonzales Porras

Engenheiro Agrônomo

2024

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA – UNESP

CAMPUS DE JABOTICABAL

**SILÍCIO VIA FERTIRRIGAÇÃO, COM E SEM FERTILIZAÇÃO
POTÁSSICA SOB TRÊS REGIMES HÍDRICOS EM CAMPO, NA
MITIGAÇÃO DE ESTRESSES FISIOLÓGICOS EM FEIJOEIRO**

Carlos Vital Gonzales Porras

Orientador: Prof. Dr. Renato de Mello Prado

Coorientadores: Prof. Dr. Luiz Fabiano Palaretti

Profa. Dra. Gelza Carliane Marques Teixeira

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

2024

G643s Gonzalez-Porras, Carlos Vital
Silício via fertirrigação, com e sem fertilização potássica sob três regimes hídricos em campo, na mitigação de estresses fisiológicos em feijoeiro / Carlos Vital
Gonzalez-Porras. – Jaboticabal, 2024
71 p. : il., tabs.

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista (UNESP), Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Jaboticabal
Orientadora: Renato de Mello Prado
Coorientadora: Luiz Fabiano Palaretti

1. Déficit hídrico. 2. Phaseolus vulgaris L.. 3. Elemento benéfico. 4. Estresse abiótico. 5. Fertirrigação. I. Título.

Sistema de geração automática de fichas catalográficas da Unesp. Biblioteca da Universidade Estadual Paulista (UNESP), Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Jaboticabal. Dados fornecidos pelo autor(a).

IMPACTO ESPERADO NA SOCIEDADE

Esta pesquisa traz consigo resultados promissores quanto à aplicação de silício em sistema de irrigação por gotejamento em feijoeiro em condições de campo, estando próximo do que é vivenciado diariamente nos processos produtivos. Desta forma poderá ser adotado pelos agricultores para melhorar e minimizar o consumo de água e aumentar sua eficiência, além de melhorar o crescimento das plantas, impactando diretamente o rendimento das culturas.

Expected impact on society

This research brings with it promising results regarding the application of silicon in a drip irrigation system on bean plants under field conditions, being close to what is experienced daily in production processes. This way can be adopted by farmers to improve and minimize the consumption of water and increase its efficiency, in addition to improving plant growth, directly impacting crop yields.

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO DA DISSERTAÇÃO: SILÍCIO VIA FERTIRRIGAÇÃO, COM E SEM FERTILIZAÇÃO POTÁSSICA SOB TRÊS REGIMES HÍDRICOS EM CAMPO, NA MITIGAÇÃO DE ESTRESSES FISIOLÓGICOS EM FEIJOEIRO

AUTOR: CARLOS VITAL GONZALEZ PORRAS


ORIENTADOR: RENATO DE MELLO PRADO

COORIENTADOR: LUIZ FABIANO PALARETTI

COORIENTADORA: GELZA CARLIANE MARQUES TEIXEIRA

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

Prof. Dr. RENATO DE MELLO PRADO (Participação Virtual)
Departamento de Ciências da Produção Agrícola / FCAVUNESP Jaboticabal


Documento assinado digitalmente
 **RENATO DE MELLO PRADO**
Data: 28/02/2024 19:33:14-0300
Verifique em <https://validar.itl.gov.br>

Prof. Dr. DIEGO RICARDO VILLASEÑOR ORTIZ (Participação Virtual)
Departamento de Fertilidad de Suelos y Nutrición / Universidad Técnica de Machala - El Oro/Ecuador



Assinado eletronicamente por:
**DIEGO RICARDO
VILLASENOR ORTIZ**

Profa. Dra. LUCIANA MARIA SARAN (Participação Virtual)
Departamento de Biotecnologia Agropecuaria e Ambiental / FCAV UNESP Jaboticabal

Documento assinado digitalmente
 **LUCIANA MARIA SARAN**
Data: 28/02/2024 14:51:35-0300
Verifique em <https://validar.itl.gov.br>

Jaboticabal, 28 de fevereiro de 2024

DADOS CURRICULARES DO AUTOR

Carlos Vital Gonzalez Porras, nascido o 22 e agosto de 1993 na cidade de Machala, Provincia de El Oro, Equador. Possui título de Técnico Agropecuário (2010) pelo Instituto Tecnológico Agropecuário “Manuel Isac Encalada Zuñiga”, e graduação em Engenharia Agrônômica (2017) pela Universidad Técnica de Machala (UTMACH). Durante a sua formação foi estagiário selecionado pelo programa Socio Empleo, por três meses na Agência de Regulación y Control Fitos y Zosanitario do Equador (2015). Depois de finalizar sua graduação começou a trabalhar na área de Assessoria Técnica na empresa R&R até 2021 onde mudou o emprego para a empresa COSMOCEL. EC. como Representante Técnico Comercial. No período de 2019 a 2022 trabalhou como docente em ciências para El Ministerio de Educación, Distrito 07D01, Chilla – El Guabo – Pasaje. Em 2021 iniciou o curso de Especialização em Agronegócios na Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiros” (USP), e no ano 2022 ingressou no curso do mestrado no Programa de Pós-graduação em Agronomia (Produção Vegetal), na Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” (UNESP). Atualmente pertence ao Grupo de Estudos em Nutrição de Plantas da Unesp (GENPLANT), atuando em pesquisas na área de nutrição de plantas, especialmente com uso de silício na mitigação da deficiência hídrica no feijoeiro e milho.

“La vida es una realidad que
nosotros creamos con el pasar del
tiempo a través de nuestras decisiones...”

Carlos Vital Gonzalez Porras

Aos meus Anjos Priscila e Vitar, meus eternos pais, quem são
a minha fonte de aprendizado e têm me ensinado os valores
que me fizeram o que sou hoje.

Dedico

AGRADECIMENTOS

Agradeço infindavelmente a nosso Senhor Deus Criador Rei do Universo, por ter me dado a oportunidade de seguir neste plano terrenal depois de ter tido uma experiência perto da morte, experimentado esta vida que embora as vezes torna-se difícil, mas faz parte desta experiência humana na qual estamos todos vivendo. Por ter me permitido sair do meu País e estar no Brasil e conhecer coisas extraordinárias e sentir-me mais perto Dele, por sempre me dar tudo o que eu peço para Ele mesmo quando as vezes não o mereço. Só posso te dizer graças Deus pela vida maravilhosa que tenho e por todos os ensinamentos que deixas cada dia na minha efêmera vida.

Agradeço aos meus pais, Priscila e Vitar por sempre me apoiar nas minhas decisões, por estar sempre presente para mim quando e preciso, mesmo até hoje, me motivando e falando seus sábios conselhos para ser uma boa pessoa e sempre ter escolhido o caminho do bem, porque sou quem sou graças a eles. Da mesma forma agradeço a meu irmão Cesar que na distância sempre esteve para mim e especialmente quando mais precisei dele, compartilhando as suas energias positivas comigo.

Ao meu grande amor Ana Paula, que tem me demonstrado o seu apoio incondicional nas minhas escolhas e ser um grande pilar durante a minha estadia no Brasil, por me cuidar e me dar seu amor incondicional todos os dias mesmo nos momentos complicados, por acreditar em mim e nas minhas habilidades. Por isso e muito mais sempre grato.

A meu amigo Luis Lata por me motivar e por me ajudar no processo para ingressar e poder seguir o sonho de estudar fora do meu país uma pós-graduação, por sempre ser esse amigo incondicional. Ao meu orientador de graduação, Diego Villaseñor, quem foi a pessoa que nos incentivou a seguir preparando-nos para adentrar na vida acadêmica, por acreditar em nosso potencial.

Ao meu orientador de mestrado, Prof. Dr. Renato de Mello Prado, por ter me acolhido e confiado em meu potencial mesmo sem me conhecer, por me dar a oportunidade de fazer parte do seu grupo de pesquisa e me colocar nesse projeto tão

grande no qual aprendi muito e por me adentrar neste mundo da ciência, agradeço infinitamente.

A minha coorientadora e amiga Gelza Teixeira, quem esteve sempre presente na minha caminhada no processo de formação e aprendizado do mestrado, por ter me ensinado tudo o que hoje sei e me seguir guiando neste percurso acadêmico. Da mesma forma ao meu coorientador Prof. Dr. Luiz Fabiano Palaretti, por nos ajudar em todo o processo de instalação dos experimentos e nos guiar na caminhada.

Ao meu amigo Rafael Chioda da BERMAD, que nos auxiliou em todo momento que precisamos. Igualmente a todos os funcionários da fazenda e ao Colovate por colaborar sempre na execução do experimento. A Claudinha que sempre me suportou no laboratório e nos ajudou nas análises que precisamos.

Aos meus colegas e amigos Thiago Fernandes e Paulo Gonçalves. As minhas amigas do grupo Kamilla, Deyviele, Livia. A Patrícia por ter sido parte do projeto e ter nos ajudado quando fiquei parado. Aos meus amigos com sotaque de Colombianos, Danilo e Cinthia que ajudaram no meu experimento e fizeram com que este mais perto da igreja. E a todos os colegas do GENPLANT por ter ajudado no desenvolvimento da pesquisa e pelos seus aportes.

Aos meus amigos Laura, Bruna, Treyce, Francisco que sempre estiveram me sorrindo, celebrando e me motivando nos meus primeiros passos nas aulas que compartilhamos juntos mesmo que tenha mal falado e da mesma forma ao professor Pedro Luis da Costa por me apoiar. A minha amiga Ingrid S., João de Deus, João Paulo e todos aqueles que compartilharam comigo esses instantes na minha formação e que sempre ficaram gravados na minha mente.

E como não agradecer a minha amiga Guio Gatti e ao Senhor Antônio Carlos que se comportaram como meus pais no Brasil, por ter estado presente no momento em que mais os precisei, muito obrigado. Assim também ao Zé Carlos que foi nosso querido vizinho pintor e escultor.

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

Agradeço também à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP), processo FAPESP 2021/12531-7.

Agradeço infinitamente a todos os que fizeram parte!

SUMARIO

RESUMO	iii
ABSTRACT	iv
CAPÍTULO 1 – Considerações gerais	1
1. INTRODUÇÃO	1
2. REVISÃO DE LITERATURA	3
2.1 Mudanças Climáticas e o déficit hídrico	3
2.2 Deficiência hídrica na fotossíntese	4
2.3 Nutrição na deficiência hídrica	5
2.4 Função do potássio no déficit hídrico	6
2.5 Silício como mitigador do déficit hídrico	7
2.6 Fertirrigação com Si	8
2.7 Conclusões e perspectivas futuras.....	9
3. REFERÊNCIAS	10
CAPÍTULO 2 - Silício via fertirrigação, com e sem aplicação de potássio, melhora os aspectos fisiológicos do feijão comum cultivado em três regimes hídricos no campo	18
Resumo	18
1. INTRODUÇÃO	19
2. MATERIAL E METODOS	21
2.1 Condições de crescimento e material vegetal	21
2.2 Tratamentos e delineamento experimental.....	24
2.3 Análises realizadas	27
2.3.1 Fluorescência e eficiência quântica do fotossistema II (Fv/Fm)	27
2.3.2 Conteúdo de clorofila e carotenoides.....	27
2.3.3 Trocas gasosas foliares	27
2.3.4 Conteúdo relativo de água.....	28
2.3.5 Potencial hídrico foliar (Ψ_w).....	28
2.3.6 Índice de extravasamento de eletrólitos.....	28
2.3.7 Produção de massa seca	28
2.3.8 Análise foliar de Si e de K.....	29
2.4 Análise estatística	29
3. RESULTADOS	30
3.1 Acúmulo de silício e potássio	30

3.2	Efeitos do silício no estado hídrico das plantas	31
3.3	Efeitos do silício nos parâmetros da fotossíntese	34
3.4	Efeitos do silício no conteúdo de massa seca do feijão comum	40
3.5	Correlação e mapa de calor	42
4.	DISCUSSÃO	44
4.1	A aplicação via fertirrigação melhora sua absorção e aumenta o acúmulo de potássio no feijão comum.	44
4.2	O silício melhora o status hídrico dos tecidos e se reflete nos parâmetros fotossintéticos	46
4.3	A aplicação de silício melhorou o acúmulo de matéria seca no feijão comum .	49
5.	CONCLUSÃO	51
6.	REFERÊNCIAS	51

SILÍCIO VIA FERTIRRIGAÇÃO, COM E SEM FERTILIZAÇÃO POTÁSSICA, SOB TRÊS REGIMES HÍDRICOS EM CAMPO, NA MITIGAÇÃO DE ESTRESSES FISIOLÓGICOS EM FEIJOEIRO

RESUMO – A deficiência hídrica é o estresse abiótico que mais afeta a produtividade das culturas no mundo e está sendo agravado com as mudanças climáticas. O silício (Si) é um elemento benéfico que pode diminuir os danos ocasionados pelo déficit hídrico, enquanto o potássio (K) é um elemento essencial requerido pelas plantas e fundamental no controle do potencial osmótico nas plantas. Uma estratégia para potencializar a eficiência do uso da água e o ótimo crescimento da cultura seria o emprego de Si e K. Portanto aplicações de Si por fertirrigação podem ser eficientes para atenuar os danos gerados pela deficiência hídrica. Objetivou-se avaliar os efeitos de doses de Si aplicada via fertirrigação em diferentes regimes hídricos, na ausência e na presença de adubação potássica nas trocas gasosas, na eficiência de uso da água e no crescimento da cultura do feijão cultivado sob condições de campo. Foram realizados dois experimentos: com e sem o fornecimento de K, avaliando os mesmos tratamentos em ambos os experimentos. Os tratamentos consistiram em fatorial 3x4, sendo três regimes hídricos: 80% (sem déficit hídrico), 60% (déficit hídrico moderado) e 40% (déficit hídrico severo) da capacidade de retenção de água no solo e quatro doses de Si fornecidas via fertirrigação: 0; 4; 8 e 12 kg ha⁻¹. As doses de Si para aplicação via fertirrigação que promoveram maior absorção do elemento na planta foram incrementadas com a diminuição do teor de água no solo, ou seja, foram iguais a 6,6; 7,0 e 7,1 kg ha⁻¹, para o regime sem déficit hídrico, déficit hídrico moderado e déficit hídrico severo, respectivamente. A aplicação de Si via fertirrigação melhorou as condições das plantas que foram submetidas, especialmente ao déficit hídrico severo, independente do status de K, refletido no conteúdo relativo de água, potencial hídrico foliar e resistência da membrana que influenciaram diretamente no conteúdo de pigmentos e nas taxas de trocas gasosas. Os efeitos fisiológicos promoveram melhoria na fotossíntese das plantas sob déficit hídrico que mitigaram as perdas na produção de massa seca. Os resultados indicam pela primeira vez nesta espécie que o Si pode ser utilizado em cultivos irrigados para potencializar a eficiência de uso da irrigação, bem como, para áreas de cultivo limitadas pela baixa precipitação e que tenham restrição hídrica.

Palavras-chave: *Phaseolus vulgaris* L., irrigação, eficiência do uso da água, silicato, fotossíntese, pigmentos fotossintetizantes.

SILICON VIA FERTIGATION, WITH AND WITHOUT POTASSIUM FERTILIZATION, UNDER THREE WATER REGIMES IN THE FIELD, IN THE MITIGATION OF PHYSIOLOGICAL STRESSES IN BEAN PLANTS

ABSTRACT – Water deficiency is the abiotic stress that most affects crop productivity in the world, especially in arid and semi-arid areas where droughts occur frequently. Silicon (Si) is a beneficial element that can reduce the damage caused by water deficit, while potassium (K) is an essential element required by plants and fundamental in controlling osmotic potential in plants. One strategy for boosting water use efficiency and optimal crop growth would be to use Si and K. Therefore, applications of Si by fertigation can be effective in alleviating the damage caused by water deficiency. The aim of this study was to evaluate the effects of doses of Si applied via fertigation under different water regimes, in the absence and presence of potassium fertilization on gas exchange, water use efficiency and growth of the bean crop grown under field conditions. Two experiments were carried out: with and without the supply of K, evaluating the same treatments in both experiments. The treatments consisted of a 3x4 factorial, with three water regimes: 80% (no water deficit), 60% (moderate water deficit) and 40% (severe water deficit) of the soil's water retention capacity and four doses of Si supplied via fertigation: 0; 4; 8 and 12 kg ha⁻¹. The doses of Si for application via fertigation that promoted the greatest absorption of the element in the plant were increased as the water content in the soil decreased, i.e. they were equal to 6.6, 7.0 and 7.1 kg ha⁻¹, for the regime without water deficit, moderate water deficit and severe water deficit, respectively. The application of Si via fertigation improved the conditions of the plants that were subjected to severe water deficit, regardless of K status, reflected in relative water content, leaf water potential and membrane resistance, which directly influenced pigment content and gas exchange rates. The physiological effects promoted an improvement in the photosynthesis of the plants under water deficit, which mitigated the losses in dry mass production. The results indicate for the first time in this species that Si can be used in irrigated crops to enhance the efficiency of irrigation use, as well as for growing areas limited by low rainfall and water restrictions.

Key words: *Phaseolus vulgaris* L., irrigation, water use efficiency, silicate, photosynthesis, photosynthetic pigments.

CAPÍTULO 1 – Considerações gerais

1. INTRODUÇÃO

Vários estudos projetam uma maior demanda de água para irrigação na produção agrícola (Bijl et al., 2018), devido ao atual crescimento na demanda alimentar por parte da população, gerando escassez de água em certas regiões (Rosa et al., 2020). Além disso, o déficit hídrico está agravado devido às mudanças climáticas, com aumento da temperatura e da frequência da seca a nível global (Zhang & Cai, 2013).

Os déficits hídricos causados pela falta de água induzem uma regulação baixa nos processos fisiológicos e bioquímicos pela produção de espécies reativas de oxigênio (ROS) que causam danos oxidativos na atividade celular, resultando em perdas de rendimento (Das et al., 2021). No entanto, a primeira resposta das plantas à falta de água é o fechamento dos estômatos para evitar a perda de água por transpiração, o que conseqüentemente leva a uma redução na entrada de CO₂, diminuindo a concentração interna de C (C_i) e a taxa fotossintética (A) (Habermann et al., 2019). Além disso, o fechamento dos estômatos limita o decréscimo do potencial hídrico na planta, evitando que a demanda de água das folhas ultrapasse a capacidade do sistema hidráulico, o que pode gerar uma embolia no sistema vascular e desidratação até a morte dos tecidos (Fu et al., 2022).

As secas representam um desafio significativo, reduzindo o rendimento das colheitas de entre o 20 e 40% especialmente dos cereais e estima-se que aproximadamente 75% da superfície agrícola mundial sofre perdas devido à falta de água. Diante desse cenário, torna-se imperativo buscar alternativas para mitigar os efeitos negativos desses eventos climáticos (Thorne et al., 2020).

O uso do silício (Si) pode ser uma alternativa na mitigação dos efeitos de diferentes estresses, incluindo o déficit hídrico (Irfan et al., 2023). Embora o Si não seja considerado um elemento essencial para as plantas, é um elemento benéfico que mitiga diferentes estresses (Dehghanipoodeh et al., 2018).

Apesar do Si estar em alta concentração na crosta terrestre e nos solos na forma de SiO₂, a concentração disponível na solução do solo é relativamente muito

baixa, de 1 – 100 mg L⁻¹ na forma de ácido monossilícico (H₄SiO₄) (Alsaeedi et al., 2019) (Ranjan et al., 2021). Assim aplicações de Si são necessárias na mitigação dos efeitos do estresse hídrico, pois o Si regula o equilíbrio nutricional, aumenta a taxa fotossintética e estimula o sistema de defesa antioxidante (Bhardwaj & Kapoor, 2021), fatos relatados em diferentes culturas como milho (Marques et al., 2022), arroz (Ghouri et al., 2022), cana-de-açúcar (Teixeira et al., 2022), trigo (Bukhari et al., 2021), morango (Dehghanipoodeh et al., 2018).

Uma inovação nas pesquisas sobre o uso do Si seria seu modo de aplicação no solo na forma fluida de alta solubilidade, o que poderia aumentar muito a eficiência na absorção em relação às fontes convencionais, como silicato de cálcio. Estudos recentes têm demonstrado que a aplicação de Si via fertirrigação é eficiente na absorção do elemento para diminuir os efeitos negativos da seca, utilizando fontes solúveis como silicato de potássio e silicato de sódio em doses relativamente baixas em relação às fontes sólidas (menor que 3 mmol L), tendo resultados positivos que foram reportados em cana-de-açúcar (Silva et al., 2023), feijão (Gonzalez-Porras et al., 2024) e milho (Teixeira et al., 2022b).

Em contrapartida o K que é um elemento essencial para as plantas, aumenta a eficiência do uso da água, já que intervém na conservação do potencial osmótico das plantas (De Mello Prado, 2021). No entanto o fornecimento de Si ajuda aumentar a absorção de K, tanto em suficiência como em deficiência (Gonzalez-Porras et al., 2024), devido a ocorrência de sinergia positiva que resulta em uma maior eficiência no aproveitamento da água (dos Santos Sarah et al., 2021, 2022).

Diante desse contexto é importante avançar na discussão sobre os efeitos negativos da seca especialmente na fotossíntese e como o fornecimento de Si via fertirrigação, com e sem fertilização com potássio podem mitigar os danos causados pela deficiência hídrica para entender e compreender melhor os mecanismos de atuação deste elemento importante na agricultura.

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1 Mudanças climáticas e o déficit hídrico

Prevê-se que para o ano 2050 a produção de alimentos terá um aumento na demanda de até 77% pelos efeitos adversos das mudanças climáticas (Singhal et al., 2023). Isso ocorre em decorrência das elevadas concentrações de gases de efeito estufa na atmosfera, como o óxido nitroso (N_2O), metano (CH_4) e especialmente pela presença de dióxido de carbono (CO_2), resultantes de processos antropogênicos, como a queima de combustíveis fósseis (Moore et al., 2021). Este cenário provoca o aumento das temperaturas da superfície terrestre e das distintas camadas da atmosfera que como consequência interfere na distribuição geográfica das precipitações e na evaporação, afetando a disponibilidade de água em distintas regiões gerando períodos mais frequentes de seca (Manabe, 2019).

As secas são importantes por serem um estresse abiótico que se apresenta em regiões tropicais e especialmente em regiões áridas e semiáridas, afetando diretamente o potencial produtivo das culturas, o que gera um risco para a segurança alimentar (Irfan et al., 2023). Estes períodos de secas prevalecem quando as elevadas temperaturas são mantidas por longos períodos e tanto o conteúdo de umidade no solo como o da atmosfera é relativamente baixo (Fu et al., 2022) resultando em maior pressão de saturação de vapor de água, o que, como consequência, resulta em um maior déficit de pressão de vapor (DPV) (Tulva et al., 2023).

O estresse hídrico devido à falta de água é um dos maiores fatores limitantes da produção agrícola, pois gera grandes perdas econômicas, já que pode diminuir as produções em escala global; na cultura de milho, foi reportado que ocorrem perdas de até 40% (Pereira et al., 2017), 50% em tomates (Dariva et al., 2020) , 45% em trigo (Zhao et al., 2020), pelos efeitos negativos das secas, sendo por isso amplamente estudada, na busca de novas formas de produzir mais com menores quantidades de água (Putti et al., 2023).

O status hídrico das plantas é afetado quando o conteúdo de água é relativamente baixo, somado ao déficit de pressão de vapor, gerando um déficit hídrico que afeta as plantas de forma fisiológica, bioquímica e molecular (Shao et al., 2008; Tulva et al., 2023). Essas mudanças causam diminuição do potencial osmótico e

turgência celular, detendo o seu crescimento. Além disso, a assimilação de carbono também é prejudicada devido à baixa condutância estomática, diminuindo, porém, a taxa de fotossíntese (Kaur et al., 2021).

2.2 Deficiência hídrica na fotossíntese

A fotossíntese é um fator chave na produção das culturas, porque intervém no metabolismo do carbono (C), que é o processo pelo qual são produzidos os carboidratos, componentes básicos para a produção e manutenção da biomassa (Muller et al., 2011). No entanto, a fotossíntese é afetada quando as plantas estão sob períodos de deficiência hídrica, pois os processos fisiológicos são interrompidos (Li et al., 2019).

A falta de água no solo faz com que o potencial hídrico da planta toda seja afetado (Tulva et al., 2023). Da mesma forma, a divisão celular é afetada pela perda de turgência, parando o seu crescimento e apresentando uma diminuição na área foliar e um menor número de folhas para evitar a perda excessiva de água pelos estômatos (Basu et al., 2016).

Os estômatos são os encarregados de regular a difusão de CO₂ e vapor de água entre as folhas e a atmosfera, controlando dessa forma a perda de água e a fotossíntese nas plantas (Cardoso et al., 2020). Em condições de falta de água no solo e ao ter um elevado DPV, a condutância estomática é regulada fechando os estômatos pela ação das células guardas e especialmente pelo ácido abscísico (ABA) (Kumari et al., 2022; Moore et al., 2021). O que é gerado nas raízes das plantas e transportado até os brotos pelo xilema e como consequência, há menor absorção de CO₂, afetando a taxa de fotossíntese (Buckley, 2019; Zia et al., 2021).

A fotossíntese diminui quando a condutância estomática é baixa, resultado da falta de água, no entanto, em condições de luminosidade baixa, a fotossíntese se mantém, especificamente o transporte de elétrons. Mas, se houver alta luminosidade, a fotossíntese para e o transporte linear dos elétrons da fase fotoquímica é detido, provocando um excesso de energia que não será dissipado, gerando espécies reativas de oxigênio (ROS) e causando danos foto-oxidativos, podendo levar à morte das plantas. (Abd El Mageed et al., 2023; Urban et al., 2017).

O dano oxidativo ocorre especialmente nos cloroplastos, mitocôndrias e peroxissomas das células, resultando na degradação da clorofila e na peroxidação dos lipídios da membrana (Abdelkhalik et al., 2019). No entanto, além do fechamento estomático, as ROS presentes nos cloroplastos degradarão os pigmentos fotossintéticos e, por conseguinte, afetarão a capacidade fotossintética do fotossistema II, diminuindo ainda mais a assimilação neta de carbono no processo fotossintético (Abd El Mageed et al., 2023; Medyouni et al., 2021). Além disso, ocorre a degradação de aminoácidos e proteínas (Joseph et al., 2021).

Diante da falta de água, a assimilação do carbono para o processo fotossintético diminui. No entanto, a fotossíntese não é a primeira a ser afetada, pois a atividade da Rubisco continua mesmo em plantas com 50% dos estômatos fechados. O primeiro efeito é a detenção do crescimento, mas quando as plantas ultrapassam esse limite e o déficit hídrico é amplamente severo, a fotossíntese é totalmente interrompida devido à falta de água e elevadas temperaturas, o que causa falhas hidráulicas e a morte das plantas (Muller et al., 2011). Estes dois fatores ambientais em conjunto fazem com que as plantas limitem a movimentação pelo xilema devido ao fato de que períodos longos geram embolias que posteriormente ocasionam a morte (Ruehr et al., 2019).

2.3 Nutrição na deficiência hídrica

A deficiência hídrica limita a absorção de nutrientes pelas plantas, especialmente a absorção de potássio (K), cálcio (Ca) e magnésio (Mg) (Medyouni et al., 2021). Além desses elementos, a absorção de nitrogênio (N) e fósforo (P), também é afetada, diminuindo o crescimento das plantas (Koç et al., 2022).

Esta absorção de nutrientes é interrompida porque em solos onde as secas são recorrentes os ciclos do N, P e K são alterados, porém a mineralização e ciclagem de nutrientes não é eficiente tornando-os indisponíveis (Luo et al., 2018). A baixa absorção de N afeta o normal desenvolvimento das plantas, pois a síntese de aminoácidos é detida, gerando a degradação de proteínas, especialmente da Rubisco, refletindo em diminuição no rendimento das culturas (Joseph et al., 2021; Ruehr et al., 2019). As secas também interferem na reabsorção dos nutrientes dos tecidos

senescentes, o que afeta o teor nutricional da palhada e a taxa de mineralização (Luo et al., 2018).

No entanto, é relatado que a aplicação de certos nutrientes diante do estresse hídrico pode ajudar a ativar mecanismos de defesa para atenuar os efeitos negativos da seca. O bom fornecimento de N está relacionado com a manutenção da plasticidade e a capacidade de extração de água pelas raízes, enquanto o P ajuda a melhorar a arquitetura das raízes e, por sua vez, melhora a boa absorção de nutrientes e água pelas plantas, devido ao aumento da área de superfície radicular (Kumari et al., 2022). Além disso, aplicações de K melhoraram a condutância estomática e a taxa de assimilação de C (fotossíntese líquida) (Seleiman et al., 2021). Do mesmo jeito, a utilização de elementos benéficos como o Si, podem mitigar os efeitos adversos da seca nas culturas (Khanum et al., 2022).

2.4 Função do potássio no déficit hídrico

O déficit hídrico afeta diretamente a absorção de K nas plantas, além de que a falta de água inativa os transportadores de K nas células das raízes (Qi et al., 2019). O K tem um papel chave no desenvolvimento normal nos processos fisiológicos e bioquímicos, porque intervém na ativação enzimática e é o principal elemento que atua no potencial osmótico, além de influenciar no máximo turgor das células guardas que regulam a abertura e fechamento dos estômatos (De Mello Prado, 2021)

Ao manter a expansão celular, o K assegura uma boa regulação estomática adequada, ajudando a manter a atividade fotossintética através do transporte de elétrons (Yang et al., 2022). No entanto, se existe uma deficiência deste elemento ou baixa absorção, esses processos são interrompidos diretamente, diminuindo o crescimento, acelerando a senescência e até mesmo a maturidade adiantada (J. Liu et al., 2021).

O fornecimento de K pode ajudar a reduzir os danos gerados por estresses abióticos (Yang et al., 2022), no caso do déficit hídrico, aplicações de K melhoraram o conteúdo de água, potencial hídrico, trocas gasosas e produtividade na cultura da canola (Waraich et al., 2020), número de grãos no milho e manutenção da hidratação (Ahmad et al., 2015). No sorgo, aumenta a absorção de N, o sistema de defesa antioxidante e

a eficiência no uso de água, o que foi refletido no aumento do peso de mil grãos (Tittal et al., 2021)

Aplicações de potássio também melhoraram a sua absorção, a estrutura radicular e foliar, refletindo em maior acúmulo de biomassa e trocas gasosas (Wasaya et al., 2021). Além disso evitou a degradação dos pigmentos fotossintéticos, além do aumento de açúcares de baixo peso molecular como as prolinas, que atuam diretamente na mitigação do déficit hídrico (Mohamed et al., 2019).

2.5 Silício como mitigador do déficit hídrico

O Si não é considerado um mineral essencial para as plantas; no entanto, o Si mitiga os efeitos de estresses abióticos e bióticos (Ibrahim et al., 2020a), incluindo o déficit hídrico, pois ele favorece processos fisiológicos e bioquímicos na planta (Khanum et al., 2022; Thakur et al., 2023), especialmente pelo fato de modular o sistema de defesa antioxidante (Dehghanipoodeh et al., 2018).

O conteúdo de Si no tecido vegetal pode atingir 10% da matéria seca das plantas, especialmente nas espécies acumuladoras de Si. Normalmente, as espécies são divididas em relação ao acúmulo de Si em três tipos: acumuladoras, intermediárias e excludoras (Wang et al., 2021). O Si pode ser absorvido na forma de ácido monossilícico (H_4SiO_4) por processos ativos ou passivos e, em seguida, é transportado das células das raízes até os brotos e depositado pelo processo transpiratório, onde perde água pela evaporação e se polimeriza na forma de fitólitos nas folhas das plantas (Singh et al., 2020).

Os fitólitos apresentam um papel estrutural protetor nas plantas e exibem um melhor rendimento de suporte que o carbono (C). Além disso, na deficiência hídrica, os fitólitos ajudam a manter o processo fotossintético e a transpiração em ambientes cambiantes (R. Xu et al., 2023). O Si, ao ser depositado nas cutículas, forma uma dupla cutícula que vai evitar a transpiração, além da transpiração cuticular, que é o segundo mecanismo pelo qual as plantas perdem água, sendo 50% maior em plantas que não contêm Si, como foi reportado no arroz (Wang et al., 2021), além disso, é reportado que os fitólitos depositados nos tricomas ajudaram a aumentar a captação da luz visível, melhorando o processo da fotossíntese (Meunier et al., 2017).

O Si atua sobre a expressão de aquaporinas que melhoram a absorção de água e a condutância hidráulica da raiz, mantendo as plantas hidratadas mesmo em condições de falta de água (Ibrahim et al., 2020b). Em condições de deficiência de potássio, o Si alivia a falta de K e mantém o potencial osmótico do xilema da raiz (Chen et al., 2018).

Da mesma forma, o Si favorece a planta porque regula genes de expressão das enzimas antioxidantes, superóxido dismutase (SOD), catalase (CAT), ascorbato peroxidase (APX), e compostos não enzimáticos como prolina, compostos fenólicos e carotenoides, que diminuem os danos causados pela falta de água e o estresse oxidativo (Saja-Garbarz et al., 2022).

Diversos estudos relatam os efeitos fisiológicos do Si diante da deficiência hídrica. No milho, o uso do elemento aumentou a absorção de nutrientes e a eficiência de uso do N, P, K, Ca e Mg (Teixeira, de Mello Prado et al., 2022). No morango, houve aumento dos pigmentos fotossintéticos, a eficiência quântica do fotossistema, a taxa fotossintética e a eficiência do uso da água (WUE) (Dehghanipoodeh et al., 2018). No feijoeiro, melhorou o potencial hídrico foliar e aumentou os pigmentos fotossintéticos e a massa seca, além da eficiência do uso da água (WUE) (Gonzalez-Porras et al., 2024), tomate (de Moraes et al., 2020), pimentão (Lob et al., 2023), cana-de-açúcar (Silva et al., 2023).

2.6 Fertirrigação com Si

A aplicação de Si via fertirrigação é considerada uma alternativa eficiente no fornecimento de Si, pois o uso de fontes solúveis favorece a sua absorção (Buchelt et al., 2021). Fontes sólidas como o silicato de cálcio são fontes com baixa solubilidade, sendo necessárias grandes quantidades do silicato para aumentar o acúmulo de Si nos tecidos. Além disso, é necessário incorporá-lo no solo para que haja reatividade e favoreça a solubilização do silicato no solo (Rocha et al., 2021).

As fontes solúveis de Si para a fertirrigação, como o silicato de potássio, que é mais conhecido, o silicato de sódio, e o silicato de sódio e potássio estabilizados com sorbitol, foram reportadas como fontes eficientes para uma ótima absorção do Si em

concentrações relativamente baixas ($>3 \text{ mmol L}^{-1}$) (Buchelt et al., 2023; Teixeira, de Mello Prado, et al., 2022), pois manteve ótima concentração do Si em solução na forma química monomérica (H_4SiO_4) (Silva et al., 2023).

Na cana-de-açúcar, o efeito do Si ficou claro na planta ao melhorar o estresse hídrico, aumentando pigmentos fotossintéticos, acúmulo de massa seca e melhorando o aparato fotossintético mediante aumento da fluorescência (Teixeira et al., 2021). E ao mesmo tempo, o Si melhorou o sistema de defesa antioxidante enzimático e não enzimático, com aumento na SOD, CAT, APX, prolina e compostos fenólicos, o que diminuiu os níveis de MDA nas plantas (Teixeira, et al., 2022) e favoreceu homeostase estequiométrica do C, N, e P (Costa et al., 2023).

No trigo, o fornecimento de Si por fertirrigação melhorou as trocas gasosas, especialmente a fotossíntese, e aumentou o conteúdo de prolina, aminoácidos e proteínas totais, açúcares solúveis e, conseqüentemente, o número de espigas e a produtividade (Bukhari et al., 2021). Estes efeitos do Si na mitigação do déficit hídrico foram reportados em plantas de milho e capim, ao incrementar o acúmulo de massa seca, fotossíntese e atividade enzimática (Rocha et al., 2022; Teixeira, et al., 2022b).

No feijoeiro, o Si melhorou a taxa fotossintética e concentração de C, conteúdo de água e potencial hídrico foliar, apresentando uma menor porcentagem de extravasamento celular. Além disso, foi reportado um aumento na eficiência do uso da água, especialmente em déficit hídrico severo (Gonzalez-Porras et al., 2024). Com efeitos similares em morangos e pepinos (Alsaeedi et al., 2019; Dehghanipoodeh et al., 2018)

2.7 Conclusões e perspectivas futuras

Dentre os estresses abióticos que mais afetam a produtividade das culturas, o déficit hídrico é especialmente gerado pelo efeito das mudanças climáticas, representando um risco constante para a segurança alimentar em um mundo onde o crescimento demográfico é cada vez maior. Portanto, é necessário buscar novas estratégias de fácil acesso para diminuir os danos causados pelas secas e, dessa forma, manter as produtividades e aumentar a eficiência no uso da água.

Nesta revisão, foram fornecidos elementos claros sobre o papel do Si na mitigação dos efeitos da seca quando aplicado na forma de fertirrigação, a qual demonstrou ser eficiente. No entanto, apesar das pesquisas realizadas em campo e em casas de vegetação, ainda são necessárias novas investigações sobre o uso eficiente do Si, especialmente em fertirrigação em condições de campo, para constituir uma alternativa sustentável na redução do uso da água na agricultura, ao mesmo tempo em que mitiga estresses e potencializa a produção agrícola.

3. REFERÊNCIAS

- Abd El Mageed, T. A., Semida, W., Hemida, K. A., Gyushi, M. A. H., Rady, M. M., Abdelkhalik, A., Merah, O., Brestic, M., Mohamed, H. I., Sabagh, A. El & Abdelhamid, M. T. (2023). Glutathione-mediated changes in productivity, photosynthetic efficiency, osmolytes, and antioxidant capacity of common beans (*Phaseolus vulgaris*) grown under water deficit. *PeerJ*, 11. <https://doi.org/10.7717/PEERJ.15343/SUPP-1>
- Abdelkhalik, A., Pascual-Seva, N., Nájera, I., Domene, M. Á., Baixauli, C. & Pascual, B. (2019). Effect of Deficit irrigation on the productive response of drip-irrigated onion (*Allium cepa* L.) in mediterranean conditions. *The Horticulture Journal*, 88(4), 488–498. <https://doi.org/10.2503/HORTJ.UTD-081>
- Ahmad, N., Bismillah Khan, M., Farooq, S., Shahzad, M., Farooq, M. & Hussain, M. (2015). Potassium nutrition improves the maize productivity under water deficit conditions. *Soil Environment*, 34(1), 15–26. www.se.org.pkhttp://www.sss-pakistan.org
- Alsaeedi, A., El-Ramady, H., Alshaal, T., El-Garawany, M., Elhawat, N. & Al-Otaibi, A. (2019). Silica nanoparticles boost growth and productivity of cucumber under water deficit and salinity stresses by balancing nutrients uptake. *Plant Physiology and Biochemistry*, 139, 1–10. <https://doi.org/10.1016/J.PLAPHY.2019.03.008>
- Basu, S., Ramegowda, V., Kumar, A. & Pereira, A. (2016). Plant adaptation to drought stress. *F1000Research*, 5. <https://doi.org/10.12688/F1000RESEARCH.7678.1>
- Bhardwaj, S. & Kapoor, D. (2021). Fascinating regulatory mechanism of silicon for alleviating drought stress in plants. *Plant Physiology and Biochemistry*, 166, 1044–1053. <https://doi.org/10.1016/J.PLAPHY.2021.07.005>
- Bijl, D. L., Biemans, H., Bogaart, P. W., Dekker, S. C., Doelman, J. C., Stehfest, E. & van Vuuren, D. P. (2018). A global analysis of future water deficit based on different allocation mechanisms. *Water Resources Research*, 54(8), 5803–5824. <https://doi.org/10.1029/2017WR021688>

- Buchelt, A. C., de Mello Prado, R., Caione, G., de Almeida Carneiro, M. & Litter, F. A. (2021). Effects of silicon fertigation on dry matter production and crude protein contents of a pasture. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 21(4), 3402–3413. <https://doi.org/10.1007/S42729-021-00615-9/FIGURES/8>
- Buchelt, A. C., de Mello Prado, R., Caione, G., de Moura Zanine, A., Justina, S. M. Dela, da Silva Ribeiro, J., de Souza Júnior, A. M., de Jesus Ferreira, D. & da Silva de Sousa, F. C. (2023). The use of soluble silicon via fertigation and leaf application in panicum maximum modulates production without decreasing grass quality. *Silicon*, 15(17), 7553–7563. <https://doi.org/10.1007/S12633-023-02602-4/METRICS>
- Buckley, T. N. (2019). How do stomata respond to water status? *New Phytologist*, 224(1), 21–36. <https://doi.org/10.1111/NPH.15899>
- Bukhari, M. A., Ahmad, Z., Ashraf, M. Y., Afzal, M., Nawaz, F., Nafees, M., Jatoi, W. N., Malghani, N. A., Shah, A. N. & Manan, A. (2021). Silicon mitigates drought stress in wheat (*Triticum aestivum* L.) through improving photosynthetic pigments, biochemical and yield characters. *Silicon*, 13(12), 4757–4772. <https://doi.org/10.1007/S12633-020-00797-4/METRICS>
- Cardoso, A. A., Brodribb, T. J., Kane, C. N., DaMatta, F. M. & McAdam, S. A. M. (2020). Osmotic adjustment and hormonal regulation of stomatal responses to vapour pressure deficit in sunflower. *AoB PLANTS*, 12(4). <https://doi.org/10.1093/AOBPLA/PLAA025>
- Chen, D., Wang, S., Yin, L. & Deng, X. (2018). How does silicon mediate plant water uptake and loss under water deficiency? *Frontiers in Plant Science*, 9, 340168. <https://doi.org/10.3389/FPLS.2018.00281/BIBTEX>
- Costa, M. G., de M. Prado, R., Sarah, M. M. S., Palaretti, L. F., de C. Piccolo, M. & Souza Júnior, J. P. (2023). New approaches to the effects of Si on sugarcane ratoon under irrigation in Quartzipsamments, Eutrophic Red Oxisol, and Dystrophic Red Oxisol. *BMC Plant Biology*, 23(1), 1–20. <https://doi.org/10.1186/s12870-023-04077-2>
- Dariva, F. D., Copati, M. G. F., Pessoa, H. P., Alves, F. M., Dias, F. de O., Picoli, E. A. de T., da Cunha, F. F. & Nick, C. (2020). Evaluation of anatomical and physiological traits of *Solanum pennellii* Cor. associated with plant yield in tomato plants under water-limited conditions. *Scientific Reports* 2020 10:1, 10(1), 1–13. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-73004-4>
- Das, D., Ullah, H., Tisarum, R., Cha-um, S. & Datta, A. (2021). Morpho-physiological responses of tropical rice to potassium and silicon fertilization under water-deficit stress. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition* 2021 23:1, 23(1), 220–237. <https://doi.org/10.1007/S42729-021-00712-9>
- De Mello Prado, R. (2021). Mineral nutrition of tropical plants. *Mineral Nutrition of Tropical Plants*, 1–339. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-71262-4/COVER>

de Moraes, D. H. M., Mesquita, M., Bueno, A. M., Flores, R. A., de Oliveira, H. F. E., de Lima, F. S. R., Prado, R. de M. & Battisti, R. (2020). Combined effects of induced water deficit and foliar application of silicon on the gas exchange of tomatoes for processing. *Agronomy* 2020, Vol. 10, Page 1715, 10(11), 1715. <https://doi.org/10.3390/AGRONOMY10111715>

DEGHANIPOODEH, S., GHOBADI, C., BANINASAB, B., GHEYSARI, M. & SHIRANIBIDABADI, S. (2018). Effect of silicon on growth and development of strawberry under water deficit conditions. *Horticultural Plant Journal*, 4(6), 226–232. <https://doi.org/10.1016/J.HPJ.2018.09.004>

dos Santos Sarah, 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), 19690. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-99194-z>

dos Santos Sarah, M. M., de Mello Prado, R., Teixeira, G. C. M., de Souza Júnior, J. P., de Medeiros, R. L. S. & Barreto, R. F. (2022). Silicon supplied via roots or leaves relieves potassium deficiency in maize plants. *Silicon*, 14(3), 773–782. <https://doi.org/10.1007/S12633-020-00908-1/METRICS>

Fu, Z., Ciais, P., Prentice, I. C., Gentine, P., Makowski, D., Bastos, A., Luo, X., Green, J. K., Stoy, P. C., Yang, H. & Hajima, T. (2022). Atmospheric dryness reduces photosynthesis along a large range of soil water deficits. *Nature Communications* 2022 13:1, 13(1), 1–10. <https://doi.org/10.1038/s41467-022-28652-7>

Ghouri, F., Ali, Z., Naeem, M., Ul-Allah, S., Babar, M., Baloch, F. S., Chattah, W. S. & Shahid, M. Q. (2022). Effects of silicon and selenium in alleviation of drought stress in rice. *Silicon*, 14(10), 5453–5461. <https://doi.org/10.1007/S12633-021-01277-Z/METRICS>

Gonzalez-Porrás, 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, improve physiological aspects of common beans cultivated under three water regimes in field. *Scientific Reports* 2024 14:1, 14(1), 1–19. <https://doi.org/10.1038/S41598-024-52503-8>

Habermann, E., Dias de Oliveira, E. A., Contin, D. R., Delvecchio, G., Viciado, D. O., de Moraes, M. A., de Mello Prado, R., de Pinho Costa, K. A., Braga, M. R. & Martinez, C. A. (2019). Warming and water deficit impact leaf photosynthesis and decrease forage quality and digestibility of a C4 tropical grass. *Physiologia Plantarum*, 165(2), 383–402. <https://doi.org/10.1111/PPL.12891>

Ibrahim, M. F. M., El-Samad, G. A., Ashour, H., El-Sawy, A. M., Hikal, M., Elkelish, A., El-Gawad, H. A., El-Yazied, A. A., Hozzein, W. N. & Farag, R. (2020a). Regulation of agronomic traits, nutrient uptake, osmolytes and antioxidants of maize as influenced by exogenous potassium silicate under deficit irrigation and semiarid conditions. *Agronomy* 2020, Vol. 10, Page 1212, 10(8), 1212. <https://doi.org/10.3390/AGRONOMY10081212>

Ibrahim, M. F. M., El-Samad, G. A., Ashour, H., El-Sawy, A. M., Hikal, M., Elkelish, A., El-Gawad, H. A., El-Yazied, A. A., Hozzein, W. N. & Farag, R. (2020b). Regulation of agronomic traits, nutrient uptake, osmolytes and antioxidants of maize as influenced by exogenous potassium silicate under deficit irrigation and semiarid conditions. *Agronomy* 2020, Vol. 10, Page 1212, 10(8), 1212. <https://doi.org/10.3390/AGRONOMY10081212>

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* 2023, Vol. 15, Page 739, 15(4), 739. <https://doi.org/10.3390/W15040739>

Joseph, J., Luster, J., Bottero, A., Buser, N., Baechli, L., Sever, K. & Gessler, A. (2021). Effects of drought on nitrogen uptake and carbon dynamics in trees. *Tree Physiology*, 41(6), 927–943. <https://doi.org/10.1093/TREEPHYS/TPAA146>

Kaur, H., Kohli, S. K., Khanna, K. & Bhardwaj, R. (2021). Scrutinizing the impact of water deficit in plants: Transcriptional regulation, signaling, photosynthetic efficacy, and management. *Physiologia Plantarum*, 172(2), 935–962. <https://doi.org/10.1111/PPL.13389>

Khanum, S., Tawaha, A. R. M., Karimirad, R. & Al-Tawaha, A. R. (2022). Beneficial effects of supplementation silicon on the plant under abiotic and biotic stress. *Silicon* 2022 15:6, 15(6), 2481–2491. <https://doi.org/10.1007/S12633-022-02209-1>

Koç, İ., Nzokou, P. & Cregg, B. (2022). Biomass allocation and nutrient use efficiency in response to water stress: insight from experimental manipulation of balsam fir, concolor fir and white pine transplants. *New Forests*, 53(5), 915–933. <https://doi.org/10.1007/S11056-021-09894-7/FIGURES/4>

Kumari, V. V., Banerjee, P., Verma, V. C., Sukumaran, S., Chandran, M. A. S., Gopinath, K. A., Venkatesh, G., Yadav, S. K., Singh, V. K. & Awasthi, N. K. (2022). Plant Nutrition: an effective way to alleviate abiotic stress in agricultural crops. *International Journal of Molecular Sciences* 2022, Vol. 23, Page 8519, 23(15), 8519. <https://doi.org/10.3390/IJMS23158519>

Li, Y., Liu, N., Fan, H., Su, J., Fei, C., Wang, K., Ma, F. & Kisekka, I. (2019). Effects of deficit irrigation on photosynthesis, photosynthate allocation, and water use efficiency of sugar beet. *Agricultural Water Management*, 223, 105701. <https://doi.org/10.1016/J.AGWAT.2019.105701>

- Liu, J., Hu, T., Feng, P., Yao, D., Gao, F. & Hong, X. (2021). Effect of potassium fertilization during fruit development on tomato quality, potassium uptake, water and potassium use efficiency under deficit irrigation regime. *Agricultural Water Management*, 250, 106831. <https://doi.org/10.1016/J.AGWAT.2021.106831>
- Lob, S., Sa'ad, N. S., Ibrahim, N. F., Soh, N. C., Shah, R. M. & Zaudin, M. S. H. (2023). Enhanced Growth of Chili (*Capsicum annuum* L.) by Silicon Nutrient Application in Fertigation System. *Malaysian Applied Biology*, 52(2), 13–19. <https://doi.org/10.55230/MABJOURNAL.V52I2.2648>
- Luo, W. et al. (2018). Effects of extreme drought on plant nutrient uptake and resorption in rhizomatous vs bunchgrass-dominated grasslands. *Oecologia*, 188(2), 633–643. <https://doi.org/10.1007/S00442-018-4232-1/TABLES/3>
- Manabe, S. (2019). Role of greenhouse gas in climate change**. *Tellus A: Dynamic Meteorology and Oceanography*, 71(1), 1–13. <https://doi.org/10.1080/16000870.2019.1620078>
- Marques, D. J., Bianchini, H. C., Maciel, G. M., de Mendonça, T. F. N. & Silva, M. F. e. (2022). Morphophysiological changes resulting from the application of silicon in corn plants under water stress. *Journal of Plant Growth Regulation*, 41(2), 569–584. <https://doi.org/10.1007/S00344-021-10322-5/FIGURES/11>
- Medyouni, I., Zouaoui, R., Rubio, E., Serino, S., Ahmed, H. Ben & Bertin, N. (2021). Effects of water deficit on leaves and fruit quality during the development period in tomato plant. *Food Science & Nutrition*, 9(4), 1949–1960. <https://doi.org/10.1002/FSN3.2160>
- Meunier, J. D., Barboni, D., Anwar-ul-Haq, M., Levard, C., Chaurand, P., Vidal, V., Grauby, O., Huc, R., Laffont-Schwob, I., Rabier, J. & Keller, C. (2017). Effect of phytoliths for mitigating water stress in durum wheat. *New Phytologist*, 215(1), 229–239. <https://doi.org/10.1111/NPH.14554>
- Mohamed, M., Abdallah, S., Mohamed, H., El-Bassiouny, S. & Abouseeda, M. A. (2019). Potential role of kaolin or potassium sulfate as anti-transpirant on improving physiological, biochemical aspects and yield of wheat plants under different watering regimes. *Bulletin of the National Research Centre* 2019 43:1, 43(1), 1–12. <https://doi.org/10.1186/S42269-019-0177-8>
- Moore, C. E., Meacham-Hensold, K., Lemonnier, P., Slattery, R. A., Benjamin, C., Bernacchi, C. J., Lawson, T. & Cavanagh, A. P. (2021). The effect of increasing temperature on crop photosynthesis: from enzymes to ecosystems. *Journal of Experimental Botany*, 72(8), 2822–2844. <https://doi.org/10.1093/JXB/ERAB090>
- Muller, B., Pantin, F., Génard, M., Turc, O., Freixes, S., Piques, M., & Gibon, Y. (2011). Water deficits uncouple growth from photosynthesis, increase C content, and modify the relationships between C and growth in sink organs. *Journal of Experimental Botany*, 62(6), 1715–1729. <https://doi.org/10.1093/JXB/ERQ438>

- Pereira, S. I. A., Abreu, D., Moreira, H., Vega, A. & Castro, P. M. L. (2017). *Plant growth-promoting rhizobacteria (PGPR) improve the growth and nutrient use efficiency in maize (Zea mays L.) under water deficit conditions*. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2020.e05106>
- Putti, F. F., de Queiroz Barcelos, J. P., Goes, B. C., Alves, R. F., Neto, M. M., da Silva, A. O., Filho, L. R. A. G., Zanetti, W. A. L. & de Souza, A. V. (2023). Effects of water deficit on growth and productivity in tomato crops irrigated with water treated with very low-frequency electromagnetic resonance fields. *Plants* 2023, Vol. 12, Page 3721, 12(21), 3721. <https://doi.org/10.3390/PLANTS12213721>
- 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(1), 10–16. <https://doi.org/10.1016/J.HPJ.2018.10.001>
- Ranjan, A., Sinha, R., Bala, M., Pareek, A., Singla-Pareek, S. L. & Singh, A. K. (2021). Silicon-mediated abiotic and biotic stress mitigation in plants: Underlying mechanisms and potential for stress resilient agriculture. *Plant Physiology and Biochemistry*, 163, 15–25. <https://doi.org/10.1016/J.PLAPHY.2021.03.044>
- Rocha, J. R., de Mello Prado, R. & de Cássia Piccolo, M. (2022). New outcomes on how silicon enables the cultivation of *Panicum maximum* in soil with water restriction. *Scientific Reports* 2022 12:1, 12(1), 1–13. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-05927-z>
- Rocha, J. R., de Mello Prado, R., Teixeira, G. C. M. & de Oliveira Filho, A. S. B. (2021). Si fertigation attenuates water stress in forages by modifying carbon stoichiometry, favouring physiological aspects. *Journal of Agronomy and Crop Science*, 207(4), 631–643. <https://doi.org/10.1111/JAC.12479>
- Rosa, L., Chiarelli, D. D., Rulli, M. C., Dell'Angelo, J. & D'Odorico, P. (2020). Global agricultural economic water scarcity. *Science Advances*, 6(18). https://doi.org/10.1126/SCIADV.AAZ6031/SUPPL_FILE/AAZ6031_TABLES_S2_TO_S5.XLSX
- Ruehr, N. K., Grote, R., Mayr, S. & Arneith, A. (2019). Beyond the extreme: recovery of carbon and water relations in woody plants following heat and drought stress. *Tree Physiology*, 39(8), 1285–1299. <https://doi.org/10.1093/TREEPHYS/TPZ032>
- Saja-Garbarz, D., Libik-Konieczny, M., Fellner, M., Jurczyk, B. & Janowiak, F. (2022). Silicon-induced alterations in the expression of aquaporins and antioxidant system activity in well-watered and drought-stressed oilseed rape. *Plant Physiology and Biochemistry*, 174, 73–86. <https://doi.org/10.1016/J.PLAPHY.2022.01.033>
- 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* 2021, Vol. 10, Page 259, 10(2), 259. <https://doi.org/10.3390/PLANTS10020259>

- Shao, H. B., Chu, L. Y., Jaleel, C. A. & Zhao, C. X. (2008). Water-deficit stress-induced anatomical changes in higher plants. *Comptes Rendus Biologies*, 331(3), 215–225. <https://doi.org/10.1016/J.CRVI.2008.01.002>
- Silva, J. L. F. da, Prado, R. de M., Alves, T. L., Lata-Tenesaca, L. F. & Soares, M. B. (2023). New strategy for silicon supply through fertigation in sugarcane integrating the pre-sprouted seedling phase and field cultivation. *Scientific Reports* 2023 13:1, 13(1), 1–10. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-27323-3>
- Singh, A., Kumar, A., Hartley, S., & Singh, I. K. (2020). Silicon: its ameliorative effect on plant defense against herbivory. *Journal of Experimental Botany*, 71(21), 6730–6743. <https://doi.org/10.1093/JXB/ERAA300>
- Singhal, R. K. et al. (2023). Beneficial elements: New Players in improving nutrient use efficiency and abiotic stress tolerance. *Plant Growth Regulation*, 100(2), 237–265. <https://doi.org/10.1007/S10725-022-00843-8/TABLES/4>
- Teixeira, G. C. M., de Mello Prado, R., de Oliveira, L. T., de Castro Souza, J. V. & Rocha, A. M. S. (2022a). Silicon fertigation with appropriate source reduces water requirement of maize under water deficit. *Plant and Soil*, 477(1–2), 83–97. <https://doi.org/10.1007/S11104-022-05446-W/FIGURES/8>
- Teixeira, G. C. M., de Mello Prado, R., de Oliveira, L. T., de Castro Souza, J. V., & Rocha, A. M. S. (2022b). Silicon fertigation with appropriate source reduces water requirement of maize under water deficit. *Plant and Soil*, 477(1), 83–97. <https://doi.org/10.1007/S11104-022-05446-W/FIGURES/8>
- Teixeira, G. C. M., Mello De Prado, R., Márcio, A., Rocha, S., Santana Batista De Oliveira Filho, A., Silveira Da Sousa Junior, G. & 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* 2022 12:1, 12(1), 1–18. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-21680-9>
- Teixeira, G. C. M., Mello Prado, R. de, Rocha, A. M. S., Silveira Sousa Junior, G. & Gratão, P. L. (2021). Beneficial Effect of Silicon Applied Through Fertigation Attenuates Damage Caused by Water Deficit in Sugarcane. *Journal of Plant Growth Regulation*, 1–16. <https://doi.org/10.1007/s00344-021-10510-3>
- Tittal, M., Mir, R. A., Jatav, K. S. & Agarwal, R. M. (2021). Supplementation of potassium alleviates water stress-induced changes in *Sorghum bicolor* L. *Physiologia Plantarum*, 172(2), 1149–1161. <https://doi.org/10.1111/PPL.13306>
- Thakur, A., Singh, A., Tandon, A. & Sharma, V. (2023). Insights into the molecular mechanisms of uptake, phytohormone interactions and stress alleviation by silicon: a beneficial but non-essential nutrient for plants. *Plant Growth Regulation*, 1–13. <https://doi.org/10.1007/s10725-023-01002-3>

- Thorne, S. J., Hartley, S. E. & Maathuis, F. J. M. (2020). Is Silicon a Panacea for Alleviating Drought and Salt Stress in Crops? *Frontiers in Plant Science*, *11*, 543584. <https://doi.org/10.3389/FPLS.2020.01221/BIBTEX>
- Tulva, I., Vålbe, M. & Merilo, E. (2023). Plants lacking OST1 show conditional stomatal closure and wildtype-like growth sensitivity at high VPD. *Physiologia Plantarum*, *175*(5), e14030. <https://doi.org/10.1111/PPL.14030>
- Urban, L., Aarouf, J. & Bidel, L. P. R. (2017). Assessing the effects of water deficit on photosynthesis using parameters derived from measurements of leaf gas exchange and of chlorophyll a fluorescence. *Frontiers in Plant Science*, *8*, 304622. <https://doi.org/10.3389/FPLS.2017.02068/BIBTEX>
- Wang, D., Hou, L., Zhang, L. & Liu, P. (2021). The mechanisms of silicon on maintaining water balance under water deficit stress. *Physiologia Plantarum*, *173*(3), 1253–1262. <https://doi.org/10.1111/PPL.13520>
- Waraich, E. A., Rashid, F., Ahmad, Z., Ahmad, R. & Ahmad, M. (2020). Foliar applied potassium stimulate drought tolerance in canola under water deficit conditions. *Journal of Plant Nutrition*, *43*(13), 1923–1934. <https://doi.org/10.1080/01904167.2020.1758132>
- Wasaya, A. et al. (2021). Foliar potassium sulfate application improved photosynthetic characteristics, water relations and seedling growth of drought-stressed maize. *Atmosphere* *2021*, Vol. *12*, Page 663, *12*(6), 663. <https://doi.org/10.3390/ATMOS12060663>
- Xu, R., Huang, J., Guo, H., Wang, C. & Zhan, H. (2023). Functions of silicon and phytolith in higher plants. *Plant Signaling & Behavior*, *18*(1). <https://doi.org/10.1080/15592324.2023.2198848>
- Yang, C., Zhang, J., Zhang, G., Lu, J., Ren, T., Cong, R., Lu, Z., Zhang, Y., Liao, S. & Li, X. (2022). Potassium deficiency limits water deficit tolerance of rice by reducing leaf water potential and stomatal area. *Agricultural Water Management*, *271*, 107744. <https://doi.org/10.1016/J.AGWAT.2022.107744>
- Zhang, X. & Cai, X. (2013). Climate change impacts on global agricultural water deficit. *Geophysical Research Letters*, *40*(6), 1111–1117. <https://doi.org/10.1002/GRL.50279>
- Zhao, W., Liu, L., Shen, Q., Yang, J., Han, X., Tian, F. & Wu, J. (2020). Effects of water stress on photosynthesis, yield, and water use efficiency in winter wheat. *Water* *2020*, Vol. *12*, Page 2127, *12*(8), 2127. <https://doi.org/10.3390/W12082127>
- Zia, R., Nawaz, M. S., Siddique, M. J., Hakim, S. & Imran, A. (2021). Plant survival under drought stress: Implications, adaptive responses, and integrated rhizosphere management strategy for stress mitigation. *Microbiological Research*, *242*, 126626. <https://doi.org/10.1016/J.MICRES.2020.126626>

CAPÍTULO 2 - Silício via fertirrigação, com e sem aplicação de potássio, melhora os aspectos fisiológicos do feijão comum cultivado em três regimes hídricos no campo¹

Resumo

Os eventos frequentes de seca têm induzido aumento nas áreas com cultivo irrigado do feijoeiro. Uma estratégia para potencializar a eficiência do uso da água e o ótimo crescimento da cultura seria com emprego do silício (Si) e potássio (K). Contudo, esse tema ainda não foi abordado e não existe conhecimento se a dose ótima de Si é alterada por regimes hídricos ou pelo status de K na planta, bem como, os mecanismos fisiológicos envolvidos. Para isso, realizou-se essa pesquisa objetivando avaliar os efeitos de doses de Si aplicada via fertirrigação em diferentes regimes hídricos, na ausência e na presença de adubação potássica nas trocas gasosas, na eficiência de uso da água e no crescimento da cultura do feijão cultivado sob condições de campo. Foram realizados dois experimentos, um com e outro sem fornecimento de K, considerando que o teor de potássio no solo foi de $6,4 \text{ mmol} \cdot \text{dm}^{-3}$ em ambos os experimentos e foi aplicada uma dose de reposição de 50 kg ha^{-1} no tratamento com e sem K, avaliando os mesmos tratamentos em ambos os experimentos. Os tratamentos consistiram em fatorial 3×4 , sendo três regimes hídricos: 80% (sem déficit hídrico), 60% (déficit hídrico moderado) e 40% (déficit hídrico severo) da capacidade de retenção de água no solo e quatro doses de Si fornecidas via fertirrigação: 0; 4; 8 e 12 kg ha^{-1} . A dose de Si para aplicação via fertirrigação que promoveu maior absorção do elemento na planta foi incrementada com a diminuição do teor de água no solo, ou seja, foram iguais a 6,6; 7,0 e $7,1 \text{ kg ha}^{-1}$, para o regime sem déficit hídrico, déficit hídrico moderado e déficit hídrico severo, respectivamente. A aplicação de Si via fertirrigação melhorou as condições das plantas que foram submetidas, especialmente ao déficit hídrico severo, independente do status de K, refletido no conteúdo relativo de água, potencial hídrico foliar e resistência da membrana que influenciaram diretamente no conteúdo de pigmentos e nas taxas de trocas gasosas. Os efeitos fisiológicos promoveram melhoria na fotossíntese das plantas sob déficit hídrico que mitigaram as perdas na produção de massa seca. Os resultados desta pesquisa indicam pela primeira vez nesta espécie que o Si pode ser utilizado em cultivos irrigados para potencializar a eficiência de uso da irrigação, bem como, para áreas de cultivo limitadas pela baixa precipitação e que tenha restrição hídrica. A implicação global desses resultados é muito relevante dada as mudanças climáticas que atingem todo o mundo causando maior frequência de secas nos cultivos.

Palavras-chave: *Phaseolus vulgaris L.*, irrigação, eficiência do uso da água, silicato, fotossíntese, pigmentos fotossintetizantes, água no solo.

¹Publicado na revista Scientific Reports em 2024.

DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-024-52503-8>

1. INTRODUÇÃO

O constante crescimento da população e o uso da terra para a agricultura tem aumentado a demanda mundial de recursos hídricos (Phogat et al., 2018). Atualmente 75% do consumo mundial da água é utilizado para a produção agrícola (Solangi et al., 2019), contudo, cerca de 35% da água é perdida por irregularidade na infraestrutura dos sistemas de irrigação em campo ou na sua distribuição (Kamienski et al., 2018; Koronkevich et al., 2022; Venkatesh et al., 2022).

A disponibilidade de água nos sistemas produtivos está sendo cada vez mais afetada pelas mudanças climáticas que envolvem aumento na temperatura do ar, diminuição da ocorrência de chuvas e prolongação das secas (Malek et al., 2018; Pizarro et al., 2022). Estima-se que para 2050, a demanda de água para irrigação aumentará 11% (Costa et al., 2023), especialmente devido a perdas por evaporação que devem aumentar como resultado das altas temperaturas e flutuação nas precipitações (Puy et al., 2020). Assim, cenários futuros indicam conflitos pela competitividade da água para irrigação especialmente em áreas com recursos hídricos diminuídos (Alejo & Alejandro, 2022).

A implementação de estratégias é necessária para melhorar a eficiência do uso da água e promover o uso responsável deste recurso. A nutrição equilibrada pode ser uma alternativa importante para a agricultura irrigada sustentável ao utilizar elementos e nutrientes com potencial para aumentar a eficiência de uso de água, como o potássio (K) e o silício (Si). O K é um nutriente que contribui na manutenção do ajuste osmótico, da abertura e fechamento dos estômatos, e que está relacionado diretamente com a taxa transpiratória das plantas, resultando em maior eficiência do uso da água (Hattori et al., 2005). O Si é um elemento benéfico que tem sido indicado como atenuador dos danos causados pelo déficit hídrico (de Oliveira Filho et al., 2021; Pei et al., 2010; Teixeira, de Mello Prado, et al., 2022a; Teixeira, Mello De Prado, et al., 2022).

O efeito benéfico do Si no alívio dos danos causados pelo déficit hídrico já foi demonstrado em diversas espécies, especialmente do grupo das Poaceae, como milho (Amin et al., 2014; Teixeira, de Mello Prado, et al., 2022a), em mudas pré-brotadas de cana-de-açúcar (Teixeira et al., 2021), em soqueiras de cana-de-açúcar (de Oliveira Filho et al., 2021), bem como, em plantas forrageiras (Rocha et al., 2021).

Contudo, os benefícios do Si são influenciados pela capacidade das plantas em absorver e acumular o elemento (Frew et al., 2018). Por essa razão, a maioria dos estudos com Si foram desenvolvidos em plantas acumuladoras do elemento (*Poaceae*), que possuem mecanismo de absorção ativo por transportadores (Mandlik et al., 2020).

As evidências científicas em plantas que absorvem o Si passivamente, seguindo o gradiente de transpiração, como o feijão, ainda são escassas (Mitani-Ueno & Ma, 2021). Estudos pontuais no feijoeiro cultivado em sistema hidropônico demonstraram que o Si melhorou a absorção de K e conseqüentemente, aumentou a taxa fotossintética, pigmentos fotossintéticos e diminuiu o estresse oxidativo, resultando em uma maior eficiência no uso da água (dos Santos Sarah et al., 2021). No entanto, na cultura da fava que é da família das Fabaceas, o Si aliviou os danos causados por déficit hídrico, aumentando as trocas gasosas e o conteúdo de água nos tecidos (Desoky et al., 2021).

O aumento do uso de Si em condições de campo e a limitação causada pela baixa absorção potencial de Si em plantas não-acumuladoras podem ser superados melhorando a tecnologia para aplicação. A fertirrigação de Si pode promover aumento na absorção desse elemento porque permite o uso de solução de alta qualidade, tendo baixa taxa de polimerização do Si. A diminuição no processo de polimerização, deve-se à baixa concentração de Si em uso ($<3,0 \text{ mmol L}^{-1}$), que mantém a forma monomérica (H_4SiO_4) absorvida pelas plantas, considerando que a polimerização é iniciada em concentrações do elemento acima de $3,5 \text{ mmol L}^{-1}$ (Birchall, 1995). O uso de fonte de Si solúvel adequadamente estabilizada com sorbitol, também colabora para manter a estabilidade das formas monoméricas de Si (Babiker & Duncan, 1974). Esses fatores, aliados à alta frequência de aplicação, proporcionam uma absorção constante do elemento que podem aumentar com eficiência a quantidade de Si acumulada nas plantas, mas isso precisa ser estudado em ensaios ou condições de campo em plantas não acumuladoras, a exemplo do feijoeiro.

Diante do avanço do cultivo irrigado do feijão tem-se opção do fornecimento de Si via fertirrigação pois pode potencializar o crescimento sustentável da planta. No entanto, faltam pesquisas nesta espécie para maior compreensão dos mecanismos

fisiológicos induzidos pela ação do Si e descobrir se a melhor dose de Si é alterada em diferentes regimes hídricos ou pelo status de K na planta. Assim, postulamos que o efeito benéfico do Si em estudos de campo com feijoeiro pode favorecer as trocas gasosas devido ao aumento de pigmentos fotossintetizantes, incrementando a eficiência do uso da água e a conversão de massa seca desta planta (i); e que esses benefícios do Si podem ocorrer em regimes hídricos deficiente e também suficiente de água (ii); e ainda que existe a necessidade de usar maior dose de Si nos regimes hídricos deficientes devido a menor absorção de Si, em relação ao regime suficiente de água, independente do status de K (iii).

Se essas hipóteses forem aceitas será possível compreender melhor o papel do Si em mecanismos fisiológicos da cultura do feijão responsáveis para aumentar o crescimento da planta. Dessa forma, será possível adotar tecnologia precisa a partir de doses ótimas de Si para regiões de cultivos com ótima disponibilidade de água, mas também para regiões com disponibilidade limitada de água, independente do status de K na planta. Portanto, pela primeira vez será conhecido que o benefício do Si não se restringe apenas em plantas com estresse como é mais indicado na literatura em outros cultivos (Cooke & Leishman, 2016). O benefício do Si em sistemas de produção em campo sem estresse colabora para potencializar a eficiência de uso da água e a sustentabilidade de sistemas de cultivo irrigado do feijão com implicação global dada ao fato que as mudanças climáticas e restrição hídrica atingem vastas áreas de cultivo desta espécie exigindo o uso de sistemas irrigados de produção.

Para isso, foi desenvolvida essa pesquisa objetivando-se avaliar os efeitos de doses de Si aplicadas via fertirrigação em diferentes regimes hídricos sem e com déficit hídrico moderado e severo, na ausência e na presença de adubação potássica nas trocas gasosas, na eficiência de uso da água e no crescimento da cultura do feijão cultivado sob condições de campo.

2. MATERIAL E METODOS

2.1 Condições de crescimento e material vegetal

A pesquisa foi realizada em condições de campo com a cultura do feijão na Fazenda de Ensino, Pesquisa e Extensão da Universidade Estadual Paulista, localizada em Jaboticabal (-21° 14' 50.7" de latitude e 48° 17' 01.8" de longitude, 546

m de altitude), São Paulo, Brasil. A duração do experimento foi maio a agosto de 2022 e foi registrado os dados de temperatura, umidade relativa do ar, radiação global e precipitação pluvial na área experimental (Figura 1), que foram importantes para determinar as lâminas de irrigação.

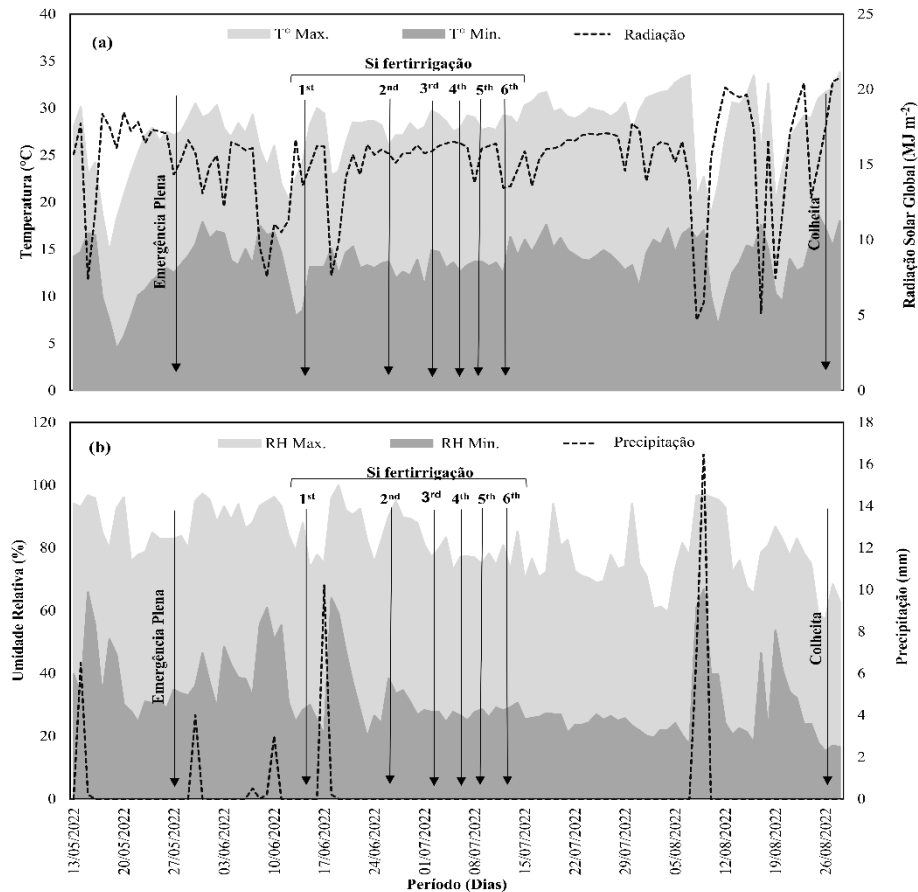


Figura 1. Condições experimentais na área de realização do experimento em campo. Temperatura máxima (T° Max.), temperatura mínima (T° Min.) e radiação global (MJ m⁻²) (a) umidade relativa máxima (RH Max.), umidade relativa mínima (RH Min.) e precipitação pluvial (P) (b).

Os elementos meteorológicos utilizados neste trabalho foram extraídos de um conjunto de dados pertencentes ao acervo da área de agrometeorologia do departamento de ciências exatas. As observações realizadas na estação agroclimática do campus de Jaboticabal são coletadas, digitadas em um formato padronizado, sendo realizado o controle de consistência e qualidade. As médias diárias mensais e anuais são então obtidas e repassadas aos usuários.

O solo da área experimental foi classificado como um Latossolo Vermelho eutroférico (Andrioli e Centurion, 1999) que corresponde na classificação americana (Soil Taxonomy) como Oxisol. Previamente a instalação da pesquisa foram coletadas amostras de solos da camada de 0-20 e 20-40 cm de profundidade para análise química para fins de fertilidade (Bizari et al., 2013; Rajj et al., 2001; Rowse & Barnes, 1979). O teor de Si disponível foi de 3,0 mg dm⁻³ e foi considerado baixo no solo (Korndorfer et al., 2004). Os resultados da análise química do solo na camada de 0-20 e 20-40 cm de profundidade, são apresentados na Tabela 1.

Tabela 1. Atributos químicos do solo em profundidades de 0-20 e 20-40cm.

Prof	pH	OM	P	S	Ca	Mg	K	Al	H + Al	SB ^a	T ^b	V ^c	m ^d	B	Cu	Fe	Mn	Zn
cm	CaCl ₂	g dm ⁻³	mg dm ⁻³		mmol _c dm ⁻³				%			mg dm ⁻³						
0-20	6,2	20,5	59	11	37	17	6,2	1	22,5	60,6	82,9	73	1	0,41	6,4	11	23,6	3,9
20-40	5,6	19	36	13	40	18	6,4	0	23	64	87,2	73	0	-	-	-	-	-

^a = soma de bases (SB = Ca²⁺ + Mg²⁺ + K⁺); ^b = capacidade de troca de cátions (T = SB + H+Al); ^c = saturação de bases (V=SBx100/T); ^d = saturação de alumínio.

O preparo do solo da área experimental foi realizado em sistema de plantio convencional a partir da subsolagem e da gradagem com grade aradora pesada e leve.

A cultivar de feijão utilizada nesta pesquisa foi a Carioca BSR FC 402. As sementes foram coletadas em terras públicas, sendo concedidas pela Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária do Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento, Brasil. Todos os estudos de plantas foram realizados de acordo com as diretrizes e regulamentações institucionais, nacionais ou internacionais relevantes. Nossa pesquisa não foi realizada com espécies ameaçadas de extinção e foi conduzida de acordo com a Declaração da Política da IUCN sobre Pesquisa Envolvendo Espécies Ameaçadas de Extinção.

As plantas tinham um ciclo normal de 85 a 94 dias (da emergência à maturação), conhecido por sua alta produtividade, valor nutricional e resistência a pragas e doenças (Embrapa, 2017). A densidade de plantio foi fixada em 333.000 plantas por hectare.

2.2 Tratamentos e delineamento experimental

A pesquisa corresponde a dois experimentos na mesma área de cultivo do feijoeiro contendo dois status de K. 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) e quatro doses de Si fornecidas via fertirrigação: 0; 4; 8 e 12 kg⁻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 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). As doses 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 de Si e, portanto, sem risco de polimerização do elemento.

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 & Duncan, 1974), diminuindo os riscos de polimerização do Si na solução aplicada.

As adubações foram realizadas baseando-se nos teores nutricionais do solo e seguindo recomendação de adubação para a cultura do feijão (Ambrosano et al.,

1997). A adubação fosfatada foi realizada aplicando dose de 40 kg ha⁻¹ de P₂O₅ na forma de superfosfato simples no sulco de semeadura. A adubação nitrogenada foi realizada via fertirrigação utilizando ureia e sendo 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 K₂O na forma de KCl aplicado à lanço e manualmente aos 14 DAE. Na ausência de adubação potássica, as plantas não receberam fornecimento de K, mas receberam a adubação dos demais nutrientes.

Foi realizado manejo fitossanitário para controle da lagarta rosca (*Agrotis ipsilon*) aos 6 DAE usando Clorantraniliprole e Lambda-cialotrina (250 mL) + Óleo mineral (150 mL adjuvante) em 150 L de calda aplicada com vazão de 335 L ha⁻¹. Para o controle da mosca branca (*Bemisia tabaci*) e fungos uma aplicação preventiva foi realizada aos 14 DAE utilizando Tiametoxame (100 g L⁻¹) + Fluxapiraxade e Piraclostrobina (150 mL) + Óleo mineral (150 mL) em 120 L de calda aplicada com vazão de 250 L ha⁻¹. Aos 30 e 42 DAE foram realizadas aplicações para controle da mosca branca usando Tiametoxame (100 g L⁻¹) + Óleo mineral (150 mL) em 120 L de calda aplicada com vazão de 250 L ha⁻¹. O controle das plantas daninhas foi realizado de maneira manual até o fechamento das linhas pelas plantas nas parcelas.

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 (Dripnet PC 16250), utilizando uma linha de gotejo para cada linha de cultivo. 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 cm³ cm⁻³ e o ponto de murcha permanente (PMP) em 0,13 cm³ cm⁻³. A partir da CC e PMP, determinou-se a quantidade de água disponível (AD) em 0,28 cm³ cm⁻³ e, conseqüentemente, a capacidade total de água disponível (CAD) utilizando AD e sistema radicular efetivo do feijoeiro 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 déficits hídricos moderado e severo foram impostos no período pré-floração (R5). 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 (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 esquema de irrigação recomendado pela FAO, ou seja, 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 (Webber et al., 2006)

As plantas foram cultivadas durante todo o ciclo fenológico e as análises morfológicas, fisiológicas e nutricionais foram realizadas na fase de formação de

vagens (R7). As análises foram determinadas utilizando a coleta em 10 plantas por parcela coletadas na área útil.

2.3 Análises realizadas

2.3.1 Fluorescência e eficiência quântica do fotossistema II (Fv/Fm)

Os dados de fluorescência inicial (F_o) e máxima (F_m) e eficiência quântica do fotossistema II (F_v/F_m) foram coletados no folíolo central da quinta folha completamente desenvolvida. As leituras foram realizadas entre 7 e 9:30 horas da manhã utilizando um fluorômetro portátil (Os30P+, Opti-Sciences Inc., EUA) (LICHTENTHALER et al., 2005) sendo as folhas mantidas no escuro por 30 minutos. Esta variável foi medida aos 64 DAE.

2.3.2 Conteúdo de clorofila e carotenoides

Coletaram-se cinco discos foliares de 26,4 mm² cada do terço médio da lâmina foliar da quarta folha completamente desenvolvida, sendo imediatamente pesados para determinação da massa fresca. As amostras foram submetidas a despigmentação em acetona a 80%. As leituras foram realizadas em um espectrofotômetro (DU640, Beckman, EUA) a 663 nm para clorofila a (Chla), 647 nm para clorofila b (Chlb) e 470 nm para carotenoides (Lichtenthaler, 1987). Os resultados foram expressos em mg g⁻¹ de massa fresca. Esta variável foi medida aos 65 DAE.

2.3.3 Trocas gasosas foliares

A fotossíntese líquida (A), taxa de transpiração (E), condutância estomática (G_s) e concentração interna de C (C_i) foram medidas usando um analisador de gás infravermelho aberto (LcPro-SD, ADC BioScientificLtd., RB). A câmara IRGA foi irradiada com uma densidade de fluxo de fótons fotossintéticos de 1200 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$, sendo determinadas no folíolo central da quinta folha completamente desenvolvida. A leitura foi realizada no período entre 9 e 11 horas da manhã. A partir da relação entre A e E foi determinada a eficiência intrínseca de uso da água ($EUA = A/E$). A eficiência instantânea de carboxilação foi determinada com a relação A e C_i ($EIC = A/C_i$). As leituras foram tomadas somente nas plantas que não receberam adubação potássica. Esta variável foi medida aos 80 DAE.

2.3.4 Conteúdo relativo de água

Foram coletados dez discos (26,4 mm² cada) da quinta folha completamente desenvolvida, sendo imediatamente pesados para obter a massa fresca (Mf). Posteriormente, as amostras foram reidratadas em água deionizada por 6 horas para obter a massa túrgida (Mt) e secas em estufa de circulação forçada de ar a 80°C por 24 horas, para obter a massa seca (Ms). Os valores foram determinados pela equação $[(Mf-Ms)/(Mt-Ms)] \times 100$ (Barrs & Weatherley, 1962). Esta variável foi medida aos 65 DAE

2.3.5 Potencial hídrico foliar (Ψ_w)

Foi determinado a partir de avaliações na quinta folha completamente desenvolvida, com uma câmara de pressão de Scholander (3000F01, Soil Moisture Equipment, EUA), aplicando-se pressão até que houvesse exsudação na área do corte. As medidas foram realizadas entre 5 e 7 horas da manhã (Turner, 1981). Esta variável foi medida aos 70 DAE.

2.3.6 Índice de extravasamento de eletrólitos

Dez discos foliares (26,4 mm² cada) foram coletados da quarta folha completamente desenvolvida, e emergidos em água deionizada por 2 horas; seguidamente foi realizado uma leitura da condutividade elétrica (EC1) da solução usando um medidor de condutividade (AK51, Akso, BR). As amostras foram autoclavadas a 121°C por 20 min e após o resfriamento uma nova leitura de condutividade elétrica foi realizada (EC2). O extravasamento de eletrólitos foi determinado considerando a fórmula: $EC1/EC2 \times 100$ (Dionisio-Sese & Tobita, 1998). Esta variável foi medida aos 65 DAE.

2.3.7 Produção de massa seca

A parte aérea das plantas foi coletada, separada em folhas e hastes; e então lavada em água corrente, solução detergente (0,1% v/v), solução de HCl (0,3% v/v) e em água deionizada. O material vegetal foi colocado em estufa de circulação forçada de ar para secar (TE-394/3-MP, Tecnal, BR) (65±5°C), até atingir uma massa constante e em seguida foi pesado em balança analítica. Esta variável foi medida aos 71 DAE.

2.3.8 Análise foliar de Si e de K

As amostras coletadas para determinar a produção de massa seca foram previamente moídas em moinho do tipo Willey (folhas+hastes). O teor de Si foi obtido a partir da extração do elemento com solução de peróxido de hidrogênio e hidróxido de sódio (Kraska & Breitenbeck, 2010). Mediu-se a absorvância do extrato, em 410nm com espectrofotômetro (B442, Micronal, BR) (Korndörfer et al., 2004).

Os teores foliares de K foram determinados mediante digestão da amostra com ácido perclórico e nítrico, e a determinação do teor de potássio foi realizada por espectrofotometria de absorção atômica com chama de ar-acetileno (Bataglia et al., 1983). Com base nos teores de Si e de K na massa seca da parte aérea, calculou-se o acúmulo de Si e K, conforme a equação:

Acúmulo de Si ou K (mg/planta)

$$= \text{massa seca da parte aérea (g/planta)} \times \text{teor de Si ou K (mg kg}^{-1}\text{)}$$

2.4 Análise estatística

Os dados foram submetidos a 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 polinomial. Os dados qualitativos, correspondentes aos regimes hídricos, foram analisados usando teste de comparação de médias de Tukey ($p \leq 0,05$).

A diferença entre os tratamentos também foi avaliada por análise hierárquica de agrupamento em que a distância euclidiana foi utilizada como coeficiente de similaridade. Além disso, uma rede de correlação foi utilizada para expressar graficamente a relação funcional entre as estimativas dos coeficientes de correlação de Pearson entre as variáveis, onde a proximidade entre os nós (traços) foi proporcional ao valor absoluto da correlação entre esses nós. As correlações positivas foram destacadas em verde, enquanto as negativas foram representadas em vermelho. As análises estatísticas foram realizadas usando a linguagem de programação R (versão 4.3.1, R Core Team).

3. RESULTADOS

3.1 Acúmulo de silício e potássio

O acúmulo de Si nas plantas sem adubação com K apresentou efeitos interativos entre os regimes hídricos e as doses de Si ($p < 0,01$) (Fig. 2a), enquanto nas plantas com adubação potássica ocorreu apenas efeito isolado dos fatores regime hídrico e doses de Si ($p < 0,01$) (Fig. 2b). As doses de Si proporcionaram acúmulo de Si seguindo ajuste polinomial quadrático nos três regimes hídricos e em ambas as condições de K. Nas plantas sem adubação potássica, os máximos acúmulos de Si foram de 68,6; 38,1 e 21,3 mg por planta de Si, obtido nas doses 6,8; 6,7 e 6,5 kg ha⁻¹ de Si, respectivamente, para WWD, MWD e SWD (Fig. 2a). Plantas com adubação potássica apresentaram os máximos acúmulos de Si iguais a 59,7; 37,7 e 21,3 mg por planta, obtidos nas doses 5,8; 6,1 e 6,9 kg ha⁻¹, respectivamente, para WWD, MWD e SWD (Fig. 2b). O menor acúmulo de Si foi observado nos regimes MWD e SWD em todas as doses de Si avaliadas em relação à condição de WWD, e independente da condição de K.

Os fatores regime hídrico e doses de Si influenciaram de forma isolada o acúmulo de K nas plantas em ambas as condições de adubação potássica ($p < 0,01$). As doses de Si promoveram ajuste polinomial quadrático para todos os regimes hídricos (Fig. 2c-d). Plantas sem adubação com K apresentaram máximos acúmulos de K de 558,4; 398,1 e 310,3 mg por planta, nas doses de Si iguais a 6,9; 8,8 e 6,6 kg ha⁻¹, respectivamente. Os acúmulos máximos de K nas plantas que receberam adubação potássica foram de 627,9; 459,4 e 371,2 mg por planta nas doses 6,8; 9,3 e 9,4 kg ha⁻¹ de Si respectivamente, para os regimes de WWD, MWD e SWD. Sem fornecimento de Si (0 kg ha⁻¹) plantas sob o regime hídrico MWD e SWD apresentaram os menores acúmulos de K sem adubação potássica e com adubação potássica em relação à condição de WWD. Contudo, sem adubação com K as doses 8 e 14 kg ha⁻¹ de Si apresentaram distinção entre os regimes quanto ao acúmulo de K (Fig. 2c), enquanto com adubação potássica isso ocorreu nas doses 0 e 4 kg ha⁻¹ de Si (Fig. 2d).

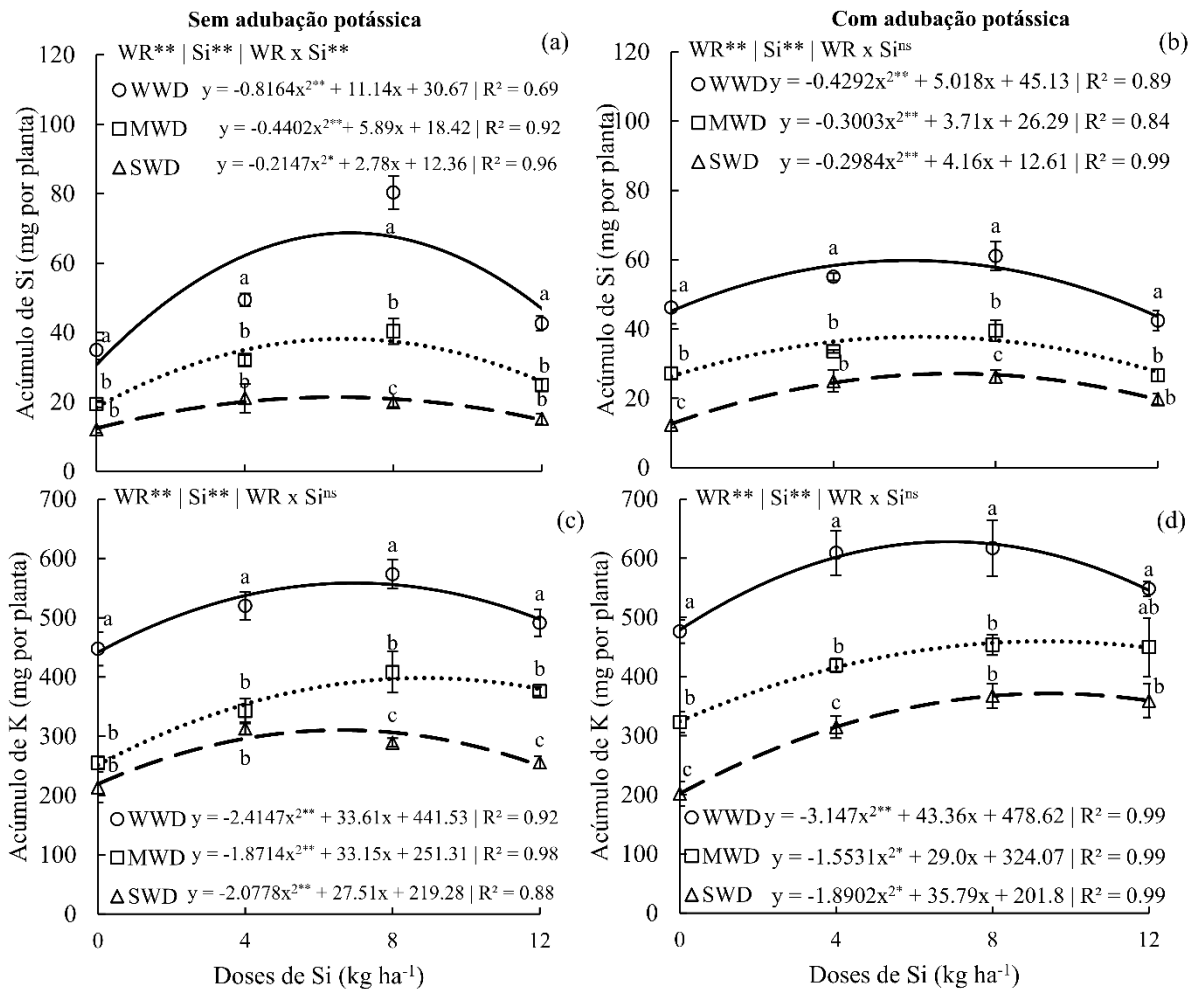


Figura 2. Acúmulo de silício (Si) (a, b) e acúmulo de potássio (K) (c, d) na parte aérea de plantas de feijão cultivada sem déficit hídrico – WWD (80% da capacidade de retenção de água - WRC), com déficit hídrico moderado – MWD (60% de WRC) e com déficit hídrico severo – SWD (40% de WRC); combinado com quatro doses de Si (Si) fornecidas via fertirrigação: 0, 4, 8 e 12 kg ha⁻¹; na ausência e presença de 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.

3.2 Efeitos do silício no estado hídrico das plantas

O conteúdo relativo de água e potencial hídrico nas plantas sem adubação potássica e com adubação potássica apresentaram efeitos apenas para os fatores isolados (regime hídrico e doses de Si) (todos a $p < 0,01$), com ajuste polinomial quadrático para todos os regimes hídricos avaliados (Fig. 3a-d). Os máximos conteúdos de água, 95,4; 89,1 e 86%, foram observados em plantas sem adubação potássica nas doses de Si iguais a 7,3; 7,4 e 7,6 kg ha⁻¹ para WWD, MWD e SWD,

respectivamente (Fig. 3a). Para as plantas com adubação potássica as doses de Si 8,0; 7,9 e 7,1 kg ha⁻¹ proporcionaram os máximos conteúdos de água, 89,0; 86,3 e 81,7% (Fig. 3b). Sem adubação potássica as plantas sob WWD apresentaram maiores conteúdos de água apenas na dose 8 kg ha⁻¹ de Si em relação às plantas sob SWD. Contudo, com adubação potássica isso foi observado nas doses 0; 4 e 12 kg ha⁻¹ de Si.

O potencial hídrico apresentou efeitos de interação ($p < 0,01$) entre regimes hídricos e doses de Si sem adubação potássica e com adubação potássica. Os máximos potenciais hídricos foliares em plantas sem adubação com K foram -0,22; 0,21 e -0,32 MPa nas doses de Si 5,8; 7,1 e 6,0 para os regimes hídricos WWD, MWD e SWD, respectivamente (Fig. 3c). Contudo, em plantas com adubação potássica as doses de Si iguais a 8,3; 6,2 e 7,8 kg ha⁻¹ proporcionaram respectivamente os máximos potenciais hídricos foliares -0,21; -0,29 e -0,33 MPa (Fig. 3d). Em ambas as condições de K, plantas sob SWD apresentaram menores potenciais hídricos em todas as doses de Si, contudo, plantas sem adubação potássica no regime hídrico MWD que receberam a dose de 4 kg ha⁻¹, apresentaram potencial hídrico igual às plantas sob WWD.

O extravasamento de eletrólitos em plantas sem adubação potássica e com adubação potássica apresentaram efeitos da interação (WR x Si) ($p < 0,05$ e $p < 0,01$, respectivamente), com ajuste polinomial quadrático decrescente (Fig. 3e, f). Os mínimos extravasamentos de eletrólitos sem adubação potássica ocorreram nas doses de Si 6,6; 5,2 e 8,0 kg ha⁻¹ com valores de 14,9; 16,5 e 15,1 % para os regimes hídricos WWD, MWD e SWD, respectivamente (Fig. 3e). Plantas com adubação potássica apresentaram os mínimos extravasamentos (15,4; 14,3 e 15,4 %) nas doses 5,5; 7,4 e 7,7 kg ha⁻¹ de Si (Fig. 3f). O SWD em ambas as condições de K apresentaram maiores extravasamentos na dose 0 kg ha⁻¹ de Si. Contudo, na dose 8 kg ha⁻¹ de Si sem adubação potássica, plantas sob SWD e WWD apresentaram menores extravasamento de eletrólitos, em relação ao MWD, e nas plantas com adubação potássica isso ocorreu para SWD.

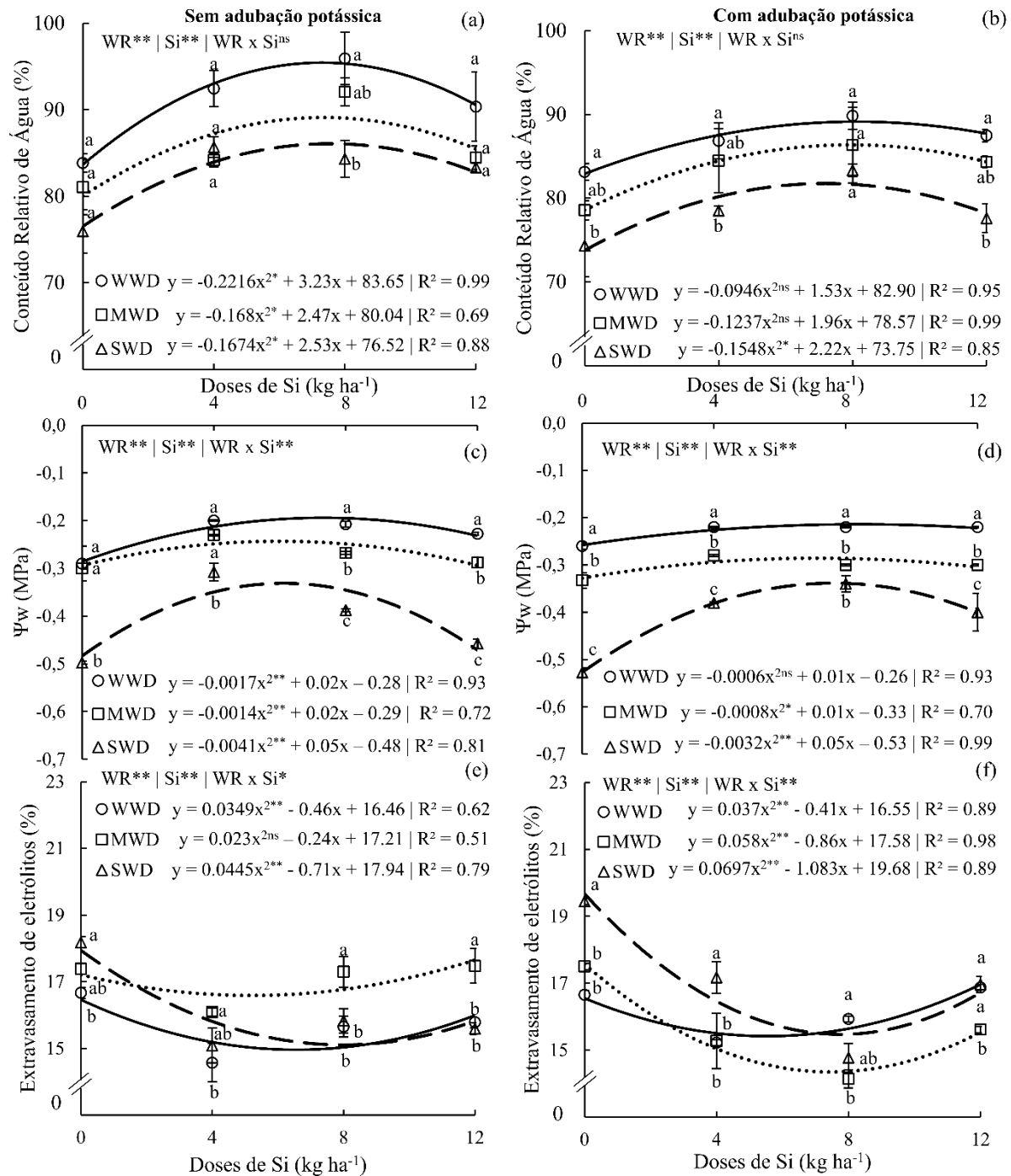


Figura 3. Conteúdo relativo de água (a, b), potencial hídrico (Ψ_w) (c, d) e extravasamento de eletrólitos (e, f) em plantas de feijão cultivada sem déficit hídrico – WWD (80% da capacidade de retenção de água - WRC), com déficit hídrico moderado – MWD (60% de WRC) e com déficit hídrico severo – SWD (40% de WRC); combinado com quatro doses de Si (Si) fornecidas via fertirrigação: 0, 4, 8 e 12 kg ha⁻¹; na ausência e presença de 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.

3.3 Efeitos do silício nos parâmetros da fotossíntese

Os pigmentos fotossintetizantes Chla apresentaram efeitos interativos dos fatores regime hídricos e doses de Si em plantas sem adubação potássica e com adubação potássica (Fig. 4a, b). O efeito das doses de Si proporcionou ajuste polinomial quadrático para os três regimes hídricos em ambas as condições de adubação potássica. Contudo, para Chlb, apenas plantas com adubação com K houve efeito interativo ($p < 0,01$) (Fig. 4d) seguindo o mesmo ajuste na regressão. Plantas sem adubação potássica tiveram pontos de máximo teor de Chla de 0,27; 0,26 e 0,25 mg g^{-1} nas doses de Si de 5,7; 6,2 e 5,5 kg ha^{-1} , respectivamente, para WWD, MWD e SWD (Fig. 4a). Plantas que receberam adubação com K, apresentaram os máximos teores de Chla de 0,26; 0,29 e 0,28 mg g^{-1} nas doses 6,6; 6,9 e 7,1 kg ha^{-1} de Si (Fig. 4b).

Nas plantas sem adubação com K e sem Si (0 kg ha^{-1} de Si), as plantas sob WWD apresentaram maior teor de Chla em relação às plantas sob MWD e SWD. Contudo, na maior dose de Si (12 kg ha^{-1}) as plantas sob SWD apresentam maior teor deste pigmento. Os máximos teores de Chlb foram de 0,45; 0,42 e 0,49 mg g^{-1} ocorrendo nas doses de Si de 10,0; 6,2 e 12,5 kg ha^{-1} de Si em plantas sem adubação potássica (Fig. 4c). Nas plantas com adubação potássica, os máximos teores de Chlb foram de 0,43; 0,43 e 0,44 mg g^{-1} obtidos nas doses de 8,3; 6,0 e 6,6 kg ha^{-1} de Si respectivamente, para WWD, MWD e SWD (Fig. 4d). As plantas sem adubação potássica e com adubação potássica sob MWD, apresentaram maior teor de Chlb na dose 4 kg ha^{-1} de Si, mas na maior dose de Si (12 kg ha^{-1}) apenas plantas sob SWD apresentaram maior teor deste pigmento. Em plantas com adubação potássica, o déficit hídrico seja moderado ou severo, elevaram o teor de Chlb apenas na dose 8 kg ha^{-1} .

Os teores de carotenoides em plantas de feijão sem adubação potássica foram influenciados pelos fatores isolados ($p < 0,01$) (regime hídrico e doses de Si), enquanto em plantas com adubação potássica houve efeito da interação entre os fatores (WR x Si) ($p < 0,01$). As duas condições de K apresentaram ajuste polinomial quadrático dos regimes hídricos de acordo com as doses crescentes de Si (Fig. 4e, f). As plantas sem adubação potássica apresentaram teor de carotenoides foliares máximos de 0,75;

0,68 0,76 mg g⁻¹ nas doses de Si de 8,8; 6,0 e 8,3 kg ha⁻¹ respectivamente, para WWD, MWD e SWD (Fig. 4e). Plantas com adubação potássica obtiveram máximos teores de carotenoides de 0,63; 0,80 e 0,70 mg g⁻¹ nas doses de 5,5; 7,1 e 6,3 kg ha⁻¹ de Si, para WWD, MWD e SWD, respectivamente (Fig. 4f). Ainda nesta condição de K, as doses intermediárias de Si (4 e 8 kg ha⁻¹) nas plantas sob MWD e SWD, apresentaram maiores teores de carotenoides em relação às plantas cultivadas sob WWD.

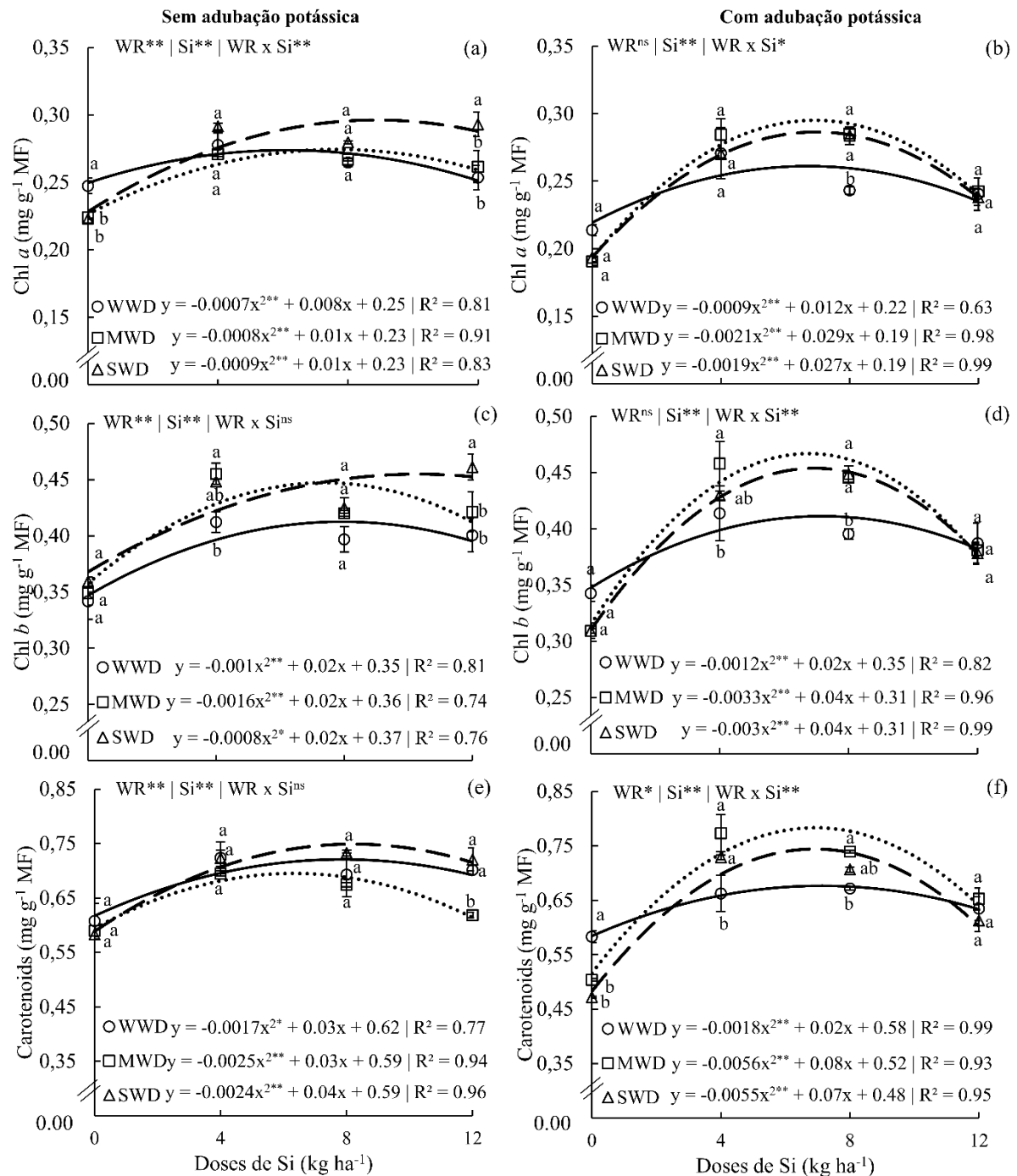


Figura 4. Teor de clorofila *a* (Chl *a*) (a, b), de clorofila *b* (Chl *b*) (c, d) e carotenoides (e, f) em plantas de feijão cultivada sem déficit hídrico – WWD (80% da capacidade de retenção de água - WRC), com déficit hídrico moderado – MWD (60% de WRC) e com déficit hídrico severo – SWD (40% de WRC); combinado com doses de Si (Si) fornecidas via fertirrigação: 0, 4, 8 e 12 kg ha⁻¹; na ausência e presença de 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. MF: massa fresca.

Os fatores isolados regime hídrico e doses de Si proporcionaram efeito para F_o e F_m nos três regimes hídricos em ambas as condições de adubação potássica (Fig. 5a-d), bem como, para F_v/F_m em plantas sem adubação potássica (Fig. 5e). O efeito da interação (WR x Si) foi significativo apenas para F_o e F_v/F_m com adubação potássica ($p < 0,05$) (Fig. 5f).

Os valores de F_o , F_m e F_v/F_m em plantas sem adubação potássica e com adubação potássica apresentaram ajuste polinomial quadrático com as doses de Si aplicadas (Fig. 5a-f). Os valores máximos em plantas sem adubação potássica foram de 109,8; 106,1 e 102,2 para F_o nas doses de 5,1; 6,1 e 5,2 kg ha⁻¹ de Si; de 488,9; 482,7 e 466,9 para F_m nas doses de 8,6; 7,8; 7,9 kg ha⁻¹ de Si; e de 0,79; 0,78 e 0,75 para F_v/F_m nas doses de 5,6; 5,6 e 6,0 kg ha⁻¹ de Si, respectivamente, para os regimes hídricos WWD, MWD e SWD. Para as plantas que receberam adubação potássica os resultados máximos foram 105,3; 99,3 e 94,7 para F_o com doses de 5,3; 7,4 e 7,1 kg ha⁻¹ de Si; 502,1; 463,3 e 450,0 para F_m com doses de 6,2; 7,3 e 7,0 de kg ha⁻¹ de Si e 0,804; 0,771 e 0,782 para F_v/F_m com doses de 7,5; 8,7 e 8,8 kg ha⁻¹ de Si. As plantas sob SWD e sem receber Si via fertirrigação apresentaram menores valores de F_v/F_m nas duas condições de K. Contudo, apenas na dose 8 kg ha⁻¹ de Si, as plantas sob MWD sem adubação potássica não diferiram das plantas sob SWD (Fig. 5a).

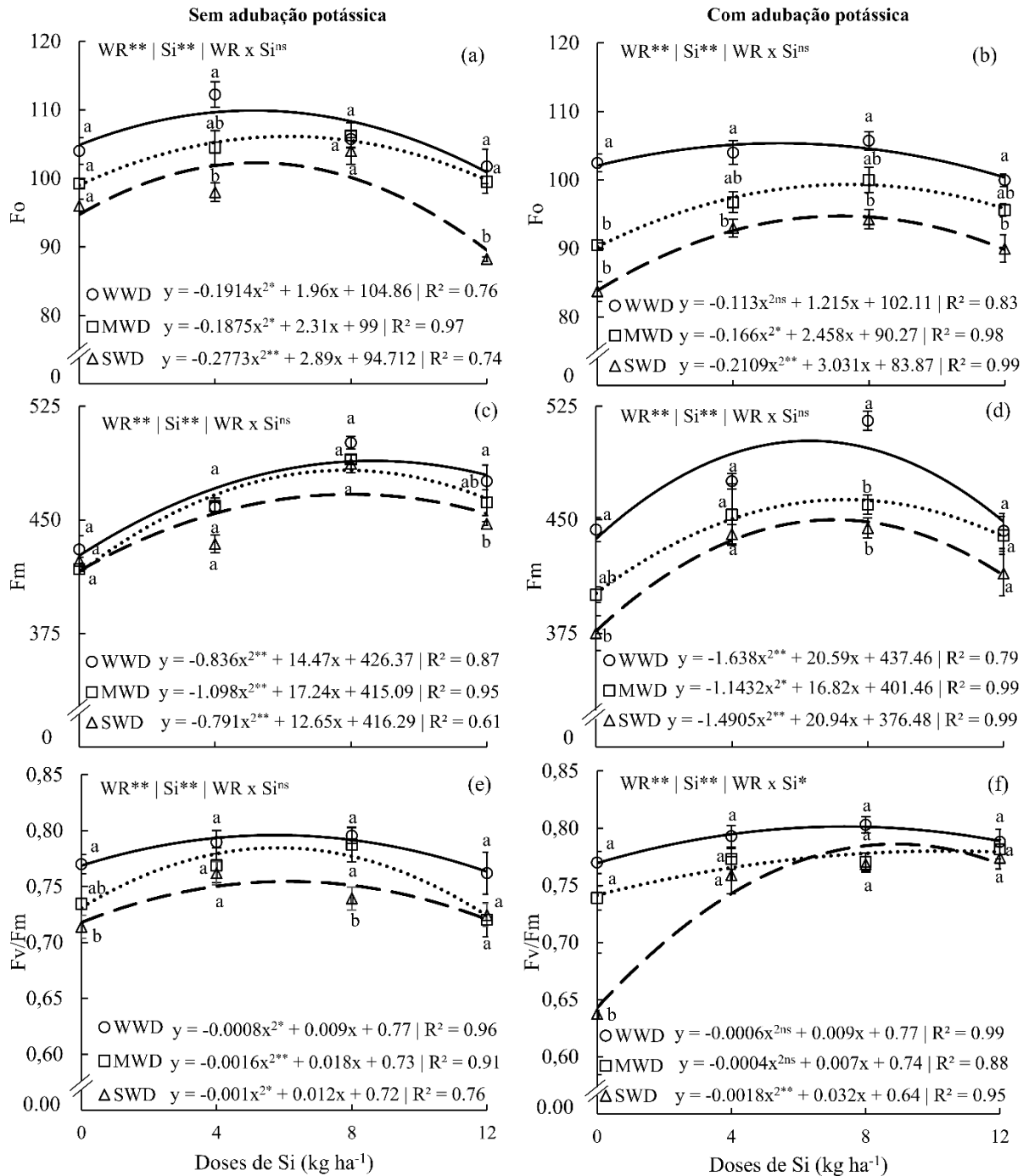


Figura 5. Fluorescência inicial (F_o) (a, b), fluorescência máxima (F_m) (c, d) e eficiência quântica do fotossistema II (F_v/F_m) (e, f) em plantas de feijão cultivada sem déficit hídrico – WWD (80% da capacidade de retenção de água - WRC), com déficit hídrico moderado – MWD (60% de WRC) e com déficit hídrico severo – SWD (40% de WRC); combinado com quatro doses de Si (Si) fornecidas via fertirrigação: 0, 4, 8 e 12 kg ha^{-1} ; na ausência e presença de 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 fotossíntese (A) e a condutância estomática (Gs) das plantas de feijão apresentaram efeitos significativos para fatores isolados ($p < 0,01$), com os resultados de doses de Si ajustados ao modelo de regressão polinomial quadrático (Fig. 6, b). A concentração interna de CO_2 (C_i) ($p < 0,05$), a transpiração (E) ($p < 0,05$), a eficiência de uso da água (EUAi) ($p < 0,01$) e a eficiência de carboxilação (EIC) ($p < 0,01$) foram influenciados pelo efeito da interação entre os fatores (WR x Si) mas, de forma semelhante, apresentaram ajuste seguindo modelo polinomial quadrático (Fig. 6c-f).

Os valores máximos de A foram de 18,1; 12,2 e 9,8 $\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ obtidos nas doses 4,6; 6,2 e 6,5 kg ha^{-1} de Si respectivamente, para as condições sob WWD, MWD e SWD. Em todas as doses de Si, plantas sob SWD apresentaram menores valores de A, enquanto plantas sob WWD, apresentaram os maiores valores desta variável (Fig. 6a). Para Gs, os valores máximos foram de 0,52; 0,37 e 0,24 $\mu\text{mol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ nas doses de 3,7; 2,9 e 4,1 kg ha^{-1} de Si, respectivamente, em plantas sob WWD, MWD e SWD. Nas menores doses de Si (0 e 4 kg ha^{-1} de Si), plantas sob WWD apresentaram maiores taxas de Gs, em relação às submetidas as condições de MWD e SWD. Nas doses 8 e 12 kg ha^{-1} de Si, as plantas sob WWD e MWD apresentaram taxas de Gs semelhantes entre si e superiores às sob SWD (Fig. 6b).

As maiores concentrações de CO_2 foram de 317,9; 328,1 e 316,4 $\mu\text{mol CO}_2 \text{ mol}^{-1}$ nas doses de Si de 7,5; 5,6 e 5,8 kg ha^{-1} de Si respectivamente, para WWD, MWD e SWD. Plantas sob MWD apresentaram maiores C_i nas doses de 0; 4 e 12 kg ha^{-1} de Si em relação às plantas sob WWD e SWD, mas na dose 8 kg ha^{-1} de Si, os três regimes hídricos apresentaram C_i semelhantes (Fig. 6c).

As máximas taxas de E ocorreram nas plantas que receberam as doses de 5,7; 4,2 e 8,1 kg ha^{-1} de Si, atingindo valores de 8,1; 7,0 e 3,5 $\text{nmol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$, respectivamente, para WWD, MWD e SWD. A maior E foi obtida em plantas cultivadas sob WWD, contudo, o menor E foi obtido em plantas sob SWD em todas as doses de Si fornecidas (Fig. 6d).

As doses de Si que proporcionaram as máximas EUAi foram de 2,2; 1,8 e 2,8 $\text{CO}_2 \text{ mol}^{-1} \text{ H}_2\text{O}$ nas doses de 2,8; 6,5 e 4,1 kg ha^{-1} de Si, para WWD, MWD e SWD, respectivamente. Para a variável EIC, os máximos valores obtidos foram de 0,051; 0,036 e 0,031 $\mu\text{mol mol}^{-1} \text{ CO}_2$ para as doses de 3,5; 8,0 e 7,5 kg ha^{-1} nos regimes sob

WWD, MWD e SWD, respectivamente (Fig. 6e, f). A eficiência de uso de água e eficiência de carboxilação foram maiores em plantas sob SWD e WWD, respectivamente, em todas as doses de Si, em relação às plantas sob WWD.

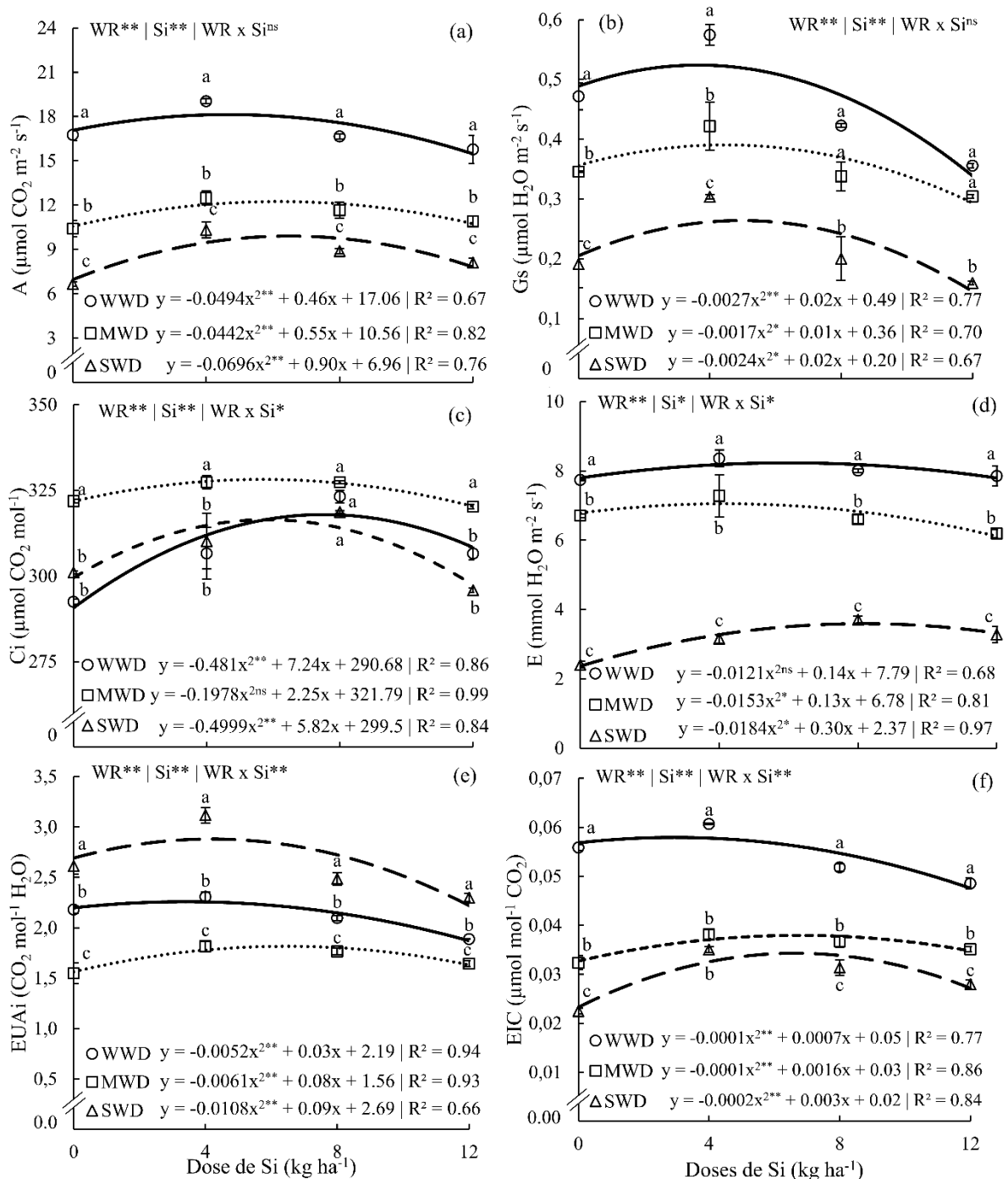


Figura 6. Fotossíntese (A) (a), condutância estomática (Gs) (b), concentração interna de CO₂ (Ci) (c), Transpiração (E) (d), eficiência do uso de água (EUAI) (e) e eficiência de carboxilação (EIC) (f) em plantas de feijão cultivada sem déficit hídrico – WWD (80% da capacidade de retenção de água - WRC), com déficit hídrico moderado – MWD (60% de WRC) e com déficit hídrico severo – SWD (40% de WRC); combinado com doses de Si (Si) fornecidas via

fertirrigação: 0, 4, 8 e 12 kg ha⁻¹; na ausência de 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.

3.4 Efeitos do silício no conteúdo de massa seca do feijão comum

A massa seca das folhas, massa seca das hastes e massa seca da parte aérea em plantas sem adubação potássica e com adubação potássica, tiveram efeitos isolados dos fatores regime hídrico e doses de Si ($p < 0,01$). Para a produção de massa seca, as doses de Si proporcionaram efeito com ajuste polinomial quadrático para todos dos regimes hídricos nas duas condições de adubação potássica (Fig. 7a-f).

Os resultados para a produção máxima de massas secas das folhas das plantas sem adubação potássica foram de 6,6; 5,1 e 3,4 g por planta obtidas com as doses de Si de 6,9; 7,9 e 7,7 kg ha⁻¹ de Si; para as plantas que receberam adubação potássica, as máximas foram de 7,0; 5,0 e 3,8 g por planta obtidas nas doses de 6,8; 6,6 e 8,2 kg ha⁻¹ de Si, respectivamente, para WWD, MWD e SWD (Fig. 7a, b). As plantas do regime WWD apresentaram massa seca de folhas superiores às submetidas aos regimes MWD e SWD nas doses de Si 4, 8 e 12 kg ha⁻¹, em ambas as condições de K.

Os resultados para produção máxima de massa seca das hastes em plantas sem adubação potássica foram de 17,9; 14,9 e 12,6 g por planta; e com adubação potássica foram de 20,7; 16,5 e 13,8 g por planta, obtidas nas doses de Si de 5,2; 7,3 e 7,0; 5,7; 7,3 e 8,2 kg ha⁻¹, respectivamente, para os regimes WWD, MWD e SWD (Fig. 7c, d). Plantas que não receberam adubação potássica, mas fertilizadas com doses de Si de 4 e 12 kg ha⁻¹ no regime hídrico MWD não diferiram das plantas sob WWD (Fig. 7c). Contudo nas plantas com adubação potássica, este resultado ocorreu também para o SWD na maior dose de Si (12 kg ha⁻¹) (Fig. 7d).

Os resultados para a produção máxima de massa seca da parte aérea em plantas sem adubação potássica foram iguais a 24,5; 20,0 e 15,7 g por planta e em plantas que receberam adubação potássica foram iguais a 27,8; 21,5 e 17,6 g por planta nas doses de Si de 5,7; 7,5 e 7,2; 6,0; 7,3 e 8,2 kg ha⁻¹, respectivamente, para os regimes hídricos WWD, MWD e SWD (Fig. 7e, 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 (Fig. 7e). 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 (Fig. 7f).

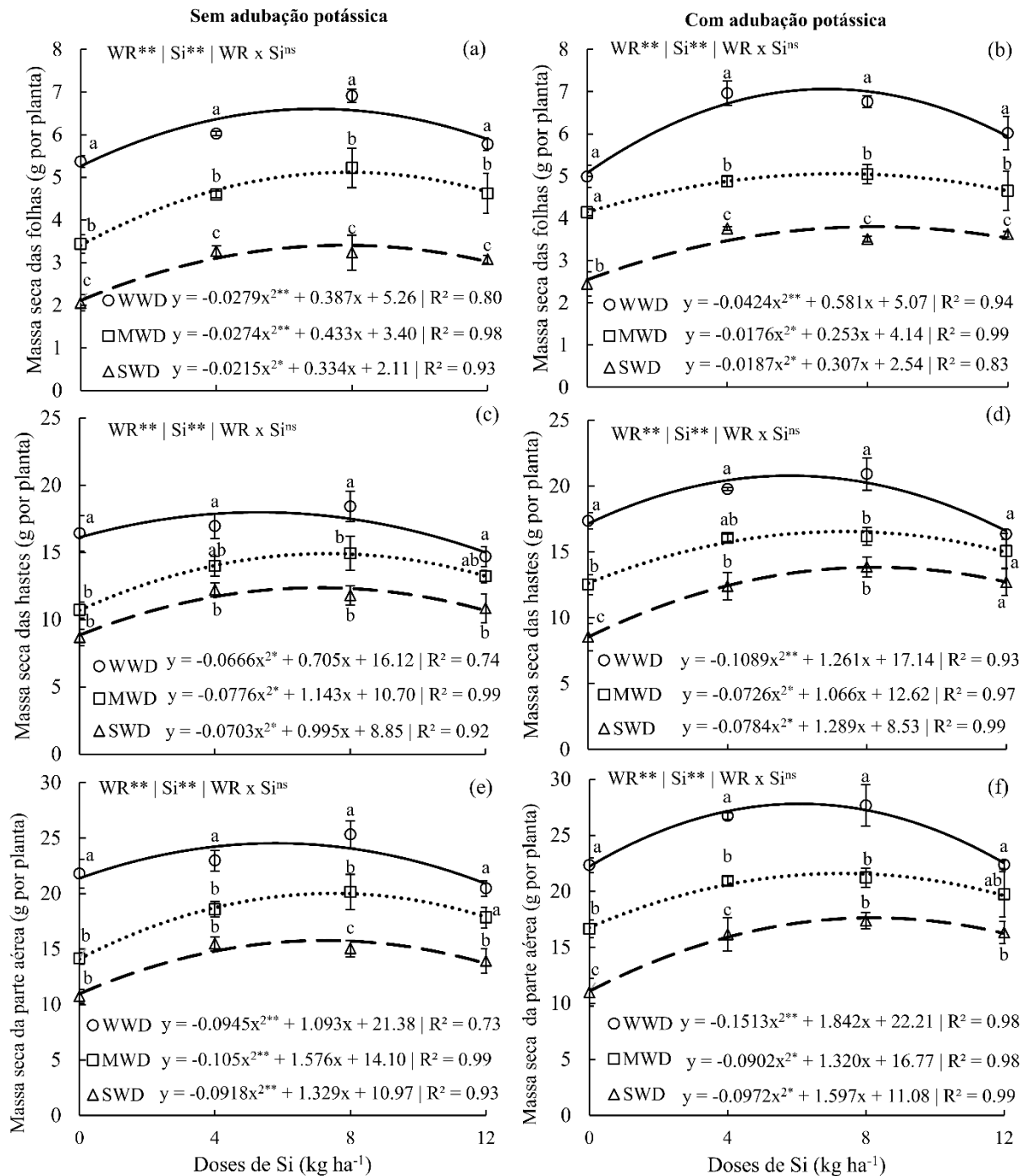


Figura 7. Massa seca das folhas (a, b), massa seca das hastes (c, d) e massa seca da parte

aérea (e, f) em 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 quatro doses de Si (Si) fornecidas via fertirrigação: 0, 4, 8 e 12 kg ha⁻¹; na ausência e presença de 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.

3.5 Correlação e mapa de calor

A correlação de Pearson revelou que, em plantas que não receberam fertilização potássica, a variável AcSi (acúmulo de silício) apresentou uma forte correlação positiva com LDM (massa seca da folha) ($r = 0,92$), ShDM (massa seca do caule) ($r = 0,91$), StDM (massa seca das hastes) ($r = 0,90$), AcK (acúmulo de potássio) ($r = 0,92$), EIC (eficiência instantânea de carboxilação) ($r = 0,76$), A (taxa de assimilação líquida) ($r = 0,80$) e Gs (condutância estomática) ($r = 0,66$). Por outro lado, Fo (fluorescência inicial) ($r = 0,65$), Fv/Fm (rendimento quântico máximo do fotossistema II) ($r = 0,82$), E (taxa de transpiração) ($r = 0,73$), Ψ_w (potencial hídrico) ($r = 0,74$), WRC (capacidade de retenção de água) ($r = 0,88$), Fm (fluorescência máxima) ($r = 0,65$), Ci (concentração intercelular de CO₂) ($r = 0,28$), Car (carotenoides) ($r = 0,27$), Chla (clorofila a) ($r = 0,11$) e Chlb (clorofila b) ($r = 0,07$) apresentaram correlações positivas, mas com menor intensidade. Além disso, o WUE (eficiência do uso da água) ($r = -0,22$) teve uma correlação negativa com o ELI (índice de vazamento de eletrólitos) ($r = -0,38$) (Fig. 8a). Em plantas com fertilização potássica, o AcSi apresentou correlações positivas com AcK ($r = 0,93$), LDM ($r = 0,95$), StDM ($r = 0,96$), Fm ($r = 0,87$), Fo ($r = 0,96$), ShDM ($r = 0,97$), Ψ_w ($r = 0,88$) e WRC ($r = 0,86$), bem como com Car ($r = 0,31$), Chla ($r = 0,25$) e Chlb ($r = 0,25$). Por outro lado, o ELI ($r = -0,48$) apresentou uma correlação negativa com essas variáveis (Fig. 8b).

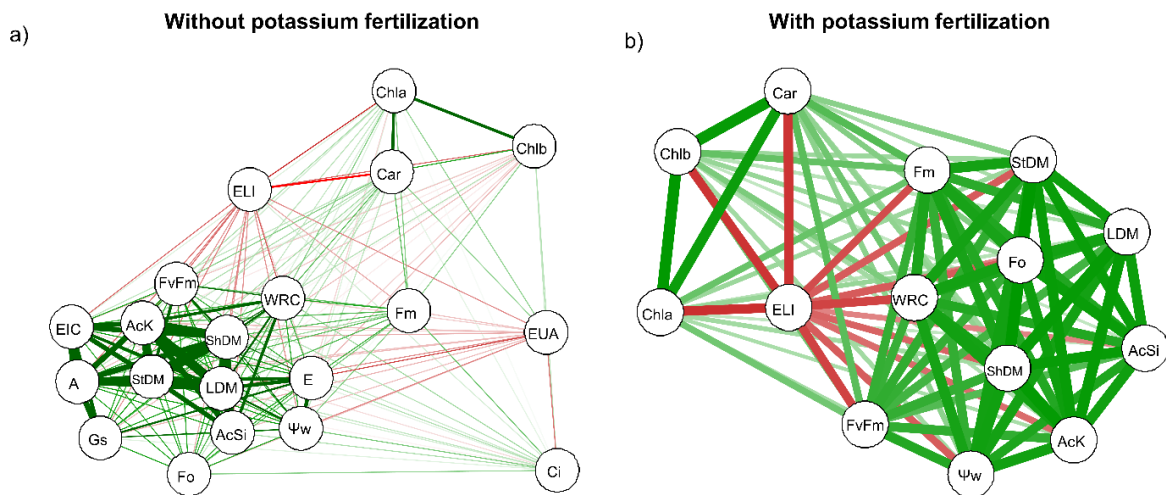


Figura 8. Rede de correlação de Pearson entre as variáveis acúmulo de Si (AcSi) e potássio (AcK), conteúdo relativo de água (WRC), potencial hídrico foliar (Ψ_w), extravasamento de eletrólitos (ELI), conteúdo de clorofila a (Chla), clorofila b (Chlb) e carotenoides (Car), fluorescência inicial (Fo), fluorescência máxima (Fm), eficiência quântica do FSII (FvFm), massa seca das folhas (LDM), massa seca das hastes (StDM) e massa seca da parte aérea (ShDM) em plantas de feijão cultivada sem (a) e com (b) adubação potássica; e fotossíntese (A), condutância estomática (Gs), concentração interna de CO_2 (Ci), transpiração (E), eficiência do uso de água (WUE) e eficiência intrínseca de carboxilação (EIC) em plantas de feijão cultivada sem adubação potássica (a). Em ambos os experimentos (sem e com adubação potássica), as plantas foram submetidas a três condições hídricas: 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} . As correlações positivas foram destacadas em verde e as negativas em vermelho; a espessura do traço indica a força da correlação.

Na análise de agrupamentos, foi possível observar que na condição sem adubação com K, a EUA esteve relacionada diretamente com a WRC e índice de extravasamento de eletrólitos que foram relacionadas com as demais variáveis analisadas nas doses de 4 a 8 kg de Si ha^{-1} no regime severo (Fig. 9a). No entanto em plantas que receberam adubação com K o índice de extravasamento de eletrólitos foi diretamente relacionado com a Fv/Fm, carotenoides e massa seca das folhas e o resto das variáveis analisadas especialmente por o regime moderado e suficiente de água nas doses de 4 a 8 kg de Si ha^{-1} (Fig. 9b).

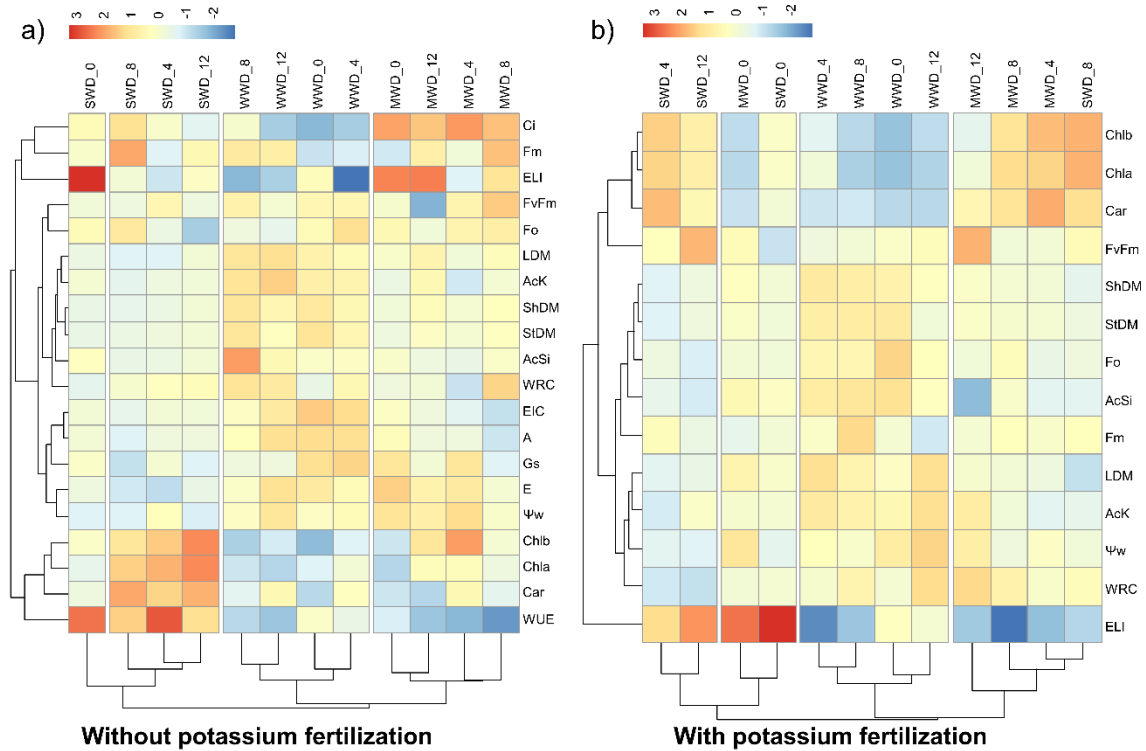


Figura 9. Análise hierárquica de agrupamento dos dados de acúmulo de Si (AcSi) e potássio (AcK), conteúdo relativo de água (WRC), potencial hídrico (WaterPotential), extravasamento de eletrólitos (WaterLeakIndex), conteúdo de clorofila a (Chla), clorofila (Chlb) e carotenoides (Car), fluorescência inicial (Fo), fluorescência máxima (Fm), eficiência quântica do FSII (FvFm), massa seca das folhas (LDM), massa seca Das hastes (StDM) e massa seca da parte aérea (ShDM) em plantas de feijão cultivada sem (a) e com (b) adubação potássica; e fotossíntese (A), condutância estomática (Gs), concentração interna de CO₂ (Ci), Transpiração (E), eficiência do uso de água (WUE) e eficiência de carboxilação (EIC) em plantas de feijão cultivada sem adubação potássica (a). Em ambos os experimentos (sem e com adubação potássica), as plantas foram submetidas a três condições hídricas: 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, as correlações positivas foram destacadas em verde e a espessura do traço indica a força da correlação.

4. DISCUSSÃO

4.1 A aplicação de Si via fertirrigação melhora sua absorção e aumenta o acúmulo de potássio no feijão comum

O efeito positivo do Si diante de estresses abióticos vem sendo demonstrado em pesquisas as quais foram desenvolvidas na maioria dos casos em plantas da família Poaceae, que tem alta capacidade de acúmulo do elemento nos seus tecidos por possuir transportadores nas membranas celulares eficientes na absorção do Si

(Vandegeer et al., 2021). No entanto, neste estudo utilizou-se uma espécie do grupo das leguminosas com uma capacidade de acúmulo do elemento mais limitado mantendo maior conteúdo do Si na raiz, em relação a parte aérea (dos Santos Sarah et al., 2021). Os relatos sobre o efeito do Si nesse grupo de plantas são limitados a poucas espécies a exemplo do tomateiro e de pepino (Shi et al., 2016; Zhu et al., 2015). Além disso, os estudos se concentram em ensaios realizados em vasos e os resultados não se aplicam para cultivos em campo. Diante disso, surgiu a necessidade de estudos em campo que possam aprimorar o modo de aplicação do Si fornecendo na forma fluída com fontes solúveis e em concentrações do elemento que possam diminuir a taxa de polimerização, que é a principal causa da diminuição da absorção do elemento pelas plantas (Birchall, 1995).

Neste contexto, realizamos o primeiro estudo em condições de campo com feijoeiro submetido a aplicação do Si via fertirrigação em diferentes regimes hídricos para gerar informações que possam serem empregadas nos cultivos desta espécie. Os resultados obtidos neste trabalho, indicam que apesar do feijoeiro ser uma espécie classificada como não acumuladora do Si (Mitani & Jian, 2005), o fornecimento deste elemento via fertirrigação foi eficiente em aumentar o seu acúmulo nas plantas (Fig. 2a-b) fato importante para aumentar a expectativa de respostas da cultura a esse elemento.

A eficiência da aplicação de Si deve-se ao manejo adequado, inicialmente o uso de fonte fluída e estabilizada com sorbitol em baixa concentração, abaixo do nível de polimerização do silicato (de Oliveira Filho et al., 2021) e isso favoreceu a absorção radicular do elemento pela planta. A nova alternativa de uso do Si na forma solúvel se destaca em relação a fontes insolúveis e sólidas que apresentam reação mais lenta e requerem grandes quantidades incorporadas no solo (Silva et al., 2023; Teixeira, de Mello Prado, et al., 2022a). Portanto, esses efeitos do Si demonstram pela primeira vez que a aplicação de Si via fertirrigação, especialmente nas doses que resultaram maior enriquecimento do elemento na planta, tanto na ausência da adubação potássica (6,5 a 6,8 kg ha⁻¹ de Si) quanto na sua presença (5,8 a 7,0 kg ha⁻¹ de Si) dependendo do regime hídrico, constituem doses relativamente baixas (<10 kg ha⁻¹ de Si).

As doses ótimas de Si foram responsáveis por aumentar o acúmulo de Si no feijoeiro sem adição de K e com adição de K com maior destaque para plantas sob regime hídrico adequado (WWD) (96 e 29%), em relação a plantas com déficit hídrico moderado (MWD) (95 e 39%) e severo (SWD) (77 e 71%), respectivamente. O maior acúmulo de Si demonstra ótima absorção de Si pelo feijoeiro em sistema fertirrigado, resultados que corroboram aos reportados para outras espécies, como a cultura da cana-de-açúcar (SILVA et al., 2023). O presente achado é uma alternativa para silicatagem eficiente de cultivos irrigados em condições de campo mesmo para espécies do grupo das leguminosas pois permite absorção bem significativa do Si em doses relativamente baixas, o que deve ampliar o uso do Si na agricultura irrigada.

Cabe destacar que o incremento do acúmulo de K em feijoeiro foi evidente em plantas que receberam adubação potássica, em relação as plantas sem adubação com K (Fig. 2c-d). No entanto, a novidade ocorreu quando o fornecimento de Si aumentou o acúmulo de K em ambas as condições potássicas sendo evidente nos três regimes hídricos, sobretudo, em plantas sob WWD. A presença de Si nos tecidos foliares têm a capacidade de ativar rotas de absorção de K (Beier et al., 2022), fato também relatado em plantas de milho (dos Santos Sarah et al., 2022; Teixeira, de Mello Prado, et al., 2022a) e de feijão em cultivos hidropônicos (dos Santos Sarah et al., 2021).

4.2 O silício melhora o status hídrico dos tecidos e foi refletido nos parâmetros fotossintéticos

As plantas sem adição de Si foram afetadas evidentemente pelo estresse hídrico severo ou moderado, com diminuição do conteúdo relativo de água nos tecidos comparado as plantas com suficiência hídrica (Fig. 3a-b). Contudo, a adição de Si foi eficiente em reverter os danos causados pela deficiência hídrica moderada e severa mantendo a hidratação dos tecidos das plantas nas duas condições de adubação potássica o que foi refletido também no ajuste do potencial hídrico foliar (Fig. 3c-d). O Si absorvido pelas plantas é depositado na cutícula e células guardas formando uma capa de sílica que diminui a perda de água no processo transpiratório (Desoky et al., 2021; Vandegeer et al., 2021). O fornecimento de Si potencializa a absorção de água

pelas raízes ao melhorar o potencial osmótico radicular e intervêm na ativação das aquaporinas que estão vinculadas com o transporte de água nas raízes, favorecendo o fluxo de água no xilema das plantas (Liu et al., 2014; Shi et al., 2016).

A desidratação celular que ocorre em plantas sob deficiência hídrica favorece a formação e acúmulo excessivo de espécies reativas de oxigênio, causando degradação das membranas celulares. Essa degradação celular foi evidenciada neste trabalho, a partir do extravasamento de eletrólitos que aumentou quando as plantas foram submetidas a deficiência hídrica severa e moderada. Contudo, a adição de Si reverteu parcialmente esse efeito, em relação a plantas que não receberam Si. A diminuição do índice de extravasamento de eletrólitos celulares com a aplicação de Si foi evidenciada anteriormente em plantas de cana-de-açúcar (Teixeira, Mello De Prado, et al., 2022), milho (Teixeira, de Mello Prado, et al., 2022a) e fava (Desoky et al., 2021).

O benefício do Si na diminuição do extravasamento de eletrólitos em plantas com déficit hídrico foi importante, pois houve a preservação da integridade das estruturas celulares refletiu em maior conteúdo de pigmentos fotossintéticos, tais como clorofilas, e especialmente nos carotenoides, em plantas que estiveram submetidas a deficiência hídrica moderada e severa em ambas as condições potássicas (Fig. 4). Essa alta concentração de carotenoides presentes nas folhas (Fig. 4e-f), refletiu na eficiência fotossintética em plantas com e sem deficiência hídrica (Fig 8). Isso ocorre porque os carotenoides protegem as membranas dos tilacoides ajudando na eliminação das espécies reativas de oxigênio e na dissipação do excesso de energia gerada nos fotossistemas, melhorando também a eficiência quântica do fotossistema II (F_v/F_m) (Teixeira, de Mello Prado, et al., 2022a; X. Xu et al., 2023). O fotossistema II é o responsável pela fluorescência variável da clorofila *a* (LI et al., 2006; Pospíšil, 2016). Os teores de clorofila e de carotenoides demonstram que plantas que recebem adubação potássica junto com aplicações de Si via fertirrigação possuem o benefício de preservação do conteúdo de pigmentos fotossintéticos, especialmente, sob condição de deficiência hídrica.

Dessa forma, ao manter a integridade dos pigmentos foliares, o Si promoveu ação de agente atenuador da deficiência hídrica moderada e severa, melhorando a

fluorescência inicial (Fo), máxima (Fm) e a Fv/Fm, que poderia ter sido afetada, como visto em plantas sob a mesma condição hídrica, mas sem o Si. Resultados semelhantes foram vistos em plantas de cevada (LI et al., 2006), especialmente para a Fo (Fig. 5a-b) e Fm (Fig. 5c-d) evidenciando um maior efeito quando o Si foi fornecido em condição de estresse hídrico severo e moderado em ambas as condições de K. Efeitos semelhantes já haviam sido relatados em plantas de feijão, mas em condição de estresse menos severo e com aplicação de ácido salicílico (Ghassemi-Golezani & Lotfi, 2015). A Fv/Fm também foi afetada pelo déficit hídrico, no entanto, a aplicação de dose adequada de Si foi importante para favorecer a eficiência fotossintética das plantas (Fig.5e-f), fatos semelhantes ocorreram em outras espécies como em plantas forrageiras (Rocha et al., 2021) e em cana-de-açúcar (Teixeira et al., 2021).

O enriquecimento com Si nas plantas favoreceu as trocas gasosas especialmente a taxa fotossintética, transpiração e condutância estomática sob condições de deficiência hídrica (Fig. 6a-b-d), mesmo efeito que foi descrito na cultura da fava (Desoky et al., 2021). As plantas cultivadas sob regime hídrico severo refletiram em uma maior eficiência no uso da água em relação aos regimes de déficit hídrico adequado e moderado (Fig. 6e). Em plantas de trigo e de sorgo o fornecimento de Si também aumentou a eficiência do uso da água em condições de deficiência hídrica (Gong & Chen, 2012; Hattori et al., 2005). Para a Ci (Fig. 6c) a aplicação de Si não teve uma diferença significativa, apresentando correlação negativa com a eficiência de uso da água (Fig. 8a). Foi anteriormente descrito que na cultura do sorgo a Ci se manteve tanto para condições adequadas e deficientes de água, independente do fornecimento de Si (Hattori et al., 2005). Num estudo prévio com feijoeiro sobre deficiência hídrica sem adição de Si estes valores tiveram uma diminuição relevante de 75% nas trocas gasosas (Fogaça et al., 2023), no entanto, nossos resultados indicam que quando o Si é adicionado nas plantas estes parâmetros são melhorados em até 40%. Isso demonstra que o Si é uma alternativa para o uso no cultivo do feijão ao favorecer estes parâmetros fisiológicos dado fato que o fornecimento de Si via fertirrigação foi muito eficiente para nutrir a planta com esse elemento. Desta forma, comprovamos a nossa primeira hipótese pois o Si favoreceu as trocas gasosas e ao mesmo tempo os pigmentos fotossintetizantes, o potencial hídrico e o conteúdo

relativo da água, mantendo a integridade da membrana em sistemas irrigados com diferentes teores de água no solo.

Estes parâmetros fisiológicos que foram avaliados no feijoeiro foram potencializados devido ao uso do Si em uma dose média próxima de $6,9 \text{ kg ha}^{-1}$ de Si, independente da condição potássica. Isso foi demonstrado porque no presente estudo as doses de Si superiores não induziram melhorias proporcionais nos processos fisiológicos nas plantas. O provavelmente se deve ao fato de que em doses maiores de Si pode ter havido polimerização do elemento, com maior deposição do elemento nas raízes na forma de sílica amorfa (Shanmugaiah et al., 2023; Thakur et al., 2023), justificando a diminuição da absorção do Si nas maiores doses do elemento.

Ficou evidenciado pelos resultados desta pesquisa que o efeito benéfico do Si nos aspectos fisiológicos estudados não é limitado pelo K pois esses efeitos positivos ocorreram em ambas as condições de nutrição potássica. Isso ocorreu possivelmente porque não houve uma limitação severa de deficiência de K na planta no tratamento sem aplicação de K, pois o teor de K no solo deste experimento não está limitado ($K = 6.2 \text{ mmolc dm}^{-3}$ na camada de 0-20 cm de profundidade) (Raij et al., 1997).

4.3 A aplicação de silício melhorou o acúmulo de matéria seca no feijão comum

O crescimento das plantas do feijoeiro foi limitado quando esteve sobre deficiência hídrica moderada e severa sem fornecimento do Si, o que refletiu na baixa produção de massa da parte aérea nas plantas, fato verificado por outros autores (Mladenov et al., 2023). No entanto, com o fornecimento de Si na dose ótima em relação a dose zero do elemento houve um incremento na produção de massa seca da parte aérea nas plantas nos dois experimentos (na ausência e na presença de K) iguais a 41 e 54% (MWD); 47 e 60% (SWD) e 12 e 24% (WWD), respectivamente. Inclusive a falta de interação de doses de Si e regimes hídricos na produção de massa seca dos diferentes órgãos da planta deixa claro que o efeito benéfico do Si independe do teor de água no solo. Portanto, o efeito benéfico do Si no crescimento do feijoeiro ocorre de forma expressiva em condições de estresses hídricos, mas também em menor intensidade em cultivo sem estresse hídrico. Essas informações diferem de

indicações que os efeitos do Si em plantas não acumuladoras estavam limitados a cultivos com estresses, visto em plantas de batata (Pilon et al., 2014) e em outras espécies (Cooke & Leishman, 2016; Crusciol et al., 2013).

Este é o primeiro relato indicando que plantas de feijão cultivado em campo, que possui apenas mecanismos passivos de absorção de Si, são beneficiadas pelo efeito atenuador de estresse promovido pelo Si tanto em plantas com quanto em plantas sem estresse. Dessa forma, podemos aceitar a segunda hipótese que os benefícios do Si podem ocorrer em regimes hídricos deficiente e suficiente de água.

Portanto, evidenciamos que o benefício do Si via fertirrigação é semelhante em áreas com diferentes teores de água no solo e de K e isso amplia a indicação deste elemento em diferentes manejos agrícolas. Contudo, ressalta-se que os benefícios podem variar com a dose do Si a ser empregada. Inclusive descobrimos a necessidade de usar doses maiores de Si nos regimes hídricos deficientes (7,2-8,2 kg ha⁻¹ de Si) devido menor absorção de Si, em relação ao regime suficiente de água (5,7-6,0 kg⁻¹ de Si) para resultar na máxima produção de massa seca da planta nos dois status de K. De forma geral, também podemos aceitar a terceira hipótese indicando que a dose ótima de Si pode ser maior nos regimes hídricos deficientes, em relação ao regime suficiente de água, independente do status de K. Portanto, surge a primeira indicação geral de Si para o cultivo irrigado do feijoeiro com doses de Si relativamente baixas próximas de 5,7 a 8,2 kg ha⁻¹ dependendo do nível de água empregado, constituindo uma estratégia útil e sustentável para melhor uso da água.

Esse amplo efeito benéfico do Si no feijoeiro cultivado em campo em uma espécie sensível ao déficit hídrico (Ray et al., 2023) pode ter implicação global pois deve beneficiar muitas regiões de cultivo desta espécie tanto em anos com ótima disponibilidade de água ou com restrições hídricas havendo necessidade de adoção de sistema de irrigação deficitário controlado. Esse tipo de irrigação deficitário controlado surgiu com os primeiros trabalhos realizados por Mitchell et al. (1984) e pode ser estratégia, pois no futuro a projeção é para o maior agravamento das mudanças climáticas que tem modificado a precipitação pluvial no mundo (Malek et al., 2018; Pizarro et al., 2022). Inclusive essa pesquisa envolvendo estratégias para melhorar o crescimento da espécie estudada deve beneficiar povos de baixa renda

que tem dieta vegetariana, comumente conhecida como “fonte de proteína do homem pobre” (>20% de proteína) (Yadav et al., 2019).

As perspectivas futuras são de que novas pesquisas sejam realizadas, pois ficou nítido que o feijoeiro é uma espécie muito responsiva ao fornecimento de água e para ampliar e elucidar o efeito do Si nesta espécie é oportuno estudar outros mecanismos, além dos fisiológicos especialmente os nutricionais e os moleculares que esse elemento pode estar beneficiando.

5. CONCLUSÃO

A aplicação de Si via fertirrigação melhora as condições das plantas sob estresse hídrico severo, independentemente do status do potássio. Essa melhoria é evidente em termos de conteúdo relativo de água, potencial hídrico da folha e resistência da membrana, que afetam diretamente os pigmentos e as trocas gasosas. Os efeitos fisiológicos da aplicação de Si aumentam a fotossíntese e atenuam os efeitos negativos do estresse por déficit hídrico. Essas descobertas demonstram, pela primeira vez em feijões comuns, o potencial do Si para melhorar a eficiência da irrigação em culturas irrigadas em condições de campo, mas precisa de mais investigações futuras com outras espécies.

6. REFERÊNCIAS

- Alejo, L. A. & Alejandro, A. S. (2022). Changes in irrigation planning and development parameters due to climate change. *Water Resources Management*, 36(5), 1711–1726. <https://doi.org/10.1007/s11269-022-03105-4>
- Ambrosano, E. J., Tanaka, R. T., Mascarenhas, H. A. A., Raij, B. van., Quaggio, J. A. & Cantarella, H. (1997). Leguminosas e Oleaginosas. In B. van. Raij, H. Cantarella, J. A. Quaggio & A. M. C. Furlani (Eds.), *Recomendações de adubação e calagem para o Estado de São Paulo* (2nd ed., pp. 189–191). **Boletim Técnico**, 100.
- Amin, M., Ahmad, R., Basra, S. M. A. & Murtaza, G. (2014). Silicon induced improvement in morpho-physiological traits of maize (*Zea Mays L.*) under water deficit. *Pakistan Journal of Agricultural Research*, 51, 187–196.
- Andrioli, I. & J. F. Centurion. (1999). Levantamento detalhado dos solos da Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias de Jaboticabal. *En Congresso Brasileiro de Ciência Do Solo 27: Resumos Da Sociedade Brasileira de Ciência Do Solo*.

- 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(6), 375–377. <https://doi.org/10.1111/j.1365-3180.1974.tb01078.x>
- Barrs, H. & Weatherley, P. (1962). A Re-Examination of the Relative Turgidity Technique for Estimating Water Deficits in Leaves. *Australian Journal of Biological Sciences*, 15(3), 413–428. <https://doi.org/10.1071/BI9620413>
- Bataglia, O. C., Furlani, A. M. C., Teixeira, J. P. F. & Furlani, P. R. ; (1983). Métodos de análise químico de plantas. In *Instituto Agronomico de Campinas*.
- Beier, S., Marella, N. C., Yvin, J. C., Hosseini, S. A. & von Wirén, N. (2022). Silicon mitigates potassium deficiency by enhanced remobilization and modulated potassium transporter regulation. *Environmental and Experimental Botany*, 198, 104849. <https://doi.org/10.1016/J.ENVEXPBOT.2022.104849>
- Birchall, J. D. (1995). The essentiality of silicon in biology. *Chemical Society Reviews*, 24(5), 351–357. <https://doi.org/10.1039/CS9952400351>
- Bizari, D. R., Matura, E. E., Chamlet, J., Mesquita, M. & Salvador, C. A. (2013). Profundidade efetiva de raízes e sua relação com a parte aérea da cultura do feijoeiro irrigado em sistema plantio direto. *REVISTA BRASILEIRA DE AGRICULTURA IRRIGADA - RBAI*, 4(3), 172–183. <https://doi.org/10.7127/RBAI.V4N300012>
- Cooke, J. & Leishman, M. R. (2016). Consistent alleviation of abiotic stress with silicon addition: a meta-analysis. *Functional Ecology*, 30(8), 1340–1357. <https://doi.org/10.1111/1365-2435.12713>
- Costa, M. G., de M. Prado, R., Sarah, M. M. S., Palaretti, L. F., de C. Piccolo, M. & Souza Júnior, J. P. (2023). New approaches to the effects of Si on sugarcane ratoon under irrigation in Quartzipsamments, Eutrophic Red Oxisol, and Dystrophic Red Oxisol. *BMC Plant Biology*, 23(1), 1–20. <https://doi.org/10.1186/S12870-023-04077-2/TABLES/3>
- Crusciol, C. A. C., Soratto, R. P., Castro, G. S. A., da Costa, C. H. M. & Neto, J. F. (2013). Foliar application of stabilized silicic acid on soybean, common bean, and peanut. *Revista Ciência Agrônômica*, 44(2), 404–410. <https://doi.org/10.1590/S1806-66902013000200025>
- de Oliveira Filho, A. S. B., de Mello Prado, R., Teixeira, G. C. M., de Cássia Piccolo, M. & Rocha, A. M. S. (2021). Water deficit modifies C:N:P stoichiometry affecting sugarcane and energy cane yield and its relationships with silicon supply. *Scientific Reports* 2021 11:1, 11(1), 1–10. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-00441-0>
- Desoky, E. S. M. et al. (2021). Physio-Biochemical and Agronomic Responses of Faba Beans to Exogenously Applied Nano-Silicon Under Drought Stress Conditions. *Frontiers in Plant Science*, 12, 637783. <https://doi.org/10.3389/FPLS.2021.637783/FULL>
- Dionisio-Sese, M. L. & Tobita, S. (1998). Antioxidant responses of rice seedlings to salinity stress. *Plant Science*, 135(1), 1–9. [https://doi.org/10.1016/S0168-9452\(98\)00025-9](https://doi.org/10.1016/S0168-9452(98)00025-9)

- dos Santos Sarah, 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), 19690. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-99194-z>
- dos Santos Sarah, M. M., de Mello Prado, R., Teixeira, G. C. M., de Souza Júnior, J. P., de Medeiros, R. L. S. & Barreto, R. F. (2022). Silicon Supplied Via Roots or Leaves Relieves Potassium Deficiency in Maize Plants. **Silicon**, 14(3), 773–782. <https://doi.org/10.1007/S12633-020-00908-1/METRICS>
- EMBRAPA. (2017). *Comunicado Técnico BRS FC402: Cultivar de feijão-comum carioca com alta produtividade, resistência à antracnose e murcha-de-fusário.*
- Frew, A., Weston, L. A., Reynolds, O. L. & Gurr, G. M. (2018). The role of silicon in plant biology: a paradigm shift in research approach. **Annals of Botany**, 121(7), 1265–1273. <https://doi.org/10.1093/aob/mcy009>
- Ghassemi-Golezani, K. & Lotfi, R. (2015). The impact of salicylic acid and silicon on chlorophyll a fluorescence in mung bean under salt stress. **Russian Journal of Plant Physiology**, 62(5), 611–616. <https://doi.org/10.1134/S1021443715040081>
- Gong, H. & Chen, K. (2012). The regulatory role of silicon on water relations, photosynthetic gas exchange, and carboxylation activities of wheat leaves in field drought conditions. **Acta Physiologiae Plantarum**, 34(4), 1589–1594. <https://doi.org/10.1007/S11738-012-0954-6/FIGURES/1>
- Hattori, T., Inanaga, S., Araki, H., An, P., Morita, S., Luxová, M. & Lux, A. (2005). Application of silicon enhanced drought tolerance in Sorghum bicolor. **Physiologia Plantarum**, 123(4), 459–466. <https://doi.org/10.1111/J.1399-3054.2005.00481.X>
- IRRI. (1993). *Rice research in a time change: IRRI's medium-term plan for 1994-1998.*
- Kamienski, C., Soininen, J. P., Taumberger, M., Fernandes, S., Toscano, A., Cinotti, T. S., Maia, R. F. & Neto, A. T. (2018). SWAMP: An IoT-based smart water management platform for precision irrigation in agriculture. **2018 Global Internet of Things Summit, GloTS 2018**. <https://doi.org/10.1109/GIOTS.2018.8534541>
- Klute, A. (2018). Water Retention: Laboratory Methods. **Methods of Soil Analysis, Part 1: Physical and Mineralogical Methods**, 635–662. <https://doi.org/10.2136/SSSABOOKSER5.1.2ED.C26>
- Korndörfer, G. H., Pereira, H. S. & Nolla, A. (2004). *Análisis de silicio: solo, planta e fertilizante.*
- Koronkevich, N. I., Barabanova, E. A. & Zaitseva, I. S. (2022). Assessment of Modern Water Consumption in the World and on Continents and Its Impact on the Annual River Runoff. **Herald of the Russian Academy of Sciences**, 92(2), 199–206. <https://doi.org/10.1134/S1019331622020034/FIGURES/4>
- 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>

- LI, R. hua, GUO, P. guo, Michael, B., Stefania, G. & Salvatore, C. (2006). Evaluation of chlorophyll content and fluorescence parameters as indicators of drought tolerance in barley. *Agricultural Sciences in China*, 5(10), 751–757. [https://doi.org/10.1016/S1671-2927\(06\)60120-X](https://doi.org/10.1016/S1671-2927(06)60120-X)
- Lichtenthaler, H. K. (1987). Chlorophylls and carotenoids: Pigments of photosynthetic biomembranes. *Methods in Enzymology*, 148(C), 350–382. [https://doi.org/10.1016/0076-6879\(87\)48036-1](https://doi.org/10.1016/0076-6879(87)48036-1)
- Lichtenthaler, H. K., Buschmann, C. & Knapp, M. (2005). How to correctly determine the different chlorophyll fluorescence parameters and the chlorophyll fluorescence decrease ratio RFd of leaves with the PAM fluorometer. *Photosynthetica*, 43(3), 379–393. <https://doi.org/10.1007/S11099-005-0062-6>
- Liu, P., Yin, L., Deng, X., Wang, S., Tanaka, K. & Zhang, S. (2014). Aquaporin-mediated increase in root hydraulic conductance is involved in silicon-induced improved root water uptake under osmotic stress in sorghum bicolor L. *Journal of Experimental Botany*, 65(17), 4747–4756. <https://doi.org/10.1093/JXB/ERU220>
- Malek, K., Adam, J., Stockle, C., Brady, M. & Rajagopalan, K. (2018). When Should Irrigators Invest in More Water-Efficient Technologies as an Adaptation to Climate Change? *Water Resources Research*, 54(11), 8999–9032. <https://doi.org/10.1029/2018WR022767>
- 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(21), 6703–6718. <https://doi.org/10.1093/jxb/eraa301>
- Marcos FOGAÇA, A., Garcia CASTRO, A. DE, Augusto Agnellos BARBOSA, E., Marcos Fogaça, A., Castro, D. & Physiological and, E. (2023). Physiological and morphological responses of two beans common genotype to water stress at different phenological stages. *Bioscience Journal*, 39, e39053–e39053. <https://doi.org/10.14393/BJ-V39N0A2023-59855>
- Mitani, N. & Jian, F. M. (2005). Uptake system of silicon in different plant species. *Journal of Experimental Botany*, 56(414), 1255–1261. <https://doi.org/10.1093/JXB/ERI121>
- Mitani-Ueno, N. & Ma, J. F. (2021). Linking transport system of silicon with its accumulation in different plant species. *Soil Science and Plant Nutrition*, 67(1), 10–17. <https://doi.org/10.1080/00380768.2020.1845972>
- Mitchell, P. D., Jerie, P. H. & Chalmers, D. J. (1984). The Effects of regulated water deficits on pear tree growth, flowering, fruit growth, and yield. *Journal of the American Society for Horticultural Science*, 109(5), 604–606. <https://doi.org/10.21273/JASHS.109.5.604>
- 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(4), 1022. <https://doi.org/10.3390/AGRONOMY13041022/S1>

- Pei, Z. F., Ming, D. F., Liu, D., Wan, G. L., Geng, X. X., Gong, H. J. & Zhou, W. J. (2010). Silicon improves the tolerance to water-deficit stress induced by polyethylene glycol in wheat (*Triticum aestivum* L.) seedlings. **Journal of Plant Growth Regulation**, 29(1), 106–115. <https://doi.org/10.1007/S00344-009-9120-9>
- Phogat, V., Cox, J. W. & Šimůnek, J. (2018). Identifying the future water and salinity risks to irrigated viticulture in the Murray-Darling Basin, South Australia. **Agricultural Water Management**, 201, 107–117. <https://doi.org/10.1016/J.AGWAT.2018.01.025>
- Pilon, C., Soratto, R. P., Broetto, F. & Fernandes, A. M. (2014). Foliar or soil applications of silicon alleviate water-deficit stress of potato plants. **Agronomy Journal**, 106(6), 2325–2334. <https://doi.org/10.2134/AGRONJ14.0176>
- Pizarro, E., Galleguillos, M., Barría, P. & Callejas, R. (2022). Irrigation management or climate change? Which is more important to cope with water shortage in the production of table grape in a Mediterranean context. **Agricultural Water Management**, 263, 107467. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2022.107467>
- Pospíšil, P. (2016). Production of reactive oxygen species by photosystem II as a response to light and temperature stress. **Frontiers in Plant Science**, 7(DECEMBER2016), 1950. <https://doi.org/10.3389/FPLS.2016.01950/BIBTEX>
- Puy, A., Lo Piano, S., & Saltelli, A. (2020). Current Models Underestimate Future Irrigated Areas. **Geophysical Research Letters**, 47(8). <https://doi.org/10.1029/2020GL087360>
- Raij, B., Andrade, J., Cantarella, H. & Quaggio, J. (2001). *Análise química para avaliação da fertilidade de solos tropicais*. IAC.
- RAIJ, B. van., FERNANDES, D. R., OLIVEIRA, E. G. & MALAVOLTA, E. Café. I. R., & H.; QUAGGIO, J. A. & F. (1997). Recomendação de adubação e calagem para o Estado de São Paulo. **Boletim Técnico 100**, 97–101.
- Ray, L. I. P., Swetha, K., Singh, A. K. & Singh, N. J. (2023). Water productivity of major pulses – A review. **Agricultural Water Management**, 281, 108249. <https://doi.org/10.1016/J.AGWAT.2023.108249>
- Rocha, J. R., de Mello Prado, R., Teixeira, G. C. M. & de Oliveira Filho, A. S. B. (2021). Si fertigation attenuates water stress in forages by modifying carbon stoichiometry, favouring physiological aspects. **Journal of Agronomy and Crop Science**, 207(4), 631–643. <https://doi.org/10.1111/JAC.12479>
- Rowse, H. R. & Barnes, A. (1979). Weather, rooting depth and water relations of broad beans — a theoretical analysis. **Agricultural Meteorology**, 20(5), 381–391. [https://doi.org/10.1016/0002-1571\(79\)90013-X](https://doi.org/10.1016/0002-1571(79)90013-X)
- Shanmugaiah, V., Gauba, A., Hari, S. K., Prasad, R., Ramamoorthy, V. & Sharma, M. P. (2023). Effect of silicon micronutrient on plant's cellular signaling cascades in stimulating plant growth by mitigating the environmental stressors. **Plant Growth Regulation** 2023, 1, 1–18. <https://doi.org/10.1007/S10725-023-00982-6>

- 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(FEB2016), 196. <https://doi.org/10.3389/FPLS.2016.00196/BIBTEX>
- Silva, J. L. F. da, Prado, R. de M., Alves, T. L., Lata-Tenesaca, L. F. & Soares, M. B. (2023). New strategy for silicon supply through fertigation in sugarcane integrating the pre-sprouted seedling phase and field cultivation. **Scientific Reports** 2023 13:1, 13(1), 1–10. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-27323-3>
- SINGH Yadav, A., Kumar Yadav, S., Kumar, N., Ram, H., Singh Yadav, A. & Kumar, S. (2019). Pulses production and productivity: status, potential and way forward for enhancing farmers income. **International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences**, 8(4), 2315–2322. <https://doi.org/10.20546/ijcmas.2019.804.270>
- Solangi, K. A., Siyal, A. A., Wu, Y., Abbasi, B., Solangi, F., Lakhari, I. A. & Zhou, G. (2019). An assessment of the spatial and temporal distribution of soil salinity in combination with field and satellite data: a case study in Sujawal district. **Agronomy** 2019, Vol. 9, Page 869, 9(12), 869. <https://doi.org/10.3390/AGRONOMY9120869>
- Teixeira, G. C. M., de Mello Prado, R., de Oliveira, L. T., de Castro Souza, J. V. & Rocha, A. M. S. (2022). Silicon fertigation with appropriate source reduces water requirement of maize under water deficit. **Plant and Soil**, 477(1–2), 83–97. <https://doi.org/10.1007/s11104-022-05446-w>
- Teixeira, G. C. M., Mello De Prado, R., Márcio, A., Rocha, S., Santana Batista De Oliveira Filho, A., Silveira Da Sousa Junior, G. & 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** 2022 12:1, 12(1), 1–18. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-21680-9>
- Teixeira, G. C. M., Mello Prado, R. de, Rocha, A. M. S., Silveira Sousa Junior, G. da & Gratão, P. L. (2021). Beneficial effect of silicon applied through fertigation attenuates damage caused by water deficit in sugarcane. **Journal of Plant Growth Regulation**, 1–16. <https://doi.org/10.1007/s00344-021-10510-3>
- Thakur, A., Singh, A., Tandon, A. & Sharma, V. (2023). Insights into the molecular mechanisms of uptake, phytohormone interactions and stress alleviation by silicon: a beneficial but non-essential nutrient for plants. **Plant Growth Regulation**, 1–13. <https://doi.org/10.1007/S10725-023-01002-3/FIGURES/3>
- Turner, N. C. (1981). Techniques and experimental approaches for the measurement of plant water status. **Plant and Soil** 1981 58:1, 58(1), 339–366. <https://doi.org/10.1007/BF02180062>
- Vandegeer, R. K., Zhao, C., Cibils-Stewart, X., Wuhler, R., Hall, C. R., Hartley, S. E., Tissue, D. T. & Johnson, S. N. (2021). Silicon deposition on guard cells increases stomatal sensitivity as mediated by K⁺ efflux and consequently reduces stomatal conductance. **Physiologia Plantarum**, 171(3), 358–370. <https://doi.org/10.1111/PPL.13202>

Venkatesh, M., Vidhyavathi, A., Suresh Kumar, D., Raviraj, A., Duraisamy, M. R. & Harishankar, K. (2022). Assessment of irrigation water loss and water balance in the Thenpennaiyar Basin of Tamil Nadu, India. **Asian Journal of Agricultural Extension, Economics & Sociology**, 40(10), 749–758. <https://doi.org/10.9734/AJAEES/2022/v40i1031138>

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(3), 259–268. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2006.05.012>

Xu, X., Zou, G., Li, Y., Sun, Y. & Liu, F. (2023). Silicon application improves strawberry plant antioxidation ability and fruit nutrition under both full and deficit irrigation. **Scientia Horticulturae**, 309, 111684. <https://doi.org/10.1016/J.SCIENTA.2022.111684>

Zhu, Y. X., Xu, X. Bin, Hu, Y. H., Han, W. H., Yin, J. L., Li, H. L. & Gong, H. J. (2015). Silicon improves salt tolerance by increasing root water uptake in (*Cucumis sativus* L.) **Plant Cell Reports**, 34(9), 1629–1646. <https://doi.org/10.1007/s00299-015-1814-9>