

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA – UNESP
Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Câmpus de Jaboticabal

RELATÓRIO FINAL

**ESTRATÉGIAS PARA VIABILIZAR USO DO SILÍCIO VIA FERTIRRIGAÇÃO PARA
AUMENTAR EFICIÊNCIA DO USO DA ÁGUA NO CULTIVO DE MILHO E FEIJÃO
NO ESTADO DE SÃO PAULO¹**

¹ Projeto com apoio FAPESP - Auxílio à Pesquisa Proc. 2021/12531-7

Gelza Carliane Marques Teixeira

Candidata à bolsa de Pós-doutorado

Prof. Dr. Renato de Mello Prado

Departamento de Ciências da Produção Agrícola,
Unesp Câmpus de Jaboticabal - Supervisor

Instituição-sede

Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho" – Faculdade de Ciências
Agrárias e Veterinárias – Câmpus de Jaboticabal – SP

Relatório final apresentado ao Conselho
Nacional de Desenvolvimento Científico e
Tecnológico – CNPq para fins de obtenção
de **bolsa de Pós-doutorado Júnior**.

Jaboticabal – SP

2023

1. INTRODUÇÃO

Os efeitos das mudanças climáticas têm afetado as culturas, que estão sujeitas a recursos hídricos limitados, tendo período mais longo de exposição ao déficit hídrico (Besharat et al., 2020). O aumento do tempo de exposição à seca induz estresse secundário por deficiência nutricional dada a necessidade da água para absorção dos nutrientes (Rizwan et al., 2015) e diminui o transporte de água e de nutrientes via xilema (Ibrahim et al., 2020).

Assim, o déficit hídrico pode induzir deficiência nutricional com destaque para o potássio (K) e isso agrava prejuízo biológico na planta, porque esse nutriente possui função associada ao status hídrico foliar, aumentando a área foliar, a eficiência do uso de água nas plantas estressadas e diminuindo a transpiração foliar (Martineau et al., 2017). Além disso, o K melhora a assimilação líquida de carbono (C), o transporte de açúcares no floema das folhas às raízes (Ibrahim et al., 2020) e previne danos oxidativos, mantendo a homeostase das espécies reativas de oxigênio (ERO) e ativando enzimas do metabolismo antioxidante (Ul-Allah et al., 2020).

Uma estratégia conhecida para atenuar estresse nos cultivos seria com uso do silício (Si) considerado um elemento benéfico (Vasanthi et al., 2014). O Si é o segundo elemento mais abundante depois do oxigênio, sendo que o dióxido de silício (SiO_2) compreende 50-70% da massa do solo (Epstein, 1994), mas na solução do solo o Si disponível está na forma de ácido monosilícico (H_4SiO_4) em concentração baixa (~ 1 mM) (Katz et al., 2021). O Si é absorvido na forma de ácido monosilícico estando na mesma forma na seiva do xilema (Mitani et al., 2005). Atinge as folhas a partir da perda de água e se concentra tendo polimerização formando sílica amorfa ou biogênica constituindo 90% do Si absorvido, onde então, é transformado em estruturas de Si-celulose presente na parede celular (Yoshida, 1965). Assim, apenas pequena parte a um nível nanométrico de sílica está contida em estruturas intercelulares (Woesz et al., 2006).

Os efeitos benéficos do Si induzem maior fotossíntese pela preservação da integridade de pigmentos fotossintéticos (Rocha et al., 2021) e da regulação de sistemas enzimáticos (Teixeira et al., 2022c) e não-enzimáticos de defesa (Teixeira et al., 2021a). Em plantas sob déficit hídrico, os depósitos de Si nas paredes celulares dos vasos do

xilema diminuem às perdas de água (Teixeira et al., 2022a). Além disso, o Si em plantas sob déficit hídrico induz função osmorreguladora modificando os teores de prolina e de açúcares (Avila et al., 2021), que proporciona ajuste na condutividade hidráulica das raízes e estimula a atividade de enzimas como a aquaporina (Abbas et al., 2015), aumenta o crescimento da raiz, visto em plantas de milho (Besharat et al., 2020), aumentando a absorção de água (Teixeira et al., 2020b) e de nutrientes (Ibrahim et al., 2020). Soma-se isso, um efeito do Si para atenuar déficit hídrico relatado recentemente que está envolvido na maior homeostase estequiométrica elementar (C:N:P) favorecendo a eficiência de uso do C (Teixeira et al., 2022b) (Teixeira et al., 2020c) (Rocha et al., 2021) (de Oliveira Filho et al., 2021). Isso provavelmente se deve ao fato do Si se ligar a componentes da parede celular substituindo compostos estruturais de alto custo energético como a lignina (Schaller et al., 2012) (Crusciol et al., 2013).

Em plantas sob deficiência nutricional, o Si atua na mobilização do nutriente em deficiência no apoplasto das raízes (Pavlovic et al., 2013) e na redistribuição para a parte aérea (Bityutskii et al., 2014), por diminuir a obstrução dos vasos impedindo a formação de calose (Doncheva et al., 2009) e por aumentar a eficiência de utilização do nutriente deficiente (Teixeira et al., 2020a) (Sarah et al., 2021).

As informações atuais predominam avaliando os efeitos do Si apenas na atenuação de estresses isolados, com maior ênfase para plantas da família Poaceae (Epstein, 1994) (Teixeira et al., 2020b) (Teixeira et al., 2020a) (Teixeira et al., 2021b) e poucos estudos em Fabaceae que apresentam diferentes sistemas de absorção de Si. No entanto, em condições de campo, as plantas são submetidas a estresses simultâneos (Frew et al., 2018) e os efeitos variam com a espécie, e nestas condições faltam pesquisas.

Dessa forma, baseando-se no cenário futuro é possível agravamento da ocorrência de multiestresse que pode demandar o uso frequente do Si na agricultura para garantir a segurança alimentar. Contudo, o impacto da alta acumulação de Si nos ciclos biogeoquímicos ainda não é conhecido. Apesar da escassez de estudos pode-se inferir que os benefícios do Si no aumento da produção de biomassa acima e abaixo do solo (Teixeira et al., 2020b), na modificação das relações estequiométricas elementares (Frazão et al., 2020) e da concentração de compostos mais recalcitrantes como a lignina

(Schoelynck et al., 2010), interferem na persistência da biomassa dessas plantas no solo, fato que deve ser considerado nas pesquisas.

Neste contexto, acredita-se que a inclusão do Si nos manejos agrícolas pode colaborar com o uso racional da água para irrigação, que é um recurso finito (Cardozo et al., 2018), tanto pelos efeitos diretos na melhoria de processos fisiológicos em plantas sob estresse, quanto pelos efeitos sinérgicos do Si com nutrientes, como o K, considerando que ambos colaboram para o ajuste hídrico na planta. (Mali and Aery, 2008) complementam que a absorção de K pela planta é melhorada pelo Si a partir da ativação da H-ATPase. Assim, presume-se que plantas adequadamente nutridas com K e Si se beneficiam desses efeitos sinérgicos, aumentando a eficiência de uso de água, o que permitiria diminuir o nível da irrigação sem haver perda na produtividade das culturas, mas a pesquisa atual ainda não explorou esse benefício sendo negligenciado pelos pesquisadores, especialmente do Brasil.

A estratégia da pesquisa para aumentar a eficiência do uso da água ganha importância na agricultura irrigada paulista, pois a área irrigada no Brasil corresponde a 8,2 milhões de hectares, sendo 30% concentrada no estado de São Paulo (ANA, 2021), predominando culturas anuais nestas áreas como milho e o feijão. Assim, fica evidente a necessidade da redução do consumo e do aumento do aproveitamento econômico da água, ou seja, da eficiência de uso da água, para garantir recursos de abastecimento alimentar adequados como pré-requisitos para uma produção agrícola sustentável (Firouzabadi et al., 2021).

Dessa forma, a intensificação dos cultivos e do uso do Si na agricultura, faz-se necessário aumentar a eficiência das aplicações deste elemento benéfico tendo como estratégia o uso da fertirrigação que poderia diminuir taxas de polimerização do Si no solo podendo utilizar doses deste elemento por área inferior a 20 kg ha⁻¹ garantindo adequada absorção do elemento pela planta. Isso ocorreria porque a fertirrigação permite o emprego de fontes solúveis e quando utilizada em concentrações de Si variando de 1,5 a 3,5 mmol L⁻¹ evitaria a ocorrência de polimerização, pois segundo (Birchall, 1995) esse processo causa problema somente em concentração acima de 3,5 mmol L⁻¹.

Diante disso, nosso grupo de pesquisa iniciou recentemente projetos piloto com a fertirrigação com o Si avaliando a resposta de algumas culturas cultivadas em vasos preenchidos com diferentes solos, incluindo o Latossolo Vermelho eutroférico da Fazenda Experimental da Unesp Câmpus de Jaboticabal. Os resultados foram promissores indicando a eficiência da fertirrigação com Si em otimizar a absorção deste elemento verificado nas culturas da cana-de-açúcar (Teixeira et al., 2021b) (Oliveira Filho et al., 2021), eucalipto (Souza Junior et al., 2021) e forrageiras (Rocha et al., 2021). Contudo, os trabalhos desenvolvidos são limitados a ambientes controlados e em vasos, e falta informação sobre a melhor dose agrônômica e econômica a ser aplicada via fertirrigação em condições de campo no Brasil. Ainda permanece desconhecido o teor de Si no solo e foliar adequado para as culturas no Brasil que são indicadores importantes para embasamento técnico do manejo do Si no campo com devido fundamento científico. No entanto, existem estudos com fertirrigação em outros países como Espanha (Peris-Felipo et al., 2020). Inclusive tem recomendação oficial de Si em alguns países como Filipinas (IRRI, 1993), Japão (Liang et al., 2015) e na Flórida (EUA) havendo indicadores de teores adequados de Si no solo e na folha e em outros estados americanos, onde tem havido aumento do número de pesquisa em campo (Tubana et al., 2016). Ensaio de campo de longo prazo em 26 estados da China demonstraram que, a aplicação de fonte solúvel de Si na forma de silicato de potássio tem incrementado a produção de dezenas de cultivos (Liu et al., 2011).

O uso do Si nos cultivos pode ter também uma promissora implicação ambiental. Isso ocorre porque existem indicações que esse elemento poderia mitigar a emissão de gases do efeito estufa (GEE), pois a otimização do Si no sistema solo-planta-microbiota promove um processo de desnitrificação mais completo, resultando na redução do nitrato a N_2 (Lou et al., 2019). Outro efeito da fertilização com Si nas emissões de GEE é o sequestro de C para o solo, devido ao aumento induzido pelo Si na formação do sistema radicular e do desenvolvimento das plantas (Besharat et al., 2020) (Katz et al., 2021) podendo contribuir para o acúmulo de C na área cultivada (Li et al., 2018). Além disso, o aumento do Si biogênico na forma de fitólitos no solo tem uma estrutura multiporosa com diâmetros de poros $<1 \mu m$ e grande área específica de $92-316 m^2 g^{-1}$, capaz de adsorver o C orgânico do solo em suas cavidades e superfícies (Song et al.,

2018). Segundo os autores, isso pode diminuir a exposição do C orgânico do solo a atividade enzimática microbiana, colaborando para sua estabilização e sequestro no solo. No entanto, pouco se conhece sobre as pesquisas com Si em condição de campo e seu impacto no incremento de C na biomassa vegetal em ambientes tropicais e suas implicações na emissão de CO₂ em diferentes cultivos.

A pesquisa com Si deve avançar para uma abordagem holística objetivando compreender melhor seus benefícios no sistema solo-planta-ambiente para aumentar a eficiência produtiva de culturas anuais irrigadas, bem como, estabelecer critérios de uso e aferir com precisão seu potencial agrônomo nestas áreas.

Neste contexto, ficou evidenciado que a nutrição de plantas equilibrada pode contribuir para aumentar a eficiência no uso da água em especial o Si e o K, mas ainda é desconhecida essa sinergia especialmente em cultivos fertirrigados de milho e de feijão. Para isso, é importante ter respostas para as seguintes hipóteses: i) existe uma dose de Si ótima e econômica para fertirrigação e os teores de Si no solo/solução e foliar adequado para seu uso fundamentado, mas depende da espécie cultivada; ii) o Si é um elemento multiestresse ao mitigar danos causados pelo déficit hídrico moderado e severo associado ao estresse por deficiência de K (comum em solos de regiões tropicais) nas culturas de milho e de feijão; iii) o fornecimento ótimo de Si via fertirrigação associado ao K ótimo pode diminuir a necessidade hídrica das duas espécies mantendo alta produtividade; iv) além disso, os dois elementos interferem na decomposição da biomassa vegetal e no C do solo diminuindo a emissão de CO₂.

Para testar essas hipóteses dois experimentos estão sendo realizados com as culturas de milho e de feijão objetivando-se estabelecer o efeito de doses de Si via fertirrigação e sua sinergia com o K em três regimes hídricos para fundamentar estratégia para uso eficiente da água a partir de indicadores fisiológicos, bioquímicos, nutricionais e ambientais em sistema de cultivo irrigado.

Assim, o projeto consiste em dois experimentos um com a cultura do feijão e outro com a cultura do milho. Para esse relatório inicial será apresentado os resultados parciais realizados no experimento do feijão. É importante esclarecer que no relatório final deverá ser incluído parte dos resultados do experimento do feijão que não foram

apresentados neste relatório (descrito no item atividades a serem realizadas) que se referem a algumas análises em processamento no laboratório e os resultados do experimento do milho.

2. ATIVIDADES REALIZADAS NO EXPERIMENTO DO FEIJÃO

A pesquisa está sendo realizada em condições de campo na Fazenda de Ensino, Pesquisa e Extensão da Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias (FCAV), Universidade Estadual Paulista (UNESP), localizada em Jaboticabal (-21° 14' 50.7" de latitude e 48° 17' 01.8" de longitude, 546 m de altitude), São Paulo, Brasil.

Os tratamentos foram constituídos por três regimes hídricos: 80% (sem déficit hídrico), 60% (déficit hídrico moderado) e 40% (déficit hídrico severo) da capacidade de retenção de água no solo (CRA) combinado com quatro doses de Si fornecidas via fertirrigação: 0; 4; 8 e 12 kg⁻¹, na condição sem e com adubação potássica. O experimento foi instalado em esquema de parcela sub-dividida (split split-plot) dispostos em delineamento de blocos casualizados, com quatro repetições. As parcelas experimentais tiveram dimensões de 2,25 x 6 m, área total de 13,5 m² e área útil de 5,4 m².

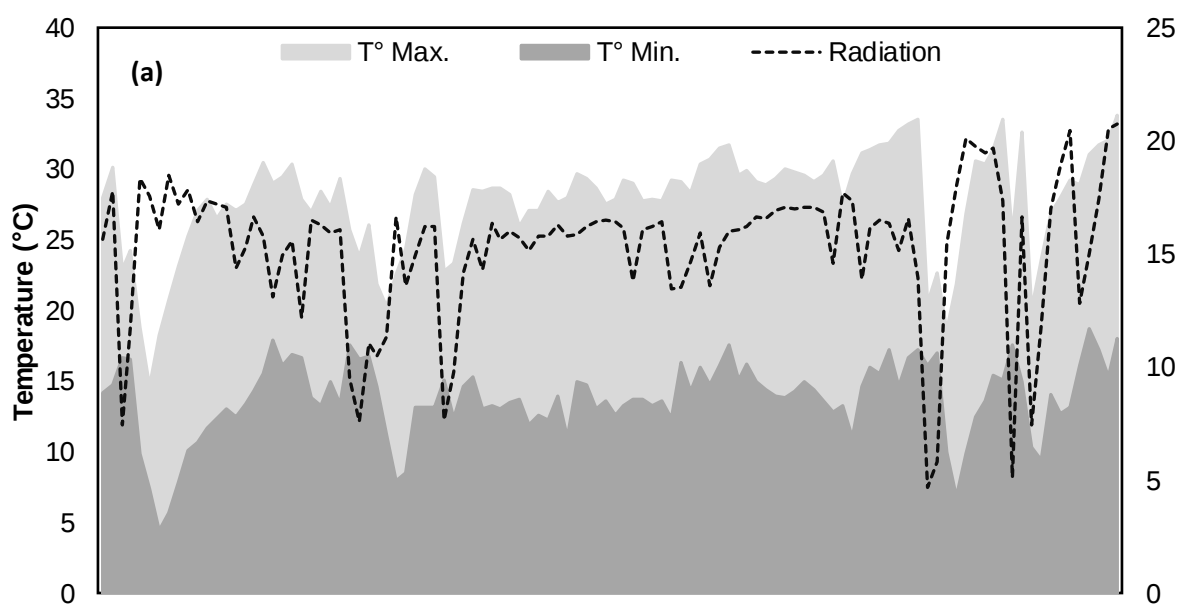
As doses de Si foram determinadas considerando indicação do International Rice Research Institute (IRRI) que recomenda o uso de doses de 40 a 60 kg ha⁻¹ de silicato de potássio (15% de Si) (equivalente a 6 a 9 kg ha⁻¹ de Si) (IRRI, 1993). As doses foram aplicadas em seis parcelamentos, aos 22, 32, 38, 41, 44 e 47 dias após da emergência plena (DAE). 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 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 and Duncan, 1974), diminuindo os riscos de polimerização da solução aplicada.

As adubações foram realizadas baseando-se nos teores do solo e seguindo recomendação de adubação para o estado de São Paulo para a cultura do 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 de forma parcelada, aplicando-se 20, 30, 45 e 45 kg ha⁻¹ de N aos 7, 20, 31 e 43 DAE, respectivamente. Para as plantas cultivadas com adubação de K foi aplicado dose 50 kg ha⁻¹ de K₂O na forma de KCl aplicado à lanço e manualmente aos 14 DAE. Na condição de cultivo sem adubação potássica, as plantas não receberam fornecimento de K, mas receberam a adubação dos demais nutrientes.

O primeiro experimento foi realizado com o cultivo de feijão durante o período de maio a agosto de 2022. Os dados de temperatura, umidade, radiação global e pluviosidade durante o período de cultivo do feijão são apresentados na Figura 1.



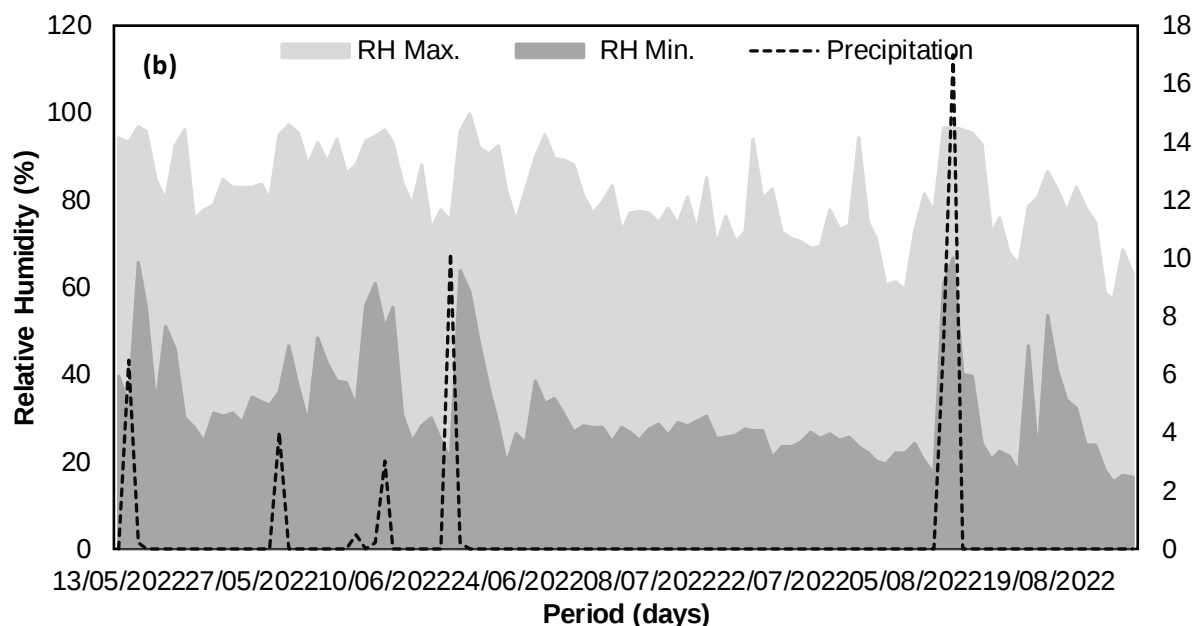


Figura 1. Condições experimentais na área de realização do experimento em campo durante o cultivo de feijão. Temperatura máxima (T° Max.), temperatura mínima (T° Min.) e radiação global (a) umidade relativa máxima (RH Max.), umidade relativa mínima (RH Min.) e precipitação (P) (b).

Sementes de feijão da cultivar Carioca BSR FC 402 foram utilizadas porque possuem elevado potencial produtivo, alto valor nutricional, uniformidade de coloração e tamanho dos grãos, resistência ao mosaico comum e resistência moderada à antracnose, à ferrugem e à murcha-de-fusário (Melo et al., 2017). O plantio foi realizado com espaçamento entre linhas de 0,45 m e 15 sementes por m, totalizando uma população de 333.000 plantas por ha^{-1} .

O solo da área experimental foi classificado como um Latossolo Vermelho eutroférico (LVef) (Andrioli and Centurion, 1999). Previamente a instalação, foram coletadas amostras de solos da camada de 0-20 e 20-40 cm de profundidade para análise química para fins de fertilidade do solo (Raij et al., 2001), para determinação do teor de Si disponível (Korndörfer et al., 2004) e para análise granulométrica (Camargo et al., 1986). Os resultados foram resumidos na Tabela 1.

Tabela 1. Atributos químicos do solo nas camadas de 0-20 e 20-40 cm de profundidade.

Prof	pH	OM	P	S	Ca	Mg	K	Al	H ⁺ Al	SB ^a	T ^b	V ^c	Sat Al	B	Cu	Fe	Mn	Zn
------	----	----	---	---	----	----	---	----	----------------------	-----------------	----------------	----------------	-----------	---	----	----	----	----

	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 = sum of bases (SB = Ca²⁺ + Mg²⁺ + K⁺); ^b = cation exchange capacity (T = SB + H+Al);
and ^c = basis saturation (V=SBx100/T).

O preparo do solo foi realizado conforme sistema de plantio convencional, realizando roçagem de plantas daninhas, seguido de subsolagem e gradagem pesada e leve.

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

Para a determinação da lâmina de água a ser aplicada se realizou a instalação de quatro tensiômetros por regime hídrico aos 38 DAE com duas profundidades de 0-20 cm e 20-40 cm. As leituras da tensão foram feitas diariamente com um tensiômetro digital portátil, além disso também foi usado um sensor de umidade portátil (HydroSenceII) com uma sonda de 0-20 cm. Ambas as leituras foram tomadas diariamente desde sua instalação as 8 da manhã até a finalização do cultivo e os níveis de CRA foram determinados a partir da coleta de amostras indeformadas do solo para determinação da curva de retenção de água em mesa de tensão e câmara de pressão de Richards (Klute, 1986).

Na área experimental foi realizado a instalação de um sistema de irrigação por gotejamento com espaçamento de 0,5 m entre emissores e vazão de 1,6 L h⁻¹. Foi instalado uma linha de gotejo para cada linha de cultivo. O manejo da irrigação se manteve em condições ótimas de capacidade de campo desde a semeadura até a última

aplicação de Si, porém os três regimes hídricos receberam uma lâmina de água diária de 7,11 mm. Após dos 47 DAE se iniciou com as restrições hídricas (60 e 40% CRA) respectivamente. O regime hídrico moderado e severo, receberam como média 5,5 e 2,3 mm da lâmina de água dependendo da porcentagem de umidade do solo das leituras feitas com o tensiômetro e o medidor de umidade, enquanto o regime adequado seguiu recebendo 7,11 mm de água por dia.

As plantas foram cultivadas durante todo o ciclo fenológico e as análises morfológicas, fisiológicas e nutricionais foram realizadas na fase de florescimento pleno, iniciando aos 58 DAE no cultivo de feijão e 65 DAE. As variáveis avaliadas serão descritas a seguir.

Trocas gasosas foliares

A fotossíntese líquida (A), taxa de transpiração (E), condutância estomática (Gs) e concentração interna de C (Ci) foram medidas usando um analisador de gás infravermelho aberto (LcPro-SD, ADC BioScientific Ltd., 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 ($\text{EUA} = A/E$). A eficiência instantânea de carboxilação foi determinada com a relação A e Ci ($\text{EIC} = A/\text{Ci}$). As leituras foram tomadas somente nas plantas que não receberam adubação potássica nas plantas de feijão.

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

Os dados de fluorescência inicial (Fo) e máxima (Fm) e eficiência quântica do fotossistema II (Fv/Fm) foram coletados no folíolo central da quinta folha completamente desenvolvida. As leituras foram realizadas entre 7 e 9:30 da manhã utilizando um fluorômetro portátil (Os30P+, Opti-Sciences Inc., EUA) (Lichtenthaler et al., 2005) sendo as folhas submetidas ao período de 30 minutos ao escuro antes das leituras.

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. As amostras foram imediatamente pesadas para determinação da massa fresca e em seguida, 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 dados estão sendo expressos em mg g⁻¹ de massa fresca.

Conteúdo relativo de água

Foram coletados dez discos (26,4 mm² cada) da quinta folha completamente desenvolvida. As amostras foram imediatamente pesados para obter a massa fresca (Mf). Posteriormente, 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 se determinaram pela equação $[(Mf - Ms) / (Mt - Ms)] \times 100$ (Barrs and Weatherley, 1962).

Potencial hídrico foliar (Ψ_w)

Foi determinado avaliando-se a quinta folha completamente desenvolvida utilizando 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 avaliadas entre 5 e 7:00 da manhã (Turner, 1981).

Índice de extravasamento de eletrólitos

Dez discos foliares (26,4 mm² cada) foram coletados da quarta folha completamente desenvolvida. Os discos coletados foram 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 depois 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 and Tobita, 1998).

Compostos fenólicos

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

Altura da planta, diâmetro do caule, número de folhas, número de vagens e área foliar

A altura das plantas foi determinada a partir de medição considerando desde a base até a inserção da primeira folha completamente desenvolvida. O diâmetro do colmo foi medido a 5 cm da base da planta. O número de folhas e o número de vagens foram obtidos a partir da contagem. A área foliar foi determinada usando um medidor de área foliar (L-3100, LiCor, EUA). Para determinação dessas variáveis, cada unidade experimental foi constituída por 10 plantas.

Produção de massa seca

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

Teores de Si, N, P, K, Ca, Mg, S e micronutrientes na folha diagnóstica

Na fase pleno florescimento, procedeu-se a coleta do 4º trifólio completo (com pecíolo) (folha diagnóstica) a partir do ápice de 10 plantas de cada parcela (Ambrosano et al., 1997). As amostras foram lavadas conforme descrito anteriormente, e em seguida as amostras de folhas foram secas em estufa de circulação forçada de ar (TE-394/3-MP, Tecnal, BR) a 65±5°C, e previamente moídas em moinho do tipo Willey.

O teor de Si foi obtido pela extração do elemento com solução de peróxido de hidrogênio e hidróxido de sódio em estufa de circulação forçada de ar (TE-394/3-MP,

Tecnal, BR) a $120 \pm 5^\circ\text{C}$, (Kraska and Breitenbeck, 2010) e a leitura realizada por colorimétrica com molibdato de amônio, ácido oxálico e HCl usando espectrofotômetro (B442, Micronal, BR) a 410 nm (Korndörfer et al., 2004).

Os teores foliares de K, Ca, Mg, P, S, Mn, Fe, Zn e Cu foram determinados a partir da digestão das amostras com ácido perclórico e ácido nítrico (2:1) (Bataglia et al., 1983). A leitura de K, Ca, Mg, Fe, Zn e Cu foi realizada por espectrofotometria de absorção atômica com chama de ar-acetileno. A determinada de P foi determinada por reação colorimétrica com molibdato de amônio e vanadato de amônio com leitura em espectrofotômetro (B442, Micronal, BR) a 420 nm. O teor de S foi quantificado por reação induzida com ácido SEED e cloreto de bário com leitura em espectrofotômetro (B442, Micronal, BR) a 420 nm.

O teor de N foi determinado pela adição de ácido sulfúrico concentrado às amostras, seguido de destilação e titulação com ácido sulfúrico (Bataglia et al., 1983).

Teores de Si, P, K, Ca, Mg, S e micronutrientes na parte aérea

As amostras de tecido vegetal coletadas para determinação da massa seca parte aérea foram previamente moídas em moinho do tipo Willey e utilizadas para determinação dos teores de Si e nutrientes.

Acúmulos de Si, P, K, Ca, Mg e S e micronutrientes na parte aérea

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

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

Eficiências de uso de P, K, Ca, Mg e S

A eficiência de uso dos macronutrientes foi determinada utilizando a equação abaixo (Fageria and Baligar, 2005):

$$\text{Eficiência de uso do elemento (g}^2\text{ g}^{-1}\text{)} = \frac{\text{Massa seca da parte aérea}^2\text{ (g)}}{\text{Acúmulo do elemento (g por planta)}}$$

Teor de Si disponível no solo

Determinado em amostras de solo coletada na zona úmida fertirrigada próximo a planta (10 subamostras por parcela). As amostras foram devidamente preparadas para análise química para fins de fertilidade do solo (Raij et al., 2001). O teor de Si disponível no solo foi determinado usando cloreto de cálcio a 0,01 mol L⁻¹ como extrator (Korndörfer et al., 2004).

Teor de Si no grão

Foi utilizado a mesma metodologia descrita anteriormente para análise foliar, utilizando-se grãos de feijão que foram previamente secos e moídos em moinho do tipo Willey.

Componentes de produtividade

Foram determinados na fase de maturação fisiológica, determinando-se a massa de 1000 grãos e a produtividade.

Produtividade de uso da água

Foram determinadas a produtividade da água de irrigação (PA_i) e a produtividade da água de irrigação mais a precipitação pluvial ($PA_i + p$) (Firouzbadi et al., 2021), usando as fórmulas:

$$PA_i = \text{Produtividade de grãos (kg ha}^{-1}\text{)} \div I$$

$$PA_i + p = \text{Produtividade de grãos (kg ha}^{-1}\text{)} \div (I + P)$$

Onde,

I = quantidade de água de irrigação aplicada durante a estação de cultivo (sem déficit hídrico (80% da CRA) = 578 mm; déficit hídrico moderado (60% da CRA) = 496 mm; e déficit hídrico severo (40% da CRA) = 409 mm);

$I + P$ = quantidade de água de irrigação aplicada em cada regime hídrico mais a precipitação pluvial (49 mm) desconsiderando-se o escoamento superficial.

Esse parâmetro foi determinado após a colheita das culturas considerando as entradas de água monitoradas pelos balanços hídricos diários realizadas durante todo ciclo das culturas.

Análise estatística

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

3. ATIVIDADES A SEREM REALIZADAS NO EXPERIMENTO DO FEIJÃO

Os materiais vegetais a serem utilizados nas análises descritas neste tópico já foram coletados conforme a época indicada para cada determinação. Porém, os procedimentos analíticos ainda não foram completamente finalizados, inviabilizando a sua apresentação neste relatório parcial. Ressalta-se que tais dados serão apresentados no relatório final.

Teores de C na folha diagnóstica e na parte aérea

O teor de C na folha diagnóstica e na parte aérea das plantas de feijão será determinado por combustão à seco a 1000°C usando um analisador elementar (LECO Truspec CHNS), calibrado com um padrão de trigo LECO 502-278 (C = 45%)

Teor de N na parte aérea

O teor de N parte aérea das plantas de feijão será determinado por combustão à seco a 1000°C usando um analisador elementar (LECO Truspec CHNS), calibrado com um padrão de trigo LECO 502-278 (N = 2,68%).

Acúmulos de C e N na parte aérea

O acúmulo de C e N na parte aérea será determinado a partir da relação dos teores obtidos com a massa seca das plantas, utilizando a equação abaixo:

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

Eficiências de uso de C e N

A eficiência de uso de C e N será determinada utilizando a equação abaixo (Fageria and Baligar, 2005):

$$\text{Eficiência de uso do elemento} (g^2 g^{-1}) = \frac{\text{Massa seca da parte aérea}^2 (g)}{\text{Acúmulo do elemento} (g \text{ por planta})}$$

Estequiometria elementar na parte aérea

Será determinada a partir das razões estequiométricas dos elementos estruturais Si:C:N:P:S.

Peroxidação lipídica

O terço médio da lâmina foliar da terceira folha completamente desenvolvida foi coletado e imediatamente armazenados em recipiente contendo N₂ líquido, posteriormente o material foi armazenado em freezer a -80°C. As amostras encontram-se armazenadas sob essas condições para análise futura.

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

Conteúdo de prolina

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

As amostras encontram-se armazenadas sob essas condições para análise futura.

Superóxido dismutase (SOD, EC 1.15.1.1)

Será obtido os extratos proteicos amostras previamente armazenadas em N₂ líquido (Gomes-Junior et al., 2007). O material vegetal será macerado em N₂ líquido, homogeneizado em tampão de fosfato de potássio contendo ácido etileno diaminotetracético, ditioneitol e polivinilpolipirrolidona. O homogenato será centrifugado, o sobrenadante armazenado em alíquotas a -80°C, e posteriormente utilizado para quantificação das enzimas. A atividade enzimática será expressa a partir da concentração de proteínas totais (Bradford, 1976). A atividade da SOD será determinada a partir da medida da inibição da redução fotoquímica do cloreto de nitro azul tetrazólio, realizado em uma câmara de reação iluminada por uma lâmpada fluorescente de 15 W, a 25°C (Giannopolitis and Ries, 1977). A medição será realizada utilizando um espectrofotômetro a 560 nm e os resultados expressos em SOD U mg⁻¹ de proteína.

Taxa de decomposição da biomassa vegetal

Após a colheita das plantas feijão foi avaliado a taxa de decomposição da biomassa vegetal, realizando-se coletas a cada 30 dias após a colheita até 120 dias, totalizando quatro coletas. Para tal, a biomassa das plantas acima do solo foi coletada considerando três amostras simples para formar uma amostra composta por parcela. A amostragem foi realizada em pontos aleatórios ao longo de linhas diagonais transversais na área útil da parcela (Crusciol et al., 2013).

Os resíduos das plantas foram lavados utilizando-se água corrente e destilada, posteriormente, acondicionadas em sacos de papel e secas em estufa de circulação forçada de ar (TE-394/3-MP, Tecnal, BR) a 65°C até massa constante e, em seguida, foram pesadas. O material foi moído em moinho do tipo Willey para determinação dos teores de C, Si e macronutrientes.

Os teores de C e N serão determinados nas amostras de resíduos vegetais coletados aos 0, 60 e 120 dias após a colheita (DAC). A quantificação será determinada por combustão à seco a 1000°C usando um analisador elementar (LECO Truspec CHNS), calibrado com um padrão de trigo LECO 502-278 (C = 45% e N = 2,68%). Os teores de P, K, Ca, Mg, S e Si serão determinados em todas as amostras coletadas, ou seja, aos 0, 30, 60, 90 e 120 DAC.

O acúmulo de macronutrientes, C e Si será determinado pelo produto da biomassa pelo teor dos elementos do resíduo vegetal de cada amostragem. Com esses valores será calculado a degradação da biomassa vegetal e o teor de elementos nela contida, sendo os dados expressos em kg ha⁻¹. Esse resultado também será expresso em porcentagem (%) pelo cálculo: conteúdo remanescente de biomassa acima do solo ou de cada nutriente do conteúdo inicial em cada período, multiplicado por 100.

Para descrever a decomposição da biomassa e o acúmulo remanescente dos elementos (N, P, K, Ca, Mg, S, C e Si), tanto em kg ha⁻¹ quanto em %, será utilizado o modelo matemático exponencial (Thomas and Asakawa, 1993): $x = x_0 e^{-kt}$, em que x é a biomassa vegetal ou o acúmulo dos elementos remanescentes após um período de tempo t , em dias; x_0 é a quantidade inicial de biomassa ou de elementos; e k é a constante de decomposição do resíduo ou liberação de elementos. Com o valor de k , será calculado o tempo de meia-vida ($t_{1/2} = 0,693/k$) (Paul and Clack, 1989), que expressa o período necessário para que metade do resíduo vegetal se decomponha ou para metade dos elementos contidos na biomassa vegetal acima do solo ser liberado. Aplicando a primeira derivada às funções ajustadas aos dados na biomassa e liberação dos elementos, as taxas diárias de decomposição e liberação de elementos após a dessecação da cultura serão calculadas (Kliemann et al., 2006).

Relações C/N, C/P, C/S e C/Si no resíduo vegetal

Será determinada a partir da obtenção dos teores dos elementos estruturais (Si, C, N e S) na biomassa vegetal, calculando-se as respectivas relações.

Lignina e celulose

Os teores de lignina e celulose serão determinados nas amostras de resíduos vegetais coletadas 0, 60 e 120 DAC. Para tal, amostras entre 0,5 e 1 g de material vegetal seco serão tratadas com brometo de cetiltrimetilamônio para dissolver e remover proteínas. O material restante será tratado com ácido sulfúrico 72%. O teor de celulose será calculado subtraindo a massa antes e depois do tratamento com ácido sulfúrico e divisão pela massa inicial do material. Em uma terceira etapa, o material restante será queimado a 550°C e o teor de fibra de detergente ácido (FDA-lignina) será calculado

subtraindo a massa antes e depois da incineração e divisão pela massa inicial do material (Vax Soest, 1963).

Incremento da biomassa vegetal (IBV), incremento da produtividade da cultura (IPC) e incremento de carbono na biomassa vegetal (ICB)

Os valores de IBV e IPC foram calculados por relações entre a biomassa ou produtividade da planta sob condição de estresse (Be ou Pe) com a de plantas sob condição controle (Bc ou Pc), em condições de presença (+Si) (escolhida dose ótima com maior produtividade) e ausência de Si (-Si), conforme as fórmulas a seguir:

$$IBV (\%) = \frac{\left(\frac{Be_{+Si}}{Be_{-Si}}\right) - \left(\frac{Bc_{+Si}}{Bc_{-Si}}\right)}{\left(\frac{Bc_{+Si}}{Bc_{-Si}}\right)} \times 100 \quad IPC (\%) = \frac{\left(\frac{Pe_{+Si}}{Pe_{-Si}}\right) - \left(\frac{Pc_{+Si}}{Pc_{-Si}}\right)}{\left(\frac{Pc_{+Si}}{Pc_{-Si}}\right)} \times 100$$

Para o cálculo do ICB, foi utilizado o valor obtido em IBV e o coeficiente de carbono da biomassa (C_b) ($C_b = 0,96$) (Li et al., 2018), conforme fórmula a seguir:

$$ICB (\%) = IBV \times C_b$$

Essas avaliações são importantes porque embora a concentração de C pode diminuir no tecido vegetal especialmente na parede celular em plantas cultivadas com o fornecimento de Si, o aumento da biomassa e da produtividade das culturas contribui para recuperar o acúmulo de C na biomassa vegetal (Li et al., 2018) incrementando a biomassa por área e consequentemente o C.

Emissão de CO₂

Foi avaliada durante a decomposição da palhada residual a cada 30 dias após a colheita até 120 dias. Para isso, foram instalados colares de PVC (0,10 m de diâmetro) em cada parcela experimental a 3 cm de profundidade, onde foi avaliado a emissão de CO₂, temperatura e umidade do solo. As medidas foram realizadas sempre no período das 7 às 10 horas da manhã, utilizando um sistema automatizado de fluxo de CO₂ do solo portátil (LI-8100, LI-COR, EUA), monitorando-se as mudanças na concentração de CO₂ dentro de uma câmara fechada usando espectroscopia de absorção óptica no espectro infravermelho (Moitinho et al., 2021).

Os dados foram coletados e estão sendo avaliados com testes estatísticos, com figuras e tabelas sendo elaboradas para apresentação no próximo relatório.

Temperatura do solo

Determinada usando um sensor portátil do sistema LI-8100 que foi inserido no solo a uma distância de 10 cm dos pontos de avaliação do fluxo de emissão de CO₂ na região próxima a instalação dos colares de PVC.

Umidade do solo

Foi medida por um sistema de reflectometria no domínio do Tempo (TDR) (Hydrosense TM, Campbell Scientific Inc., EUA), que consiste em duas sondas de 12 cm que foram inseridas no solo a 10 cm dos pontos de avaliação do fluxo de emissão de CO₂ dos colares de PVC.

Dose econômica de Si

Determinada aplicando a seguinte equação quando as respostas da fertirrigação com doses de Si se ajustaram ao modelo polinomial quadrático. Para tal, foi utilizada a equação descrita abaixo (Zebarth et al., 1991):

$$\text{Dose mais econômica (t ha}^{-1}\text{)} = \frac{a1 - \text{relação de troca}}{2 \cdot (-a2)}$$

Onde:

a1 = valor que acompanha o termo x² (coeficiente angular);

a2 = valor que acompanha o termo x (coeficiente linear);

relação de troca = custo da tonelada do silicato ÷ preço da tonelada do produto (grãos).

4. RESULTADOS PARCIAIS NO EXPERIMENTO DO FEIJÃO

4.1 Parâmetros fisiológicos

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 isolados 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 foram de 68,67; 38,16 e 21,35

mg por planta de Si, obtido nas doses 6,82; 6,69 e 6,47 kg ha⁻¹ de Si, respectivamente, para WWD, MWD e SWD (Fig. 2a). Plantas com adubação potássica apresentaram os máximos acúmulos de 59,79; 37,74 e 21,35 mg por planta, obtidos nas doses 5,84; 6,17 e 6,97 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 558,48; 398,11 e 310,33 mg por planta, nas doses de Si de 6,96; 8,86 e 6,62 kg ha⁻¹, respectivamente. Os acúmulos máximos de K nas plantas que receberam adubação potássica foram de 627,97; 459,44 e 371,21 mg por planta nas doses 6,89; 9,34 e 9,46 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).

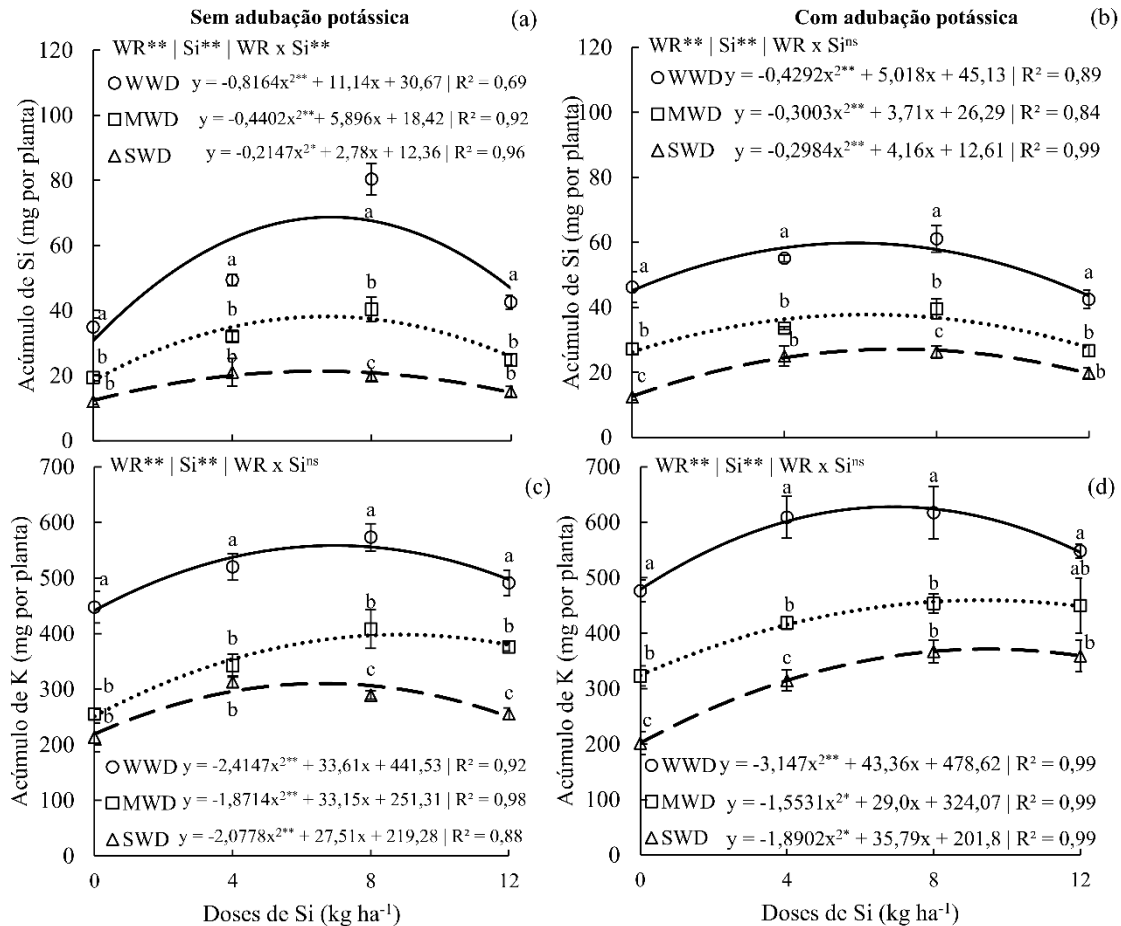


Figura 2. Acúmulo de silício (Si) (a, b) e acúmulo de potássio (K) (c, d) na parte aérea de plantas de feijão cultivada sem déficit hídrico – WWD (70% da capacidade de retenção de água - WRC), com déficit hídrico moderado – MWD (60% de WRC) e com déficit hídrico severo – SWD (40% de WRC); combinado com doses de fornecidas via fertirrigação: 0, 4, 8 e 12 kg ha⁻¹, sem e com adubação potássica. Letras mostram diferenças para os regimes hídricos (WR) em cada dose de Si ($p < 0,05$, teste de Tukey). * e **: significativo a 1 e 5% de probabilidade, respectivamente, e ^{ns}: não significativo pelo teste F.

Os pigmentos fotossintetizantes Chl *a* e Chl *a + b* apresentaram efeitos interativos dos fatores regime hídrico e doses de Si em plantas sem adubação potássica e com adubação potássica (Fig. 3a, b, e, f). O efeito das doses de Si proporcionou ajuste polinomial quadrático para os três regimes hídricos em ambas as condições de adubação potássica. Contudo, para Chl *b*, apenas plantas com adubação com K houve efeito interativo ($p < 0,01$) (Fig. 3d) seguindo o mesmo ajuste na regressão. Plantas sem adubação potássica tiveram pontos de máximo teor de Chl *a* de 0,27; 0,26 e 0,25 mg g⁻¹ nas doses de Si de 5,71; 6,25 e 5,55 kg ha⁻¹, respectivamente, para WWD, MWD e SWD (Fig. 3a). Plantas que receberam adubação com K, apresentaram os máximos teores de Chl *a* de 0,26; 0,29 e 0,28 mg g⁻¹ nas doses 6,66; 6,90 e 7,10 kg ha⁻¹ de Si

(Fig. 3b). Nas plantas sem adubação com K e sem Si (0 kg ha^{-1} de Si), as plantas sob WWD apresentaram maior teor de Chl *a* 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.

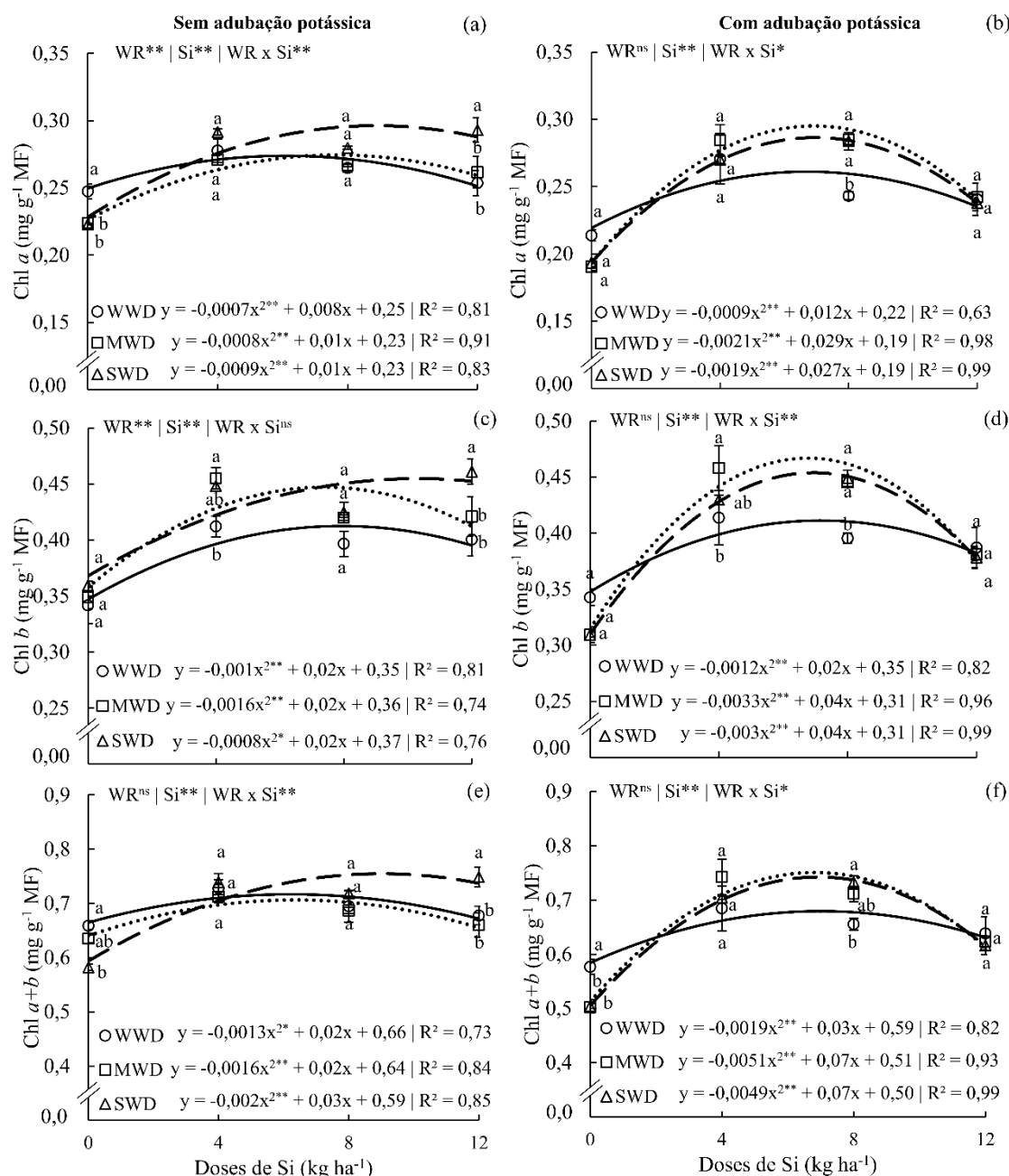


Figura 3. Teor de clorofila *a* (Chl *a*) (a, b), de clorofila *b* (Chl *b*) (c, d) e de clorofila *a+b* (Chl *a+b*) (e, f) em plantas de feijão cultivada sem déficit hídrico – WWD (70% da capacidade de retenção de água - WRC), com déficit hídrico moderado – MWD (60% de WRC) e com déficit hídrico severo – SWD (40% de WRC); combinado com doses de Si (Si) fornecidas via fertirrigação: 0, 4, 8 e 12 kg ha^{-1} , sem e com adubação potássica. Letras mostram diferenças para os regimes

hídricos (WR) em cada dose de Si ($p < 0,05$, teste de Tukey). * e **: significativo a 1 e 5% de probabilidade, respectivamente, e ^{ns}: não significativo pelo teste F. MF: massa fresca.

Os máximos teores de Chl *b* foram de 0,45; 0,42 e 0,49 mg g⁻¹ ocorrendo nas doses de Si de 10,0; 6,25 e 12,5 kg ha⁻¹ de Si em plantas sem adubação potássica (Fig. 3c). Nas plantas com adubação potássica, os máximos teores de Chl *b* foram de 0,43; 0,43 e 0,44 mg g⁻¹ obtidos nas doses de 8,33; 6,06 e 6,66 kg ha⁻¹ de Si respectivamente, para WWD, MWD e SWD (Fig. 3d). Plantas sem adubação potássica e com adubação potássica sob MWD apresentaram maior teor de Chl *b* 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 Chl *b* apenas na dose 8 kg ha⁻¹.

Os teores de Chl *a* + *b* máximos foram de 0,73; 0,70 e 0,70 mg g⁻¹ nas doses de 7,69; 6,25 e 7,50 kg ha⁻¹ de Si em plantas sem adubação potássica e de 0,70; 0,75 e 0,75 mg g⁻¹ nas doses de 7,89; 6,86 e 7,14 kg ha⁻¹ de Si em plantas com adubação potássica respectivamente, para WWD, MWD e SWD (Fig. 3e, f). Nas duas condições de K as plantas sob WWD apresentaram maiores teores de Chl *a* + *b*. Contudo, sem adubação potássica, plantas em SWD apresentaram maiores teores de Chl *a* + *b* nas folhas na maior dose de Si, enquanto nas plantas com adubação potássica, isto ocorreu apenas na dose 8 kg ha⁻¹ para a mesma condição hídrica.

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. 4a, b).

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 8,82; 6,00 e 8,33 kg ha⁻¹ respectivamente, para WWD, MWD e SWD (Fig. 4a). Plantas com adubação potássica obtiveram máximos teores de carotenoides de 0,63; 0,80 e 0,70 mg g⁻¹ nas doses de 5,55; 7,14 e 6,36 kg ha⁻¹ de Si, para WWD, MWD e SWD, respectivamente (Fig. 4b). 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.

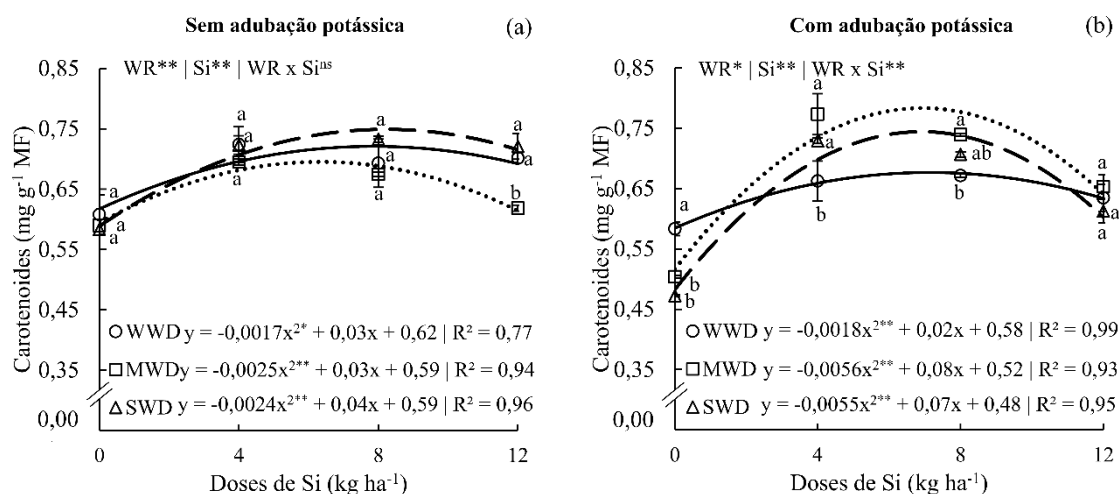


Figura 4. Teor de carotenoides (a, b) em plantas de feijão cultivada sem déficit hídrico – WWD (70% da capacidade de retenção de água - WRC), com déficit hídrico moderado – MWD (60% de WRC) e com déficit hídrico severo – SWD (40% de WRC); combinado com doses de Si (Si) fornecidas via fertirrigação: 0, 4, 8 e 12 kg ha⁻¹, sem e com adubação potássica. Letras mostram diferenças para os regimes hídricos (WR) em cada dose de Si (p<0,05, teste de Tukey). * e **: significativo a 1 e 5% de probabilidade, respectivamente, e ns: não significativo pelo teste F. MF: massa fresca

O conteúdo de fenóis nas plantas sem adubação potássica, foi influenciado apenas pelos fatores isolados (regimes hídricos e doses de Si) (p<0,01) (Fig. 5a). Contudo, as plantas com adubação com K apresentaram efeito significativo da interação (WR x Si) (p<0,01) (Fig. 5b). Nas duas condições de K, as plantas apresentaram efeito com ajuste polinomial quadrático às doses crescentes de Si para os três regimes hídricos (Fig. 5a, b).

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

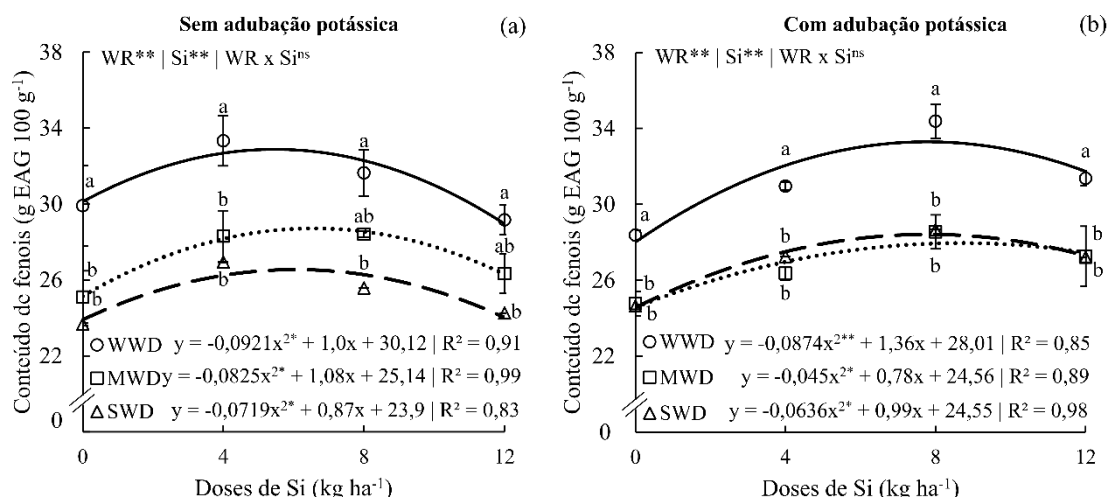


Figura 5. Conteúdo de fenóis (a, b) em plantas de feijão cultivada sem déficit hídrico – WWD (70% da capacidade de retenção de água - WRC), com déficit hídrico moderado – MWD (60% de WRC) e com déficit hídrico severo – SWD (40% de WRC); combinado com doses de Si (Si) fornecidas via fertirrigação: 0, 4, 8 e 12 kg ha⁻¹, sem e com adubação potássica. Letras mostram diferenças para os regimes hídricos (WR) em cada dose de Si ($p < 0,05$, teste de Tukey). * e **: significativo a 1 e 5% de probabilidade, respectivamente, e ^{ns}: não significativo pelo teste F. EAG: equivalente a ácido gálico.

Os fatores isolados regime hídrico e doses de Si proporcionaram efeito para Fo e Fm nos três regimes hídricos em ambas as condições de adubação potássica (Fig. 6a-d), bem como, para Fv/Fm em plantas sem adubação potássica (Fig. 6e). O efeito da interação (WR x Si) foi significativo apenas para Fo e Fv/Fm com adubação potássica ($p < 0,05$) (Fig. 6f).

Os valores de Fo, Fm e Fv/Fm em plantas sem adubação potássica e com adubação potássica apresentaram ajuste polinomial quadrático com as doses de Si aplicadas (Fig. 6a-f). Os valores máximos em plantas sem adubação potássica foram de 109,87; 106,11 e 102,24 para Fo nas doses de 5,12; 6,16 e 5,21 kg ha⁻¹ de Si; de 488,98; 482,76 e 466,92 para Fm nas doses de 8,65; 7,85; 7,99 kg ha⁻¹ de Si; e de 0,79; 0,78 e 0,75 para Fv/Fm nas doses de 5,62; 5,62 e 6,0 kg ha⁻¹ de Si, respectivamente, para os regimes hídricos WWD, MWD e SWD. As plantas sob SWD e sem receber Si via fertirrigação apresentaram menores valores de Fv/Fm 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. 6a).

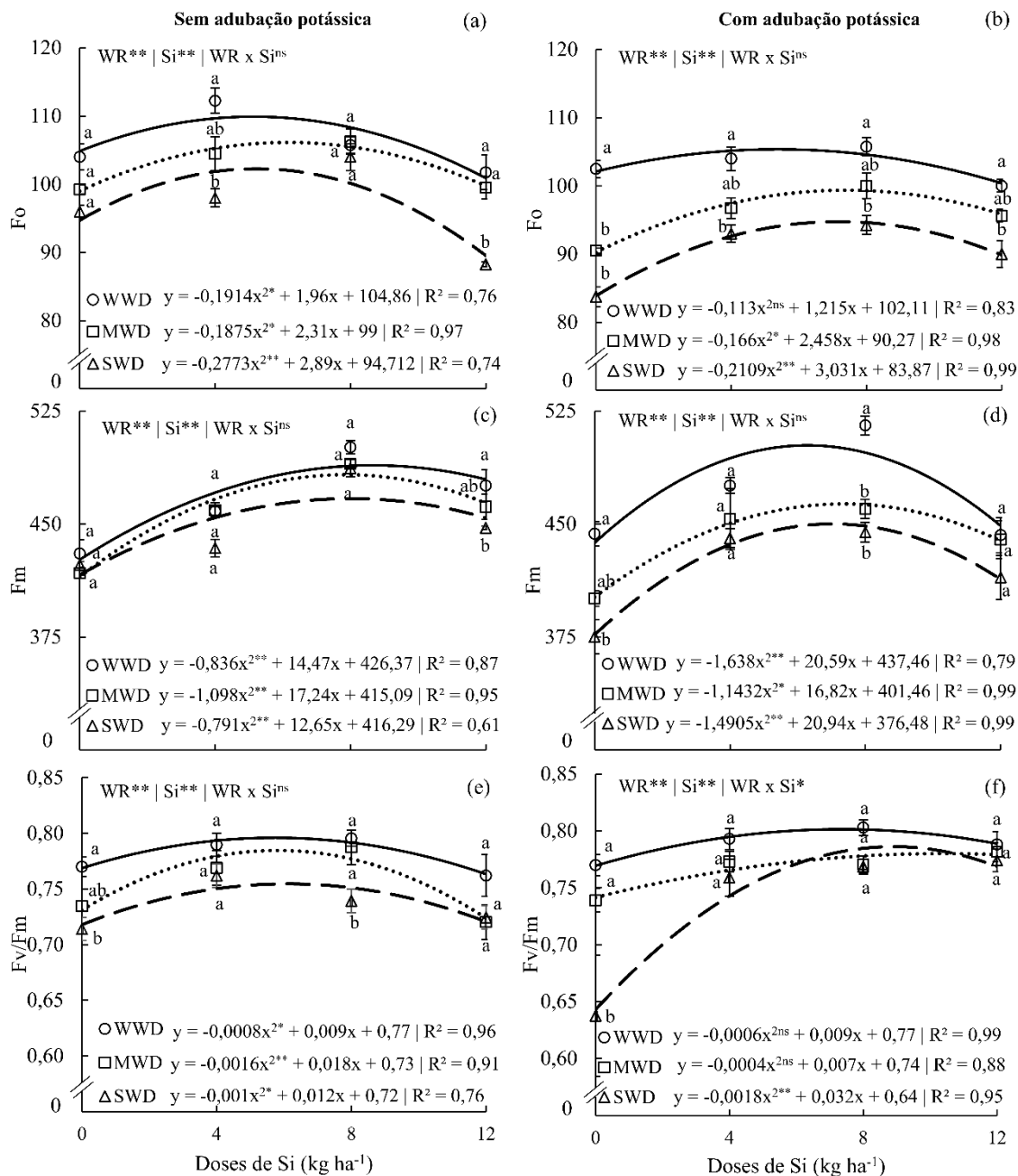


Figura 6. Fluorescência inicial (Fo) (a-b), fluorescência máxima (Fm) (c-d) e eficiência quântica do fotossistema II (Fv/Fm) (e-f) em plantas de feijão cultivada sem déficit hídrico – WWD (70% da capacidade de retenção de água - WRC), com déficit hídrico moderado – MWD (60% de WRC) e com déficit hídrico severo – SWD (40% de WRC); combinado com doses de Si (Si) fornecidas via fertirrigação: 0, 4, 8 e 12 kg ha⁻¹, sem e com adubação potássica. Letras mostram diferenças para os regimes hídricos (WR) em cada dose de Si ($p < 0,05$, teste de Tukey). * e **: significativo a 1 e 5% de probabilidade, respectivamente, e ^{ns}: não significativo pelo teste F.

A 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. 7a, b). A concentração interna de CO₂ (Ci) ($p < 0,05$), 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. 7c-f).

Os valores máximos de A foram de 18,13; 12,27 e 9,89 $\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ obtidos nas doses 4,65; 6,22 e 6,52 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. 7a). 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 3,70; 2,94 e 4,16 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. 7b).

As maiores concentrações de CO₂ foram de 317,92; 328,18 e 316,43 $\mu\text{mol CO}_2 \text{ mol}^{-1}$ nas doses de Si de 7,52; 5,68 e 5,82 kg ha^{-1} de Si respectivamente, para WWD, MWD e SWD. Plantas sob MWD apresentaram maiores Ci 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 Ci semelhantes (Fig. 7c).

As máximas taxas de E ocorreram nas plantas que receberam as doses de 5,78; 4,24 e 8,15 kg ha^{-1} de Si, atingindo valores de 8,19; 7,05 e 3,59 $\text{nmol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$, 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. 7d).

As doses de Si que proporcionaram as máximas EUAi foram de 2,23; 1,82 e 2,87 $\text{CO}_2 \text{ mol}^{-1} \text{ H}_2\text{O}$ nas doses de 2,88; 6,55 e 4,16 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 3,50; 8,00 e 7,5 kg ha^{-1} nos regimes sob WWD, MWD e SWD, respectivamente (Fig. 7e, 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.

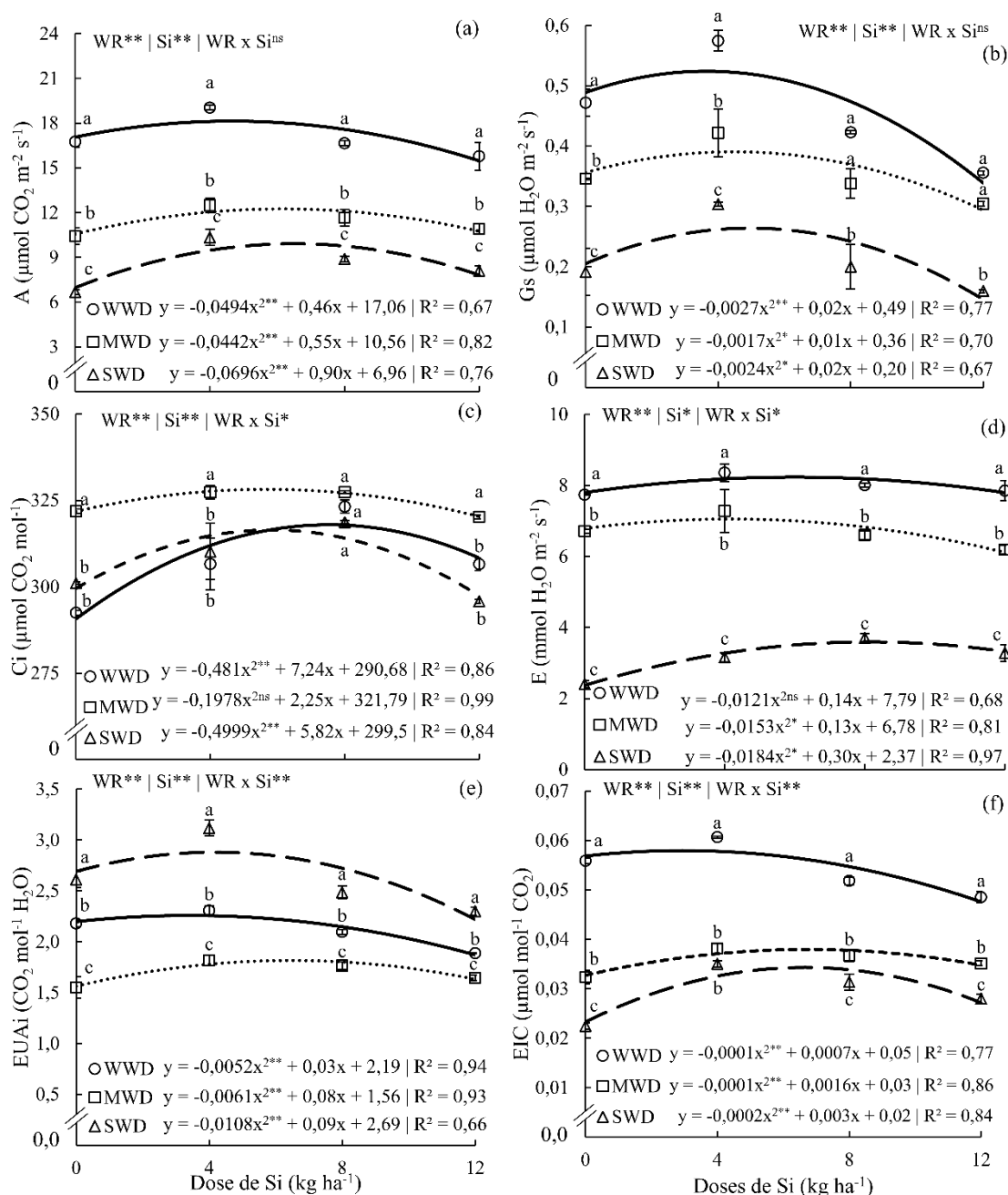


Figura 7. Fotossíntese (a), condutância estomática (b), concentração interna de CO₂ (Ci) (c), Transpiração (Tr) (d), eficiência do uso de água (EUA_i) (e), eficiência de carboxilação (EIC) (f) em plantas de feijão cultivada sem déficit hídrico – WWD (70% da capacidade de retenção de água - WRC), com 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, sem 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.

O conteúdo relativo de água e potencial hídrico nas plantas sem adubação potássica e com adubação potássica apresentaram efeitos significativos 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. 8a-d). Os máximos conteúdos de água, 95,42; 89,11 e 86,08%, 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. 8a). Para as plantas com adubação potássica as doses de Si 8,09; 7,92 e 7,17 kg ha⁻¹ proporcionaram os máximos conteúdos de água, 89,08; 86,33 e 81,70% (Fig. 8b). Sem adubação potássica as plantas sob WWD apresentaram maiores conteúdos de água apenas da 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 5,88; 7,14 e 6,09 para os regimes hídricos WWD, MWD e SWD, respectivamente (Fig. 8c). Contudo, em plantas com adubação potássica as doses de Si iguais a 8,33; 6,25 e 7,81 kg ha⁻¹ proporcionaram respectivamente os máximos potenciais hídricos foliares -0,21; -0,29 e -0,33 MPa (Fig. 8d). 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. 8e, f). Os mínimos extravasamentos de eletrólitos ocorreram nas doses de Si 6,6; 5,2 e 8,0 kg ha⁻¹ com valores de 14,94; 16,58 e 15,10 % para os regimes hídricos WWD, MWD e SWD, respectivamente (Fig. 8e). Plantas com adubação potássica apresentaram os mínimos extravasamentos (15,38; 14,20 e 15,27 %) nas doses 5,05; 8,98 e 8,98 kg ha⁻¹ de Si (Fig. 8f). 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.

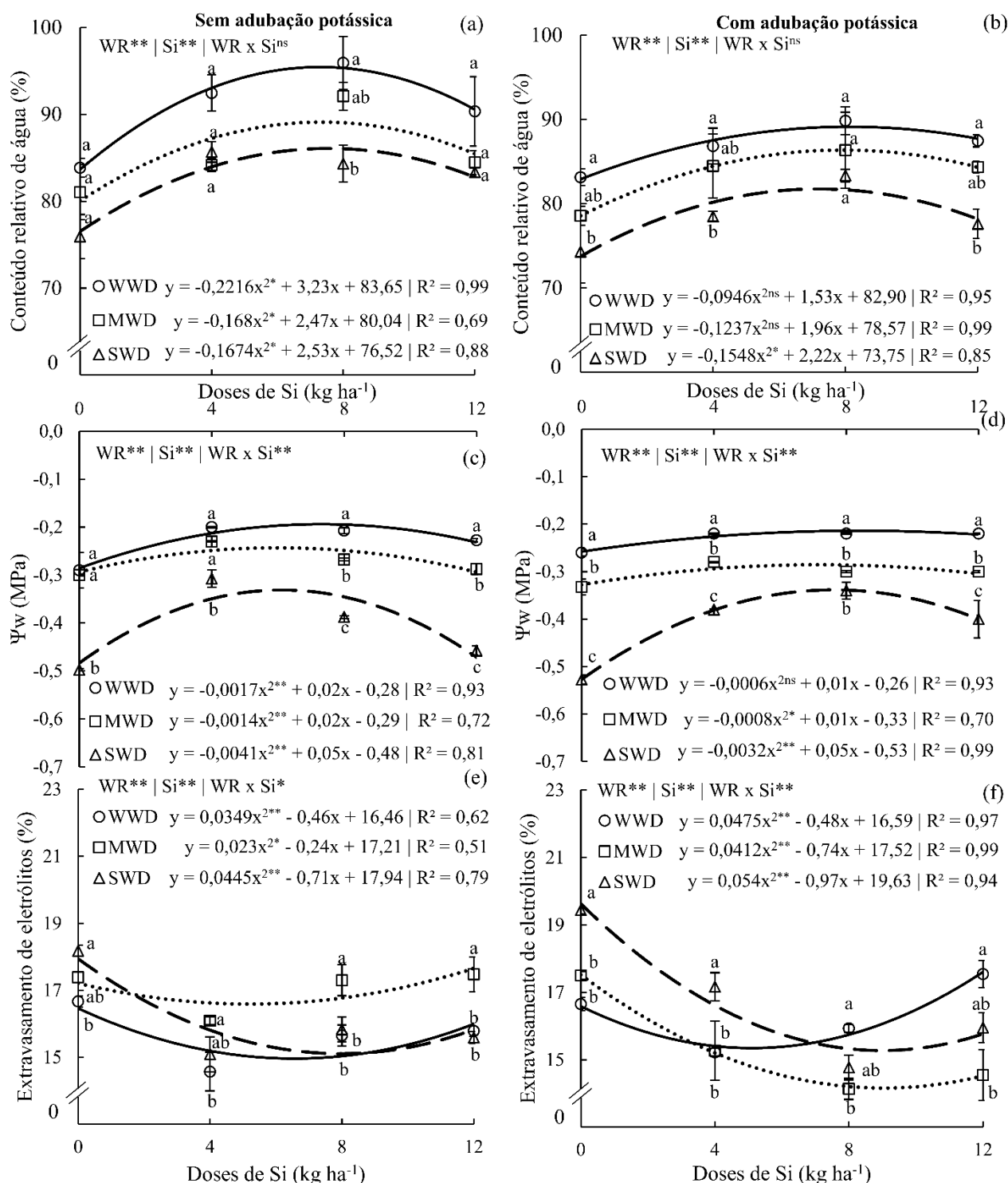


Figura 8. Conteúdo relativo de água (a, b), potencial hídrico (Ψ_w) (c, d) e extravasamento de eletrólitos (e, f) em plantas de feijão cultivada sem déficit hídrico – WWD (70% da capacidade de retenção de água – WRC), com déficit hídrico moderado – MWD (60% de WRC) e com déficit

hídrico severo – SWD (40% de WRC); combinado com doses de Si (Si) fornecidas via fertirrigação: 0, 4, 8 e 12 kg ha⁻¹, sem e com adubação potássica. Letras mostram diferenças para os regimes hídricos (WR) em cada dose de Si ($p < 0,05$, teste de Tukey). * e **: significativo a 1 e 5% de probabilidade, respectivamente, e ^{ns}: não significativo pelo teste F.

A 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. 9a-f).

As máximas massas secas das folhas das plantas sem adubação potássica foram de 6,60; 5,11 e 3,40 g obtidas com as doses de Si de 6,93; 7,90 e 7,76 kg ha⁻¹ de Si; para as plantas que receberam adubação potássica, as máximas foram de 7,06; 5,04 e 3,80 g obtidas nas doses de 6,85; 6,67 e 8,20 kg ha⁻¹ de Si, respectivamente, para WWD, MWD e SWD (Fig. 9a, 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.

A massa seca das hastes máximas em plantas sem adubação potássica foram de 17,98; 14,90 e 12,65 g; e com adubação potássica foram de 20,79; 16,53 e 13,82 g, obtidas nas doses de Si de 5,29; 7,36 e 7,07; 5,78; 7,34 e 8,22 kg ha⁻¹, respectivamente, para os regimes WWD, MWD e SWD (Fig. 9c, 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. 9c). Contudo nas plantas com adubação potássica, este resultado ocorreu também para o SWD na maior dose de Si (12 kg ha⁻¹) (Fig. 9d).

A massa seca da parte aérea foram máximas em plantas sem adubação potássica (24,5; 20,01 e 15,78 g) e com adubação potássica (27,81; 21,59 e 17,63 g) nas doses de Si de 5,78; 7,50 e 7,23; 6,08; 7,31 e 8,21 kg ha⁻¹, respectivamente, para os regimes hídricos WWD, MWD e SWD (Fig. 9e, 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. 9e). 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. 9f).

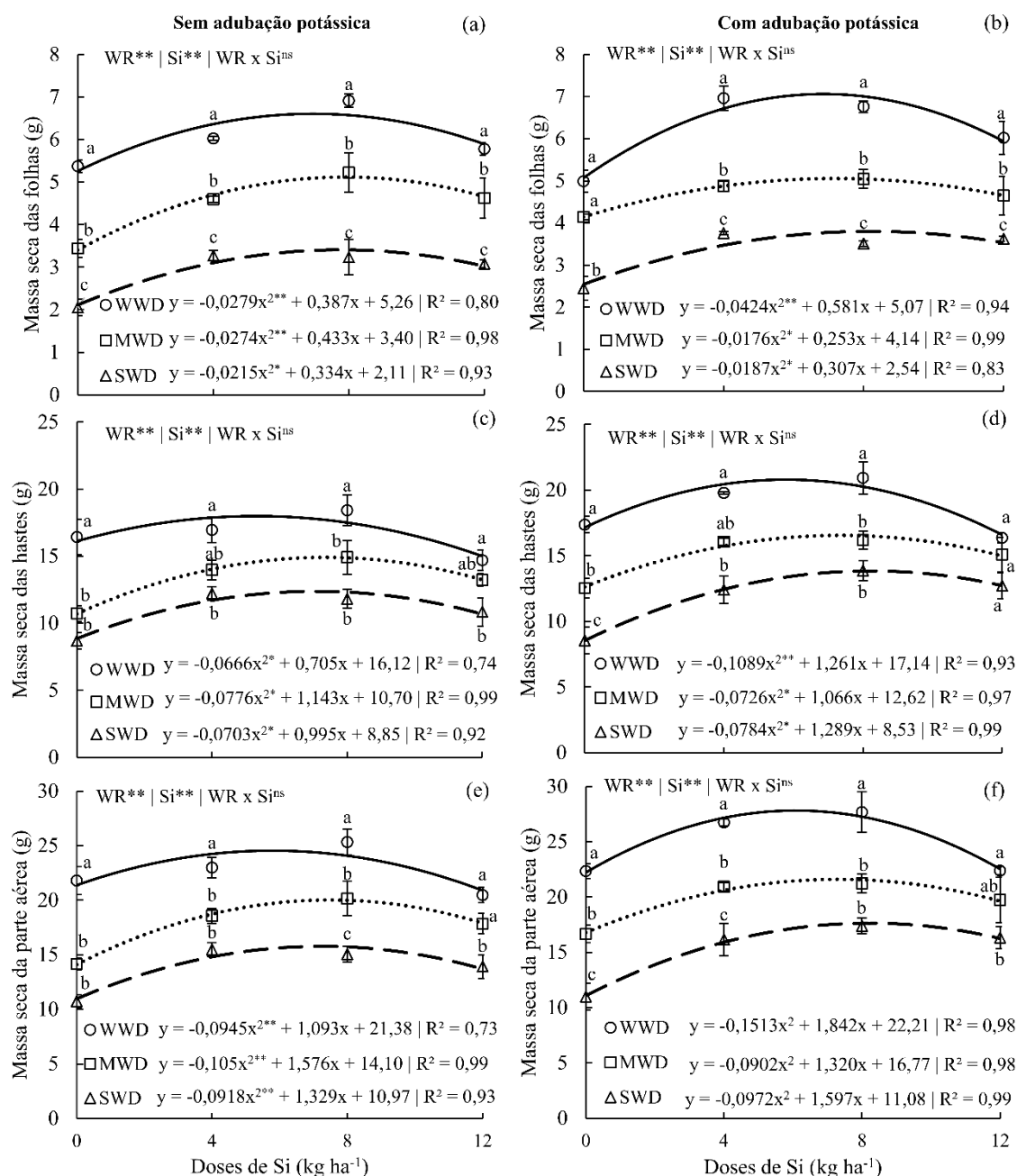


Figura 9. Massa seca das folhas (a, b), massa seca das hastes (c, d) e massa seca da parte aérea (e, f) de plantas de feijão cultivada sem déficit hídrico – WWD (70% da capacidade de retenção de água - WRC), com déficit hídrico moderado – MWD (60% de WRC) e com déficit hídrico severo – SWD (40% de WRC); combinado com doses de Si (Si) fornecidas via fertirrigação: 0, 4, 8 e 12 kg ha⁻¹, sem e com adubação potássica. Letras mostram diferenças

para os regimes hídricos (WR) em cada dose de Si ($p < 0,05$, teste de Tukey). * e **: significativo a 1 e 5% de probabilidade, respectivamente, e ^{ns}: não significativo pelo teste F.

4.2 Diagnose foliar

O teor de Si na folha diagnóstica de feijão apresentou efeitos dos fatores individuais ($p < 0,01$) e ajuste polinomial quadrático para as doses de Si avaliadas em plantas cultivadas sem adubação potássica e com adubação potássica (Fig. 10a, b). Em plantas sem adubação com K, os máximos teores de Si foram de 1,88; 1,55 e 1,29 g kg⁻¹ observados nas doses de Si iguais a 5,94; 6,17 e 6,19 kg ha⁻¹, respectivamente, para WWD, MWD e SWD (Fig. 10a). Plantas com adubação potássica, obtiveram máximos valores nas doses de Si de 6,92; 6,61 e 5,55 kg ha⁻¹, proporcionando teores foliares de Si máximos de 2,09; 1,85 e 1,28 g kg⁻¹, respectivamente, para plantas sob WWD, MWD e SWD (Fig. 10b). Os maiores teores de Si na folha diagnóstica de plantas sob WWD e sem adubação com K e com adubação potássica nas doses de 4, 8 e 12 kg ha⁻¹ de Si, em relação às plantas sob MWD e SWD, contudo, em plantas com adubação potássica os teores de Si foram semelhantes às de que não receberam aplicação de Si (0 kg ha⁻¹).

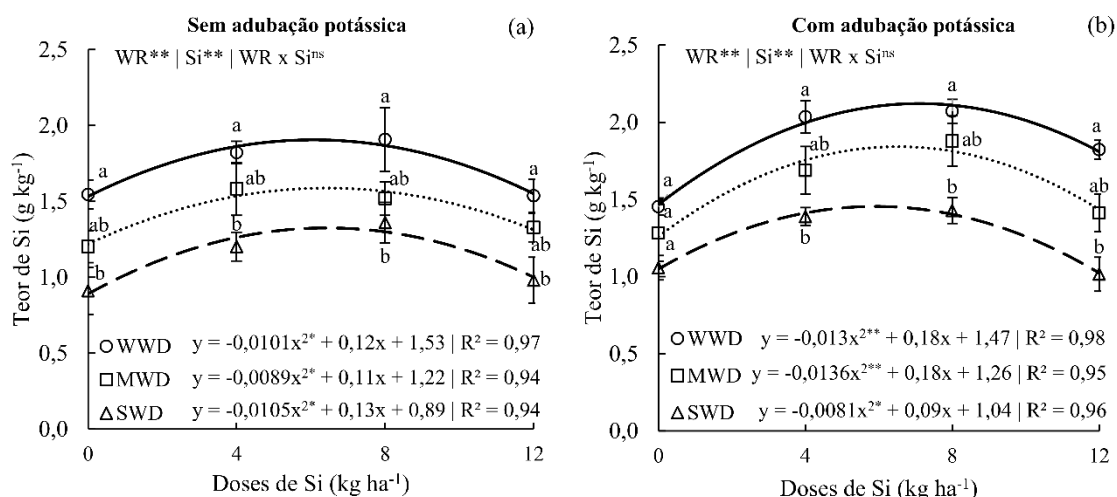


Figura 10. Teor de silício (Si) (a, b) na folha diagnóstica de plantas de feijão cultivada sem déficit hídrico – WWD (70% da capacidade de retenção de água - WRC), com déficit hídrico moderado – MWD (60% de WRC) e com déficit hídrico severo – SWD (40% de WRC); combinado com doses de Si fornecidas via fertirrigação: 0, 4, 8 e 12 kg ha⁻¹, sem e com adubação potássica. Letras mostram diferenças para os regimes hídricos (WR) em cada dose de Si ($p < 0,05$, teste de Tukey). * e **: significativo a 1 e 5% de probabilidade, respectivamente, e ^{ns}: não significativo pelo teste F.

Os teores de N e de P na folha diagnóstica de plantas de feijão cultivadas sem e com adubação potássica, e o teor de K em plantas com adubação potássica foram influenciados pelos efeitos interativos entre os fatores (WR x Si) ($p < 0,01$ e $p < 0,05$, respectivamente) (Fig. 11a-d, f). Os teores de N e P apresentaram ajuste polinomial quadrático para todos os regimes hídricos independente da condição de K. Contudo, os teores de K apresentaram ajuste linear positivo apenas em plantas sob regime WWD (Fig. 11e,f).

Os máximos teores de N (30,74; 32,36 e 32,27 g kg⁻¹) ocorreram nas doses de 3,84; 7,60 e 5,92 kg ha⁻¹ de Si em plantas sem adubação potássica, respectivamente, para os regimes hídricos WWD, MWD e SWD (Fig. 11a). Plantas com adubação potássica e sob WWD, MWD e SWD, alcançaram os máximos teores de N (32,9; 33,09 e 33,88 g kg⁻¹) nas doses de Si iguais a 7,58; 7,38 e 4,54 kg ha⁻¹ de Si, respectivamente (Fig. 11b). O teor de N foi maior nas doses 4, 8 e 12 kg ha⁻¹ em plantas sob MWD em relação às plantas sob WWD na condição sem adubação com K. Na condição de plantas que receberam adubação potássica e sob SWD, o apresentaram maior teor de N na dose 0 e 4 kg ha⁻¹, mas o menor teor na dose 12 kg ha⁻¹.

Os teores de P máximos em plantas sem adubação potássica foram de 2,48; 1,92 e 1,75 g kg⁻¹ nas doses de Si 5,50; 5,71 e 5,92 kg ha⁻¹, respectivamente, para os regimes hídricos WWD, MWD e SWD (Fig. 11c). As doses de Si de 5,88; 3,57 e 4,22 kg ha⁻¹ proporcionaram os máximos teores de P na condição com adubação potássica, respectivamente, para os regimes hídricos WWD (2,67 g kg⁻¹), MWD (1,93 g kg⁻¹) e SWD (1,78 g kg⁻¹) (Fig. 11d). Plantas sob MWD e SWD, independente da condição de K, apresentaram os menores teores de P, em relação às plantas sob WWD em todas as doses de Si. Contudo, sem adubação potássica, plantas sob MWD nas doses de Si 0; 8 e 12 kg ha⁻¹ ainda apresentaram teores de P maiores que plantas cultivadas em SWD, enquanto em condição de adubação com K, isso ocorreu apenas nas doses 4 e 12 kg ha⁻¹ de Si.

Os máximos teores de K em plantas sem adubação com o nutriente (22,74 e 24,48 g kg⁻¹) ocorreram na dose de Si de 5,79 kg ha⁻¹, em plantas sob MWD, e de 6,49 kg ha⁻¹ em plantas sob SWD, respectivamente (Fig. 11e). Em plantas com adubação potássica os teores máximos de K foram 23,28 e 24,80 g kg⁻¹ nas doses 5,43 e 6,46 kg

ha⁻¹ de Si, respectivamente para o regime déficit hídrico MWD e SWD (Fig. 11f). Plantas sob SWD e sem adubação com K, apresentaram os maiores teores de K na dose 4 kg ha⁻¹, enquanto em plantas com adubação potássica, isso ocorreu nas doses de 4; 8 e 12 kg ha⁻¹ de Si, em relação às plantas sob WWD.

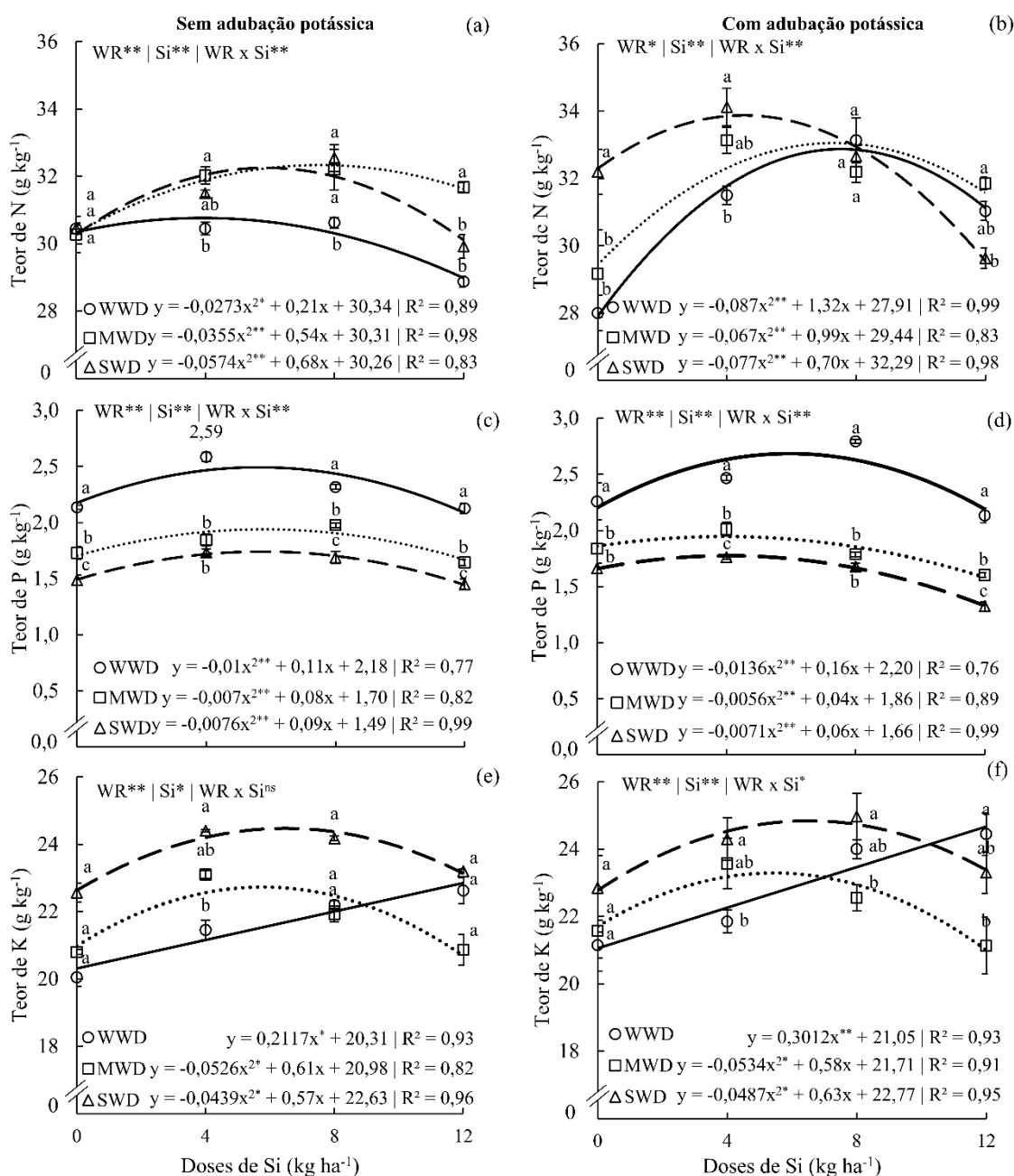


Figura 11. Teores de nitrogênio (N) (a, b), fósforo (P) (c, d) e potássio (K) (e, f) na folha diagnóstica de plantas de feijão cultivada sem déficit hídrico – WWD (70% da capacidade de retenção de água - WRC), com déficit hídrico moderado – MWD (60% de WRC) e com déficit

hídrico severo – SWD (40% de WRC); combinado com doses de Si fornecidas via fertirrigação: 0, 4, 8 e 12 kg ha⁻¹, sem e com adubação potássica. Letras mostram diferenças para os regimes hídricos (WR) em cada dose de Si ($p < 0,05$, teste de Tukey). * e **: significativo a 1 e 5% de probabilidade, respectivamente, e ^{ns}: não significativo pelo teste F.

Os teores de Ca em plantas sem adubação potássica apresentaram efeitos interativos dos fatores (WR x Si) ($p < 0,01$) (Fig. 12a), sendo que as doses de Si proporcionaram efeito com ajuste polinomial quadrático para todos os regimes hídricos. Contudo, nas plantas com adubação potássica, apenas os fatores isolados influenciaram os teores de Ca, com ajuste linear crescente para o efeito de doses de Si (Fig. 12b). As doses de Si de 4,69; 7,82 e 6,66 kg ha⁻¹ aplicadas em plantas sem adubação potássica induziram, respectivamente, os teores máximos de Ca de 16,61; 18,33 e 17,53 g kg⁻¹ para os regimes hídricos WWD, MWD e SWD. Nas doses 8 e 12 kg ha⁻¹, plantas sob WWD apresentaram menor teor de Ca na folha diagnose de feijão, em relação às plantas sob MWD, que apresentou maiores teores de Ca (Fig. 12a). Nas plantas com adubação potássica, a dose 12 kg ha⁻¹ de Si proporcionou maiores teores de Ca nas plantas independente do regime hídrico, e a condição de MWD induziram os maiores teores nas plantas nas doses de 0; 4 e 12 kg ha⁻¹ de Si, em relação às plantas sob WWD. Na dose de 8 kg ha⁻¹ de Si, as plantas sob os três regimes apresentaram teores de Ca semelhantes (Fig. 12b).

Os teores de Mg apresentaram efeitos dos fatores isolados ($p < 0,05$), com ajuste polinomial quadrático em plantas sem adubação potássica, e linear positiva em plantas com adubação com K (Fig. 12c, d). Os máximos teores de Mg em plantas sem adubação (2,94; 2,50 e 2,23 g kg⁻¹) aconteceram nas doses de Si 5,18; 5,55 e 5,42 kg ha⁻¹, respectivamente, para WWD, MWD e SWD (Fig. 12c). Nas duas condições de K, plantas sob SWD apresentaram os menores teores de Mg independente da dose de Si, em relação à condição WWD. Contudo, as plantas sob SWD mantiveram o teor de Mg iguais às plantas em MWD na dose de Si de 4 kg ha⁻¹ (sem adubação potássica) (Fig. 12c), e nas doses de 4 e 8 kg ha⁻¹ de Si (com adubação potássica) (Fig. 12d).

O teor de S na folha diagnose foi influenciado apenas pelas doses de Si ($p < 0,01$) em plantas sem adubação potássica (Fig. 12e) e pelos regimes hídricos e doses de Si ($p < 0,01$) em plantas com adubação potássica (Fig. 12f). Nas duas condições de K, os

teores de S apresentaram ajuste polinomial quadrático com as doses de Si. Os máximos teores de Mg em plantas sem adubação com K (2,64; 2,55 e 2,61 g kg⁻¹) foram obtidos com as doses de Si de 3,40; 4,16 e 4,09 kg ha⁻¹, respectivamente, para WWD, MWD e SWD. Contudo, não houve diferença nos teores de S nas doses de Si entre os regimes hídricos (Fig. 12e). Os teores máximos de S em plantas com adubação potássica (2,79; 2,58 e 2,50 g kg⁻¹) ocorreram nas doses de Si de 7,00; 5,00 e 5,00 kg ha⁻¹. Nesta condição de K, plantas sob WWD apresentaram os maiores teores de S na dose 8 e 12 kg ha⁻¹, em relação a MWD e SWD (Fig. 12f).

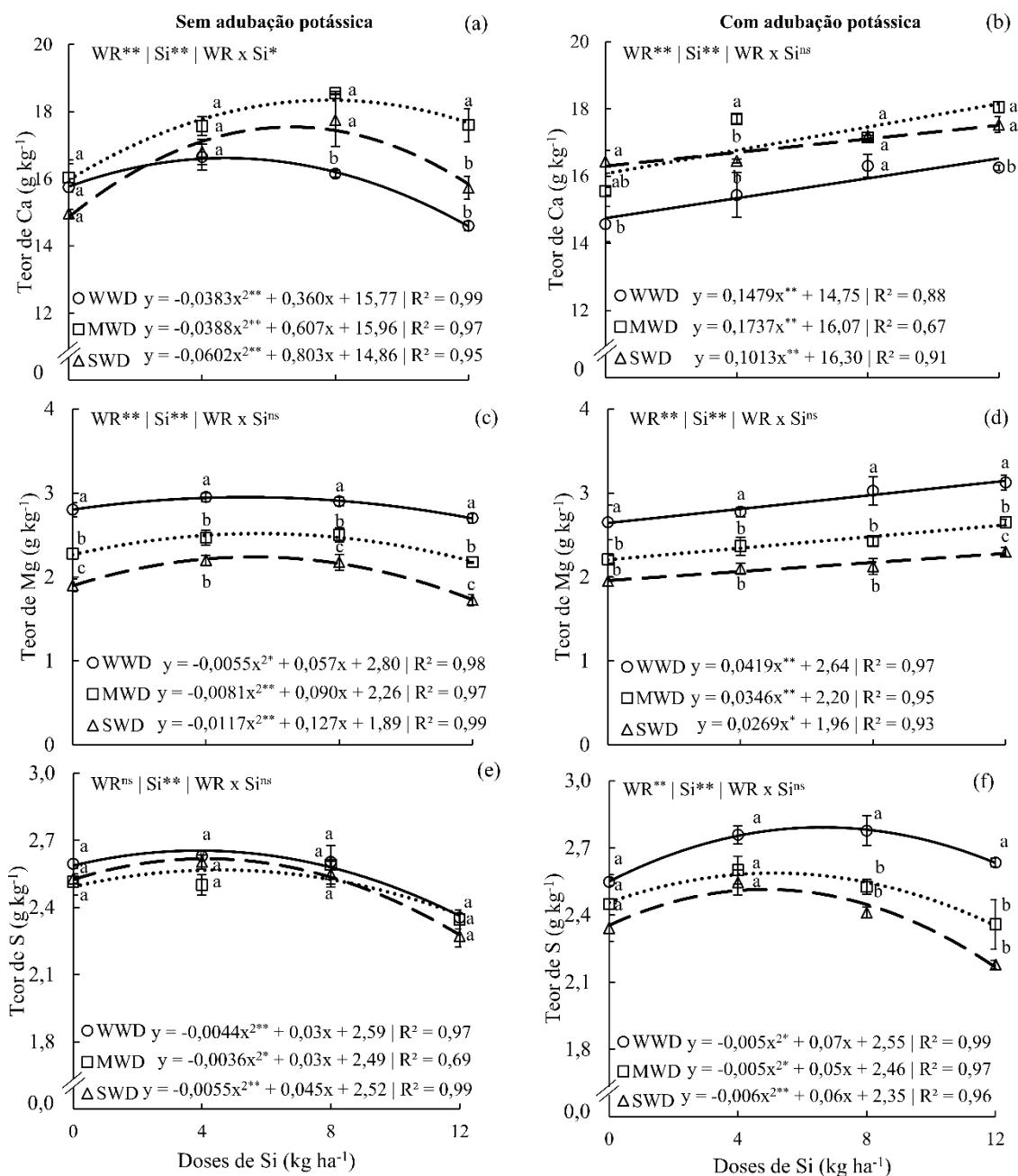


Figura 12. Teores de cálcio (Ca) (a, b), magnésio (Mg) (c, d) e enxofre (S) (e, f) na folha diagnóstica de plantas de feijão cultivada sem déficit hídrico – WWD (70% da capacidade de retenção de água - WRC), com déficit hídrico moderado – MWD (60% de WRC) e com déficit hídrico severo – SWD (40% de WRC); combinado com doses de Si fornecidas via fertirrigação: 0, 4, 8 e 12 kg ha⁻¹, sem e com adubação potássica. Letras mostram diferenças para os regimes hídricos (WR) em cada dose de Si ($p < 0,05$, teste de Tukey). * e **: significativo a 1 e 5% de probabilidade, respectivamente, e ^{ns}: não significativo pelo teste F.

Os teores de Fe foram influenciados pelos fatores individuais (regime hídrico e doses de Si) ($p < 0,01$) nas duas condições de K com ajuste polinomial quadrático (Fig.

13a, b). Os teores de Fe máximos em plantas sem adubação potássica foram de 337,91; 414,93 e 593,00 mg kg⁻¹ nas doses de Si de 7,00; 6,50 e 6,29 kg ha⁻¹, respectivamente, para WWD, MWD e SWD. Nas duas condições de K, plantas sob WWD apresentaram os menores teores de Fe em todas as doses de Si, em relação às plantas sob SWD (Fig. 13a, b). Nas plantas com adubação potássica, os teores máximos de Fe (324,83; 406,18 e 454,39 mg kg⁻¹) ocorreram nas doses de 5,60; 5,40 e 5,64 kg ha⁻¹ de Si, respectivamente, para WWD, MWD e SWD (Fig. 13b).

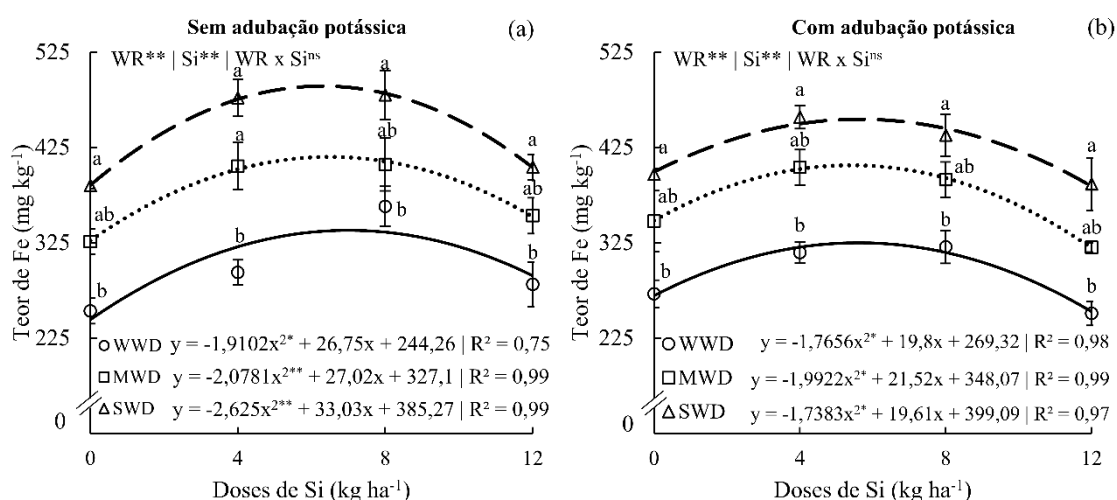


Figura 13. Teor de ferro (Fe) (a, b) na folha diagnóstica de plantas de feijão cultivada sem déficit hídrico – WWD (70% da capacidade de retenção de água - WRC), com déficit hídrico moderado – MWD (60% de WRC) e com déficit hídrico severo – SWD (40% de WRC); combinado com doses de Si fornecidas via fertirrigação: 0, 4, 8 e 12 kg ha⁻¹, sem e com adubação potássica. Letras mostram diferenças para os regimes hídricos (WR) em cada dose de Si ($p < 0,05$, teste de Tukey). * e **: significativo a 1 e 5% de probabilidade, respectivamente, e ^{ns}: não significativo pelo teste F.

Os teores de Mn, Zn e Cu na folha diagnose de plantas sem e com adubação potássica foram influenciados apenas pelos fatores isolados (regime hídrico e doses de Si) ($p < 0,01$) com ajuste polinomial quadrático às doses de Si (Fig. 14a-f). Os teores de Mn máximos em plantas sem adubação com K (71,89; 63,32 e 56,86 mg kg⁻¹) foram alcançados nas doses de Si de 6,33; 5,94 e 6,74 kg ha⁻¹, respectivamente, para WWD, MWD e SWD (Fig. 14a). Nas plantas com adubação potássica, as doses de 5,42; 4,69 e 4,67 kg ha⁻¹ induziram os teores máximos de Mn de 72,22; 64,23 e 54,81 mg kg⁻¹, respectivamente, para WWD, MWD e SWD (Fig. 14b). Nas duas condições de K, as plantas sob SWD apresentaram menores teores de Mn em todas as doses de Si, em

relação às plantas sob WWD. Contudo, plantas sem adubação potássica e sob MWD apresentaram teores de Mn semelhantes às plantas sob WWD nas doses de 0 e 4 kg ha⁻¹ de Si (Fig. 14a), nas plantas com adubação potássica isso ocorreu apenas na dose 4 kg ha⁻¹ de Si (Fig. 14b).

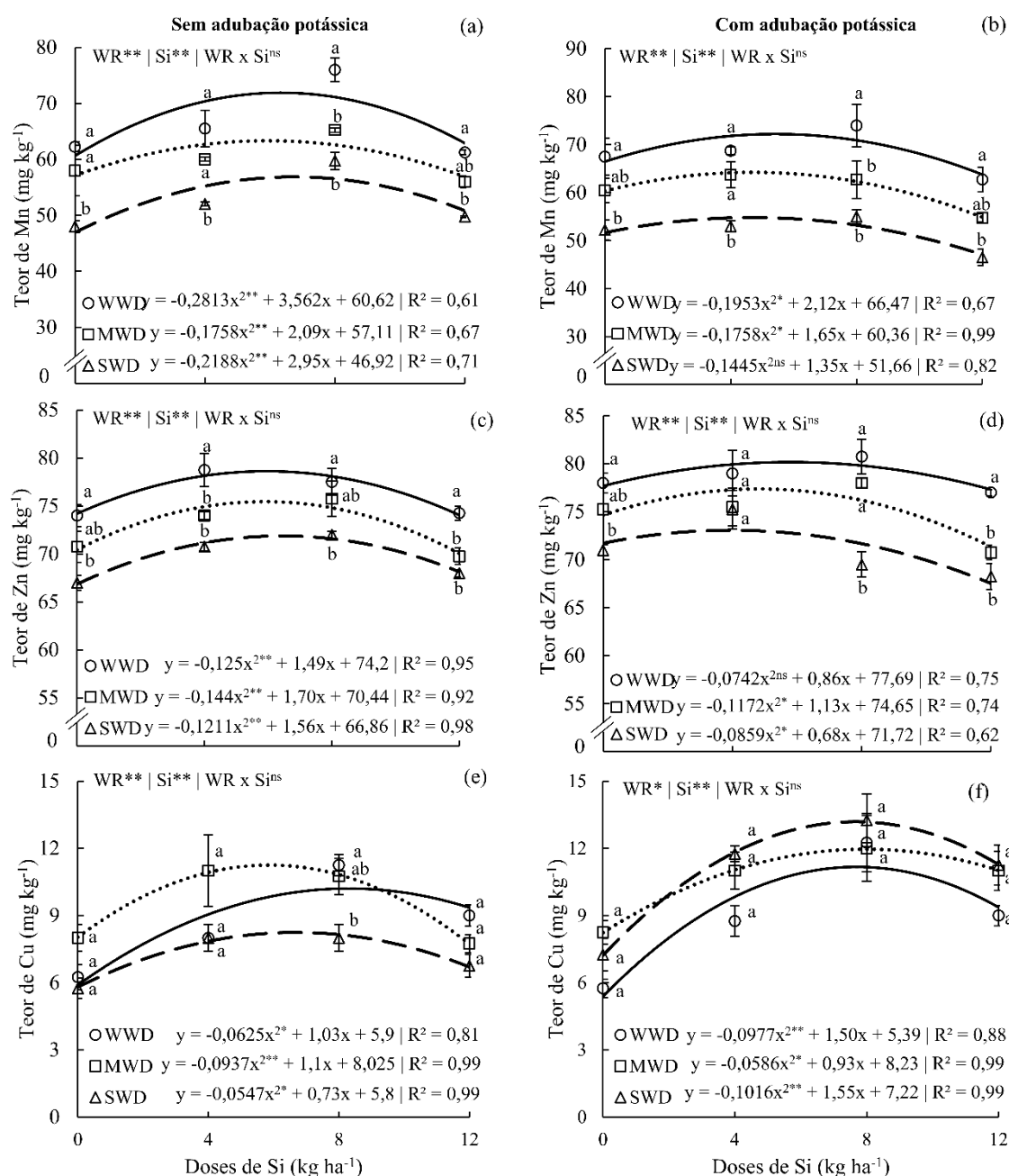


Figura 14. Teores de manganês (Mn) (a, b), zinco (Zn) (c, d) e cobre (Cu) (e, f) na folha diagnóstica de plantas de feijão cultivada sem déficit hídrico – WWD (70% da capacidade de retenção de água - WRC), com déficit hídrico moderado – MWD (60% de WRC) e com déficit

hídrico severo – SWD (40% de WRC); combinado com doses de Si fornecidas via fertirrigação: 0, 4, 8 e 12 kg ha⁻¹, sem e com adubação potássica. Letras mostram diferenças para os regimes hídricos (WR) em cada dose de Si ($p < 0,05$, teste de Tukey). * e **: significativo a 1 e 5% de probabilidade, respectivamente, e ^{ns}: não significativo pelo teste F.

Os máximos teores de Zn em plantas sem adubação potássica (78,64; 75,45 e 71,88 mg kg⁻¹) e com adubação potássica (80,18; 77,37 e 73,06 mg kg⁻¹) nos regimes hídricos WWD, MWD e SWD, ocorreram respectivamente nas doses de Si de 5,96; 5,90 e 6,44; 5,79; 4,82 e 3,95 kg ha⁻¹ (Fig. 14c, d). Plantas cultivadas sob WWD apresentaram os maiores teores de Zn em todas as doses de Si, em relação às plantas sob SWD e sem adubação potássica (Fig. 14c). Contudo, plantas com adubação potássica e em MWD apresentaram teores de Zn semelhantes às plantas sob WWD quando receberam 4 e 8 kg ha⁻¹ de Si (Fig. 14d).

Os teores máximos de Cu em plantas sem adubação com K, foram de 10,14; 11,25 e 8,23 mg kg⁻¹, respectivamente, nas doses 8,24; 5,68 e 6,67 kg ha⁻¹ de Si e nos regimes hídricos WWD, MWD e SWD, respectivamente (Fig. 14e). Contudo, nas plantas com adubação potássica, os teores máximos de Cu (11,14; 11,91 e 13,13 mg kg⁻¹) na folha diagnose aconteceram quando as plantas receberam as doses de Si iguais a 7,67; 7,93 e 7,62 kg ha⁻¹, nos regimes hídricos WWD, MWD e SWD (Fig. 14f). Plantas sem adubação potássica sob SWD e que receberam 8 kg ha⁻¹ de Si, apresentaram menor teor de Cu na folha diagnose, em relação às plantas em MWD (Fig. 14e). Nas demais doses de Si e nas duas condições de K, os teores de Cu mantiveram-se semelhantes entre os regimes hídricos estudados.

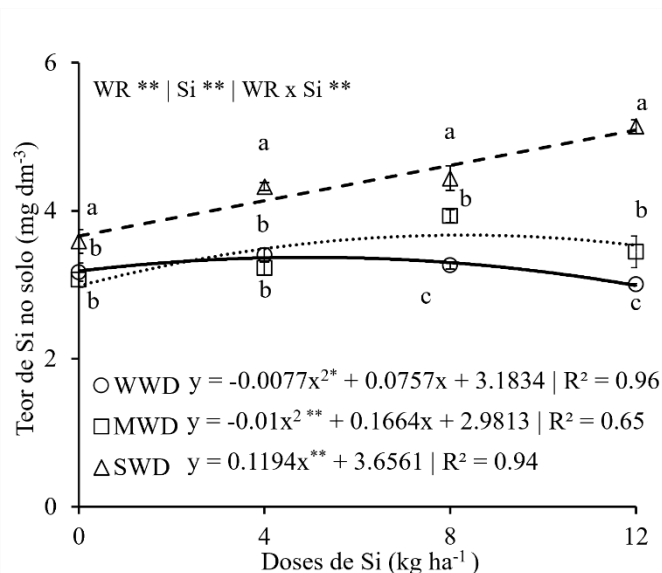


Figura 15. Teor de silício (Si) no solo na colheita de plantas de feijão cultivadas sem déficit hídrico – WWD (70% da capacidade de retenção de água - WRC), com déficit hídrico moderado – MWD (60% de WRC) e com déficit hídrico severo – SWD (40% de WRC); combinado com doses de Si fornecidas via fertirrigação: 0, 4, 8 e 12 kg ha⁻¹. 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.

O teor de Si no solo após o cultivo do feijão apresentou efeitos da interação entre os fatores (WR x Si) ($p < 0,01$) (Fig. 15). Plantas nas condições WWD e MWD apresentaram ajuste polinomial quadrático para o efeito de doses de Si, com máximos teores de Si no solo de 3,74 e 3,67 mg dm⁻³ obtidos nas doses de Si de 4,91 e 8,32 kg ha⁻¹, respectivamente. Contudo, o regime hídrico SWD proporcionou ajuste linear crescente com as doses de Si aplicadas. O solo cultivado com plantas sob WWD apresentou os menores teores de Si nas doses de 8 e 12 kg ha⁻¹ de Si, em relação ao cultivo das plantas sob MWD e SWD. Contudo, nas doses 0 e 4 kg ha⁻¹ de Si, apenas o solo cultivado com plantas sob SWD apresentou maiores teores de Si, diferindo da condição sob MWD e SWD.

4.3 Análise nutricional na parte aérea

O teor de Si na parte aérea apresentou efeito da interação (WR x Si) em plantas que não receberam adubação com K ($p < 0,01$) (Fig. 16a), e apenas de efeitos isolados de regime hídrico ($p < 0,01$) e de doses de Si ($p < 0,05$) em plantas com adubação

potássica (Fig. 16b). As doses de Si proporcionaram efeito com ajuste polinomial quadrático para os três regimes hídricos avaliados em ambas as condições de K. Plantas sem adubação potássica obtiveram seus máximos acúmulos de 2,8; 1,9 e 1,4 mg kg⁻¹ nas doses de 7,2; 6,33 e 5,9 kg ha⁻¹ de Si na parte aérea, respectivamente para WWD, MWD e SWD (Fig. 16a). Plantas com adubação potássica apresentaram os máximos acúmulos de 2,2; 1,75 e 1,54 kg ha⁻¹ de Si na parte aérea, obtidos nas doses 5,4; 4,9 e 6 kg ha⁻¹, respectivamente (Fig. 16b). O menor teor de Si foi observado em plantas sob SWD e sem adubação potássica em todas as doses de Si avaliadas; bem como, em plantas sob MWD e SWD que foram adubadas com K.

O teor de K na parte aérea teve efeito apenas do fator isolado regime hídrico ($p < 0,01$) na condição de cultivo sem adubação potássica (Fig. 16c). Em plantas que receberam a adubação potássica, houve efeito isolado dos fatores regimes hídricos e doses de Si (ambos a $p < 0,01$) (Fig. 16d). Os teores de K em função das doses de Si apresentaram ajuste de regressão linear, exceto em plantas cultivadas sem adubação potássica em SWD, em que houve ajuste de regressão polinomial quadrático com teor máximo de 20,3 g kg⁻¹ na dose de 3,4 kg ha⁻¹ de Si. O maior teor de K foi observado em plantas sob WWD cultivada sem K nas doses de 4 e 8 kg ha⁻¹ de Si, em relação às plantas sob MWD. Contudo, na dose de 12 kg ha⁻¹ de Si, o menor teor de K foi em plantas sob SWD, em relação a condição ótima de irrigação (WWD).

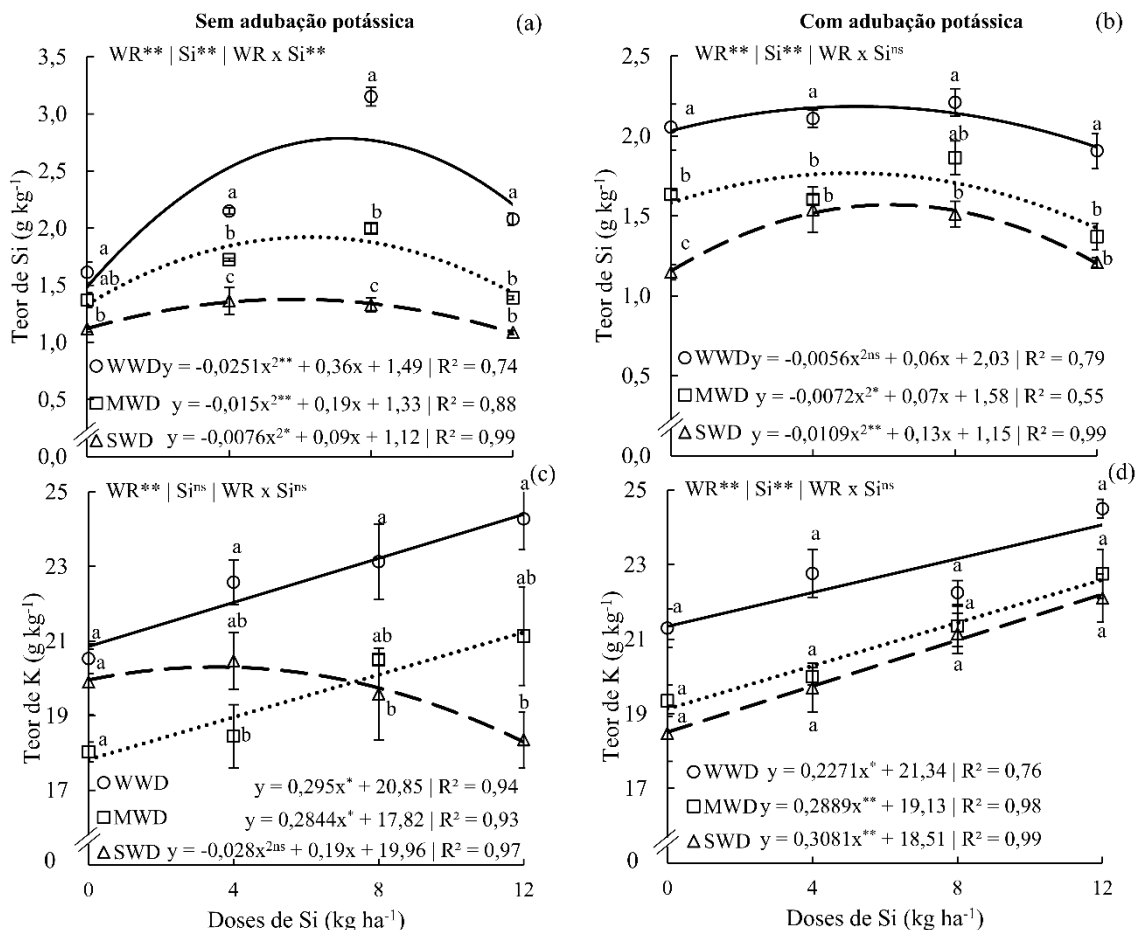


Figura 16. Teor de silício (Si) (a, b) e de potássio (K) (c, d) na parte aérea de plantas de feijão cultivada sem déficit hídrico – WWD (70% da capacidade de retenção de água - WRC), com déficit hídrico moderado – MWD (60% de WRC) e com déficit hídrico severo – SWD (40% de WRC); combinado com doses de Si fornecidas via fertirrigação: 0, 4, 8 e 12 kg ha⁻¹, sem e com adubação potássica. Letras mostram diferenças para os regimes hídricos (WR) em cada dose de Si ($p < 0,05$, teste de Tukey). * e **: significativo a 1 e 5% de probabilidade, respectivamente, e ^{ns}: não significativo pelo teste F.

O acúmulo de Si na parte aérea das plantas sem adubação com K apresentou efeito da interação entre os fatores (WR x Si) ($p < 0,01$) (Fig. 17a), enquanto nas plantas com adubação potássica ocorreu apenas efeito dos fatores isolados regime hídrico e doses de Si (ambos a $p < 0,01$) (Fig. 17b). As doses de Si proporcionaram efeito com ajuste de regressão polinomial quadrático nos três regimes hídricos, independente da condição potássica.

Plantas sem adubação potássica obtiveram seus máximos acúmulos de 68,67; 38,16 e 21,36 mg por planta de Si nas doses de 6,82; 6,69 e 6,47 kg ha⁻¹ de Si, respectivamente, para os regimes hídricos WWD, MWD e SWD (Fig. 17a). Plantas com

adubação potássica apresentaram os máximos acúmulos de 59,8; 37,75 e 21,11 mg por planta, obtidos nas doses 5,85; 6,18 e 6,97 kg ha⁻¹, respectivamente (Fig. 17b). O menor acúmulo de Si foi observado nos regimes MWD e SWD em todas as doses de Si, em relação à condição WWD, e independente da condição de K. Os menores acúmulos de Si foram observados em plantas sob MWD e SWD, em todas as doses de Si avaliadas e nas duas condições de adubação potássica.

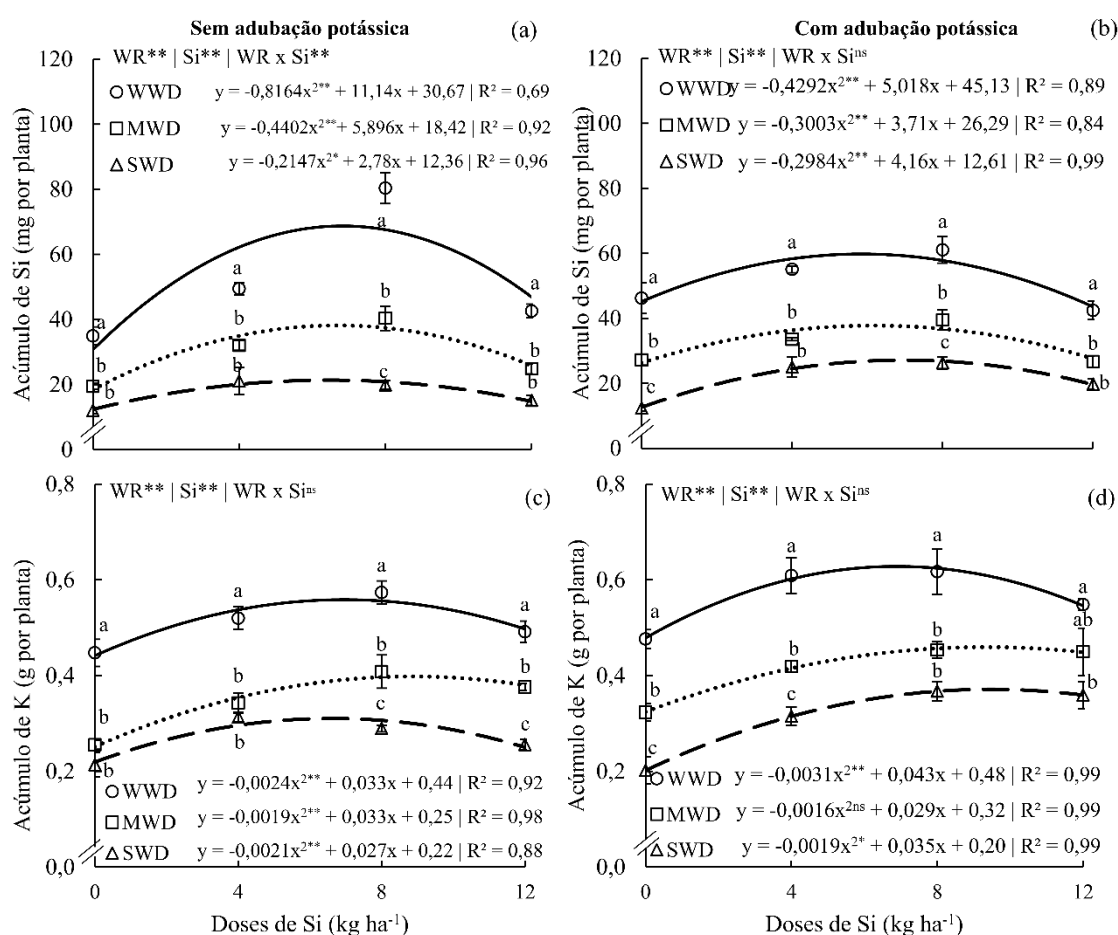


Figura 17. Acúmulo de silício (Si) (a, b) e de potássio (K) (c, d) na parte aérea de plantas de feijão cultivada sem déficit hídrico – WWD (70% da capacidade de retenção de água - WRC), com déficit hídrico moderado – MWD (60% de WRC) e com déficit hídrico severo – SWD (40% de WRC); combinado com doses de Si fornecidas via fertirrigação: 0, 4, 8 e 12 kg ha⁻¹, sem e com adubação potássica. Letras mostram diferenças para os regimes hídricos (WR) em cada dose de Si ($p < 0,05$, teste de Tukey). * e **: significativo a 1 e 5% de probabilidade, respectivamente, e ^{ns}: não significativo pelo teste F.

Os fatores isolados regime hídrico e doses de Si (ambos a $p < 0,01$), influenciaram acúmulo de K na parte aérea das plantas em ambas as condições de adubação

potássica. As doses de Si causaram efeito com ajuste polinomial quadrático para todos os regimes hídricos (Fig. 17c-d) no cultivo sem e com adubação potássica. Plantas sem adubação com K apresentaram máximos acúmulos de K de 0,55; 0,39 e 0,31 g por planta, nas doses de 6,87; 8,68 e 6,43 kg ha⁻¹, respectivamente, para WWD, MWD e SWD.

Os acúmulos máximos de K nas plantas que receberam adubação potássica foram de 0,63; 0,45 e 0,36 g por planta, nas doses de 6,94; 9,06 e 9,2 kg ha⁻¹ de Si respectivamente, para WWD, MWD e SWD. Plantas cultivadas sem adubação potássica e sem déficit hídrico tiveram os maiores acúmulos de K em todas as doses de Si, em relação as plantas sob MWD e SWD. Esse fato também ocorreu quando as plantas receberam adubação com K, exceto na maior dose de Si (12 kg ha⁻¹) (Fig. 17d).

A eficiência de uso de K teve efeito isolado dos fatores regime hídrico e doses de Si (ambos a $p < 0,01$), nas plantas sem adubação potássica e com adubação potássica (Fig. 18a, b). Os impactos proporcionados pelas doses de Si tiveram ajuste polinomial quadrático. As máximas eficiências de uso de K foram de 1205,66; 1092,11 e 867,97 g² g⁻¹, obtido nas doses de 6,0; 6,47 e 6,91 kg ha⁻¹ de Si, respectivamente para WWD, MWD e SWD, em plantas que não receberam adubação potássica (Fig. 18a).

Nas plantas que foram fertilizadas com K, as máximas eficiências de K obtidas foram de 1249,50; 1040,56 e 859,44 g² g⁻¹, nas doses de 5,40; 5,93 e 7,12 kg ha⁻¹ de Si, respectivamente para WWD, MWD e SWD (Fig. 18b). Sem adubação potássica, as plantas sob WWD apresentaram maiores eficiências de uso de K nas doses 0 e 8 kg ha⁻¹ de Si, em relação às plantas sob SWD. Contudo, com adubação potássica isso foi observado nas doses 0; 4 e 8 kg ha⁻¹ de Si.

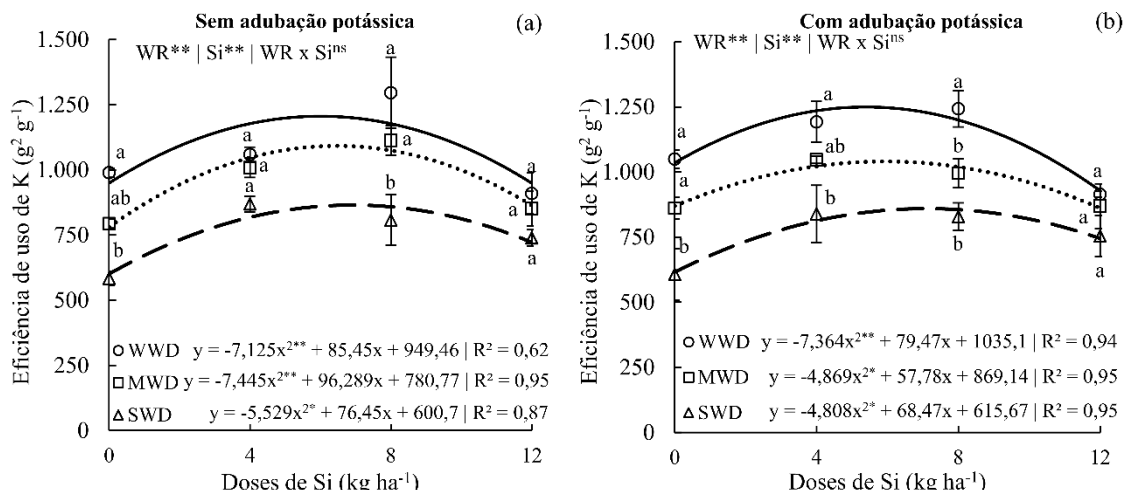


Figura 18. Eficiência de uso de potássio (K) (a, b) na parte aérea de plantas de feijão cultivada sem déficit hídrico – WWD (70% da capacidade de retenção de água - WRC), com déficit hídrico moderado – MWD (60% de WRC) e com déficit hídrico severo – SWD (40% de WRC); combinado com doses de Si fornecidas via fertirrigação: 0, 4, 8 e 12 kg ha⁻¹, sem e com adubação potássica. Letras mostram diferenças para os regimes hídricos (WR) em cada dose de Si ($p < 0,05$, teste de Tukey). * e **: significativo a 1 e 5% de probabilidade, respectivamente, e ^{ns}: não significativo pelo teste F.

O efeito da interação entre os fatores (WR x Si) afetou o teor de P na parte área de plantas cultivadas sem adubação potássica ($p < 0,05$) (Fig. 19a) e o teor de Ca em plantas com adubação potássica ($p < 0,01$) (Fig. 19d). Contudo, apenas dos fatores isolados regime hídrico e doses de Si causaram efeito (todos com $p < 0,01$) no teor de P em plantas com adubação potássica (Fig. 19b), no teor de Ca em sem adubação com K (Fig. 19c) e no teor Mg em ambas as condições de adubação potássica (Fig. 19e, f). As doses de Si testadas proporcionaram ajuste de regressão polinomial quadrática para os teores de P, Ca e Mg nos três regimes hídricos e em ambas as condições de adubação com K, exceto para o teor de Ca em plantas sob SWD e com adubação potássica, em que houve ajuste linear.

Os teores máximos de P foram de 1,75; 1,42 e 1,15 g kg⁻¹ obtido nas doses de 6,85; 6,4 e 3,34 kg ha⁻¹, respectivamente para os regimes de WWD, MWD e SWD e sem adubação potássica (Fig. 19a). Quando a adubação potássica foi realizada, os máximos teores de P foram de 1,85; 1,35 e 1,27 g kg⁻¹ proporcionado pelo uso das doses de 6,02; 4,71 e 5,13 kg ha⁻¹ de Si, respectivamente, para WWD, MWD e SWD (Fig. 19b). Os menores teores de P aconteceram em todas as doses nos regimes MMD e SWD, em relação às plantas sob WWD nas duas condições de K.

Os máximos teores de Ca obtidos em plantas que não receberam adubação com K foram de 11,60; 9,94 e 9,93 g kg⁻¹ com as doses de 5,85; 5,41 e 6,4 kg ha⁻¹ de Si, respectivamente, para WWD, MWD e SWD (Fig. 19c). Plantas que receberam adubação potássica apresentam os teores máximos de Ca de 10,36 e 10,23 g kg⁻¹ nas doses de 9,45 e 5,6 kg ha⁻¹ de Si, respectivamente, para WWD e MWD. A taxa de aumento de teor de Ca em plantas sob SWD foi de 0,1775 g de Ca para cada 1 kg ha⁻¹ de Si (Fig. 19d). Os teores de Ca foram maiores na dose 4 kg ha⁻¹ de Si em plantas sob WWD, em relação às plantas sob MWD, e na dose 8 kg ha⁻¹ de Si, em relação às plantas sob SWD em plantas sem adubação com K. Contudo, em plantas com adubação com K, não houve diferença das doses entre os regimes hídricos, exceto em plantas sob SWD que receberam 12 kg ha⁻¹ de Si, que apresentaram o maior teor de Ca.

Para o teor de Mg em plantas sem adubação, as doses de 6,2; 6,45 e 5,23 kg ha⁻¹ de Si proporcionaram maiores teores, sendo de 2,83; 2,53 e 2,44 g kg⁻¹, para WWD, MWD e SWD, respectivamente (Fig. 19e). Com a adubação potássica, os teores máximos de Mg foram de 2,82; 2,53 e 2,42 g kg⁻¹, nas doses de 5,48; 4,65 e 6,67 kg ha⁻¹ de Si, respectivamente, para WWD, MWD e SWD (Fig. 19f). Os maiores teores de Mg em plantas sem adubação com K aconteceram sob WWD e nas doses 4; 8 e 12 kg ha⁻¹ de Si em relação às plantas no SWD. Contudo, em plantas com adubação com K isso aconteceu nas doses 0; 4 e 8 kg ha⁻¹ de Si.

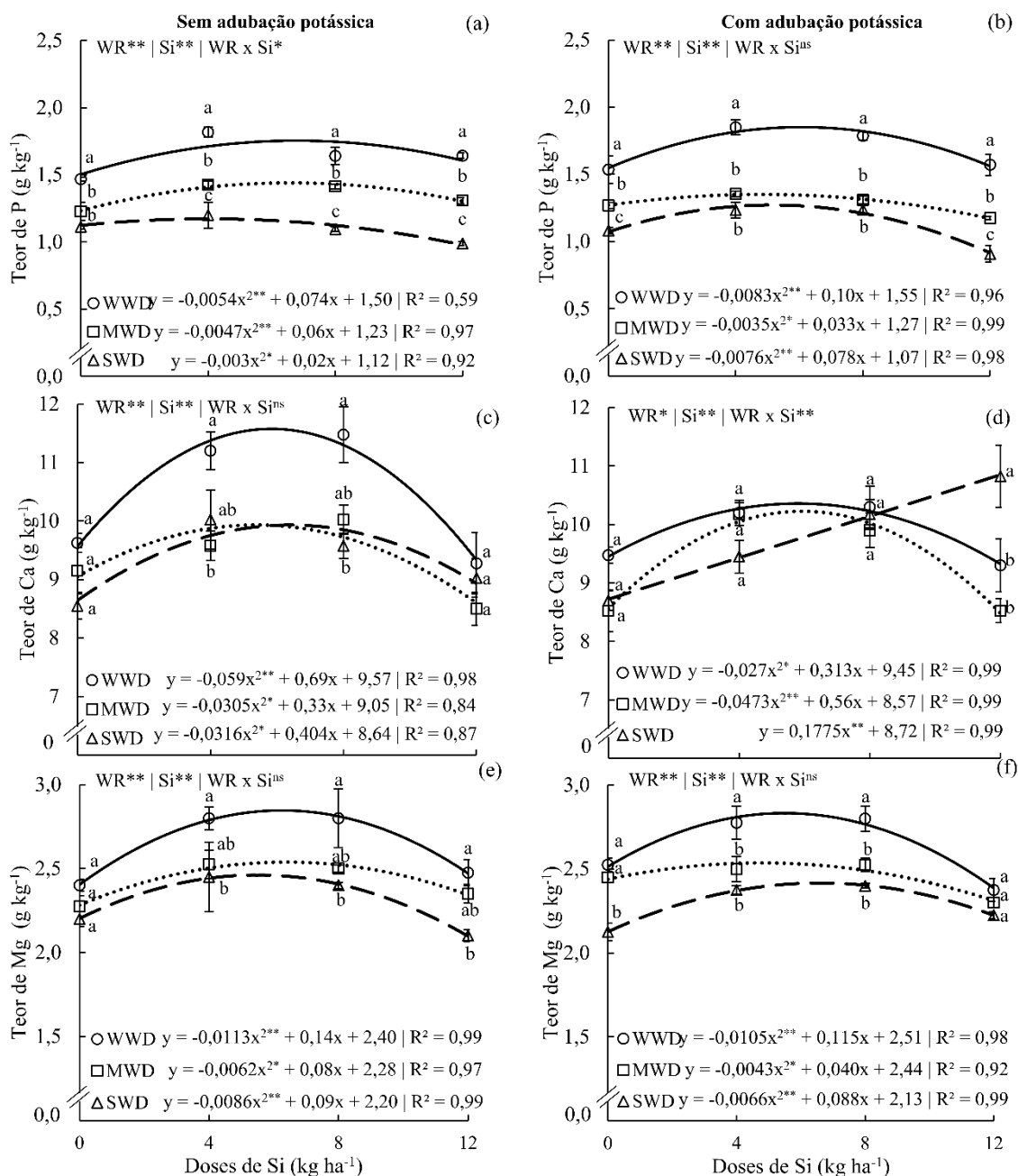


Figura 19. Teores de fósforo (P) (a, b), cálcio (Ca) (c, d) e magnésio (Mg) (e, f) na parte aérea de plantas de feijão cultivada sem déficit hídrico – WWD (70% da capacidade de retenção de água - WRC), com déficit hídrico moderado – MWD (60% de WRC) e com déficit hídrico severo – SWD (40% de WRC); combinado com doses de Si fornecidas via fertirrigação: 0, 4, 8 e 12 kg ha⁻¹, sem e com adubação potássica. Letras mostram diferenças para os regimes hídricos (WR) em cada dose de Si (p < 0,05, teste de Tukey). * e **: significativo a 1 e 5% de probabilidade, respectivamente, e ^{ns}: não significativo pelo teste F.

Os acúmulos de P, Ca e Mg na parte aérea das plantas de feijão foram influenciados pelos efeitos isolados dos fatores regime hídrico e doses de Si (todos com p < 0,01) independente da adubação potássica (Fig. 20a-c, e-f), exceto para o acúmulo

de Ca em plantas com adubação de K, que teve efeito da interação (WR x Si) ($p < 0,05$) (Fig. 20d). As doses de Si testadas proporcionaram ajuste de regressão polinomial quadrática para os acúmulos de P, Ca e Mg nos três regimes hídricos e em ambas as condições de adubação com K, exceto para o acúmulo de Ca em plantas sob SWD e com adubação potássica, em que houve ajuste linear.

Os máximos acúmulos de P foram de 0,042; 0,030 e 0,018 g por planta nas doses de 5,67; 8,0 e 9,0 kg ha⁻¹, respectivamente, para os regimes de WWD, MWD e SWD e sem adubação potássica (Fig. 20a). Na condição de adubação potássica, os acúmulos máximos de P foram de 0,043; 0,025 e 0,021 g por planta, obtido nas doses de 5,0; 5,0 e 7,5 kg ha⁻¹ de Si, respectivamente, para WWD, MWD e SWD (Fig. 20b). O acúmulo de P foi maior em plantas em WWD nas duas condições de K em todas as doses de Si testadas, em relação às plantas MWD e SWD.

Plantas que não receberam adubação com K, apresentaram acúmulo máximo de Ca de 0,28; 0,20 e 0,15 g por planta com as doses de 5,77; 6,9 e 6,54 kg ha⁻¹ de Si, respectivamente, para WWD, MWD e SWD (Fig. 20c). Plantas que receberam adubação potássica apresentam os acúmulos máximos de Ca de 0,29 e 0,21 g por planta nas doses de 5,9 e 6,4 kg ha⁻¹ de Si, respectivamente, para WWD e MWD. A taxa de aumento do acúmulo de Ca em plantas cultivadas com adubação potássica e sob SWD foi de 0,0069 g por planta para cada 1 kg ha⁻¹ de Si (Fig. 20d). O acúmulo de Ca foi maior nas duas condições de K no regime WWD, em relação às plantas SWD, exceto para a dose 12 kg ha⁻¹ nas plantas com adubação potássica, no qual o acúmulo de Ca não diferiu entre os regimes hídricos.

As condições hídricas de WWD, MWD e SWD proporcionaram acúmulos máximos de Mg de 0,069; 0,046 e 0,035 g por planta nas doses de 6,1; 6,4 e 7,2 g kg⁻¹ de Si no cultivo sem adubação potássica, e de 0,068; 0,053 e 0,033 g por planta nas doses de 5,0; 6,7 e 6,7 g kg⁻¹ de Si, no cultivo com adubação potássica, respectivamente (Fig. 20e). O acúmulo de Mg em plantas com e sem adubação com K foram menores em plantas sob SWD em todas as doses de Si testadas. Mas plantas do regime MWD na dose 12 kg ha⁻¹ de Si não diferiram o acúmulo de Mg das plantas WWD nas duas condições de K.

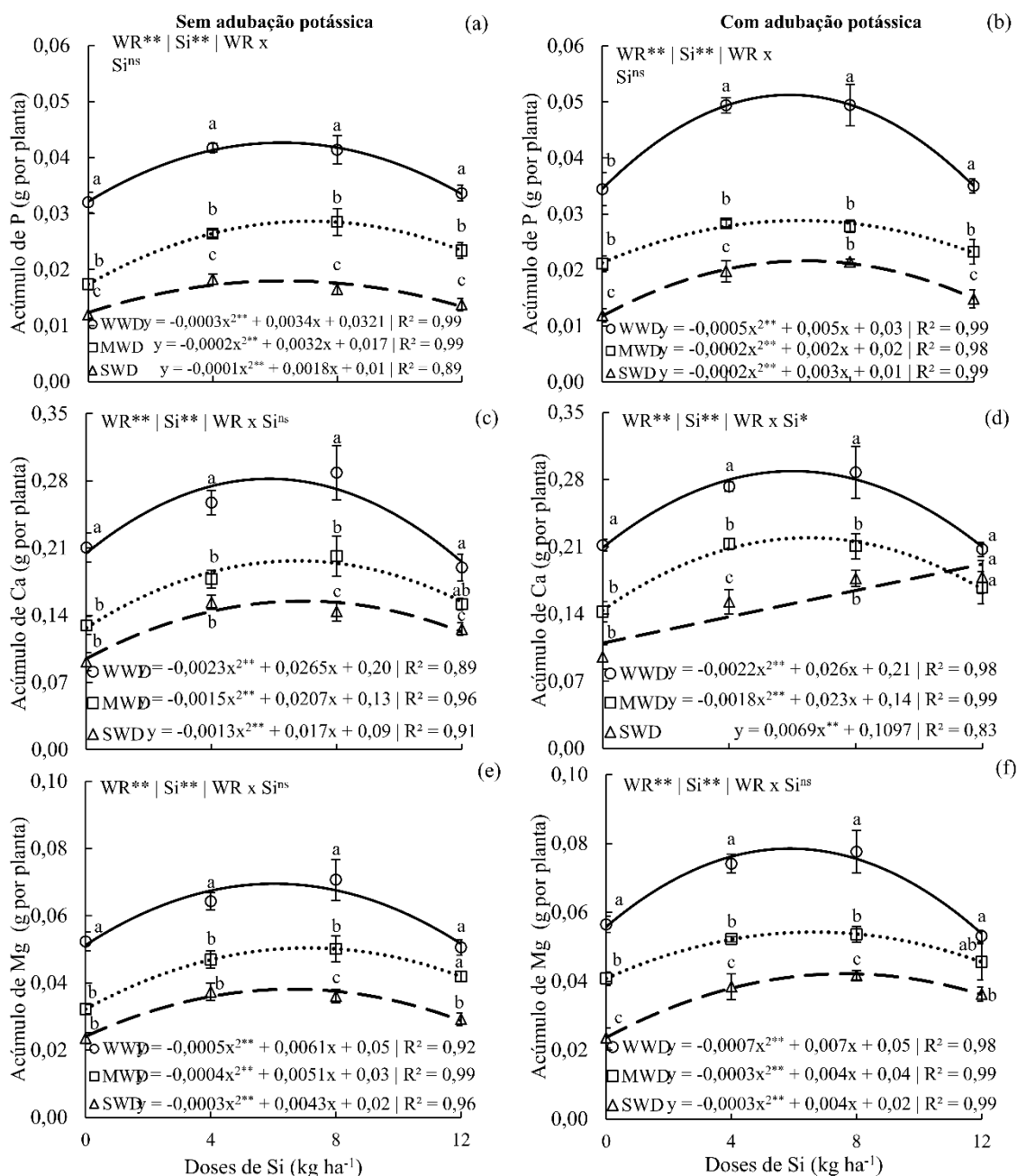


Figura 20. Acúmulo de fósforo (P) (a, b), cálcio (Ca) (c, d) e magnésio (Mg) (e, f) na parte aérea de plantas de feijão cultivada sem déficit hídrico – WWD (70% da capacidade de retenção de água - WRC), com déficit hídrico moderado – MWD (60% de WRC) e com déficit hídrico severo – SWD (40% de WRC); combinado com doses de Si fornecidas via fertirrigação: 0, 4, 8 e 12 kg ha⁻¹, sem e com adubação potássica. Letras mostram diferenças para os regimes hídricos (WR) em cada dose de Si (p<0,05, teste de Tukey). * e **: significativo a 1 e 5% de probabilidade, respectivamente, e ^{ns}: não significativo pelo teste F.

O efeito da interação (WR x Si) influenciou a eficiência de uso de P ($p < 0,01$) nas duas condições de K (Fig. 21a, b), bem como, a eficiência de uso de Mg ($p < 0,01$) em plantas que não receberam adubação potássica (Fig. 21e). Para a eficiência de Ca em ambas as condições de adubação com K (Fig. 21c-d), e para a eficiência de Mg com adubação potássica (Fig. 21f), apenas os fatores isolados regime hídrico e doses de Si foram significativos (todos com $p < 0,001$). As doses de Si proporcionaram ajuste de regressão polinomial quadrática para as eficiências de uso de P, Ca e Mg nos três regimes hídricos e em ambas as condições de adubação com K, exceto para a eficiência de uso de P em plantas sob SWD nas duas condições de adubação com K, em que houve ajuste linear.

Os valores máximos de eficiência de uso de P em plantas cultivadas sob WWD foram de 14424,5 e 16296,9 $\text{g}^2 \text{g}^{-1}$ nas doses de Si de 4,64 e 5,23 kg ha^{-1} para o cultivo sem e com adubação potássica, respectivamente. Para o regime hídrico de MWD, as eficiências máximas de uso de P foram de 14438,4 e 16215,0 $\text{g}^2 \text{g}^{-1}$ usando as doses de Si de 7,62 e 7,82 kg ha^{-1} para o cultivo sem e com adubação potássica, respectivamente. Já para o regime hídrico de SWD, as taxas de aumento foram de 396,5 e 5,56,3 $\text{g}^2 \text{g}^{-1}$ para cada 1 kg ha^{-1} de Si aplicado via fertirrigação, respectivamente, para o cultivo sem e com adubação potássica (Fig. 21a, b). Não houve diferença na eficiência de uso de P entre os regimes em doses mais altas de Si (8 e 12 kg ha^{-1}) em plantas sem adubação com K. Quando a adubação potássica foi realizada, plantas sob SWD apresentaram maior eficiência de uso de P, em relação às plantas WWD na dose 12 kg ha^{-1} . Em doses menores (0 e 4 kg ha^{-1} de Si), plantas sob SWD apresentaram menores eficiências de uso de P nas duas condições de K.

Nas plantas sem adubação potássica, as eficiências de uso de Ca foram de 2420,83; 2127,3 e 1769,44 $\text{g}^2 \text{g}^{-1}$, obtidas nas doses 6,12; 7,9 e 6,71 kg ha^{-1} de Si, respectivamente, para WWD, MWD e SWD. Na condição de fertilização com K, as eficiências de uso de Ca máximas foram de 2.689,05; 2175,05 e 1759,49 $\text{g}^2 \text{g}^{-1}$, usando as doses de Si de 6,45; 7,43 e 6,9 kg ha^{-1} , respectivamente, para WWD, MWD e SWD (Fig. 21c, d). A eficiência de uso de Ca em plantas em SWD foi menor em todas as doses de Si e nas duas condições de K em relação às plantas sob WWD. Contudo, nas doses

de Si 4 e 12 kg ha⁻¹ em plantas sem adubação com K, plantas em MWD não diferiram das plantas em condição hídrica ótima.

Os valores máximos de eficiência de uso de Mg em plantas cultivadas sem e com adubação potássica e sob WWD foram de 10349,15 e 10394,65 g² g⁻¹ nas doses de 6,3 e 6,5 kg ha⁻¹ de Si, respectivamente. No regime MWD, as eficiências máximas de uso de Mg foram de 8553,02 e 8772,35 g² g⁻¹ nas doses de Si de 7,3 e 6,92 kg ha⁻¹ para o cultivo sem e com adubação potássica, respectivamente. No regime SWD, obteve-se 7268,4 e 7636,0 g² g⁻¹ nas doses de 7,1 e 7,4 kg ha⁻¹ de Si, respectivamente, para o cultivo sem e com adubação potássica (Fig. 21e, f). As eficiências de uso de Mg foram menores em plantas não adubadas e adubadas com K sob MWD e SWD em todas as doses de Si, em relação às plantas sob WWD. Contudo, na dose 12 kg ha⁻¹ de Si para as plantas do regime MWD em plantas sem adubação de K, a eficiência de uso de Mg não diferiu entre os regimes WWD e SWD.

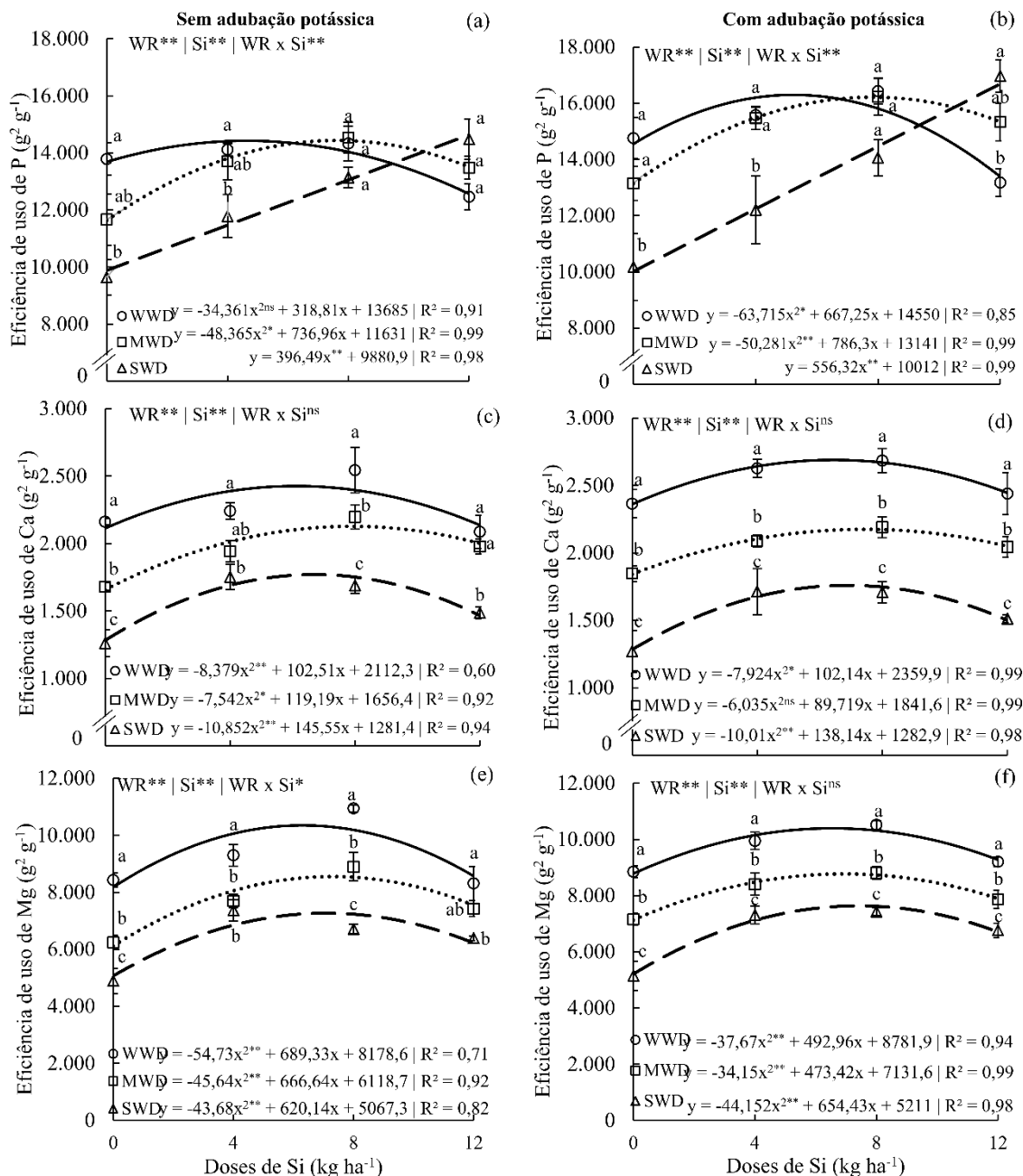


Figura 21. Eficiência de uso de fósforo (P) (a, b), cálcio (Ca) (c, d) e magnésio (Mg) (e, f) na parte aérea de plantas de feijão cultivada sem déficit hídrico – WWD (70% da capacidade de retenção de água - WRC), com déficit hídrico moderado – MWD (60% de WRC) e com déficit hídrico severo – SWD (40% de WRC); combinado com doses de Si fornecidas via fertirrigação: 0, 4, 8 e 12 kg ha⁻¹, sem e com adubação potássica. Letras mostram diferenças para os regimes hídricos (WR) em cada dose de Si ($p < 0,05$, teste de Tukey). * e **: significativo a 1 e 5% de probabilidade, respectivamente, e ^{ns}: não significativo pelo teste F.

Os teores de Mn e Zn na parte aérea de plantas sem e com adubação potássica foram influenciados apenas pelos fatores isolados (regime hídrico e doses de Si) ($p < 0,01$) (Fig. 22a-d). O teor de Cu foi influenciado apenas pelo efeito isolado de doses

de Si ($p < 0,01$) em plantas que não receberam adubação potássica e pelo efeito da interação (WR x Si) $p < 0,05$) quando a adubação com K foi realizada (Fig. 22e, f). As doses de Si causaram efeito com ajuste de regressão polinomial quadrático para os teores de Mn e Zn nos três regimes hídricos, na ausência e presença de adubação potássica e para os teores de Cu nos três regimes hídricos em plantas que não receberam adubação com K e em WWD com adubação com K. Nos regimes MWD e SWD com adubação potássica as doses de Si induziram efeito linear crescente nos teores de Cu.

Os teores máximos de Mn na parte aérea em plantas sem adubação com K (54,33; 43,31 e 35,61 mg kg⁻¹) foram alcançados nas doses de Si de 5,85; 5,43 e 5,4 kg ha⁻¹, respectivamente, para WWD, MWD e SWD (Fig. 22a). Nas plantas com adubação potássica, as doses de 6,72; 5,97 e 6,34 kg ha⁻¹ induziram os teores máximos de Mn de 49,0; 44,5 e 34,6 mg kg⁻¹, respectivamente, para WWD, MWD e SWD (Fig. 22b). Plantas sob WWD apresentaram maiores teores de Mn, em relação às plantas SWD em ambas as condições de K. No entanto, em plantas adubadas com K e com as doses 4 e 8 kg ha⁻¹ os teores de Mn foram iguais às plantas na condição ótima de água.

Os máximos teores de Zn em plantas sem adubação potássica (35,12; 29,5 e 25,95 mg kg⁻¹) e com adubação potássica (32,66; 30,85 e 25,62 mg kg⁻¹) nos regimes hídricos WWD, MWD e SWD, ocorreram respectivamente nas doses de Si de 6,0; 5,76 e 5,67; e 6,1; 6,0 e 4,75 kg ha⁻¹ (Fig. 22c, d). Em plantas sem adubação com K os menores teores de Zn ocorreram em plantas sob SWD, em relação às plantas em condição hídrica ótima (WWD) em todas as doses de Si. Contudo, nas plantas adubadas com K e sem adubação com Si, não houve diferença do teor de Zn entre os regimes hídricos e entre os regimes WWD e MWD na dose 8 kg ha⁻¹ de Si.

Os teores máximos de Cu em plantas sem adubação com K foram de 9,17; 8,77 e 7,38 mg kg⁻¹, nas doses 5,56; 6,26 e 6,25 kg ha⁻¹ de Si, respectivamente, nos regimes hídricos WWD, MWD e SWD (Fig. 22e). Contudo, nas plantas com adubação potássica e sob WWD, o teor máximo de Cu na parte aérea foi 8,74 mg kg⁻¹ obtido na dose de 6,0 kg ha⁻¹ de Si. Nos regimes MWD e SWD as taxas de aumento do teor de Cu foram de 0,125 e 0,0625 mg kg⁻¹ por kg ha⁻¹ de Si, respectivamente (Fig. 22f). Os regimes de água não apresentaram efeito significativo nas doses de Si para os teores de Cu em plantas

não adubadas com K. Mas em plantas adubadas com K que receberam a dose Si 4 kg ha⁻¹, plantas do regime WWD apresentaram teores de Cu maiores em relação às condições de déficit (MWD e SWD).

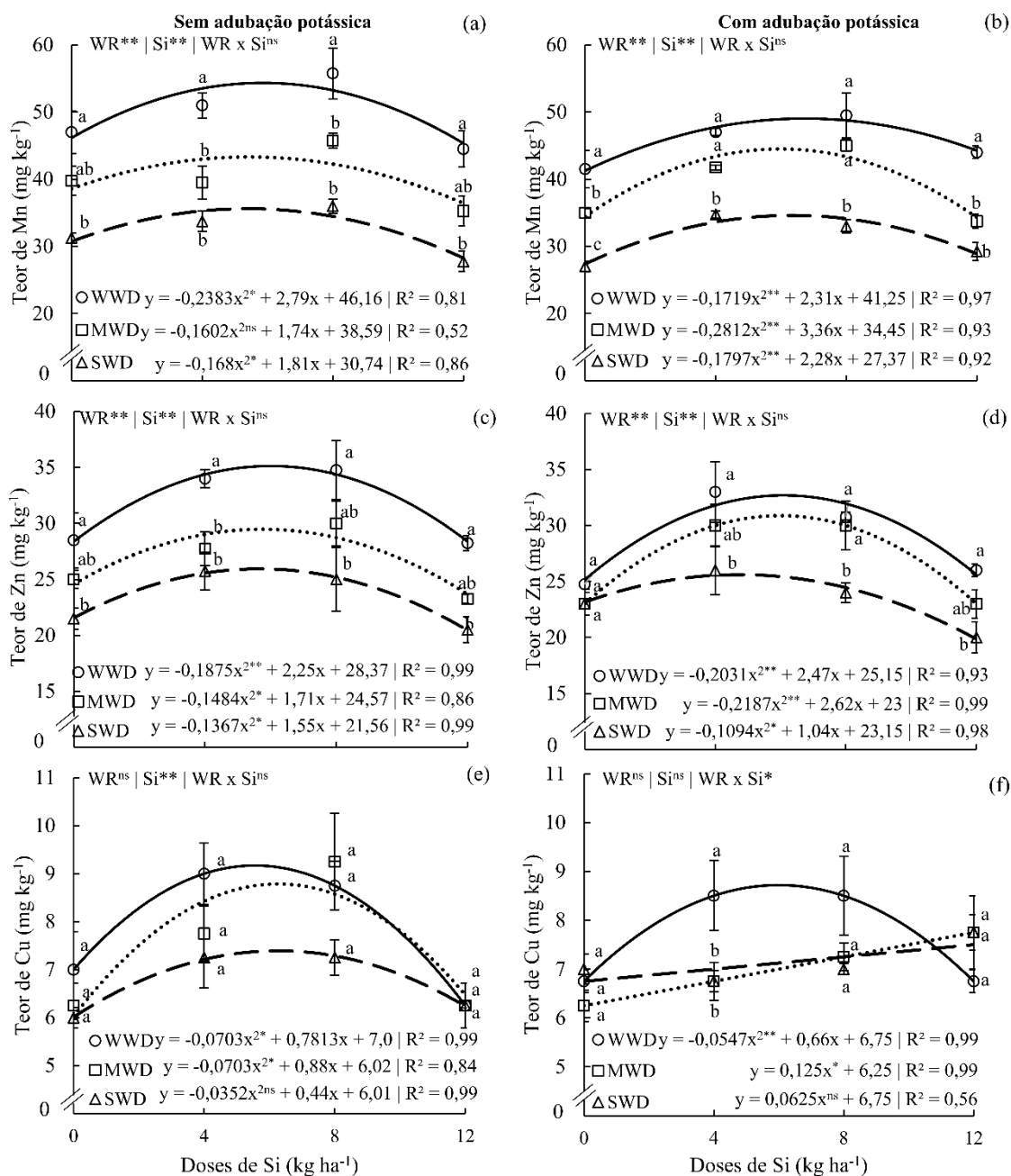


Figura 22. Teores de manganês (Mn) (a, b), zinco (Zn) (c, d) e cobre (Cu) (e, f) na parte aérea de plantas de feijão cultivada sem déficit hídrico – WWD (70% da capacidade de retenção de água - WRC), com déficit hídrico moderado – MWD (60% de WRC) e com déficit hídrico severo – SWD (40% de WRC); combinado com doses de Si fornecidas via fertirrigação: 0, 4, 8 e 12 kg ha⁻¹, sem e com adubação potássica. Letras mostram diferenças para os regimes hídricos (WR) em cada dose de Si ($p < 0,05$, teste de Tukey). * e **: significativo a 1 e 5% de probabilidade, respectivamente, e ^{ns}: não significativo pelo teste F.

Os fatores isolados regime hídrico ($p < 0,01$) e doses de Si ($p < 0,01$) proporcionaram efeito para os acúmulos de Mn e Zn na parte aérea em ambas as condições de adubação potássica (Fig. 23a-d), bem como, para o acúmulo de Cu em plantas sem adubação potássica (ambos a $p < 0,01$) (Fig. 23e). O efeito da interação (WR x Si) foi significativo apenas para o acúmulo de Cu na parte aérea de plantas cultivadas com adubação potássica ($p < 0,01$) (Fig. 23f). Os acúmulos de Mn, Zn e Cu em plantas sem adubação potássica e com adubação potássica apresentaram ajuste polinomial quadrático com as doses de Si aplicadas (Fig. 23a-f).

Os valores máximos na parte aérea de plantas sem adubação potássica foram de 1,29; 0,86 e 0,55 mg por planta para o acúmulo de Mn, obtido nas doses de 5,57; 6,62 e 6,40 kg ha⁻¹ de Si; de 0,85; 0,58 e 0,40 mg por planta para o acúmulo de Zn, nas doses de 5,96; 6,61 e 6,25 kg ha⁻¹ de Si; e de 0,22; 0,16 e 0,10 mg por planta para o acúmulo de Cu, nas doses de 5,65; 6,5 e 6,36 kg ha⁻¹ de Si, respectivamente, para WWD, MWD e SWD (Fig. 23a, c, e). Os acúmulos de Mn e Zn em plantas sem adubação com K foram menores nos regimes sob déficit hídrico em todas as doses de Si em relação às plantas sob condição hídrica adequada. Contudo, o acúmulo de Cu nas doses 8 e 12 kg ha⁻¹ de Si de plantas do regime MWD não diferiu das plantas sob WWD.

Em plantas que receberam adubação potássica os valores máximos foram de 1,36; 0,96 e 0,60 mg por planta para o acúmulo de Mn, nas doses de 6,34; 6,43 e 7,22 kg ha⁻¹ de Si; de 0,90; 0,65 e 0,43 mg por planta para o acúmulo de Zn, nas doses de 6,0; 6,44 e 6,46 kg ha⁻¹ de Si; e de 0,24; 0,15 e 0,11 mg por planta para o acúmulo de Cu, nas doses de 6,0; 8,57 e 9,0 kg ha⁻¹ de Si, respectivamente, para WWD, MWD e SWD (Fig. 23b, d, f). O acúmulo de Mn, Zn e Cu em plantas adubadas com K foram maiores em condição hídrica adequada, exceto na dose de Si 12 kg ha⁻¹ que não houve diferença dos regimes hídricos para o acúmulo de Cu.

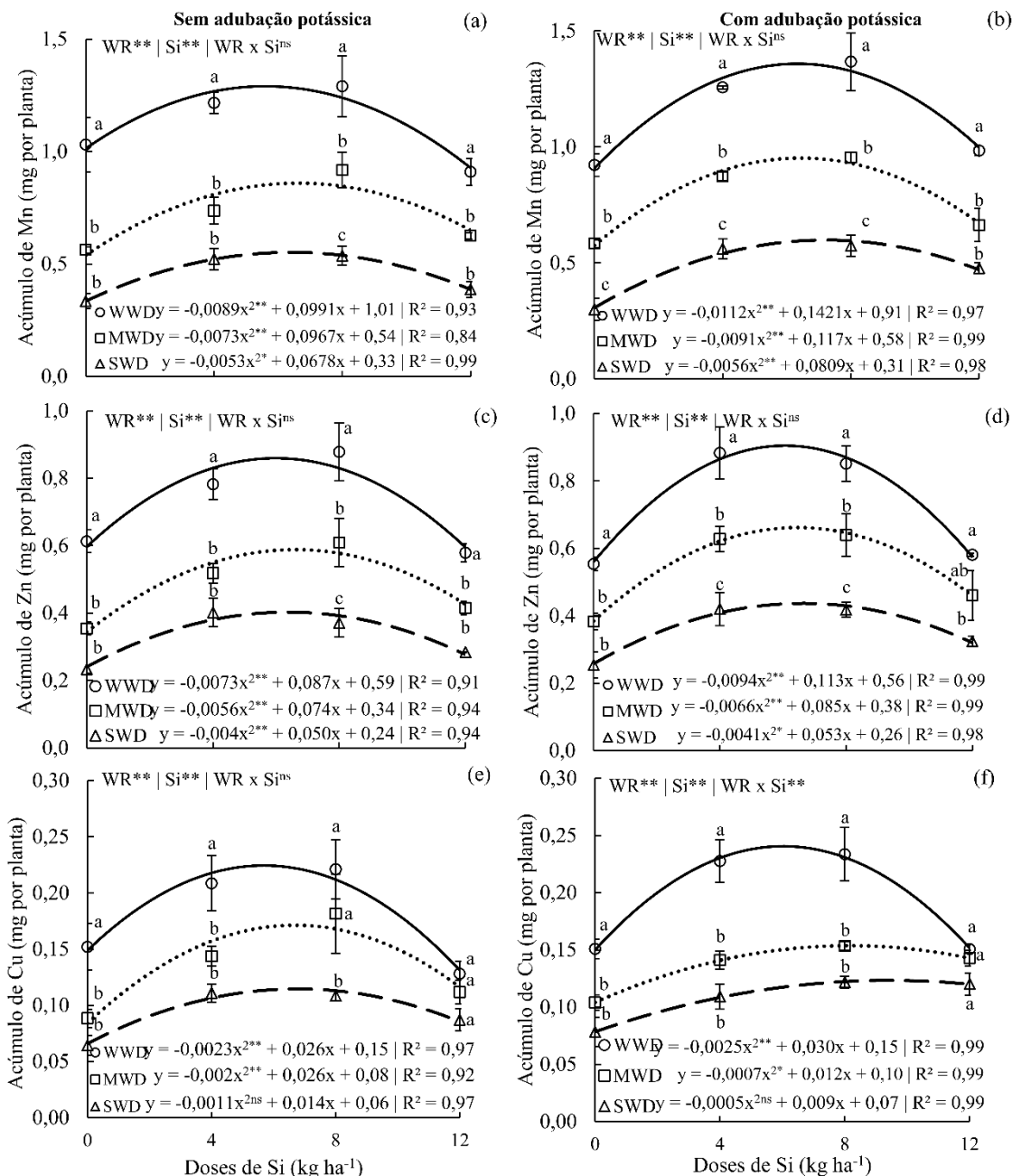


Figura 23. Acúmulo de manganês (Mn) (a, b), zinco (Zn) (c, d) e cobre (Cu) (e, f) na parte aérea de plantas de feijão cultivada sem déficit hídrico – WWD (70% da capacidade de retenção de água - WRC), com déficit hídrico moderado – MWD (60% de WRC) e com déficit hídrico severo – SWD (40% de WRC); combinado com doses de Si fornecidas via fertirrigação: 0, 4, 8 e 12 kg ha⁻¹, sem e com adubação potássica. Letras mostram diferenças para os regimes hídricos (WR) em cada dose de Si ($p < 0,05$, teste de Tukey). * e **: significativo a 1 e 5% de probabilidade, respectivamente, e ^{ns}: não significativo pelo teste F.

O teor de Fe na parte aérea em plantas de feijão cultivadas sem e com adubação potássica foi influenciado pelos fatores isolados regime hídrico (ambos a $p < 0,01$) e doses de Si ($p < 0,05$ e $p < 0,01$, respectivamente). As doses de Si proporcionaram efeito

com ajuste ao modelo de regressão polinomial quadrático nos três regimes hídricos e nas duas condições de K (Fig. 24a, b). Os teores de Fe máximos em plantas sem adubação potássica foram de 350,89; 273,67 e 235,87 mg kg⁻¹ nas doses de Si de 5,11; 6,13 e 5,54 kg ha⁻¹, respectivamente, para WWD, MWD e SWD. Nas plantas com adubação potássica, os teores máximos de Fe foram de 318,06; 274,14 e 253,65 mg kg⁻¹ obtidos com uso das doses de 6,47; 7,0 e 7,0 kg ha⁻¹ de Si, respectivamente, para WWD, MWD e SWD (Fig. 24a, b).

Plantas cultivadas sob MWD e SWD sem adubação potássica apresentaram teores de Fe semelhantes, mas menores ao das plantas do regime WWD nas doses 0; 4 e 8 kg ha⁻¹ de Si. Contudo, sob MWD as plantas apresentaram teor de Fe semelhante às plantas sem déficit hídrico. As plantas adubadas com K do regime WWD, por outro lado, apresentaram teores de Fe maiores nas doses intermediárias de Si (4 e 8 kg ha⁻¹ de Si), em relação às plantas sob SWD.

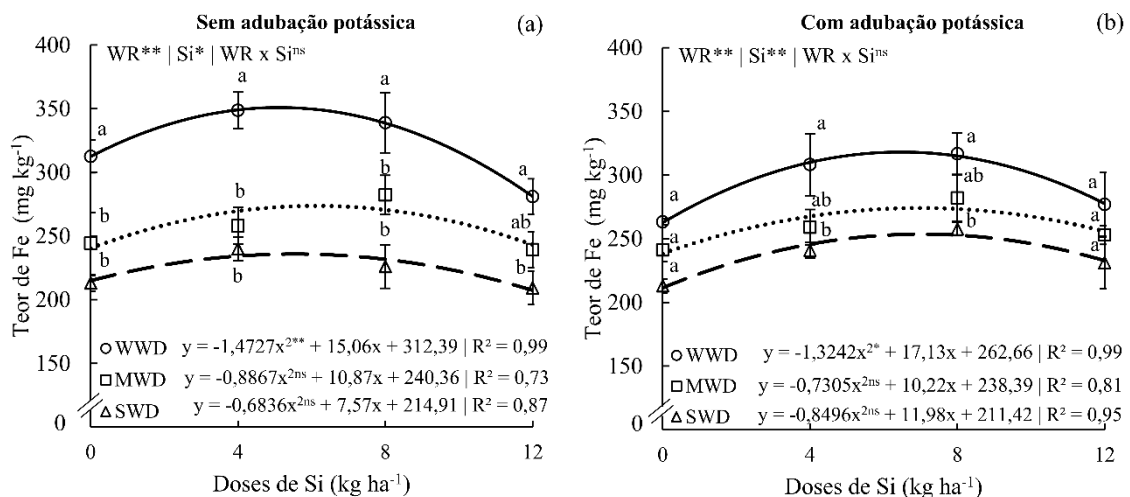


Figura 24. Teor de ferro (Fe) (a, b) na parte aérea de plantas de feijão cultivada sem déficit hídrico – WWD (70% da capacidade de retenção de água - WRC), com déficit hídrico moderado – MWD (60% de WRC) e com déficit hídrico severo – SWD (40% de WRC); combinado com doses de Si fornecidas via fertirrigação: 0, 4, 8 e 12 kg ha⁻¹, sem e com adubação potássica. Letras mostram diferenças para os regimes hídricos (WR) em cada dose de Si ($p < 0,05$, teste de Tukey). * e **: significativo a 1 e 5% de probabilidade, respectivamente, e ^{ns}: não significativo pelo teste F.

O acúmulo de Fe na parte aérea foi influenciado pelo efeito isolado de regime hídrico e doses de Si (todos a $p < 0,01$) nas duas condições de adubação potássica (Fig. 25a, b). As doses de Si proporcionaram efeito com ajuste de regressão polinomial quadrático nos três regimes hídricos, independente da condição potássica. Plantas sem

adubação potássica obtiveram seus máximos acúmulos de 8,47; 5,37 e 3,69 mg por planta de Fe nas doses de 5,42; 7,0 e 6,7 kg ha⁻¹ de Si, respectivamente, para WWD, MWD e SWD (Fig. 25a). Plantas com adubação potássica apresentaram os máximos acúmulos de 8,95; 5,91 e 4,44 mg por planta, obtidos nas doses 6,23; 7,11 e 7,63 kg ha⁻¹, respectivamente, para WWD, MWD e SWD (Fig. 25b).

O acúmulo de Fe em plantas não adubadas e adubadas com K, mas em déficit hídrico (MWD e SWD) foram menores nas doses 0; 4 e 8 kg ha⁻¹ de Si, em relação às plantas em condição hídrica ótima. Contudo, nas plantas MWD não adubadas com K mas adubadas com 8 kg ha⁻¹ de Si ainda apresentaram acúmulo de Fe superior às plantas em SWD. Já em plantas adubadas com K, esta resposta ocorreu apenas em plantas sem Si (0 kg ha⁻¹).

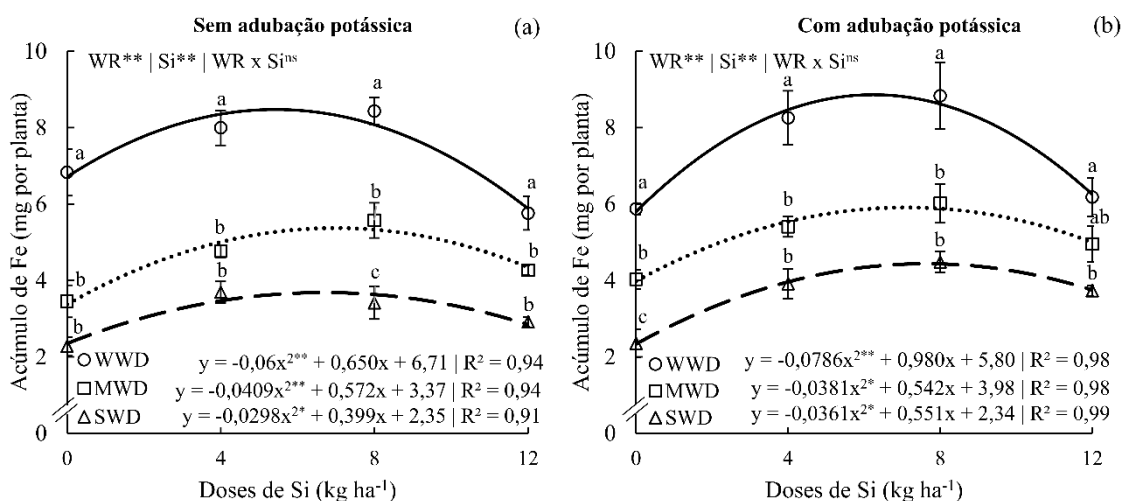


Figura 25. Acúmulo de ferro (Fe) (a, b) na parte aérea de plantas de feijão cultivada sem déficit hídrico – WWD (70% da capacidade de retenção de água - WRC), com déficit hídrico moderado – MWD (60% de WRC) e com déficit hídrico severo – SWD (40% de WRC); combinado com doses de Si fornecidas via fertirrigação: 0, 4, 8 e 12 kg ha⁻¹, sem e com adubação potássica. Letras mostram diferenças para os regimes hídricos (WR) em cada dose de Si ($p < 0,05$, teste de Tukey). * e **: significativo a 1 e 5% de probabilidade, respectivamente, e ^{ns}: não significativo pelo teste F.

4.4 Teor de Si nos grãos de feijão

O teor de Si nos grãos de feijão apresentou efeitos isolado dos fatores regime hídrico ($p < 0,01$) e doses de Si ($p < 0,05$) em plantas cultivadas sem adubação potássica (Fig. 26a); e efeito da interação entres os fatores (WR x Si) ($p < 0,05$) quando houve

fornecimento de K (Fig. 26b). Plantas nas condições WWD e MWD apresentaram ajuste polinomial quadrático para o efeito de doses de Si, com máximos teores de Si de 51,24 e 59,91 mg 100g⁻¹ obtidos nas doses de Si de 6,0 e 6,14 kg ha⁻¹, respectivamente, em sem adubação potássica; e de 62,93 e 62,83 mg 100g⁻¹ obtidos nas doses de Si de 4,8 e 5,86 kg ha⁻¹, respectivamente, em com adubação potássica.

No regime SWD, as doses de Si proporcionaram efeito linear crescente em ambas as condições de adubação potássicas, com taxas de aumento de 1,75 e 1,47 mg 100g⁻¹ para cada 1 kg ha⁻¹ de Si, em plantas cultivadas sem e com adubação potássica, respectivamente (Fig. 26a, b). Na dose de 12 kg ha⁻¹ de Si, plantas cultivadas sob SWD apresentaram maiores teores de Si nos grãos, em relação as plantas sob WWD e MWD em sem adubação potássica; e apenas em relação WWD, em com adubação potássica.

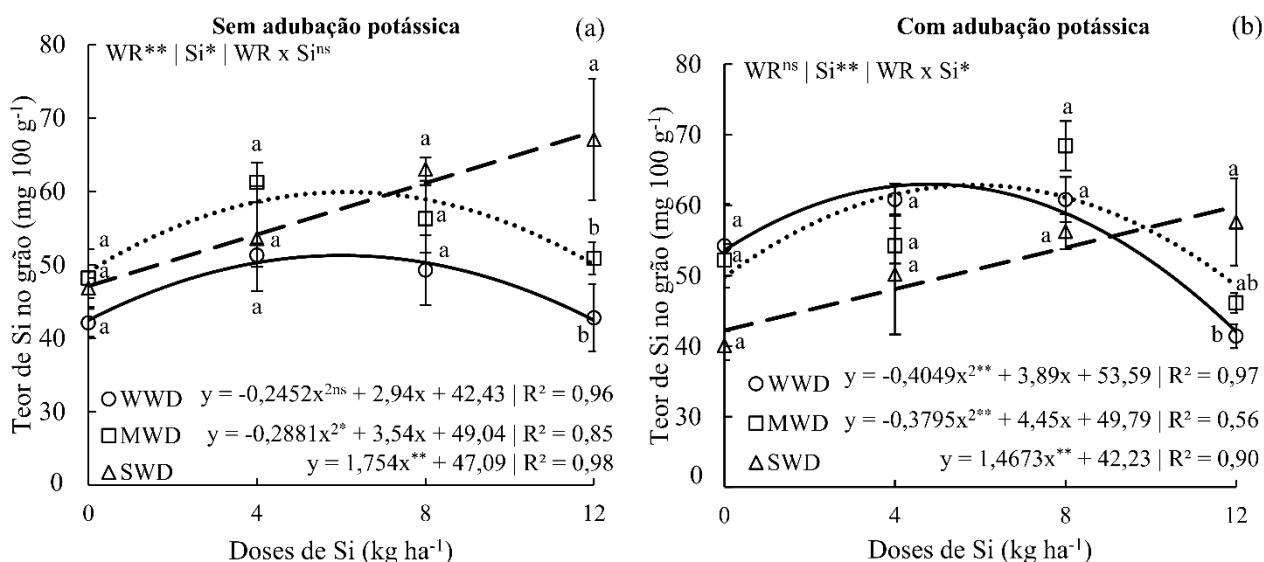


Figura 26. Teor de silício (Si) em grãos de feijão (a, b) cultivado sem déficit hídrico – WWD (70% da capacidade de retenção de água - WRC), com déficit hídrico moderado – MWD (60% de WRC) e com déficit hídrico severo – SWD (40% de WRC); combinado com doses de Si fornecidas via fertirrigação: 0, 4, 8 e 12 kg ha⁻¹, sem e com adubação potássica. Letras mostram diferenças para os regimes hídricos (WR) em cada dose de Si ($p < 0,05$, teste de Tukey). * e **: significativo a 1 e 5% de probabilidade, respectivamente, e ^{ns}: não significativo pelo teste F.

4.5 Parâmetros morfológicos

A altura da planta e o diâmetro do caule foram influenciados apenas pelos efeitos isolados dos fatores regime hídrico e doses de Si (todos com $p < 0,01$) nos três regimes hídricos no cultivo sem e com adubação potássica (Fig. 27a-d). As doses de Si

proporcionaram efeito com ajuste polinomial quadrático para todos dos regimes hídricos nas duas condições de adubação potássica, para a altura da planta e o diâmetro do caule (Fig. 27a-d).

Os máximos valores para a altura da planta em plantas sem adubação potássica foram de 117,36; 99,62 e 92,21 cm obtidas com a aplicação de Si nas doses de 6,64; 6,68 e 6,95 kg ha⁻¹ de Si; para as plantas que receberam adubação potássica, as alturas máximas de plantas foram de 111,63; 96,28 e 86,51 cm obtidas nas doses de 6,56; 6,11 e 7,1 kg ha⁻¹ de Si, respectivamente, para WWD, MWD e SWD (Fig. 27a, b). As plantas cultivadas sob SWD com e sem adubação com K apresentaram menores alturas de plantas em todas as doses de Si testadas, em relação às plantas sob WWD. Contudo, plantas cultivadas sob MWD apresentaram alturas semelhantes às plantas sob WWD nas doses de Si 0; 4 e 12 kg ha⁻¹ em plantas sem adubação com K e nas doses 0 e 8 kg ha⁻¹ em plantas com adubação.

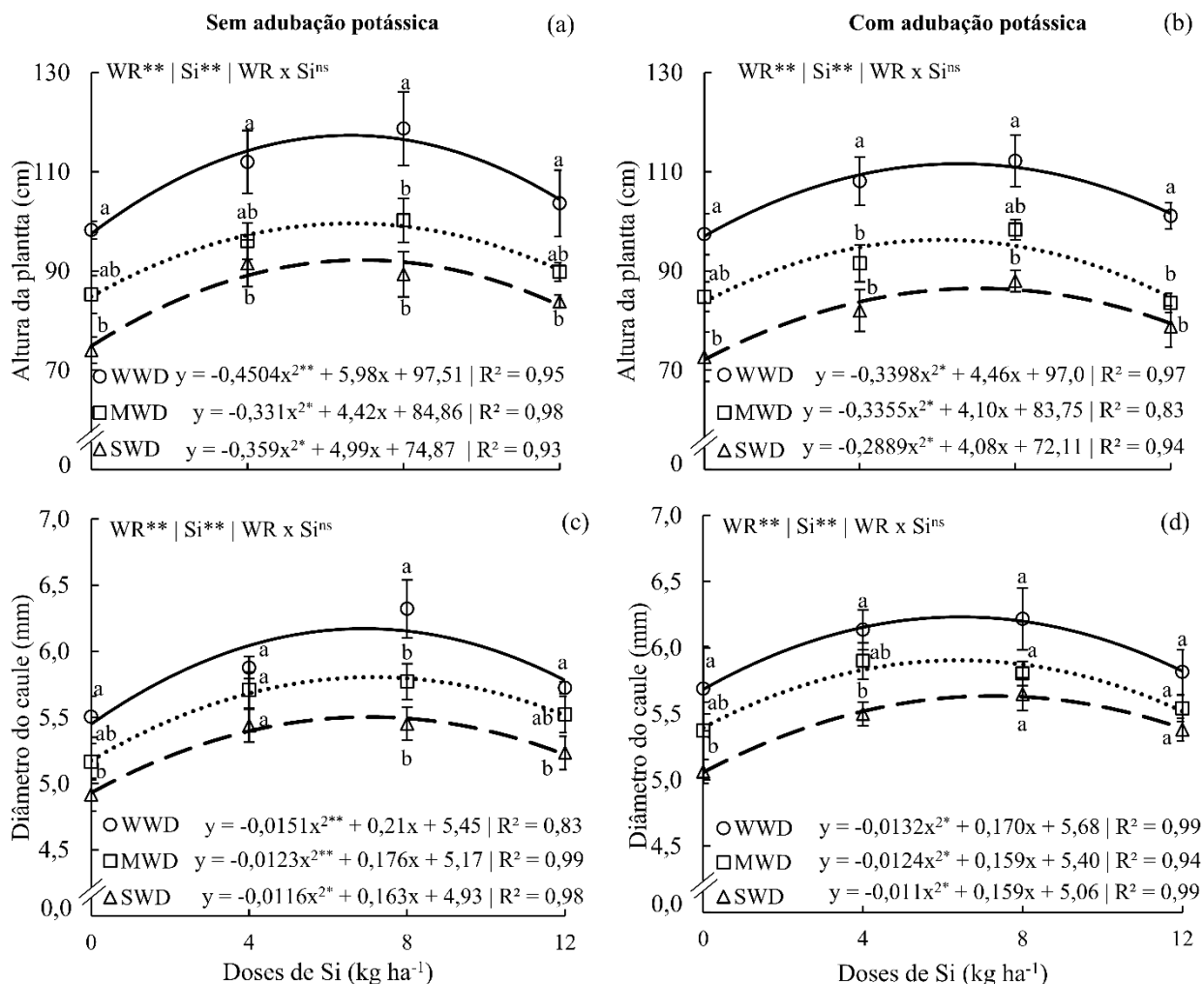


Figura 27. Altura da planta (a, b) e diâmetro do caule (c, d) de plantas de feijão cultivadas sem déficit hídrico – WWD (70% da capacidade de retenção de água - WRC), com déficit hídrico moderado – MWD (60% de WRC) e com déficit hídrico severo – SWD (40% de WRC); combinado com doses de Si fornecidas via fertirrigação: 0, 4, 8 e 12 kg ha⁻¹, sem e com adubação potássica. Letras mostram diferenças para os regimes hídricos (WR) em cada dose de Si ($p < 0,05$, teste de Tukey). * e **: significativo a 1 e 5% de probabilidade, respectivamente, e ^{ns}: não significativo pelo teste F.

Os valores máximos de diâmetro do caule de plantas sem adubação potássica foram de 6,2; 5,8 e 5,5 mm; e com adubação potássica foram de 6,2; 5,9 e 5,6 mm, obtidos nas doses de Si de 6,95; 7,15 e 7,0; e de 6,44; 6,41 e 7,23 kg ha⁻¹, respectivamente, para os regimes WWD, MWD e SWD (Fig. 27c, d). Os regimes de déficit hídrico (MWD e SWD) em plantas sem adubação com K induziram diâmetros de caule iguais às plantas cultivadas em condição hídrica adequada (WWD) quando

receberam Si na dose 4 kg ha⁻¹. Enquanto plantas adubadas com K, isso ocorreu quando as plantas receberam 8 e 12 kg ha⁻¹ de Si.

Apenas os fatores isolados regime hídrico e doses de Si efeitos foram suficientes para influenciar o número de folhas e área foliar (todos com p<0,01) nos três regimes hídricos no cultivo sem e com adubação potássica (Fig. 28a-d). As doses de Si proporcionaram efeito com ajuste polinomial quadrático para todos dos regimes hídricos nas duas condições de adubação potássica, para ambas as variáveis (Fig. 28a-d).

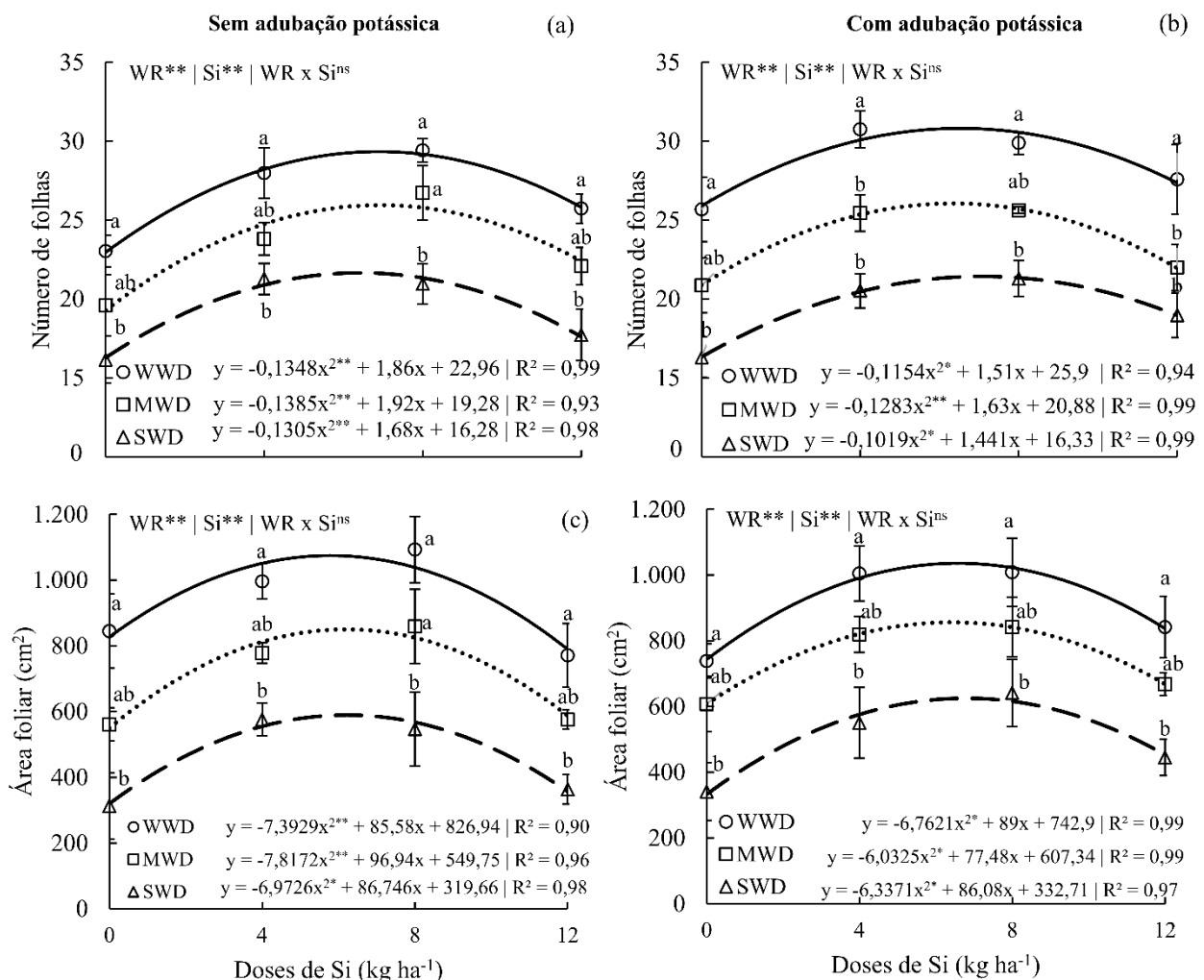


Figura 28. Altura da planta (a, b) e diâmetro do caule (c, d) de plantas de feijão cultivadas sem déficit hídrico – WWD (70% da capacidade de retenção de água - WRC), com déficit hídrico moderado – MWD (60% de WRC) e com déficit hídrico severo – SWD (40% de WRC); combinado com doses de Si fornecidas via fertirrigação: 0, 4, 8 e 12 kg ha⁻¹, sem e com adubação potássica. Letras mostram diferenças para os regimes hídricos (WR) em cada dose de Si (p<0,05, teste de Tukey). * e **: significativo a 1 e 5% de probabilidade, respectivamente, e ^{ns}: não significativo pelo teste F.

O maior número de folhas em plantas sem adubação potássica (29; 26 e 22) e com adubação potássica (31; 26 e 22) foram obtidos aplicando 6,9; 6,9 e 6,4; e 6,5; 6,3 e 7,1 kg ha⁻¹, respectivamente, para WWD, MWD e SWD (Fig. 28a, b). Plantas sem adubação potássica tiveram área foliar máxima de 1074,6; 850,3 e 589,5 cm² nas doses de 5,8; 6,2 e 6,2 kg ha⁻¹ de Si, respectivamente, para WWD, MWD e SWD (Fig. 28c). Plantas com adubação potássica apresentaram área foliar máxima de 1035,7; 856,1 e 625,0 cm², obtidas nas doses 6,6; 6,4 e 6,8 kg ha⁻¹, respectivamente, para WWD, MWD e SWD (Fig. 28d).

As plantas sem adubação com K e adubadas com K cultivadas sob o regime WWD, apresentaram maior número de folhas e área foliar em todas as doses de Si, em relação às plantas sob SWD. Contudo, quando plantas sem adubação com K no regime MWD receberam Si na dose 8 kg ha⁻¹ o número de folhas e a área foliar foram iguais às plantas cultivadas em condição hídrica adequada.

4.6 Componentes de produtividade

Os fatores isolados WR e Si influenciaram o número de vagens das plantas cultivadas sob os três regimes hídricos e em ambas as condições potássicas ($p < 0,01$); apresentando ajuste polinomial quadrático para as doses de Si avaliadas (Fig. 29a, b). Em plantas sem adubação com K, os maiores números de vagens foram de 26; 23 e 19 observados nas doses de Si iguais a 7,12; 6,62 e 6,18 kg ha⁻¹, respectivamente, para WWD, MWD e SWD (Fig. 29a). Plantas com adubação potássica, obtiveram número de vagens máximos nas doses de Si de 6,7; 7,25 e 6,5 kg ha⁻¹, sendo de 32; 26 e 22, respectivamente, para plantas sob WWD, MWD e SWD (Fig. 29b). Plantas cultivadas sob SWD apresentaram os menores números de vagens em plantas com adubação potássica em relação ao regime hídrico WWD em todas as doses de Si, exceto na dose 4 kg ha⁻¹ de Si em plantas sem adubação com K, que apresentaram número de vagens semelhantes entre os regimes.

O efeito da interação (WR x Si) influenciou o peso de 1000 grãos em plantas que não foram fertilizadas com K ($p < 0,05$) (Fig. 29c). Quando a adubação potássica foi realizada, apenas os fatores isolados regime hídrico ($p < 0,01$) e doses de Si ($p < 0,05$) causaram efeito nesse componente de produtividade (Fig. 29d). As doses de Si

proporcionaram ajuste de regressão polinomial quadrática nos três regimes hídricos e em ambas as condições de adubação com K.

Os valores máximos de peso de 1000 grãos em plantas cultivadas sob WWD foram de 231,35 e 227,57 g, nas doses de Si de 5,7 e 4,5 kg ha⁻¹ para o cultivo sem e com adubação potássica, respectivamente. Para o regime hídrico de MWD, os valores máximos obtido foram 251,1 e 249,5 g, nas doses de Si de 6,0 e 4,0 kg ha⁻¹ para o cultivo sem e com adubação potássica, respectivamente. Já para o regime hídrico de SWD, foram de 227,5 e 222,6 g, nas doses de 6,15 e 5,0 kg ha⁻¹ de Si aplicado via fertirrigação, respectivamente, para o cultivo sem e com adubação potássica (Fig. 29a, b).

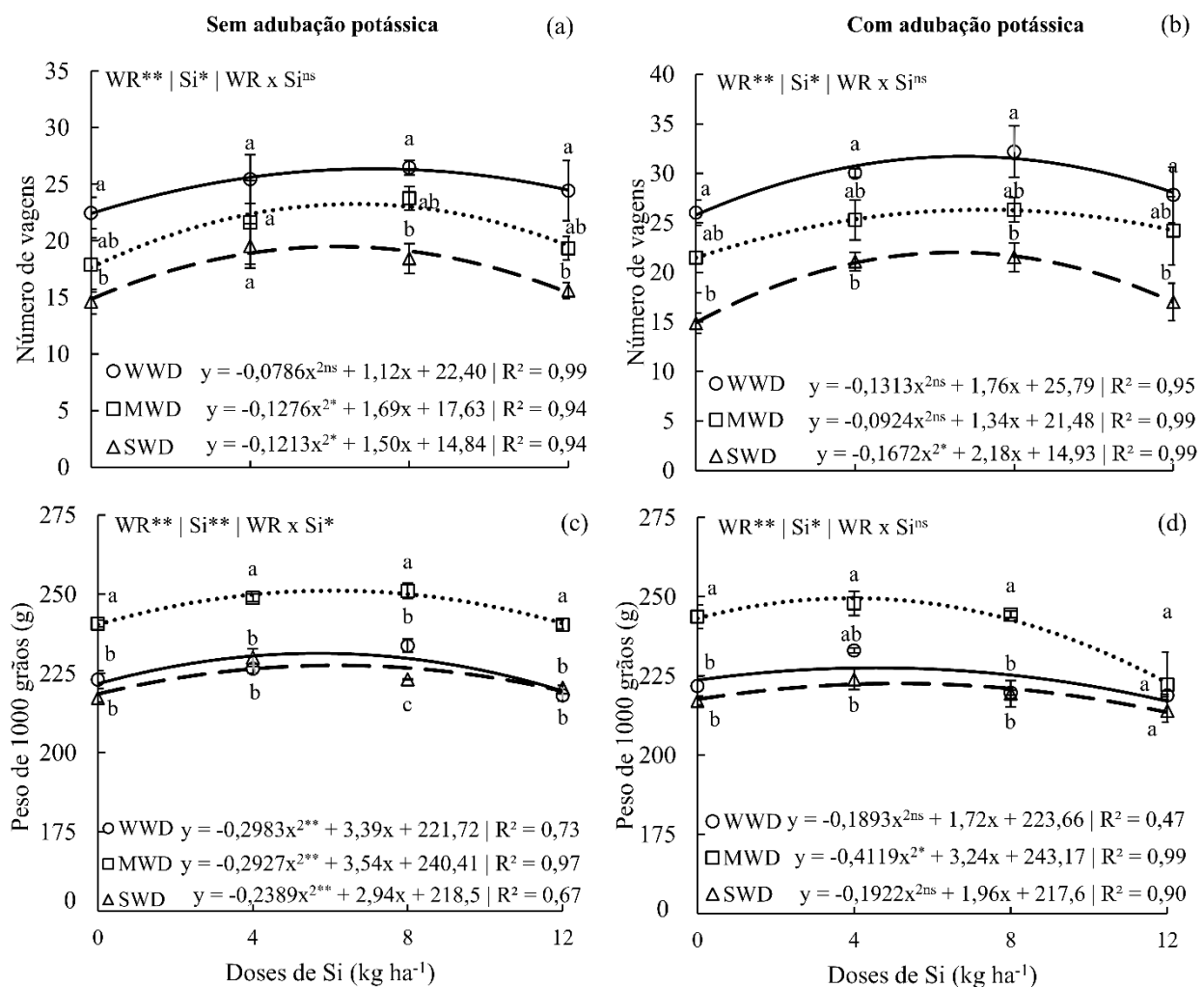


Figura 29. Número de folhas (a, b) e peso de 1000 grãos (c, d) de plantas de feijão cultivadas sem déficit hídrico – WWD (70% da capacidade de retenção de água - WRC), com déficit hídrico moderado – MWD (60% de WRC) e com déficit hídrico severo – SWD (40% de WRC); combinado com doses de Si fornecidas via fertirrigação: 0, 4, 8 e 12 kg ha⁻¹, sem e com adubação potássica. Letras mostram diferenças para os regimes hídricos (WR) em cada dose de Si

($p < 0,05$, teste de Tukey). * e **: significativo a 1 e 5% de probabilidade, respectivamente, e ^{ns}: não significativo pelo teste F.

Em ambas as condições de K, as plantas cultivadas em WWD apresentaram maiores pesos de 1000 grãos nas doses 0; 4 e 8 kg ha⁻¹ de Si, em relação às plantas cultivadas sob MWD e SWD. Contudo, em plantas com adubação potássica o peso de 1000 grãos foi semelhante entre os regimes WWD, MWD e SWD quando receberam dose de Si igual a 12 kg ha⁻¹ de Si.

Os fatores isolados regimes hídricos e doses de Si influenciaram a produtividade de grãos de feijão (todos a $p < 0,01$) para os três regimes hídricos e nas duas condições potássicas (Fig. 30a, b). As doses de Si proporcionaram efeito com ajuste polinomial quadrático para todos dos regimes hídricos nas duas condições de adubação potássica (Fig. 30a-b).

As máximas produtividades obtidas em sem adubação potássica foram de 2718,68; 2331,09 e 1337,92 kg ha⁻¹, obtidas com as doses de Si de 6,8; 5,6 e 6,0 kg ha⁻¹ de Si; já para as plantas que receberam adubação potássica, as máximas foram de 2902,72; 2111,72 e 1134,0 kg ha⁻¹, obtidas nas doses de 5,77; 6,73 e 6,0 kg ha⁻¹ de Si, respectivamente, para WWD, MWD e SWD (Fig. 30a, b). As plantas do regime WWD apresentaram produtividade de grãos superiores às submetidas aos regimes MWD e SWD em todas as doses de Si, em ambas as condições de K. Contudo, plantas sem adubação com K sob regime MWD apresentaram produtividade semelhante às plantas sob condição hídrica ideal quando não receberam Si e quando receberam Si na dose 8 kg ha⁻¹.

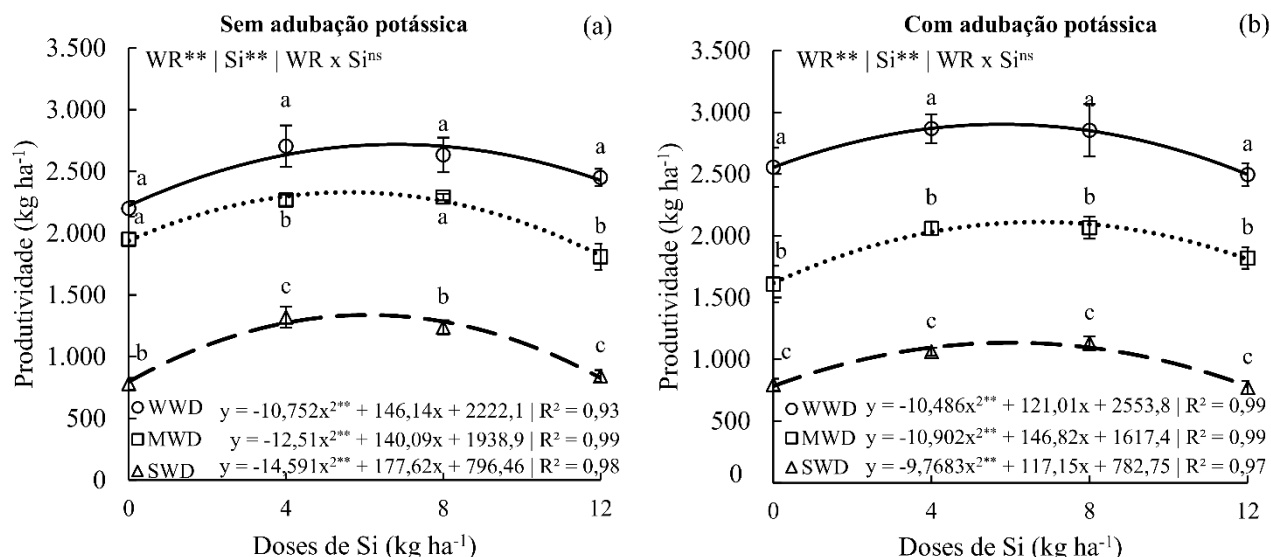


Figura 30. Produtividade de feijão (a, b) cultivado sem déficit hídrico – WWD (70% da capacidade de retenção de água - WRC), com déficit hídrico moderado – MWD (60% de WRC) e com déficit hídrico severo – SWD (40% de WRC); combinado com doses de Si fornecidas via fertirrigação: 0, 4, 8 e 12 kg ha⁻¹, sem e com adubação potássica. Letras mostram diferenças para os regimes hídricos (WR) em cada dose de Si ($p < 0,05$, teste de Tukey). * e **: significativo a 1 e 5% de probabilidade, respectivamente, e ns: não significativo pelo teste F.

4.7 Eficiência de uso de água

A produtividade da água de irrigação (PAi) e a produtividade da água de irrigação + precipitação (PAi+p) foram afetadas pelo efeito isolado dos fatores regime hídrico e doses de Si (todos a $p < 0,01$), com os resultados de doses de Si ajustados ao modelo de regressão polinomial quadrático para todos os regimes hídricos em sem e com adubação potássica (Fig. 31a-d). Os valores máximos de PAi obtidos foram de 4,7; 4,7 e 3,3 kg ha⁻¹ mm⁻¹ obtidos nas doses 6,3; 5,6 e 6,1 kg ha⁻¹ de Si respectivamente, para as condições sob WWD, MWD e SWD e sem adubação potássica (Fig. 31a). Para o cultivo com adubação potássica, os valores máximos foram de 5,0; 4,2 e 2,8 kg ha⁻¹ mm⁻¹ nas doses de 5,8; 6,6 e 6,1 kg ha⁻¹ de Si, respectivamente, nos regimes hídricos de WWD, MWD e SWD (Fig. 31b). A PAi foi menor no regime SWD nas duas condições de K em todas as doses de Si testadas. No entanto, sem adubação com K o regime MWD apresentou a mesma PAi que plantas em condição hídrica ideal em todas as doses, enquanto na condição adubada com K, isso ocorreu apenas na maior dose de Si (12 kg ha⁻¹).

Para os dados de PAi+p os maiores valores foram de 4,3; 4,3 e 3 kg ha⁻¹ mm⁻¹ nas doses de 6,7; 5,6 e 6,1 kg ha⁻¹ de Si, respectivamente, para WWD, MWD e SWD e

sem adubação potássica (Fig. 31c). Para a condição de cultivo com adubação potássica, os valores máximos foram de 4,6; 3,9 e 2,5 kg ha⁻¹ mm⁻¹, obtidos nas doses 5,7; 6,75 e 6,1 kg ha⁻¹, respectivamente, para WWD, MWD e SWD (Fig. 31d). A PAi+p, semelhante a PAi, foi menor quando no regime SWD na condição sem adubação potássica e com adubação potássica, em relação aos regimes MWD e WWD em todas as doses de Si. No entanto, sem adubação com K, MWD e WWD apresentaram PAi+p semelhantes em todas as doses de Si, não sendo verificado este resultado quando houve adubação potássica, em que MDW apresentou PAi+p intermediária entre WWD e SWD.

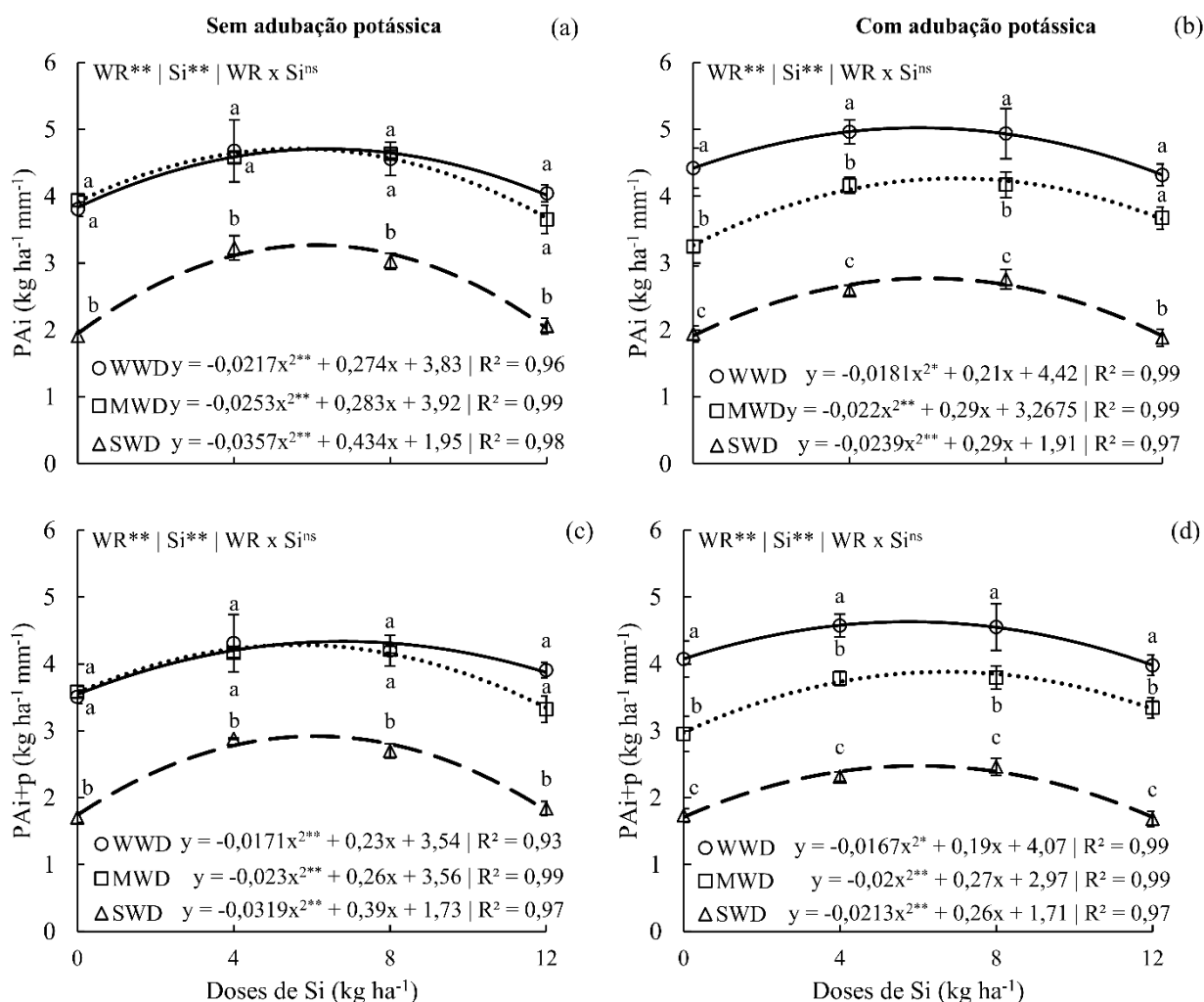


Figura 31. Produtividade da água de irrigação (PAi) (a, b) e produtividade da água de irrigação mais a precipitação pluvial (PAi+p) (c, d) para o cultivo de feijão sob sem déficit hídrico – WWD (70% da capacidade de retenção de água - WRC), com déficit hídrico moderado – MWD (60% de WRC) e com déficit hídrico severo – SWD (40% de WRC); combinado com doses de Si fornecidas via fertirrigação: 0, 4, 8 e 12 kg ha⁻¹, sem e com adubação potássica. Letras mostram diferenças para os regimes hídricos (WR) em cada dose de Si ($p < 0,05$, teste de Tukey). * e **: significativo a 1 e 5% de probabilidade, respectivamente, e ^{ns}: não significativo pelo teste F.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Uma nova forma de aplicação de Si via fertirrigação em estudos de campo em culturas anuais irrigadas ainda não estudado no Brasil poderia ser opção vantajosa para potencializar a produtividade dos cultivos em sistema de irrigação deficitário severo e moderado e sem déficit.

O presente relatório inicial apresenta os primeiros dados do experimento do feijão com resultados muito promissores mesmo em uma espécie considerada não acumuladora de Si. Ficou evidenciado que a fertirrigação com Si na cultura do feijão é capaz de aumentar absorção do elemento nos três regimes hídricos nas duas condições de fertilização potássica e foram suficientes para favorecer a fisiologia, a nutrição com Si e de diferentes nutrientes, o crescimento e a produtividade da cultura e até a biofortificação dos grãos com Si. Inclusive teve efeito na decomposição da palhada e a emissão de CO₂. Inclusive temos amostras da planta para diferentes variáveis conforme indicado nas atividades a serem avaliadas que depende de outros laboratórios como de bioquímica, mas as análises das amostras estão agendadas para serem processadas nos próximos dois meses. Cabe destacar que o número de avaliações deste projeto é muito elevado para garantir maior compreensão dos efeitos do Si na planta e ainda tem o tamanho do experimento, ou seja, 96 parcelas a nível de campo constituem um grande desafio.

De toda forma, destacamos também que as doses de Si estudadas foram bem estabelecidas para garantir o sucesso desta pesquisa, pois as doses foram suficientes para gerar uma resposta da planta nas diferentes variáveis um ajuste polinomial quadrático. Este fato é importante para conseguir estabelecer com precisão a dose ótima do elemento para o cultivo do feijão. Por exemplo, a dose de Si responsável para a maior produtividade foi de 6,0 kg ha⁻¹ pois melhorou aspectos biológicos e nutricionais da cultura indicados neste relatório.

No próximo relatório será abordado a cultura do milho e poderá ter resultados ainda mais promissores por ser espécie acumuladora do Si. Deste modo, esperamos no final deste projeto ter informações inéditas para orientar com precisão o uso do Si na

agricultura irrigada para cultivos anuais e em breve serão publicados os primeiros papers desta pesquisa.

6. REFERÊNCIAS

- Abbas, T., Balal, R.M., Shahid, M.A., Pervez, M.A., Ayyub, C.M., Aqueel, M.A., Javaid, M.M., 2015. Silicon-induced alleviation of NaCl toxicity in okra (*Abelmoschus esculentus*) is associated with enhanced photosynthesis, osmoprotectants and antioxidant metabolism. *Acta Physiol Plant* 37, 1–15.
<https://doi.org/10.1007/s11738-014-1768-5>
- Ambrosano, E.J., Tanaka, R.T., Mascarenhas, H.A.A., Rajj, B. van., Quaggio, J.A., Cantarella, H., 1997. Leguminosas e Oleaginosas, in: Rajj, B. van., Cantarella, H., Quaggio, J.A., Furlani, A.M.C. (Eds.), *Recomendações de Adubação e Calagem Para o Estado de São Paulo*. Boletim Técnico, 100, Campinas, pp. 189–191.
- ANA, 2021. Atlas irrigação: uso da água na agricultura irrigada, 2ª. ed. Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico, Brasília.
- Andrioli, I., Centurion, J.F., 1999. Levantamento detalhado dos solos da Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias de Jaboticabal, Anais. Brasília.
- Avila, R.G., Magalhães, P.C., da Silva, E.M., de Souza, K.R.D., Campos, C.N., de Alvarenga, A.A., de Souza, T.C., 2021. Application of silicon to irrigated and water deficit sorghum plants increases yield via the regulation of primary, antioxidant, and osmoregulatory metabolism. *Agric Water Manag* 255, 107004.
<https://doi.org/10.1016/j.agwat.2021.107004>
- 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 Res* 14, 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. *Aust J Biol Sci* 15, 413–428.
<https://doi.org/10.1071/BI9620413>
- Bataglia, O.C., Furlani, A.M.C., Teixeira, J.P.F., Furlani, P.R., Gallo, J.R., 1983. *Métodos de análise química de plantas* (No. 78). Campinas.
- Bates, L.S., Waldren, R.P., Teare, I.D., 1973. Rapid determination of free proline for water-stress studies. *Plant Soil* 39, 205–207.
<https://doi.org/10.1007/BF00018060>
- Besharat, S., Barão, L., Cruz, C., 2020. New strategies to overcome water limitation in cultivated maize: Results from sub-surface irrigation and silicon fertilization. *J Environ Manage* 263. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.110398>
- Birchall, J.D., 1995. The essentiality of silicon in biology. *Chem Soc Rev* 24, 351–357.
<https://doi.org/10.1039/CS9952400351>
- Bityutskii, N., Pavlovic, J., Yakkonen, K., Maksimovi, V., 2014. Contrasting effect of silicon on iron, zinc and manganese status and accumulation of metal-mobilizing compounds in micronutrient-deficient cucumber. *Plant Physiology and Biochemistry* 74, 205–211. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2013.11.015>
- Bradford, M.M., 1976. A rapid and sensitive method for the quantitation of microgram quantities of protein utilizing the principle of protein-dye binding. *Anal Biochem* 72, 248–254.
- Camargo, O.A. de, Moniz, A.C., Jorge, J.A., Valadares, J.M.A.S., 1986. *Metodos de analise quimica, mineralogica e fisica de solos do Instituto Agronômico de Campinas*. Instituto Agronômico de Campinas - IAC, Campinas.
- Cardozo, N.P., de Oliveira Bordonal, R., La Scala, N., 2018. Sustainable intensification of sugarcane production under irrigation systems, considering climate interactions and agricultural efficiency. *J Clean Prod* 204, 861–871.
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.09.004>

- Crusciol, C.A.C., Ferrari Neto, J., Soratto, R.P., Costa, C.H.M. da, 2013. Cycling of nutrients and silicon in pigeonpea and pearl millet monoculture and intercropping. *Rev Bras Cienc Solo* 37, 1628–1640.
<https://doi.org/10.1590/s0100-06832013000600019>
- de Oliveira Filho, A.S.B., de Mello Prado, R., Teixeira, G.C.M., Rocha, A.M.S., de Souza Junior, J.P., de Cássia Piccolo, M., Rocha, J.R., 2021. Silicon attenuates the effects of water deficit in sugarcane by modifying physiological aspects and C:N:P stoichiometry and its use efficiency. *Agric Water Manag* 255, 107006.
<https://doi.org/10.1016/j.agwat.2021.107006>
- Dionisio-Sese, M.L., Tobita, S., 1998. Antioxidant responses of rice seedlings to salinity stress. *Plant Science* 135, 1–9. [https://doi.org/10.1016/S0168-9452\(98\)00025-9](https://doi.org/10.1016/S0168-9452(98)00025-9)
- Doncheva, S., Poschenrieder, C., Stoyanova, Z., Georgieva, K., Velichkova, M., Barceló, J., 2009. Silicon amelioration of manganese toxicity in Mn-sensitive and Mn-tolerant maize varieties. *Environ Exp Bot* 65, 189–197.
<https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2008.11.006>
- Epstein, E., 1994. The anomaly of silicon in plant biology. *Proc Natl Acad Sci U S A* 91, 11–17. <https://doi.org/10.1073/pnas.91.1.11>
- Fageria, N.K., Baligar, V.C., 2005. Enhancing nitrogen use efficiency in crop plants. *Advances in Agronomy* 88, 97–185.
- Firouzabadi, A.G., Baghani, J., Jovzi, M., Albaji, M., 2021. Effects of wheat row spacing layout and drip tape spacing on yield and water productivity in sandy clay loam soil in a semi-arid region. *Agric Water Manag* 251, 106868.
<https://doi.org/10.1016/j.agwat.2021.106868>
- Frazão, J.J., Prado, R. de M., de Souza Júnior, J.P., Rossatto, D.R., 2020. Silicon changes C:N:P stoichiometry of sugarcane and its consequences for photosynthesis, biomass partitioning and plant growth. *Sci Rep* 10, 1–10.
<https://doi.org/10.1038/s41598-020-69310-6>

- 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. *Ann Bot* 121, 1265–1273.
<https://doi.org/10.1093/aob/mcy009>
- Giannopolitis, C.N., Ries, S.K., 1977. Superoxide dismutases. I. Occurrence in higher plants. *Plant Physiol* 59, 309–314. <https://doi.org/10.1104/pp.59.2.309>
- Gomes-Junior, R.A., Gratão, P.L., Gaziola, S.A., Mazzafera, P., Lea, P.J., Azevedo, R.A., 2007. Selenium-induced oxidative stress in coffee cell suspension cultures. *Functional Plant Biology* 34, 449–456. <https://doi.org/10.1071/FP07010>
- Gratão, P.L., Monteiro, C.C., Carvalho, R.F., Tezotto, T., Piotto, F.A., Peres, L.E.P., Azevedo, R.A., 2012. Biochemical dissection of diageotropica and Never ripe tomato mutants to Cd-stressful conditions. *Plant Physiology and Biochemistry* 56, 79–96. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2012.04.009>
- Heath, R.L., Packer, L., 1968. Photoperoxidation in isolated chloroplasts I. Kinetics and stoichiometry of fatty acid peroxidation. *Arch Biochem Biophys* 125, 189–198.
[https://doi.org/10.1016/0003-9861\(68\)90654-1](https://doi.org/10.1016/0003-9861(68)90654-1)
- 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., 2020. Regulation of agronomic traits, nutrient uptake, osmolytes and antioxidants of maize as influenced by exogenous potassium silicate under deficit irrigation and semiarid conditions. *Agronomy* 10. <https://doi.org/10.3390/agronomy10081212>
- IRRI, 1993. Rice research in a time change: IRRI's medium-term plan for 1994-1998. International Rice Research Institute, Los Banos, Philippines.
- Katz, O., Puppe, D., Kaczorek, D., Prakash, N.B., Schaller, J., 2021. Silicon in the soil–plant continuum: Intricate feedback mechanisms within ecosystems. *Plants* 10, 1–36. <https://doi.org/10.3390/plants10040652>
- Kliemann, H.J., Braz, a. J.P.B., Silveira, P.M. Da, 2006. Taxas de decomposição de resíduos de espécies de cobertura em Latossolo Vermelho distroférico. *Pesqui Agropecu Trop* 36, 21–28.

- Klute, A., 1986. Water retention: laboratory methods, in: Klute, A. (Ed.), *Methods of Soil Analysis, Part 1. Physical and Mineralogical Methods*. Agronomy Monograph, pp. 635–662. <https://doi.org/10.2136/sssabookser5.1.2ed.c26>
- Korndörfer, G.H., Pereira, H.S., Nolla, A., 2004. *Análise de silício no solo, planta e fertilizantes*, 2nd ed. UFU, Uberlândia.
- Kraska, J.E., Breitenbeck, G.A., 2010. Simple, robust method for quantifying silicon in plant tissue. *Commun Soil Sci Plant Anal* 41, 2075–2085.
<https://doi.org/10.1080/00103624.2010.498537>
- Li, Z., Song, Z., Yan, Z., Hao, Q., Song, A., Liu, L., Yang, X., Xia, S., Liang, Y., 2018. Silicon enhancement of estimated plant biomass carbon accumulation under abiotic and biotic stresses. A meta-analysis. *Agron Sustain Dev* 38, 26.
<https://doi.org/10.1007/s13593-018-0496-4>
- Liang, Y., Nikolic, M., Bélanger, R., Gong, H., Song, A., 2015. *Silicon in Agriculture*, *Silicon in Agriculture*. Springer Netherlands, Dordrecht.
<https://doi.org/10.1007/978-94-017-9978-2>
- Lichtenthaler, H.K., 1987. Chlorophylls and carotenoids: Pigments of photosynthetic biomembranes. *Methods Enzymol* 148, 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 R_{Fd} of leaves with the PAM fluorometer. *Photosynthetica* 43, 379–393. <https://doi.org/10.1007/s11099-005-0062-6>
- Liu, J.M., Han, C., Sheng, X.B., Liu, S.K., Qi, X., 2011. Potassium-containing silicate fertilizer: its manufacturing technology and agronomic effects, in: *Oral Presentation at 5th International Conference on Silicon in Agriculture*.
- Lou, Y., Ren, L., Zhao, S., Shi, Y., Zhang, Y., Zhu, H., 2019. Effects of silicate application on CH₄ and N₂O emissions and global warming potentials in paddy soil under enhanced UV-B radiation. *Energy Sci Eng* 7, 1784–1794.
<https://doi.org/10.1002/ese3.390>

- Mali, M., Aery, N.C., 2008. Influence of silicon on growth, relative water contents and uptake of silicon, calcium and potassium in wheat grown in nutrient solution. *J Plant Nutr* 31, 1867–1876. <https://doi.org/10.1080/01904160802402666>
- Martineau, E., Domec, J.C., Bosc, A., Dannoura, M., Gibon, Y., Bénard, C., Jordan-Meille, L., 2017. The role of potassium on maize leaf carbon exportation under drought condition. *Acta Physiol Plant* 39. <https://doi.org/10.1007/s11738-017-2515-5>
- Melo, L.C., Pereira, H.S., Faria, L.C. de, Souza, T.L.P.O. de, Wendland, A., Díaz, J.L.C., Carvalho, H.W.L. de, Costa, A.F. da, Magaldi, M.C. de S., Costa, J.G.C. da, Aguiar, M.S. de, Abreu, Â. de F.B., Pereira Filho, I.A., Posse, S.C.P., Martins, M., Albrecht, J.C., Souza Filho, B.F. de, Carneiro, G.E. de S., Guimarães, C.M., Braz, A.J.B.P., Marangon, M.A., Trindade, N.L.S.R., Souza, N.P. de, Faria, J.C. de, Peloso, M.J. Del, 2017. BRS FC402: cultivar de feijão-comum carioca com alta produtividade, resistência à antracnose e murcha-de-fusário (No. 237), Comunicado Técnico. Santo Antônio de Goiás.
- Mitani, N., Jian, F.M., Iwashita, T., 2005. Identification of the silicon form in xylem sap of rice (*Oryza sativa* L.). *Plant Cell Physiol* 46, 279–283. <https://doi.org/10.1093/pcp/pci018>
- Moitinho, M.R., Ferraudo, A.S., Panosso, A.R., Bicalho, E. da S., Teixeira, D.D.B., Barbosa, M. de A., Tsai, S.M., Borges, B.M.F., Cannavan, F. de S., Souza, J.A.M. de, La Scala, N., 2021. Effects of burned and unburned sugarcane harvesting systems on soil CO₂ emission and soil physical, chemical, and microbiological attributes. *Catena (Amst)* 196, 104903. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2020.104903>
- Oliveira Filho, A.S.B. De, Mello, R. De, Teixeira, G.C.M., Rocha, A.M.S., Souza Junior, J.P. de, Piccolo, M. de C., Rocha, J.R., 2021. Silicon attenuates the effects of water deficit in sugarcane by modifying physiological aspects and C: N: P stoichiometry and its use efficiency. *Agric Water Manag* 255, 107006. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2021.107006>

Paul, E.A., Clack, F.E., 1989. Soil Microbiology and Biochemistry. Elsevier, San Diego.
<https://doi.org/10.1016/C2009-0-02814-1>

Pavlovic, J., Samardzic, J., Maksimovi, V., Timotijevic, G., Stevic, N., Laursen, K.H., Hansen, T.H., Husted, S., Schjoerring, J.K., Liang, Y., Nikolic, M., 2013. Silicon alleviates iron deficiency in cucumber by promoting mobilization of iron in the root apoplast. *New Phytologist* 198, 1096–1107.
<https://doi.org/10.1111/nph.12213>

Peris-Felipo, F.J., Benavent-Gil, Y., Hernández-Apaolaza, L., 2020. Silicon beneficial effects on yield, fruit quality and shelf-life of strawberries grown in different culture substrates under different iron status. *Plant Physiology and Biochemistry* 152, 23–31. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2020.04.026>

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

Rizwan, M., Ali, S., Ibrahim, M., Farid, M., Adrees, M., Bharwana, S.A., Zia-ur-Rehman, M., Qayyum, M.F., Abbas, F., 2015. Mechanisms of silicon-mediated alleviation of drought and salt stress in plants: a review. *Environmental Science and Pollution Research* 22, 15416–15431. <https://doi.org/10.1007/s11356-015-5305-x>

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. *J Agron Crop Sci* 1–13.
<https://doi.org/10.1111/jac.12479>

Sarah, M.M. dos S., Prado, R. de M., Teixeira, G.C.M., Souza Júnior, J.P. de, Medeiros, R.L.S. de, Barreto, R.F., 2021. Silicon supplied via roots or leaves relieves potassium deficiency in maize plants. *Silicon*.
<https://doi.org/10.1007/s12633-020-00908-1>

Schaller, J., Brackhage, C., Gessner, M.O., Bäuker, E., Gert Dudel, E., 2012. Silicon supply modifies C:N:P stoichiometry and growth of *Phragmites australis*. *Plant Biol* 14, 392–396. <https://doi.org/10.1111/j.1438-8677.2011.00537.x>

- Schoelynck, J., Bal, K., Backx, H., Okruszko, T., Meire, P., Struyf, E., 2010. Silica uptake in aquatic and wetland macrophytes: A strategic choice between silica, lignin and cellulose? *New Phytologist* 186, 385–391.
<https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.2009.03176.x>
- Singleton, V.L., Rossi, J.A.Jr., 1965. Colorimetry to total phenolics with phosphomolybdic-phosphotungstic acid reagents. *American Journal of Enology and Viniculture* 16, 144–58.
- Song, Z., Liu, C., Müller, K., Yang, X., Wu, Y., Wang, H., 2018. Silicon regulation of soil organic carbon stabilization and its potential to mitigate climate change. *Earth Sci Rev* 185, 463–475. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2018.06.020>
- Souza Junior, J.P. de, Prado, R. de M., Morais, T. chagas B. de, Frazão, J.J., Santos Sarah, M.M. dos, Oliveira, K.R. de, Paula, R.C. de, 2021. Silicon fertigation and salicylic acid foliar spraying mitigate ammonium deficiency and toxicity in *Eucalyptus* spp. clonal seedlings. *PLoS One* 16, 1–11.
<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0250436>
- 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 Soil*.
<https://doi.org/10.1007/s11104-022-05446-w>
- Teixeira, G.C.M., de Mello Prado, R., Oliveira, K.S., D'Amico-Damião, V., da Silveira Sousa Junior, G., 2020a. Silicon increases leaf chlorophyll content and iron nutritional efficiency and reduces iron deficiency in sorghum plants. *J Soil Sci Plant Nutr* 20, 1311–1320. <https://doi.org/10.1007/s42729-020-00214-0>
- Teixeira, G.C.M., de Mello Prado, R., Rocha, A.M.S., de Cássia Piccolo, M., 2022b. Silicon as a sustainable option to increase biomass with less water by Inducing Carbon:Nitrogen:Phosphorus stoichiometric homeostasis in sugarcane and energy cane. *Front Plant Sci* 13. <https://doi.org/10.3389/fpls.2022.826512>
- Teixeira, G.C.M., de Mello Prado, R., Rocha, A.M.S., dos Santos, L.C.N., dos Santos Sarah, M.M., Gratão, P.L., Fernandes, C., 2020b. Silicon in pre-sprouted

- sugarcane seedlings mitigates the effects of water deficit after transplanting. *J Soil Sci Plant Nutr* 1, 1–11. <https://doi.org/10.1007/s42729-019-00170-4>
- Teixeira, G.C.M., de Prado, R.M., Rocha, A.M.S., de Oliveira Filho, A.S.B., da Sousa Junior, G.S., Gratão, P.L., 2022c. Action of silicon on the activity of antioxidant enzymes and on physiological mechanisms mitigates water deficit in sugarcane and energy cane plants. *Sci Rep* 12. <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., 2021a. Beneficial effect of silicon applied through fertigation attenuates damage caused by water deficit in sugarcane. *J Plant Growth Regul.* <https://doi.org/10.1007/s00344-021-10510-3>
- Teixeira, G.C.M., Mello Prado, R., Rocha, A.M.S., 2021b. Low absorption of silicon via foliar in comparison to root application has an immediate antioxidant effect in mitigating water deficit damage in sugarcane. *J Agron Crop Sci* 00, 1–10. <https://doi.org/10.1111/jac.12511>
- Teixeira, G.C.M., Prado, R. de M., Rocha, A.M.S., Piccolo, M. de C., 2020c. Root- and foliar-applied silicon modifies C:N:P ratio and increases the nutritional efficiency of pre-sprouted sugarcane seedlings under water deficit. *PLoS One* 15, e0240847. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0240847>
- Thomas, R.J., Asakawa, N.M., 1993. Decomposition of leaf litter from tropical forage grasses and legumes. *Soil Biol Biochem* 25, 1351–1361. [https://doi.org/10.1016/0038-0717\(93\)90050-L](https://doi.org/10.1016/0038-0717(93)90050-L)
- Tubana, B.S., Babu, T., Datnoff, L.E., 2016. A review of silicon in soils and plants and its role in US agriculture. *Soil Sci* 181, 393–411. <https://doi.org/10.1097/SS.0000000000000179>
- Turner, N.C., 1981. Techniques and experimental approaches for the measurement of plant water status. *Plant Soil* 58, 339–366. <https://doi.org/10.1007/BF02180062>

- Ul-Allah, S., Ijaz, M., Nawaz, A., Sattar, A., Sher, A., Naeem, M., Shahzad, U., Farooq, U., Nawaz, F., 2020. Potassium application improves grain yield and alleviates drought susceptibility in diverse maize hybrids. *Plants* 9, 1–11.
- Vasanthi, N., Saleena, L.M., Raj, S.A., Vijay, R., Pvt, B., 2014. Silicon in crop production and crop protection - A Review. *Agricultural Research Communication Centre* 35, 14–23. <https://doi.org/10.5958/j.0976-0741.35.1.002>
- Vax Soest, P.J., 1963. Use of detergents in the analysis of fibrous feeds. II. A rapid method for the determination of fiber and lignin. *Journal of Association of Official Agricultural Chemists* 46, 829–835. <https://doi.org/10.1093/jaoac/46.5.829>
- Woesz, A., Weaver, J.C., Kazanci, M., Dauphin, Y., Aizenberg, J., Morse, D.E., Fratzl, P., 2006. Micromechanical properties of biological silica in skeletons of deep-sea sponges. *J Mater Res* 21, 2068–2078. <https://doi.org/10.1557/jmr.2006.0251>
- Yoshida, S., 1965. Chemical aspects of the role of silicon in physiology of the rice plant. *Bulletin of the National Institute of Agricultural Sciences Series B* 15, 1–58.
- Zebarth, B.J., Sheard, R.W., Curnoe, W.E., 1991. A soil test calibration method for potassium on alfalfa which allows for variation in crop value and fertilizer cost. *Journal of Production Agriculture* 4, 317–322. <https://doi.org/10.2134/jpa1991.0317>