

USO DE SILÍCIO NA MITIGAÇÃO DE DÉFICIT HÍDRICO EM FEIJOEIRO

LUIZ FABIANO PALARETTI¹, ANA LAURA DA COSTA ANTONIO SANTOS², GELZA CARLIANE MARQUES TEIXEIRA³, RENATO DE MELLO PRADO⁴ e CARLOS VITAL GONZALEZ PORAS⁵

¹Dr. Professor Associado, UNESP/FCAV, Jaboticabal-SP, luiz.f.palaretti@gmail.com;

²Discente do curso de Engenharia Agrônômica, UNESP/FCAV, al.santos@unesp.br;

³Dr. Professora Doutora, UFLA, Lavras-MG, gelza.teixeira@ufla.br;

⁴Dr. Professor Associado, UNESP/FCAV, Jaboticabal-SP, rm.prado@unesp.br;

⁵Doutorando em Produção Vegetal, UNESP/FCAV, vital_gp@outlook.es

Apresentado no
Congresso Técnico Científico da Engenharia e da Agronomia – CONTECC
06 a 09 de outubro de 2025

RESUMO: Torna-se crucial elucidar se o Silício mitiga os efeitos adversos do déficit hídrico por meio de mecanismos nutricionais, e se o teor de água no solo e a quantidade de Silício aplicada podem influenciar tais benefícios no cultivo de feijão. Com esse propósito, conduziu-se a presente pesquisa com o objetivo de avaliar os efeitos de diferentes doses de Si, aplicadas via fertirrigação, em distintos regimes hídricos. A investigação contemplou condições tanto com quanto sem adubação potássica, analisando o acúmulo de nutrientes e a eficiência nutricional do feijoeiro em condições de campo. Os experimentos foram delineados em dois cenários: um com fornecimento de potássio (K) e outro sem. Em ambos, os tratamentos foram organizados em um arranjo fatorial 3x4, considerando três níveis de disponibilidade hídrica (80%, 60%, e 40% da capacidade de retenção de água no solo) e quatro doses de Si via fertirrigação (0, 4, 8 e 12 kg ha⁻¹). A determinação da dose apropriada de Si revelou um aumento proporcional à severidade do déficit hídrico, sendo recomendadas doses específicas para condições hídricas adequadas (6 kg ha⁻¹), déficit hídrico moderado (7 kg ha⁻¹) e déficit hídrico severo (8 kg ha⁻¹), respectivamente. Estes resultados fornecem insights valiosos sobre a influência interativa entre o Si, o déficit hídrico e a adubação potássica no cultivo do feijão, contribuindo para o avanço do entendimento nessa área de pesquisa.

PALAVRAS-CHAVE: irrigação, *Phaseolus vulgaris*, fertirrigação.

MAPPING OF THE PEDOLOGICAL POTENTIAL OF THE PARAÍBA STATE FOR THE CULTIVATION OF SUGAR CANE (*Saccharum spp*)

ABSTRACT: It is crucial to elucidate whether Silicon mitigates the adverse effects of water deficit through nutritional mechanisms, and whether the water content in the soil and the amount of Silicon applied can influence such benefits in bean cultivation. To this end, this research was carried out to evaluate the effects of different doses of Si, applied via fertigation, in different water regimes. The investigation included conditions with and without potassium fertilization, analyzing the accumulation of nutrients and the nutritional efficiency of the bean plant under field conditions. The experiments were designed in two scenarios: one with potassium (K) supply and the other without. In both treatments, they were organized in a 3x4 factorial arrangement, considering three levels of water availability (80%, 60% and 40% of the soil's water retention capacity) and four doses of Si via fertigation (0, 4, 8 and 12 kg). ha⁻¹). Determination of the appropriate dose of Si revealed an increase proportional to the severity of the water deficit, with specific doses being recommended for adequate water conditions (6 kg ha⁻¹), moderate water deficit (7 kg ha⁻¹) and severe water deficit. deficit (8 kg ha⁻¹), respectively. These results provide valuable insights into the interactive influence between Si, water deficit and potassium fertilization on bean cultivation, contributing to the advancement of understanding in this area of research.

KEYWORDS: irrigation, *Phaseolus vulgaris*, fertirrigation.

INTRODUÇÃO

O déficit hídrico pode desencadear deficiência nutricional, agravando ainda mais o impacto negativo nas plantas. Nutrientes como potássio (K) desempenham funções cruciais associadas ao status hídrico, promovendo o aumento da área foliar, a eficiência do uso da água em plantas estressadas e a redução da 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 para as raízes (Ibrahim et al., 2020) e protege contra danos oxidativos, mantendo a homeostase das espécies reativas de oxigênio (ERO) e ativando enzimas do metabolismo antioxidante (Ul-Allah et al., 2020), resultando em benefícios para o acúmulo de massa seca das plantas.

Para otimizar a eficiência do uso da água, o silício (Si), é tido como agente atenuador do déficit hídrico (Vasanthi et al., 2014). Absorvido na forma de ácido monossilício, por transportadores específicos, chega às folhas e se concentra na forma de sílica amorfa ou biogênica.

O Si atua na redução de perda de água devido à formação de fitólitos nas paredes celulares e ao redor do feixe vascular (Mecfel et al., 2007). Além disso, estimula o crescimento radicular (Besharat et al., 2020) e absorção de água (Teixeira et al., 2020b), resultando em um ajuste positivo na condução de água e nutrientes.

A absorção de nutrientes como fósforo, potássio, ferro, zinco e cobre também são favorecidos pelo Si (Hajizadeh et al., 2023). Neste contexto, a inclusão do Si em práticas agrícolas, como a fertirrigação, pode representar uma estratégia promissora para aumentar a eficiência do uso da água em sistemas de cultivo irrigado.

Esta pesquisa visa avaliar o efeito de doses de Si via fertirrigação, na presença e ausência de fertilização potássica, em diferentes regimes hídricos. O objetivo é fundamentar estratégias para o uso eficiente da água em sistemas de cultivo irrigado de feijão e desvendar os mecanismos nutricionais envolvidos.

Para isso, propomos testar a hipótese de que o Si, quando aplicado em doses adequadas, mitiga os danos causados pelo déficit hídrico por meio de mecanismos nutricionais. Além disso, pretendemos investigar se a adubação potássica pode interferir na dose ótima de Si recomendada.

MATERIAL E MÉTODOS

O experimento foi conduzido em campo experimental na Universidade Estadual Paulista, situada em Jaboticabal, São Paulo. O solo na área experimental foi classificado como um Latossolo Vermelho eutroférico, correspondendo a um Oxisol. A caracterização química do solo resultou em valores de pH (CaCl₂) de 6.2 e 5.6; matéria orgânica de 20.5 e 19 g dm⁻³; fósforo (P) de 59 e 36 mg dm⁻³; enxofre (S) de 11 e 13 mg dm⁻³; cálcio (Ca) de 37 e 40 mg dm⁻³; magnésio (Mg) de 17 e 18 mmolc dm⁻³; potássio (K) de 6.2 e 6.4 mmolc dm⁻³; H + Al de 22.5 e 23 mmolc dm⁻³; SB de 60.6 e 64 mmolc dm⁻³; CTC de 82.9 e 87.2 mmolc dm⁻³; e SB de 73% em ambas as camadas. Os teores de micronutrientes no solo, na camada de 0-20 cm de profundidade, foram: boro (B) 0.41 mg dm⁻³; cobre (Cu) 6.4 mg dm⁻³; ferro (Fe) 11 mg dm⁻³; manganês (Mn) 23.6 mg dm⁻³; zinco (Zn) 3.9 mg dm⁻³.

Durante o período experimental a temperatura média foi de 20,50 °C, com máxima e mínima de 32,20 °C e 5,30 °C.

Foi utilizada a cultivar Carioca BSR FC 402 com espaçamento entre linhas de 0,45 metros e densidade populacional de 333 mil plantas por hectare, semeada em maio e colhida em agosto de 2022.

Os tratamentos foram arranjos em um fatorial 3 x 4, sendo três regimes hídricos: RH80% (sem déficit hídrico); RH60% (déficit hídrico moderado) e RH40% (déficit hídrico severo) da capacidade de retenção de água no solo (CRA). Os regimes foram combinados com doses de 0, 4, 8 e 12 kg ha⁻¹ de silício (Si) aplicado via fertirrigação. As combinações foram avaliadas na presença (K1) e ausência (K0) de adubação potássica. O experimento foi implementado num esquema de parcela subdividida (split-plot), em que os regimes hídricos foram designados como o fator primário e as doses de Si como o fator secundário.

Os tratamentos foram distribuídos em um delineamento de blocos casualizados, com quatro repetições. As parcelas experimentais tinham dimensões de 2,25 x 6 m, totalizando uma área de 13,5 m² e uma área útil de 5,4 m².

As doses de Si foram aplicadas aos 22, 32, 38, 41, 44 e 47 dias após a emergência (DAE) tendo como fonte o silicato de sódio estabilizado com sorbitol, reduzindo os riscos de polimerização da solução aplicada.

A adubação fosfatada foi de 40 kg ha⁻¹ de P₂O₅ na forma de superfosfato simples no sulco de semeadura e a nitrogenada, realizada via fertirrigação, aplicando-se ureia via fertirrigação da seguinte forma: 20, 30, 45 e 45 kg ha⁻¹ de N aos 7, 20, 31 e 43 DAE.

Para as plantas cultivadas com adubação de potássio (K1), foi aplicada uma dose de 50 kg ha⁻¹ de K₂O na forma de cloreto de potássio branco (KCl), distribuída à lanço e manualmente aos 14 DAE. Na condição K0 as plantas receberam somente todos os nutrientes, exceto o potássio.

A lâmina de irrigação foi definida em função dos tratamentos adotados (CRA) cuja umidade volumétrica foi obtida por meio de um medidor portátil - TDR na camada de 0 a 20 cm de profundidade. As leituras foram realizadas diariamente às 8:00h da manhã durante todo o ciclo cultivo.

Na área experimental, para cada linha de feijão foi instalada uma linha de gotejamento com espaçamento de 0,5 m entre emissores, vazão de 1,6 L h⁻¹ e pressão de funcionamento de 1,2 kgf cm⁻².

No manejo da irrigação a umidade do solo foi mantida na capacidade de campo da semeadura até última aplicação de silício (Si). No entanto, os três regimes hídricos receberam uma lâmina de água diária fixa de 7,11 mm. A partir do 47º dia após a emergência (DAE), foram iniciadas restrições hídricas para os RH60% e RH40% da CRA.

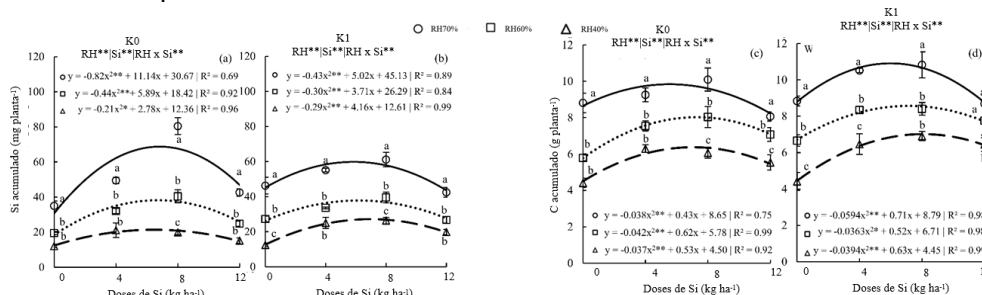
De amostras de plantas coletadas durante a fase de florescimento pleno, aos 58 DAE foram mensuradas a massa seca (MS) e o acúmulo de Si, C, N, P e K da parte aérea do feijoeiro.

Os dados foram submetidos a análise de variância pelo teste F (p≤0,05). A análise dos dados quantitativos, referentes às doses de Si, foi conduzida por meio de modelos matemáticos de regressão. Para os dados qualitativos, relacionados aos regimes hídricos, foi empregado o teste de comparação de médias de Tukey (p≤0,05).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

O acúmulo de silício (Si) na parte aérea das plantas foi influenciado pela interação entre os fatores de regime hídrico (RH) e doses de Si em plantas sem adubação de potássio (K0) (p<0,01) (Figura 1). No entanto, nas plantas com adubação potássica, o efeito foi observado apenas para os fatores isolados de regime hídrico e doses de Si (ambos a p<0,01) (Figura 1a). As doses de Si causaram um efeito com ajuste de regressão polinomial quadrático nos três regimes hídricos, independentemente da presença de adubação potássica.

Figura 1. Acúmulo de silício (Si) e de carbono (C) na parte aérea de plantas de feijão cultivada em diferentes regimes hídricos combinado com doses de Si fornecidas via fertirrigação, com (K1) e sem (K0) fornecimento de potássio.



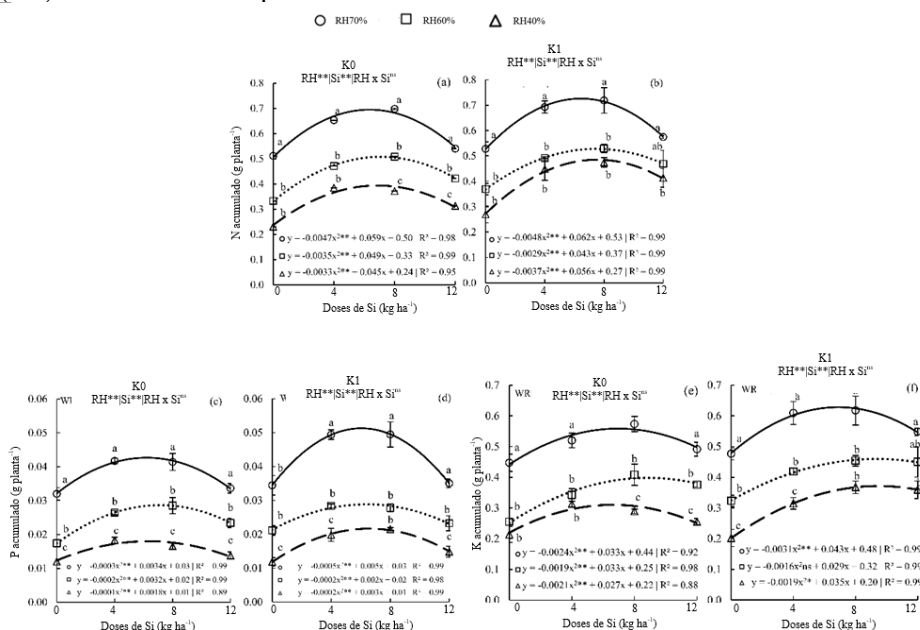
Letras mostram diferenças para os regimes hídricos (WR) em cada dose de Si (p<0,05, teste de Tukey). * e **: significativo a 1 e 5% de probabilidade, respectivamente, e^{ns}: não significativo pelo teste F.

Na situação K0, os máximos acúmulos de Si foram de 68,7; 38,2 e 21,4 mg por planta (Figura 1a) e em K1, 59,8; 37,8 e 21,1 mg por planta (Figura 1b), nos RH70%, RH60% e RH40%. Assim, independente da dose de Si e do fornecimento ou não de K o menor acúmulo de Si ocorreu nos regimes deficitários.

Os acúmulos de carbono (C) (Figura 1c e 1d), nitrogênio (N) e fósforo (P) (Figura 2) na parte aérea das plantas de feijão foram influenciados pelos efeitos isolados de RH e doses de silício (Si) ($p < 0,01$), independentemente do K. As doses de Si causaram um efeito com ajuste polinomial quadrático para todos os RH e K0 e K1. Os acúmulos máximos de C nas plantas que receberam adubação potássica (K1) foram de 10,9; 8,6 e 7,0 g por planta, para os RH70%, RH60% e RH40% (Figura 1d). Em K0, os acúmulos de C foram de 9,8; 8,0 e 6,4 g por planta para os RH70%, RH60% e RH40% (Figura 1c). Plantas cultivadas sem adubação potássica (K0) e RH70% apresentaram os maiores acúmulos de C em todas as doses de Si, em relação a RH60% e RH40%. Essa tendência também foi observada quando as plantas receberam adubação com potássio (K1), com exceção da maior dose de Si (12 kg ha^{-1}).

Os maiores acúmulos de N na parte aérea foram de 0,7; 0,5 e 0,4 g por planta, para RH70%, RH60% e RH40%, em K0 (Figura 2a). Já em K1, os acúmulos máximos de N foram de 0,7; 0,5 e 0,5 g por planta, para RH70%, RH60% e RH40% (Figura 2b). Plantas sob RH70%, em ambas as condições de K, apresentaram os maiores acúmulos de N em todas as doses de Si testadas, em comparação com os regimes deficitários, exceto na maior dose de Si em plantas com adubação potássica (K1).

Os teores de P máximos em plantas sem adubação potássica (K0) foram de 0,042; 0,028 e 0,020 g por planta, para RH70%, RH60% e RH40% (Figura 2c). Já nas plantas que receberam potássio os teores de P foram de 0,052; 0,028 e 0,023 g por planta, para RH70%, RH60% e RH40% (Figura 2d). Figura 2. Acúmulo de Nitrogênio (N), fósforo (P) e potássio (K) na parte aérea de plantas de feijão cultivada em diferentes regimes hídricos combinado com doses de Si fornecidas via fertirrigação, com (K1) e sem (K0) fornecimento de potássio.



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, RH e doses de Si ($p < 0,01$), exerceram influência no acúmulo de K na parte aérea das plantas, em K0 e K1. As doses de Si provocaram efeito com ajuste polinomial quadrático para todos os RH em K0 e K1 (Figura 2).

Em K0, os máximos acúmulos de potássio foram de 0,6; 0,4 e 0,3 g por planta nos regimes RH70%, RH60% e RH40% (Figura 2e). Os acúmulos máximos de potássio nas plantas que receberam adubação potássica (K1) foram de 0,6; 0,5 e 0,4 g por planta, para RH70%, RH60% e RH40% (Figura

2f). Plantas cultivadas sem adubação potássica (K₀) e RH70% tiveram os maiores acúmulos de K em todas as doses de Si, em relação às plantas sob RH60% e RH40%. Esse padrão também foi observado quando as plantas receberam adubação com K, exceto na maior dose de Si (12 kg ha⁻¹).

CONCLUSÃO

O Si associado ao regime hídrico sem restrição hídrica (RH70%) possibilitou o maior acúmulo de nutrientes e biomassa em plantas de feijão. Recomenda-se para condições hídricas adequadas, a aplicação de 6 kg ha⁻¹ de Si; em condições de déficit hídrico moderado, 7 kg ha⁻¹ de Si e, em condições de déficit hídrico severo, 8 kg ha⁻¹ de Si.

AGRADECIMENTOS

Ao CNPq pela concessão de bolsa da discente de graduação em Engenharia Agrônômica.

REFERÊNCIAS

- Besharat, S., Barão, L., and Cruz, C. (2020). New strategies to overcome water limitation in cultivated maize: Results from sub-surface irrigation and silicon fertilization. *J Environ Manage* 263. doi: 10.1016/j.jenvman.2020.110398.
- Hajizadeh, H. S., Azizi, S., Rasouli, F., and Kaya, O. (2023). Evaluation of nano-silicon efficiency on compatible solutes and nutrient status of Damask rose affected by in vitro simulated drought stress. *Chemical and Biological Technologies in Agriculture* 10. doi: 10.1186/s40538-023-00397-5.
- Ibrahim, M. F. M., El-Samad, G. A., Ashour, H., El-Sawy, A. M., Hikal, M., Elkelish, A., et al. (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. doi: 10.3390/agronomy10081212.
- Martineau, E., Domec, J. C., Bosc, A., Dannoura, M., Gibon, Y., Bénard, C., et al. (2017). The role of potassium on maize leaf carbon exportation under drought condition. *Acta Physiol Plant* 39. doi: 10.1007/s11738-017-2515-5.
- Mecfel, J., Hinke, S., Goedel, W. A., Marx, G., Fehlhäber, R., Bäucker, E., et al. (2007). Effect of silicon fertilizers on silicon accumulation in wheat. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science* 170, 769–772. doi: 10.1002/jpln.200625038.
- 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., et al. (2020b). Silicon in pre-sprouted sugarcane seedlings mitigates the effects of water deficit after transplanting. *J SoilSci Plant Nutr* 1, 1–11. doi: 10.1007/s42729-019-00170-4
- Ul-Allah, S., Ijaz, M., Nawaz, A., Sattar, A., Sher, A., Naeem, M., et al. (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., and Pvt, B. (2014). Silicon in crop production and crop protection - A Review. *Agricultural Research Communication Centre* 35, 14–23. doi: 10.5958/j.0976-0741.35.1.002.