

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). Ensaios 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.

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, 2^a. 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>