

EFEITO DO SILÍCIO EM PARÂMETROS FISIOLÓGICOS E ANATÔMICOS DE *Ilex paraguariensis* EXPOSTA AO ALUMÍNIO

SABRINE ONGARATTO^{1,2*}, KAUÊ DE ALMEIDA STEFANSKI³, EMILY BALBINÓ
BALESTRIN⁴, SUELEN DARIVA⁵, DOUGLAS CARVALHO⁶, LETÍCIA DE
OLIVEIRA⁷, CARLA MARIA GARLET DE PELEGRIN⁸, LAÍSA PRESTES⁹, DENISE
CARGNELUTTI^{2,10}

1 Introdução

A *Ilex paraguariensis* A. St. Hil. (erva-mate), nativa do Sul do Brasil, Paraguai, Argentina e Uruguai, possui grande importância econômica pelo uso em infusões tradicionais como chimarrão, tereré e chá-mate. A espécie apresenta tolerância ao alumínio (Al), com estímulo ao crescimento radicular e foliar, especialmente na presença de boro (Benedetti, 2012). Entretanto, cerca de 60% das amostras analisadas acumulam níveis de Al potencialmente nocivos à saúde humana (Tatsch *et al.*, 2010). Embora abundante na crosta terrestre, o Al em sua forma solúvel é tóxico em solos ácidos, limitando o crescimento vegetal, e não há evidências de desempenhar funções bioquímicas essenciais em organismos vivos.

O silício (Si), segundo elemento mais abundante da crosta terrestre, é absorvido pelas plantas como ácido monossilícico e acumulado como sílica amorfa (Balakhnina; Borkowska, 2013). Embora não essencial para todas as espécies, é particularmente importante em gramíneas e ciperáceas, estando associado à tolerância a estresses abióticos e bióticos, incluindo seca, salinidade, toxicidade por metais (como Al), patógenos e deficiências nutricionais. Nesse contexto, tem sido investigado como agente atenuador da toxicidade do alumínio em plantas (Liang *et al.*, 2007).

2 Objetivos

- Caracterizar as respostas fisiológicas de crescimento e parâmetros fotossintéticos de plantas de *I. paraguariensis* expostas a dose tóxica de Al na presença e ausência de Si. - Caracterizar as respostas anatômicas de plantas de *I. paraguariensis* expostas a dose tóxica de Al na presença e ausência de Si.

3 Metodologia

¹ Discente, Universidade Federal da Fronteira Sul, *campus Erechim*, contato: sabrine.ongaratto@uffs.edu.br

² Grupo de Pesquisa: Agricultura Familiar e Transição Agroecológica

^{3, 4, 5, 6, 7, 9} Discente, Universidade Federal da Fronteira Sul, *campus Erechim*

⁸ Doutora em Botânica, Universidade Federal da Fronteira Sul, *campus Cerro Largo*,

¹⁰ Doutora em Bioquímica Toxicológica, Universidade Federal da Fronteira Sul, *campus Erechim*.

Os ensaios foram conduzidos nos laboratórios de Entomologia e Bioquímica e nas casas de vegetação da Universidade Federal da Fronteira Sul (UFFS), campus Erechim. As análises anatômicas foram realizadas no laboratório de Citologia e Histologia Vegetal e Animal da UFFS Campus Cerro Largo, RS. As mudas de *Ilex paraguariensis* com três meses de idade foram adquiridas no comércio local de Erechim (RS) e transplantadas para vasos contendo 6 L de substrato (solo, composto orgânico e areia, na proporção de 1:1:1) e mantidas em casa de vegetação. Após aclimação de sete dias, foram aplicados os tratamentos.

O delineamento utilizado foi o inteiramente casualizado, com três repetições e cinco plantas por unidade experimental. Os tratamentos consistiram das seguintes combinações de alumínio (na forma de $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$) e silício (na forma de Na_2SiO_3): 0; 305 Si; 610 Si; 25 Al; 25 Al e 305 Si; 25 Al e 610 Si mg kg^{-1} de substrato. As plantas permaneceram sob tratamento durante 30 dias, sendo irrigadas diariamente, e após este período as análises foram realizadas. As variáveis fisiológicas analisadas incluíram, taxa fotossintética (A), concentração interna de CO_2 (C_i), quantidade de CO_2 consumido (QT), taxa de transpiração (E), condutância estomática (G_s), eficiência de carboxilação (EC) e uso eficiente da água (UEA), quantificadas por analisador de gases infravermelho (IRGA).

Para as análises da anatomia foliar, foram coletados fragmentos da porção mediana de folhas de três plantas por repetição, fixados em glutaraldeído 1% e formaldeído 4% (McDowell; Trump, 1976) em tampão fosfato de sódio, 0,1M e pH 7,2 e desidratados em série etílica e embebidos em hidroxietilmetacrilato. Posteriormente, as amostras foram seccionadas (5 μm) em micrótomo rotativo (Lupetec[®] MRP20016) com navalha descartável de aço. Como corante de rotina foi utilizado Azul de Toluidina. As análises e registro das imagens foram realizadas em microscópio de campo claro (Olympus[®] BX53), com câmera digital acoplada.

Os dados foram submetidos à análise de variância (ANOVA) e as médias comparadas pelo teste de Tukey, a 5% de significância.

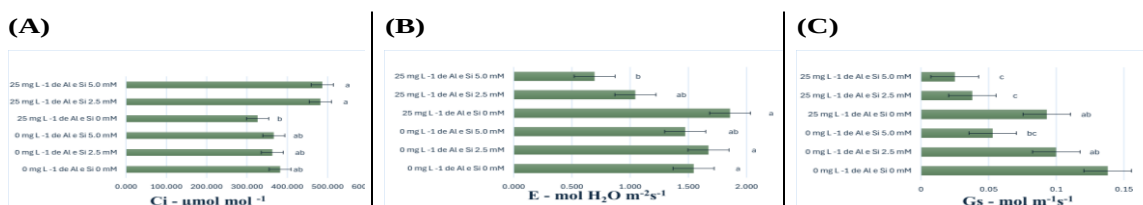
4 Resultados e Discussão

Em folhas de *Ilex paraguariensis* expostas a 25 mg kg^{-1} de Al e 610 mg kg^{-1} Si os níveis E foram reduzidos em 55%, quando comparado com o tratamento controle (Figura 1A). Silva (2024), obtiveram resultados semelhantes àqueles observados no presente estudo, no qual os níveis de E foram reduzidos nas plantas de *Ilex paraguariensis* expostas as maiores

doses de alumínio, enquanto na presença de Si esses valores aumentaram. No presente estudo, a presença do Si diminuiu as taxas de transpiração promovendo uma maior tolerância ao Al.

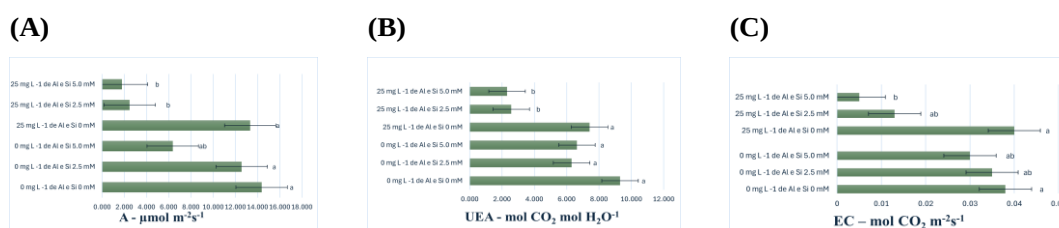
A condutância estomática (G_s) foi reduzida em 3,6 e 5,5 vezes em plantas tratadas com 25 mg Al kg^{-1} combinados com 305 ou 610 mg Si kg^{-1} , respectivamente, em relação ao controle (Fig. 1B), efeito semelhante ao descrito por Gavassi *et al.* (2020). Essa redução pode estar associada ao acúmulo de ABA nas folhas como resposta química ao estresse.

Figura 1. Concentração interna de CO_2 (C_i), taxa de transpiração (E) e condutância estomática (G_s) de folhas de *Ilex paraguariensis* expostas ao alumínio e a duas concentrações de silício (0; 305 Si; 610 Si; 25 Al; 25 Al e 305 Si; 25 Al e 610 Si, mg Kg^{-1} de substrato) durante trinta dias. Médias seguidas pela mesma letra não diferem entre si pelo teste Tukey a 95% de confiança ($p \leq 0.05$).



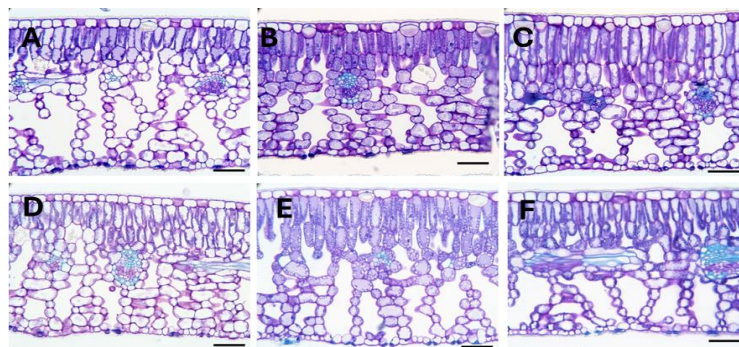
Os tratamentos com 25 mg Al kg^{-1} e 305 ou 6210 mg Si kg^{-1} reduziram a A e WUE , respectivamente, por aproximadamente 80% e 70%. Além disso, a A/C_i foi 7,6 vezes menor em folhas de *I. paraguariensis* exposta a 25 mg Al kg^{-1} e 610 mg Si kg^{-1} (Figura 1). Estudos com outras plantas mostraram que o Si alivia os efeitos tóxicos do Al (Silva, 2023). No entanto, os resultados obtidos no presente estudo revelaram que o Si associado ao Al causa toxicidade nas folhas de *I. paraguariensis*, tendo em vista a redução nos valores dos parâmetros A , WUE e A/C_i .

Figura 2. Taxa de assimilação líquida de CO_2 (A), eficiência no uso da água (EUA) e eficiência de carboxilação da rubisco (EC) de folhas de *Ilex paraguariensis* expostas ao alumínio e a duas concentrações de silício (0; 305 Si; 610 Si; 25 Al; 25 Al e 305 Si; 25 Al e 610 Si, mg kg^{-1} de substrato) durante trinta dias. Médias seguidas pela mesma letra não diferem entre si pelo teste Tukey a 95% de confiança ($p \leq 0.05$).



Os resultados do presente estudo não mostraram alterações nos parâmetros da anatomia foliar em corte transversal analisados (Figura 3).

Figura 3. Corte transversal de folhas de *Ilex paraguariensis* expostas ao alumínio e a duas concentrações de silício. (A) 0; (B) 305 Si; (C) 610 Si; (D) 25 Al; (E) 25 Al e 305 Si; (F) 25 Al e 610 Si, mg kg⁻¹ de substrato.



As folhas de *I. paraguariensis* em todos os tratamentos exibiram padrão anatômico geral, semelhante ao já relatado na literatura para espécies crescendo em ambiente natural (Antunes *et al.*, 2023). As folhas são hipoestomática, com as faces epidérmicas uniestratificadas, mesofilo dorsiventral com duas camadas de parênquima paliçádico, o parênquima esponjoso formado por células de formato irregular e com amplos espaços intercelulares. Também foram observados cristais semelhantes a drusas em células do mesofilo e células cristalíferas na face adaxial da epiderme. São necessárias mais análises para elucidar a constituição química desses cristais.

5 Conclusão

A *Ilex paraguariensis* tolera o alumínio, e o silício isoladamente não alterou os parâmetros analisados. Entretanto, a exposição conjunta provocou efeitos tóxicos, reduzindo significativamente as trocas gasosas, indicando a necessidade de mais estudos sobre os mecanismos envolvidos.

Referências Bibliográficas

ANTUNES, K. A., et al. Comparative anatomy of *Ilex paraguariensis* “erva-mate” and its adulterant *Citronella gongonha* “falso-mate”. *Brazilian Archives of Biology and Technology*, Curitiba, v. 66, esp., e23230040, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1590/1678-4324-ssbfar-2023230040>.

BALAKHNINA, T.; BORKOWSKA, A. Effects of silicon on plant resistance to environmental stresses: review. *International Agrophysics*, Lublin, v. 27, n. 2, p. 225-232, 2013. DOI: <https://doi.org/10.2478/v10247-012-0089-4>.

BENEDETTI, Eliziane Luiza. Tolerance of yerba-mate (*Ilex paraguariensis* St. Hil.) to aluminum. 2012. Thesis (PhD in Soils and Plant Nutrition) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2012.

GAVASSI, Marina Alves, *et al.* Aluminum-induced stomatal closure is related to low root hydraulic conductance and high abscisic acid accumulation in tomato plants. *Environmental and Experimental Botany*, [s. l.], v. 179, p. 104233, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2020.104233>.

LIANG, Y. C., *et al.* Mechanisms of silicon-mediated alleviation of abiotic stresses in higher plants: A review. *Environmental Pollution*, v. 147, n. 2, p. 422-428, 2007. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2006.06.008>.

MCDOWELL, E. M.; TRUMP, B. R. Histological fixatives for diagnostic light and electron microscopy. *Archives of Pathology & Laboratory Medicine*, v. 100, p. 405-414, 1976.

SILVA, Gilmar da Silveira *et al.* Silicon attenuates aluminum toxicity in sugarcane plants by modifying growth, roots morphoanatomy, photosynthetic pigments, and gas exchange parameters. *Scientific Reports*, [S.l.], v. 14, n. 4717, 2024. DOI: 10.1038/s41598-024-53537-8.

SILVA, G. da S. J.; HURTADO, A. C.; ALVES, R. C.; GASPARINO, E. C.; SANTOS, D. M. M. dos. Silício como atenuador dos efeitos tóxicos do alumínio em plantas de *Schinus terebinthifolius*. *Brazilian Journal of Biology*, [S.l.], v. 83, e271301, 2023. DOI: 10.1590/1519-6984.271301.

TATSCH, F. R. P.; GONÇALVES, V. C.; MEURER, E. J. Total and soluble aluminum in samples of yerba-mate commercialized in Rio Grande do Sul. *Scientia Agraria*, Curitiba, v. 11, n. 1, p. 83-86, Jan./Feb. 2010.

Palavras-chave: fisiologia vegetal, trocas gasosas, toxicidade.

Nº de Registro no sistema Prisma: PES-2024-0427

Financiamento