

28. Ciencia, Tecnología, e Innovación

Atenuação da toxidez de alumínio em raízes de plantas jovens de cana-de-açúcar pela suplementação silício em hidroponia

Sousa Junior, Gilmar S. gilmar.ssjr@hotmail.com; Gasparino, Eduardo
C.eduardo.gasparino@unesp.br; Santos, Durvalina Maria Mathias.
durvalina.maria@unesp.br

Universidade Estadual Paulista (Unesp), Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias,
Jaboticabal

Resumo

Partindo-se do pressuposto que a suplementação de silício atenua os efeitos dos estresses abióticos nas plantas, no presente trabalho foi verificado se o silício aplicado exógenamente atenua a toxidez do alumínio (Al) nas raízes de plantas jovens de cana-de-açúcar, mediante os parâmetros de massa seca e morfoanatomia. O experimento foi conduzido em hidroponia e o delineamento experimental foi em esquema fatorial 2x4x2, com duas cultivares (CTC9002 e CTC9003), quatro concentrações de sulfato de alumínio (0,0; 10,0; 15,0 e 20,0 mg L⁻¹) e duas concentrações de silicato de potássio (0,0; 2,0 mmol L⁻¹), com três repetições por tratamento. As avaliações consistiram em mensurar o crescimento, mediante o acúmulo de massa seca e verificar a morfoanatomia procedendo-se aos cortes anatômicos das porções apicais das raízes, nos quais foram realizadas medidas da espessura geral e da espessura dos vasos condutores. Os resultados evidenciaram que, o Si exógeno atenuou a toxidez do alumínio nas raízes de ambas as cultivares evidenciando maior acúmulo da massa seca e menor degradação da espessura geral e vasculares, em comparação com os tratamentos isentos de Si, embora a atenuação do silício ao alumínio tóxico tenha sido maior nas raízes da cv. CTC9003 que nas raízes da cv. CTC9002.

Palavras chave: *Saccharum officinarum*, sulfato de alumínio, silicato de potássio, crescimento, morfoanatomia

Introdução

Devido à importância econômica e social da cultura de cana-de-açúcar, pela

produção do etanol e açúcar, a partir do ano 2000, o cultivo tem se expandido para o bioma Cerrado, região Centro-Oeste do Brasil, com solo ácido em que o alumínio

(Al) trocável tende a ser o cátion dominante (Ribeiro et al., 2015).

A toxidez do alumínio (Al) em solos ácidos (pH<5,5) é um dos mais sérios fatores limitantes para a produtividade vegetal. Dependendo da espécie, ocorre cerca de 25% a 80% de perdas no campo (Sade et al., 2016). Os solos com toxidez de Al, constituem cerca de 50% das terras cultiváveis do mundo (Jiang et al., 2018) e 32% no Brasil (Navascués et al., 2012). O Al é encontrado sob diferentes formas, como aluminos silicatos insolúveis ou óxidos, que favorecem a liberação na solução dos solos ácidos do Al tóxico, (Al³⁺) que permanece, predominantemente, retido pelas cargas negativas das partículas do solo (Ma et al., 2014). Nas plantas, o Al tóxico provoca sintomas imediatos e acentuados, particularmente, na redução do crescimento da raiz, pela inibição do alongamento celular, engrossamento e a diminuição da permeabilidade das células radiculares (Matsumoto & Motoda, 2013; Kopittke et al., 2015; Rao et al., 2016; Singh et al., 2017). O sistema radicular em cana-de-açúcar é essencial para a regeneração das soqueiras após a colheita (Alvarez et al., 2000). Todos os fatores que favorecem a expansão do sistema radicular são importantes para aumentar a produtividade da cana-de-açúcar, uma vez que o crescimento semipereene permite e exige que a planta

explore maior volume de solo em maiores profundidades (Castro, 2016).

O silício (Si), após o oxigênio, é o segundo elemento mais abundante na crosta terrestre, a qual é composta de silicatos. Este elemento não é considerado essencial para o crescimento e desenvolvimento das plantas, mas participa de múltiplas funções nos vegetais (Broadley et al., 2012).

Na literatura está, cada vez mais, aumentando a evidencia dos efeitos benéficos do Si para as plantas, especialmente, quando se encontram sob vários estresses bióticos e abióticos (Cooke & Leishman, 2016; Etesami & Jeong, 2018). Porém, são poucos os estudos de atenuação do silício nas plantas sob toxidez do Al, em comparação com os estudos com outros tipos de estresses que acometem as plantas (Nhan et al., 2013). Contudo, algumas pesquisas comprovam que, a suplementação de Si atenua a toxidez do Al em trigo (Zsoldos et al., 2003), milho (Giannakoula et al., 2010; Giongo & Bohnen, 2011) e arroz (Singh et al., 2011; Nhan et al. 2013). Para cana-de-açúcar não foram encontrados quaisquer estudos do uso Si para atenuar os efeitos da toxidez do Al.

Objetivos

Partindo-se do pressuposto que a suplementação de silício atenua os efeitos

dos estresses abióticos nas plantas, no presente trabalho foi verificado se o silício aplicado exogenamente atenua a toxidez do alumínio (Al) nas raízes de plantas jovens de cana-de-açúcar, mediante os parâmetros de massa seca e morfoanatomia.

Material e Métodos

O delineamento experimental foi em esquema fatorial 2x4x2, com duas cultivares (CTC9002 e CTC9003), quatro concentrações de sulfato de alumínio, Al [Al₂(SO₄)₃.18H₂O], (0,0; 10,0; 15,0 e 20,0 mg L⁻¹) e duas concentrações de silicato de potássio (K₂SiO₃Si), ausência (0,0 mg L⁻¹) e presença (2,0 mmol L⁻¹). Nas avaliações morfoanatômicas foram realizadas três repetições em triplicata. Os mini-toletes, provenientes da AZOCANA, Guariba, SP, foram plantados em recipientes plásticos com capacidade de 2L preenchidos com areia lavada e esterilizada, para a formação das mudas e estas foram mantidas sem restrição hídrica durante 30 dias. Findo este período, realizou-se a aclimação das mudas à solução nutritiva de Clark, (1977) por 10 dias. A seguir, as mudas foram fixadas em placas de isopor para imersão do sistema radicular na solução e o sistema foi mantido sob arejamento constante por borbulhamento. As mudas foram expostas por 15 dias às concentrações de 0,0; 10,0; 15,0 e 20,0

mg L⁻¹ sulfato de alumínio. Aos 15 dias, os tratamentos de silício foram realizados, acrescentando aos tratamentos de Al duas concentrações de silicato de potássio, ausência (0,0 mg L⁻¹) e presença (2,0 mmol L⁻¹). As plantas permaneceram por mais 20 dias sob estresse por Al e Si.

Ao final do experimento (75dias), foi verificado o crescimento das raízes mediante a avaliação da massa seca da raiz. Para verificar as alterações morfoanatômicas provocadas pelo Al no sistema radicular, porções de aproximadamente 5 mm do ápice da raiz principal foram coletadas e armazenadas em frascos de vidro contendo solução de FAA Para o preparo das lâminas foi utilizado o protocolo de Johansen, (1940). As pequenas porções apicais da raiz principal foram incluídas em blocos de parafina, seccionadas transversalmente em micrótomo rotativo LEICA RM 2065, e aderidas às lâminas histológicas com adesivo de Meyer. As secções foram contrastadas com safranina, e para a montagem final da lâmina foi utilizado balsamo do Canadá como adesivo para a lamínula (Môro, 2000). A avaliação ocorreu através da mediação da espessura geral da raiz e da espessura dos vasos condutores e o material foi observado em fotomicroscópios JENAVAL Carl Zeiss e Bel Photonics.

Os dados foram submetidos à análise de variância pelo teste F e as

diferenças significativas entre os tratamentos foram comparadas pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

Resultados e Discussão

A presença de Si aumentou o crescimento das raízes de ambas as cultivares de cana-de-açúcar, mediante o incremento da biomassa seca, em cada concentração de Al (Figura 1A). Em plantas não estressadas (0,0 mmol L⁻¹ Al), a adição de Si, também aumentou o

crescimento das raízes revelando o efeito benéfico em planta acumuladora do Si, como é o caso de cana-de-açúcar (Figura 1A). Ashraf et al. (2010) verificaram que, o deste trabalho revelam, ainda que, a presença de Si não foi eficaz para combater o efeito negativo do Al no crescimento das raízes, pois a redução da massa seca foi maior conforme houve acréscimo das concentrações de alumínio (Figura 1A).

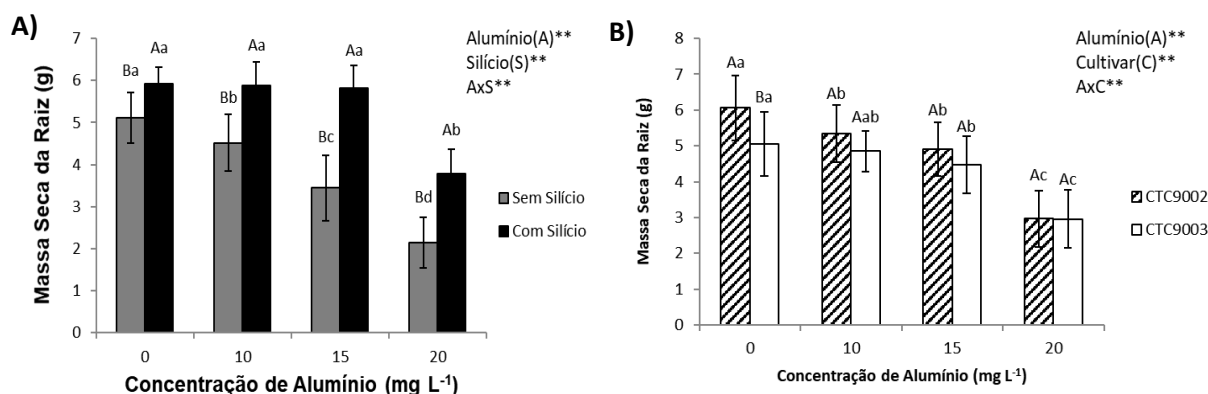


Figura 1. Crescimento (Massa seca (M.S)) de plantas jovens de cana-de-açúcar sob concentrações de Al³⁺, na ausência e presença de Si. A) concentrações de Al³⁺ na ausência e presença de Si; B) concentrações de Al³⁺ em cada cultivar. Letras maiúsculas iguais (em cada concentração de Al) e letras minúsculas iguais (entre as concentrações de Al) não diferem estatisticamente entre si pelo teste de Tukey p<0,05. As barras indicam o desvio padrão da média de três repetições

O crescimento das raízes, em cada concentração de Al, foi significativamente maior na cv. CTC9003 que na cv. CTC9002 (Figura 1B). Porém, pelo fato desta cultivar possuir menor crescimento de raízes que a cv. CTC9003 no tratamento 0,0 mmol L⁻¹ Al, não se pode

aferir que a toxidez de Al causou redução do crescimento (Figura 1B). Todavia, considerando a severidade do estresse por Al, ambas as cultivares mostraram redução acentuada do crescimento (Figura 1B). No tratamento controle de Al o crescimento das raízes da cv. CTC9002

foi 14% menor que o crescimento da cv. CTC9003, evidenciando que a cv. CTC9002 de cana-de-açúcar é menos produtiva que a cv. CTC9003.

A suplementação de Si reduziu tanto a espessura geral de raízes quanto

e espessura dos vasos condutores, evidenciado pelo menor diâmetro nas plantas (Figura 2A e 2B). A suplementação de Si reduziu tanto a espessura geral de raízes quanto e espessura dos vasos condutores,

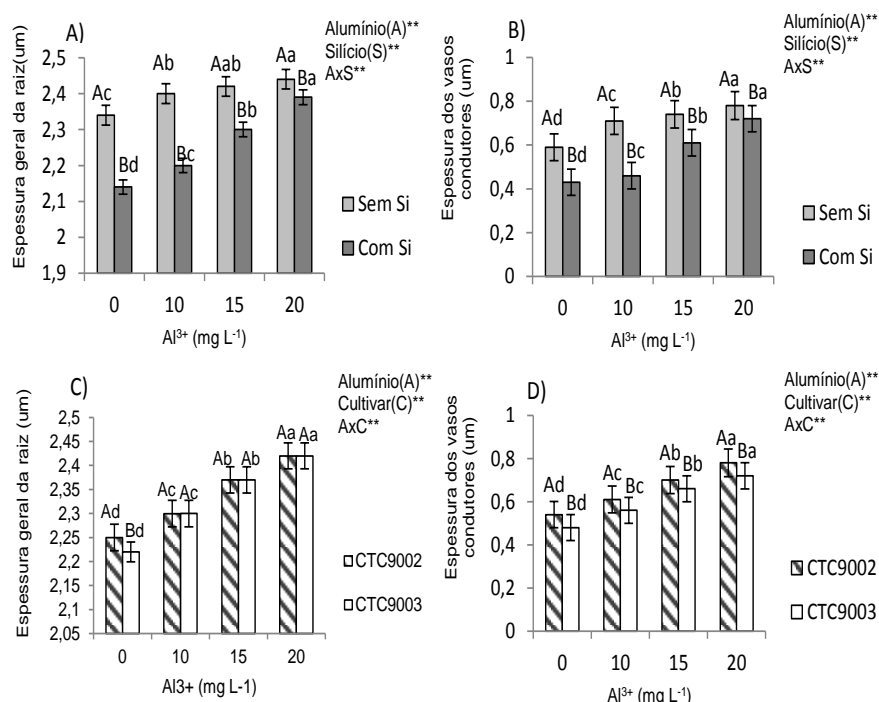


Figura 2. Morfoanatomia das raízes de plantas jovens de cana-de-açúcar sob toxidez do Al e Si exógeno. A) Si exógeno na espessura geral da raiz de plantas tratadas com Al; B) Al na espessura geral da raiz de ambas as cultivares; C) Si exógeno na espessura dos vasos condutores de plantas tratadas com Al; D) Al na espessura dos vasos condutores de ambas as cultivares. Letras maiúsculas iguais (em cada concentração de Al) e letras minúsculas iguais (entre as concentrações de Al), não diferem estatisticamente entre si pelo teste de Tukey ($p < 0,05$). As barras indicam o desvio padrão da média de três repetições.

evidenciado pelo menor diâmetro nas plantas (Figura 2A e 2B). Isto ocorreu em plantas estressadas ou não pelo Al. Verificou-se que, na presença de Si houve maior redução da espessura geral das

raízes pelo Al, com 8% em 10 mg L⁻¹ de Al, 5% em 15 mg L⁻¹ de Al e 3%, em 20 mg L⁻¹ de Al (Figura 2A). Porém, em 0,0 mg L⁻¹ de Al, o Si também causou redução de 45% na espessura geral das raízes

(Figura 2A). Os resultados encontrados de Al), com a menor espessura geral das raízes da cv. CTC9003 em comparação

de Al), com a menor espessura geral das raízes da cv. CTC9003 em comparação

foram similares aos da espessura das raízes, pois a presença de Si nas mesmas concentrações de Al causou significativa redução, respectivamente, 35%, 17% e 7% (Figura 2B). Também, em 0,0 mg L⁻¹ de Al, o Si causou redução de 45% na espessura geral das raízes (Figura 2A) e 36% na espessura dos vasos condutores (Figura 2B). Esta redução causada pelo Si evidencia que houve maior integridade da epiderme e da espessura dos vasos condutores. A presença do Si em arroz sob toxidez de Al ou não, causou maior integridade da morfologia das raízes, reduzindo as anormalidades anatômicas, mediante a estabilização dos teores de alguns elementos minerais (Singh et al., 2011; Singh et al., 2017). A toxidez de Al em milho (Giongo; Bohnen, 2011) e em ervilha (Matsumoto; Motoda, 2013), evidenciou que, as células epidérmicas, endodérmicas e corticais rapidamente se autolizam, tornando-as inchadas e desorganizadas, a um ponto em que os danos morfológicos nas raízes impediam a distinção entre coifa e os elementos vasculares.

Os resultados dos efeitos do Al na espessura geral das raízes mostraram que, não houve diferença entre cv. CTC9003 e cv. CTC9003 (Figura 2C e 2D). Inclusive, a diferença estatística ocorre no tratamento controle (0,0 mg L⁻¹

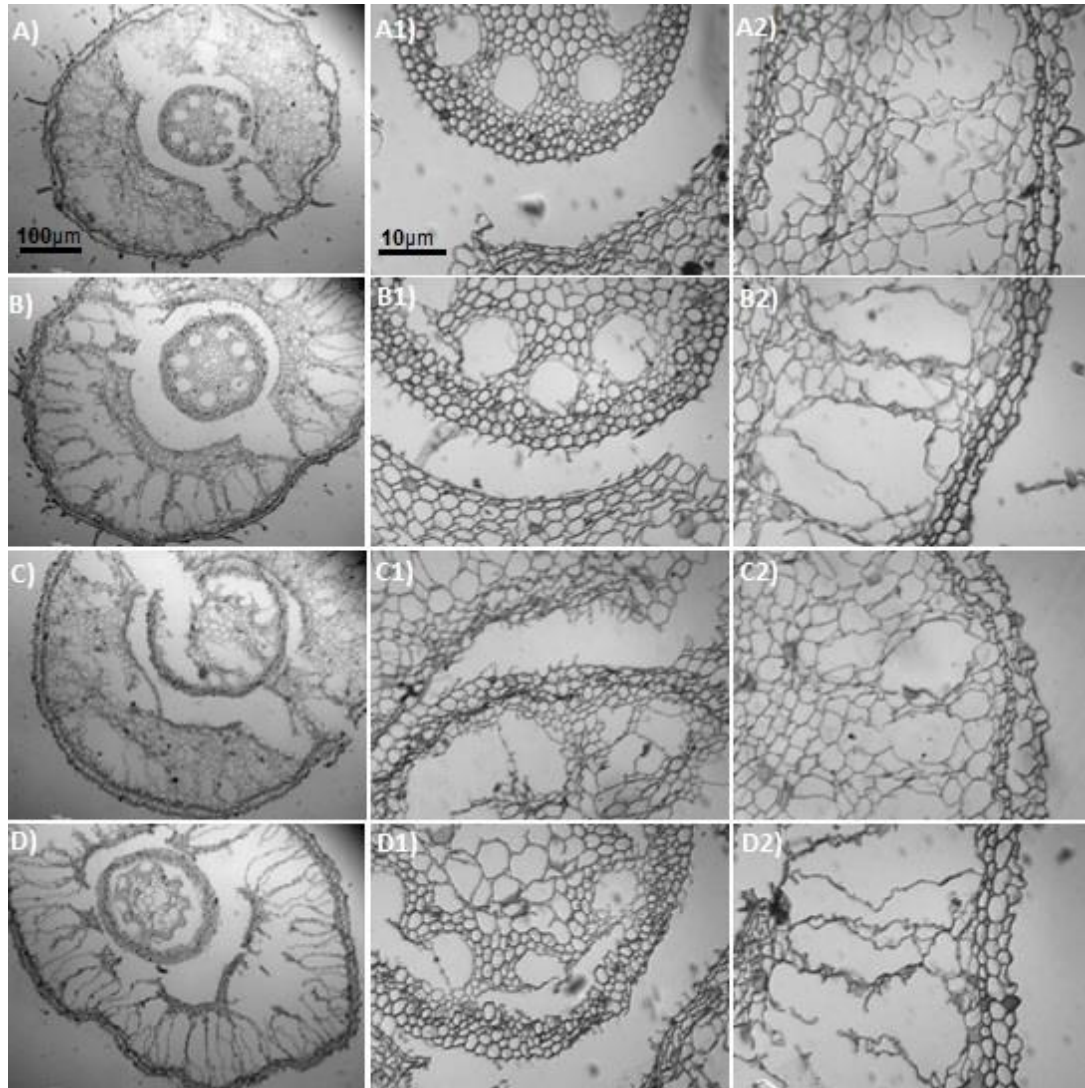
com a cv. CTC9002 (Figura 2C). Porém, para a espessura dos vasos condutores, em cada concentração de Al houve maior redução desta espessura na cv. CTC9003 que na cv. CTC9003 (Figura 2D). Contudo, na ausência do estressor a cv. CTC9003 também apresentou menor espessura dos vasos que a CTC9002 (Figura 2D). Considerando a severidade do estresse por Al, ambas as cultivares mostraram aumento acentuado da espessura geral das raízes e da espessura dos vasos condutores (Figuras 2C e 2D). Interessante, notar que ambas as cultivares, tanto na ausência quanto na presença de Si, o aumento das concentrações de Al mostra que os resultados da massa seca e da morfoanatomia foram inversos, isto é, a severidade do estresse reduziu drasticamente o crescimento (Figura 2A e 2B), mas aumentou acentuadamente as espessuras das raízes (Figura 2C e 2B). O aumento da concentração de Al promoveu também uma maior fragilidade da parede celular, causando rompimento na região dos vasos condutores e espessura geral da raiz (Figura 3, 4, 5 e 6). A exposição ao Al diminui a quantidade alterando a estrutura e a integridade das células mesofílicas e do floema

(Singht et al., 2011). As respostas de
Universidad Nacional de Cuyo | Mendoza | Argentina
ambas as cultivares, frente à toxicidez do Al

17, 18 y 19 de octubre de 2018

e a suplementação de Si, evidenciaram
que, a cv. CTC9003 foi menos suscetível
ao estresse e mais responsiva ao Si. De

seleção de plantas que sejam mais
produtivas e tolerantes a toxicidade do Al
é um componente muito importante para
as estratégias de produção em solos
ácidos.



acordo com Tabaldi et al. (2009), a

Figura 3. Secções transversais de raízes de plantas jovens de cama-de-açúcar. cv. CTC9002 submetidas a diferentes concentrações de Al, sob microscópio óptico. A) Controle; A1) Vasos condutores; A2) Espessura da raiz; B) 10mg L⁻¹ de Al; B1)

Vasos conductores; B2) Espessura da raiz; C) 15mg L⁻¹ de Al; C1) Vasos conductores; 17, 18 y 19 de octubre de 2018
 Universidad Nacional de Cuyo | Mendoza | Argentina
 C2) Espessura da raiz; D) 20mg L⁻¹ de Al; D1) Vasos conductores; D2) Espessura da raiz. ((---) 10µm/100µm)

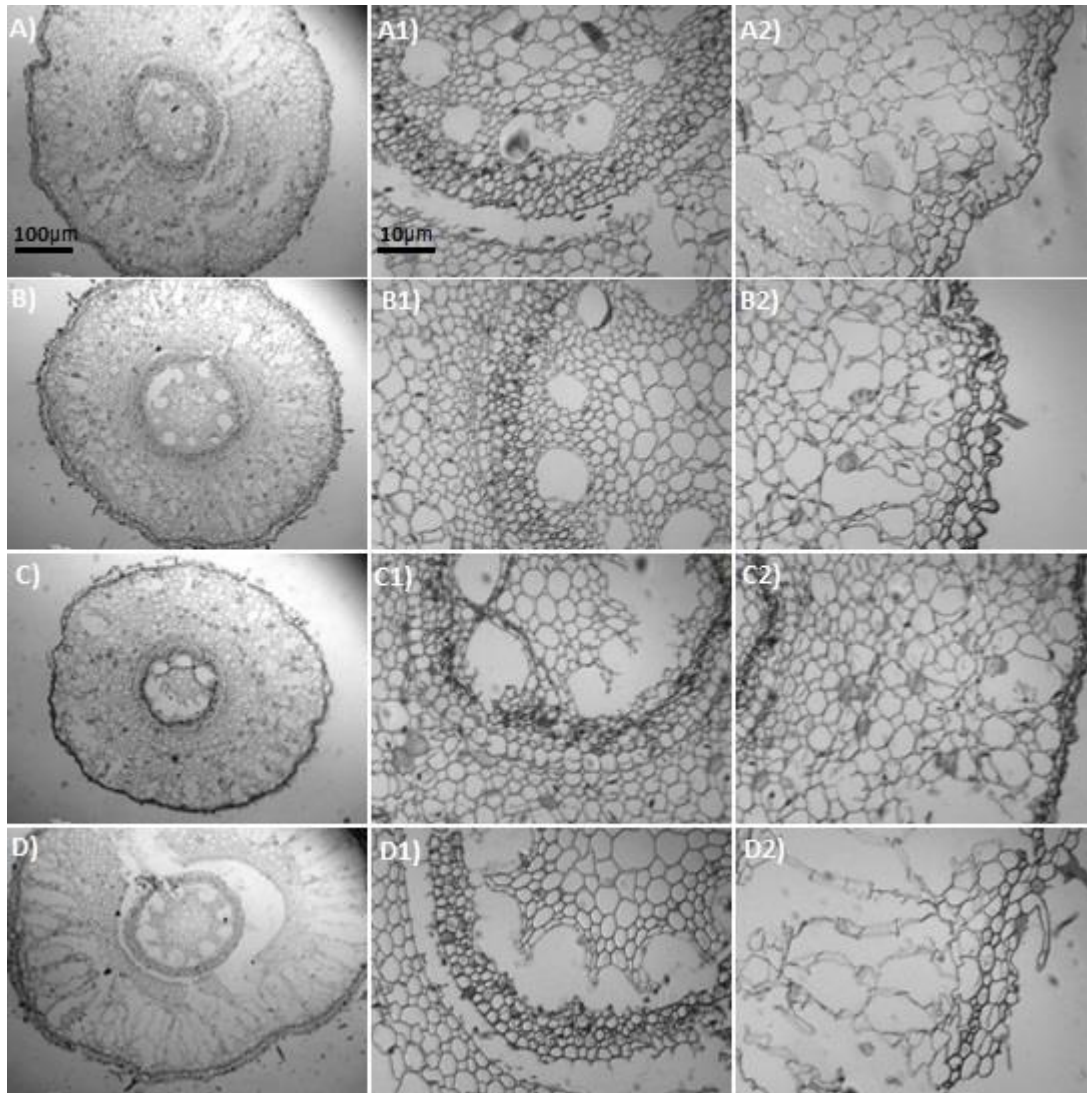


Figura 4. Secções transversais de raízes de plantas jovens de cama-de-açúcar. cv. CTC9002 submetidas a diferentes concentrações de Al com Si, sob microscópio óptico. A) Controle; A1) Vasos conductores; A2) Espessura da raiz; B) 10mg L⁻¹ de Al com 2mmol de Si; B1) Vasos conductores; B2) Espessura da raiz; C) 15mg L⁻¹ de Al com 2mmol de Si; C1) Vasos conductores; C2) Espessura da raiz; D) 20mg L⁻¹ de Al com 2mmol de Si; D1) Vasos conductores; D2) Espessura da raiz. ((---) 10µm/100µm).

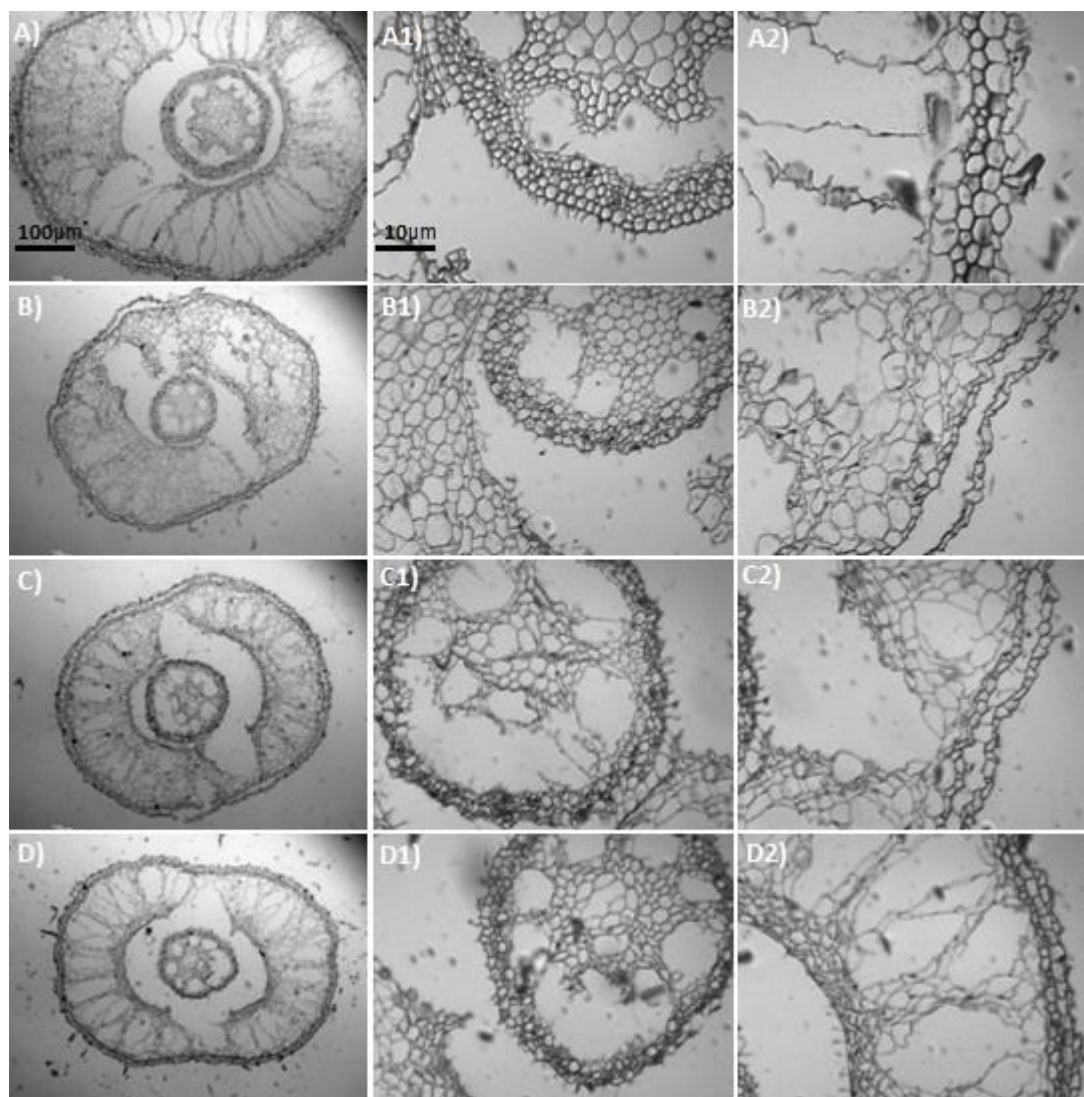


Figura 5. Seções transversais de raízes de plantas jovens de cama-de-açúcar. cv. CTC9003 submetidas a diferentes concentrações de Al, sob microscópio óptico. A) Controle; A1) Vasos condutores; A2) Espessura da raiz; B) 10mg L⁻¹ de Al; B1) Vasos condutores; B2) Espessura da raiz; C) 15mg L⁻¹ de Al; C1) Vasos condutores; C2) Espessura da raiz; D) 20mg L⁻¹ de Al; D1) Vasos condutores; D2) Espessura da raiz. (---) 10µm/100µm).

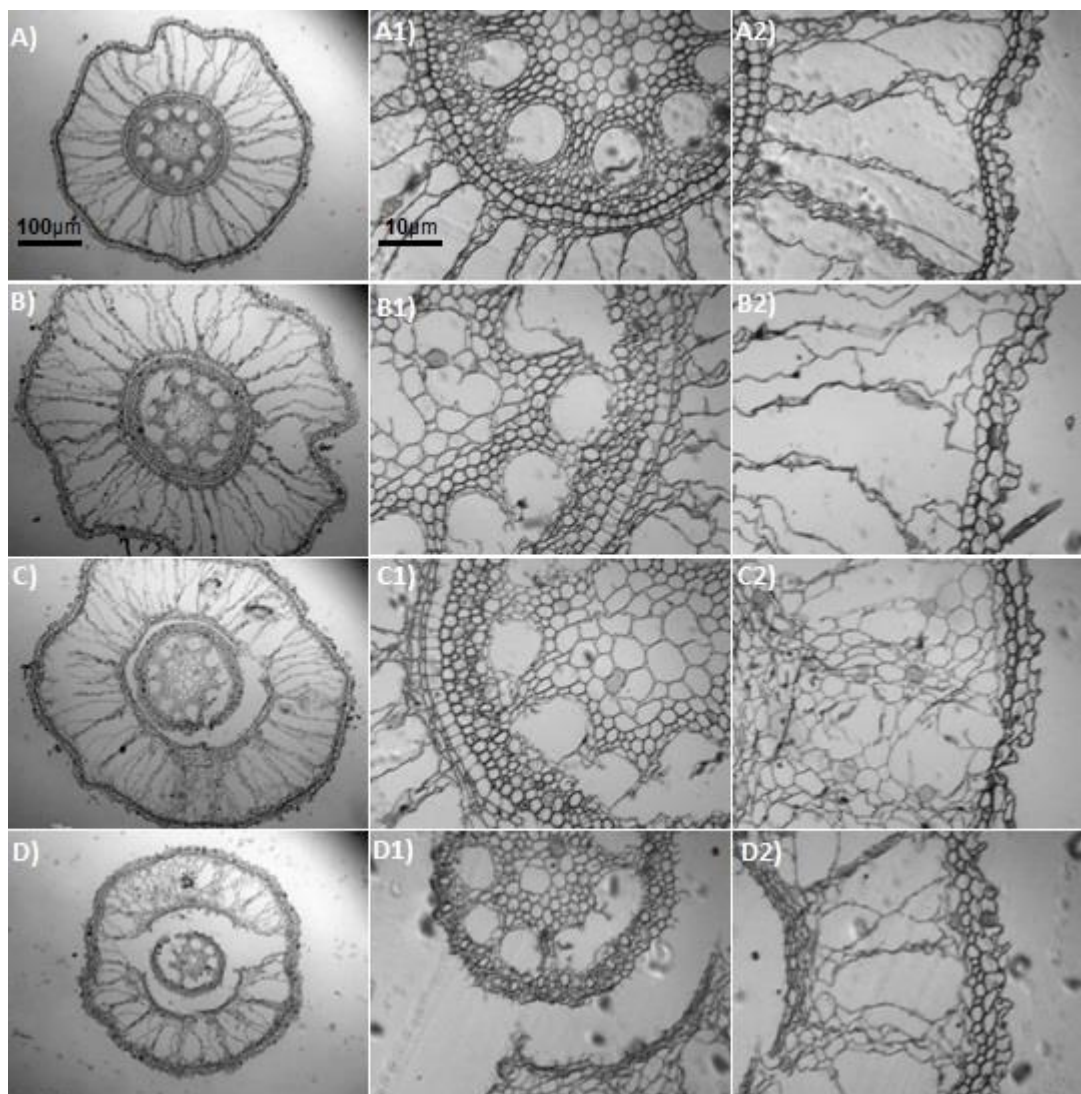


Figura 6. Seções transversais de raízes de plantas jovens de cama-de-açúcar. cv. CTC9002 submetidas a diferentes concentrações de Al com Si, sob microscópio óptico. A) Controle; A1) Vasos condutores; A2) Espessura da raiz; B) 10mg L⁻¹ de Al com 2mmol de Si; B1) Vasos condutores; B2) Espessura da raiz; C) 15mg L⁻¹ de Al com 2mmol de Si; C1) Vasos condutores; C2) Espessura da raiz; D) 20mg L⁻¹ de Al com 2mmol de Si; D1) Vasos condutores; D2) Espessura da raiz. (---) 10µm/100µm).

Ma, J. F., Chen, Z. C., & Shen, R. F. (2014) Molecular mechanisms of Al tolerance in

Conclusão

O Si atenuou os efeitos da toxidez do Al aumentando o crescimento e reduzindo os efeitos deletérios na morfoanatomia das raízes, em ambas as cultivares de cana-de-açúcar.

Bibliografía

Broadley, M., Brown, P., Cakmak, I., Ma, J. F., Rengel, Z., & Zhao, F. Beneficial elements. In: Marschner's Mineral Nutrition of Higher Plants (Third Edition). Cap. 8. 2012. p. 249-269.

Clark, R. B. (1977) Effect of aluminum on growth and mineral elements of Al-tolerant and Al-intolerant corn. *PlantandSoil*, 47, 653-662.

Etesami, H. & Jeong, B. R. (2018). Silicon (Si): Review and future prospects on the action mechanisms in alleviating biotic and abiotic stresses in plants. *Ecotoxicology and environmental safety*, 147, 881-896

Giannakoula, A., Moustakas, M., Syros, T., & Yupsanis, T. (2010) Aluminum stress induces up-regulation of an efficient antioxidant system in the Al-tolerant maize line but not in the Al-sensitive line. *Environmental and Experimental Botany*, 39, 487-494.

Giongo, V., & Bohnen, H. (2011) Relação entre alumínio e silício em genótipos de milho resistente e sensível a toxidez de alumínio. *Bioscience Journal*, 27(3), 348-356.

Johansen D.A., (1940) *Plant Microtechnique*. McGraw-Hill, New York.

Kopittke, P. M., Moore, K. L., Lombi, E., Gianoncelli, A., Ferguson, B. J., Blamey, F. P. C., ... & Gresshoff, P. M. (2015). Identification

gramineous plants. *Plant and Soil*, 381 (1-2), 1-12.

Matsumoto, H., & Motoda, H. (2012) Aluminum toxicity recovery processes in root apices. Possible association with oxidative stress. *Plant science*, 185, 1-8.

Matsumoto, H., & Motoda, H. (2013) Oxidative stress is associated with aluminum toxicity recovery in apex of pea root. *Plantandsoil*, 363(1-2), 399-410.

Môro, F. V. (2000) Tolerância de genótipos de milho (Zeamaiz L.) ao herbicida nicosulfuron. 2000. 88 f. Tese (Doutorado em Agronomia) - Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Universidade Estadual Paulista, "Júlio de Mesquita Filho", Jaboticabal.

Navascués, J., Pérez-Rontomé, C., Sánchez, D. H., Staudinger, C., Wienkoop, S., Rellán-Álvarez, R.; & Becana, M. (2012). Oxidative stress is a consequence, not a cause, of aluminum toxicity in the forage legume *Lotus corniculatus*. *New Phytologist*, 193, 625-636.

Nhan, P. Phuoc, & Hai, N. T. (2013) Amelioration of aluminum toxicity on OM4900 rice seedlings by sodium silicate. *African Journal of Plant Science*, 7(6), 208-212.

Rao, I. M., Miles, J. W., Beebe, S. E., & Horst, W. J. (2016). Root adaptations to soils with low fertility and aluminium toxicity. *Annals of botany*, 118(4), 593-605.

Ribeiro, N. V., Ferreira, L. G., & Ferreira, N. C. (2015). Padrões e impactos ambientais da expansão atual do cultivo da cana-de-açúcar: uma proposta para o seu ordenamento no bioma Cerrado. *AteliêGeográfico*, 9, 99-113.

Singh, S., Tripathi, D. K., Singh, S., Sharma, S., Dubey, N. K., Chauhan, D. K., & Vaculík, M. (2017). Toxicity of aluminium on various

levels of plant cells and organism: a review.
Universidade Experimental do Rio de Janeiro, 37, Argentina
Environmental and Experimental Botany, 73,
177-193.

17, 18 y 19 de octubre de 2018

Singh, V. P., Tripathi, D. K., Kumar, D., & Chauhan, D. K. (2011). Influence of exogenous silicon addition on aluminium tolerance in rice seedlings. *Biological trace element research*, 144(1-3), 1260-1274.

Tabaldi, L. A., Cargnelutti, D., Gonçalves, J. F., Pereira, L. B., Castro, G. Y., Maldaner, J., & Nicoloso, F. T. (2009) Oxidative stress is an early symptom triggered by aluminum in Al-sensitive potato plantlets. *Chemosphere*, 76, 1402-1409.

Zsoldos, F., Vashegyi, A., Pecsvaradi, A., & Bona, L. (2003). Influence of silicon on aluminium toxicity in common and durum wheats. *Agronomie*, 23(4), 349-354.

Financiamiento

Coordenação de Aperfeiçoamento de
Pessoal de Nível Superior (CAPES)