

Respostas biométricas de plantas de sorgo e feijão-mungo expostas aos estresses isolados e combinados de salinidade e alumínio

Biometric responses of sorghum and mung bean plants exposed to isolated and combined salinity and aluminum stresses

Respuestas biométricas de plantas de sorgo y frijol mungo expuestas a estrés aislado y combinado de salinidad y aluminio

Recebido: 03/04/2023 | Revisado: 19/04/2023 | Aceitado: 20/04/2023 | Publicado: 25/04/2023

Maria Eduarda Cabral da Silva

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4643-7713>
Universidade Federal do Piauí, Brasil
E-mail: m.eduardacabralsilva@gmail.com

Ana Raquel Pereira de Melo

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7510-1186>
Universidade Federal do Piauí, Brasil
E-mail: anaraquel013@outlook.com

Cleriston Correia da Silva Souza

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2646-276X>
Faculdade Ages, Brasil
E-mail: cleriston.css@outlook.com

José Alves Pereira Neto

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5185-4637>
Universidade Federal do Piauí, Brasil
E-mail: Josealvespn06@gmail.com

Vicente Paulo da Costa Neto

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4553-6573>
Universidade Federal do Piauí, Brasil
E-mail: costanetovp@gmail.com

Victor Breno Campelo Lima

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7251-9229>
Universidade Federal do Piauí, Brasil
E-mail: victorbreno1000@gmail.com

Aurenivia Bonifacio

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1911-7941>
Universidade Federal do Piauí, Brasil
E-mail: bonifacio.a@live.com

Resumo

Os estresses abióticos induzem alterações de crescimento e perda de produtividade nas espécies vegetais. O presente estudo objetivou avaliar as respostas de plantas de feijão-mungo e sorgo submetidas ao estresse salino (0, 50 e 150 mM de NaCl) e por alumínio (0 e 1,0 μ M de Al) de forma isolada ou em combinação com base na mensuração da taxa de crescimento absoluto, altura das plantas, massa fresca da parte aérea e das raízes e o comprimento das raízes. Observou-se que as plantas de sorgo apresentaram valores superiores de taxa de crescimento absoluto e da altura das plantas em relação ao feijão-mungo, sendo os demais parâmetros similares entre as duas culturas. A salinidade e estresse por alumínio induziram efeitos negativos quando aplicados de forma isolada ou combinada em todas as variáveis analisadas para as duas culturas testadas. A combinação de 150 mM de NaCl e 1,0 μ M de Al não afetou a altura das plantas, massa fresca e comprimento das raízes de plantas de sorgo em relação ao observado nas plantas estressadas apenas com 150 mM de NaCl. O comprimento das raízes de plantas de feijão-mungo estressadas com 1,0 μ M de Al foi estatisticamente similar ao observado nas plantas expostas simultaneamente a 50 mM de NaCl e 1,0 μ M de Al. As plantas de sorgo apresentaram melhores respostas aos estresses salino e por alumínio em relação às plantas de feijão-mungo, possivelmente devido ao metabolismo C4 presente nestas plantas que permite maior captação de CO₂ e acúmulo de biomassa.

Palavras-chave: Estresse; Plantas; Salinidade; Alumínio.

Abstract

Abiotic stresses induce changes in growth and loss of productivity in plant species. The present study aimed to evaluate the responses of mung bean and sorghum plants subjected to salt stress (0, 50 and 150 mM of NaCl) and aluminum (0

and 1.0 μM of Al) alone or in combination with base in the measurement of absolute growth rate, plant height, fresh mass of shoots and roots and root length. It was observed that the sorghum plants showed higher values of absolute growth rate and plant height in relation to mung bean, with the other parameters being similar between the two cultures. Salinity and aluminum stress induced negative effects when applied alone or combined in all variables analyzed for the two cultures tested. The combination of 150 mM NaCl and 1.0 μM Al did not affect the plant height, fresh mass and length of roots of sorghum plants compared to that observed in plants stressed with only 150 mM NaCl. Root length of mung bean plants stressed with 1.0 μM Al was statistically similar to that observed in plants simultaneously exposed to 50 mM NaCl and 1.0 μM Al. Sorghum plants showed better responses to saline and aluminum stress than mung bean plants, possibly due to the C4 metabolism present in these plants, which allows greater CO_2 uptake and biomass accumulation.

Keywords: Stress; Plants; Salinity; Aluminum.

Resumen

Los estreses abióticos inducen cambios en el crecimiento y pérdida de productividad en las especies vegetales. El presente estudio tuvo como objetivo evaluar las respuestas de plantas de frijol mungo y sorgo sometidas a estrés salino (0, 50 y 150 mM de NaCl) y aluminio (0 y 1,0 μM de Al) solos o en combinación con base en la medición del crecimiento absoluto, tasa, altura de la planta, masa fresca de brotes y raíces y longitud de raíces. Se observó que las plantas de sorgo presentaron mayores valores de tasa absoluta de crecimiento y altura de planta en relación al frijol mungo, siendo los demás parámetros similares entre los dos cultivos. La salinidad y el estrés por aluminio indujeron efectos negativos cuando se aplicaron solos o combinados en todas las variables analizadas para los dos cultivos probados. La combinación de 150 mM de NaCl y 1,0 μM de Al no afectó la altura, masa fresca y longitud de raíces de plantas de sorgo en comparación con lo observado en plantas estresadas con solo 150 mM de NaCl. La longitud de la raíz de las plantas de frijol mungo estresadas con 1,0 μM de Al fue estadísticamente similar a la observada en plantas expuestas simultáneamente a 50 mM de NaCl y 1,0 μM de Al. Las plantas de sorgo mostraron mejores respuestas al estrés por salinidad y aluminio que las plantas de frijol mungo, posiblemente debido al metabolismo C4 presente en estas plantas, lo que permite una mayor absorción de CO_2 y acumulación de biomasa.

Palabras clave: Estrés; Plantas; Salinidad; Aluminio.

1. Introdução

O feijão-mungo é uma leguminosa com fotossíntese do tipo C3, cultivada nas regiões tropicais e subtropicais, comumente utilizada como fonte de alimentos e também de uso industrial. Atualmente, a Índia se destaca como o maior produtor de feijão-mungo do mundo uma vez que apresenta produção anual de 2,0 milhões de toneladas de grãos (Coutinho et al., 2022). No Brasil, o feijão-mungo, também conhecido como “mungo-verde”, tem seu consumo em grãos pouco difundido, sendo mais consumido na forma de brotos que apresentam várias propriedades farmacológicas interessantes (Ali, 2017). O sorgo é uma monocotiledônea com metabolismo fotossintético do tipo C4 largamente utilizada na alimentação animal devido a sua adaptabilidade às regiões de seca, onde a produtividade de grãos, tais como o milho e/ou forragem, não é muito alta (Guimarães et al., 2022). Quando cultivado em condições de sequeiro, as plantas de sorgo exibem alterações significativas no seu desenvolvimento, crescimento e produtividade. No Brasil, a produção de sorgo foi de 3.014,3 mil toneladas na safra 2022/2023 com produtividade de 2.785 kg ha⁻¹ de acordo com dados publicados pela CONAB (2023).

As espécies vegetais habitam diferentes ambientes que apresentam uma grande diversidade de estresses abióticos, tais como seca, altas temperaturas, alta irradiância e salinidade, e estes podem se apresentar de forma isolada e, mais comumente de forma simultânea (Bonifacio et al., 2016; Noctor et al., 2016; Foyer, 2018). A salinidade do solo é um problema global que afeta mais de 20% das terras aráveis, sendo caracterizado pelo excesso de sais na solução do solo (principalmente, os íons sódio (Na^+) (Isayenkov & Maathuis, 2019). O estresse salino induz danos osmóticos e citotóxicos às plantas e pode promover alterações osmóticas que resultam em diminuição do teor relativo de água, da pressão de turgor e do potencial hídrico celular bem como na toxicidade iônica (Munns et al., 2020). Adicionalmente, a salinidade compromete a abertura e o fechamento estomático, provoca redução no crescimento foliar e diminuição na produção de biomassa (Hernández, 2019). Em solos com alta concentração de sais, é frequentemente observada alterações em diversos processos metabólicos das plantas que culminam na redução na produtividade destas culturas (Bonifacio et al., 2016; Negrão et al., 2017).

O estresse por alumínio (Al) é um fator limitador da produtividade das culturas nos solos ácidos (pH abaixo de 5,0),

frequentemente encontrados no bioma Cerrado, sendo o alumínio trivalente (Al^{3+}) a forma iônica mais tóxica para as plantas (Rao et al., 2016; Sarker et al., 2019). O excesso de alumínio, além de causar danos diretos nos componentes celulares, compete com outros cátions essenciais, reduzindo sua absorção e interferindo na nutrição das plantas (Nunes-Nesi et al., 2014). O estresse por Al provoca redução do crescimento radicular e, conseqüentemente, limita a produção e o rendimento de grãos de diversas culturas (Emamverdian et al., 2015; Singh et al., 2017). Chen et al. (2010) relatam efeito negativo do Al nos teores de clorofilas e ressaltam que os níveis destes pigmentos podem ser utilizados como indicadores do estresse por excesso de alumínio nas espécies vegetais. Além de afetar o crescimento radicular, a concentração de alumínio em níveis tóxicos induz mudanças nas células radiculares, provocando a presença de células enrugadas e/ou colapsadas, desintegração da epiderme e de porções externas do córtex do ápice radicular, redução no tamanho da coifa, desarranjo do tecido meristemático e elevada lignificação do protoxilema e endoderme em regiões próximas ao ápice radicular (Rao et al., 2016).

A produção de alimentos pelo setor agrícola mundial é afetada severamente por vários estresses abióticos, com destaque para o estresse salino e estresse por alumínio. Estes estresses ambientais, que podem ocorrer simultaneamente em algumas regiões do globo, são responsáveis por consideráveis perdas econômicas tanto para os pequenos e grandes agricultores. Além disso, os danos resultantes da exposição aos estresses ambientais podem ser potencialmente agravados pelos efeitos das recentes mudanças climáticas globais, sendo, portanto, a sua mitigação um grande desafio para a comunidade científica. O acúmulo de biomassa vegetal e captação e absorção de nutrientes pelas plantas ocorre mediante a sua interação com fatores do ambiente e, portanto, a planta é um integrador dos estímulos ambientais (Ecco, 2014). O melhor entendimento das interações planta x ambiente pode ser obtido através da análise quantitativa do crescimento utilizando medidas biométricas que podem explicar as diferenças varietais quanto à produção econômica. Diante do exposto, o presente estudo objetivou avaliar as respostas de crescimento (biométricas) de plantas de feijão-mungo e sorgo submetidas aos estresses salino e por alumínio aplicados de forma isolada ou em combinação (estresses múltiplos).

2. Metodologia

2.1 Material vegetal e condições iniciais de crescimento das plantas

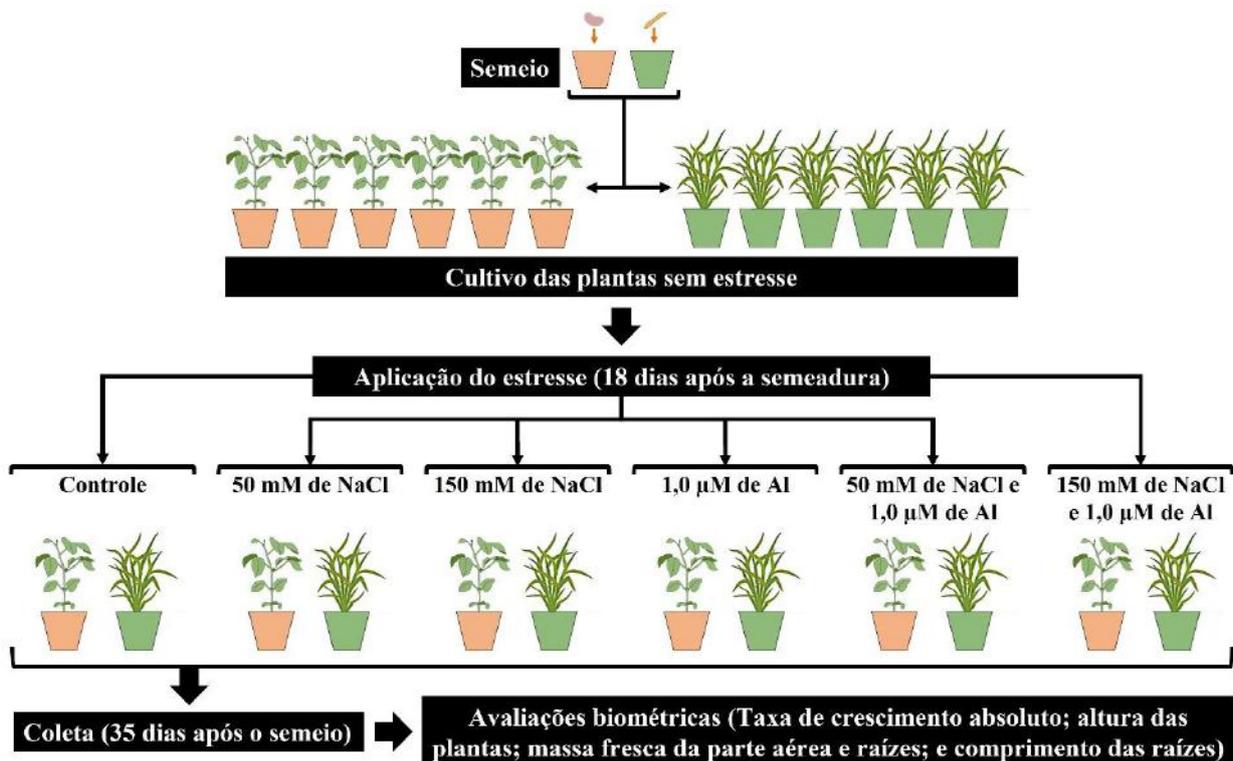
Plantas de feijão-mungo (*Vigna radiata* (L.) Wilczek) e sorgo (*Sorghum bicolor* (L.) Moench) foram avaliadas separadamente em experimentos simultâneos conduzidos na casa de vegetação do Departamento de Biologia do Centro de Ciências da Natureza (UFPI; Teresina/PI, Brasil). As plantas de feijão-mungo e sorgo foram escolhidas por apresentarem metabolismo fotossintético do tipo C3 e C4, respectivamente. Sementes de feijão-mungo e de sorgo, disponibilizadas pela Embrapa Meio-Norte (Teresina/PI), foram desinfestadas com hipoclorito de sódio 1,5% (m/v) sob agitação, lavadas três vezes e embebidas em água deionizada (isenta de íons). Após desinfestadas, as sementes foram semeadas, separadamente, em vasos plásticos contendo 3,5 kg de areia lavada (pH 6,5) e mantidas em condições de casa de vegetação (temperatura média $29 \pm 2,0$ °C; umidade relativa de 65%; irradiância de $1600 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$; fotoperíodo de 12 h). Para cada espécie vegetal, utilizou-se duas plantas por vaso (constituindo uma parcela experimental). Após a semeadura, as plantas foram mantidas em casa de vegetação e irrigadas com água destilada e solução nutritiva de Hoagland e Arnon (1950) em dias alternados (Bonifácio et al. 2016). Para evitar choque osmótico, nos primeiros sete dias após a semeadura, as plantas foram suplementadas com solução nutritiva diluída (50%) e, do oitavo dia após a semeadura até o final do experimento, utilizou-se a solução nutritiva sem diluição conforme descrito por Bonifácio et al. (2016).

2.2 Aplicação dos estresses e obtenção dos resultados

Aos 18 dias após a semeadura (DAS), as plantas foram expostas ao estresse salino com 0 (controle), 50 e 150 mM de cloreto de sódio (NaCl) de forma isolada ou combinada com o estresse por alumínio (0,0 (controle) e 1,0 μM de cloreto de

alumínio (AlCl_3) (Figura 1). No momento de aplicação dos estresses, as plantas de feijão-mungo e sorgo foram submetidas aos seguintes tratamentos: plantas não estressadas (controle); plantas estressadas com 50 mM de NaCl; plantas estressadas com 150 mM de NaCl; plantas estressadas com 1,0 μM de Al; plantas estressadas com 50 mM de NaCl e 1,0 μM de Al; e plantas estressadas com 150 mM de NaCl e 1,0 μM de Al. Os experimentos com as plantas de feijão-mungo e sorgo foram conduzidos simultaneamente até os 35 DAS. Do momento da implantação dos estresses (18 DAS) até a coleta (35 DAS), a solução nutritiva foi aplicada mantendo-se os tratamentos. Na ocasião da coleta, as plantas foram levadas ao Laboratório de Fisiologia e Bioquímica Vegetal (CCN/UFPI) e então avaliadas quanto à altura e comprimento de raízes utilizando fita métrica (Bonifácio et al. 2016) e a massa fresca da parte aérea e raízes com uso de balança analítica de precisão (Mendes et al., 2020). A taxa de crescimento absoluto (TCA) foi calculada conforme a seguinte equação: $TCA = (A2 - A1) \div (T2 - T1)$, sendo A1 e A2 correspondentes a altura inicial e final, respectivamente, e T1 e T2 os tempos iniciais e finais (em dias) das duas amostragens (Moraes et al., 2016).

Figura 1 – Esquema das etapas gerais do experimento realizado com as plantas de feijão-mungo e sorgo mostrando os diferentes tratamentos aplicados: controle (plantas não estressadas); plantas estressadas com 50 mM de NaCl; plantas estressadas com 150 mM de NaCl; plantas estressadas com 1,0 μM de Al; plantas estressadas com 50 mM de NaCl e 1,0 μM de Al; e plantas estressadas com 150 mM de NaCl e 1,0 μM de Al. NaCl = cloreto de sódio. Al = cloreto de alumínio (AlCl_3).



Fonte: Autores (2023).

2.3 Análises estatísticas

O experimento foi estatisticamente analisado utilizando delineamento inteiramente casualizado com seis tratamentos e cinco repetições. Os dados obtidos foram submetidos à análise de variância (ANOVA), precedido pelo teste F a 5% de probabilidade, e as médias comparadas pelo teste de Scott-Knott a 5% de probabilidade utilizando o software estatístico RStudio (pacote ExpDes.pt). A análise de correlação foi realizada para obtenção do coeficiente de correlação de Pearson (r) entre as variáveis analisadas para cada espécie vegetal utilizando o software Past 4.03.

3. Resultados e Discussão

3.1 Análise geral dos resultados

A Tabela 1 sumariza a análise de variância (ANOVA) dos dados obtidos após a exposição das plantas de feijão-mungo e sorgo ao estresse salino (0, 50 e 150 mM de NaCl) e por alumínio (0 e 1,0 μ M de Al) de forma isolada ou em combinação. De acordo com a ANOVA (Tabela 1), houve efeito significativo da salinidade e do estresse por alumínio e da combinação destes estresses em todos os parâmetros avaliados. Observou-se que os dados obtidos apresentaram distribuição normal, variâncias homogêneas e baixo coeficiente de variação (Tabela 1).

Tabela 1 - Análise de variância (ANOVA) das variáveis analisadas após a exposição de plantas de feijão-mungo e sorgo aos estresses isolados e combinados de salinidade e alumínio.

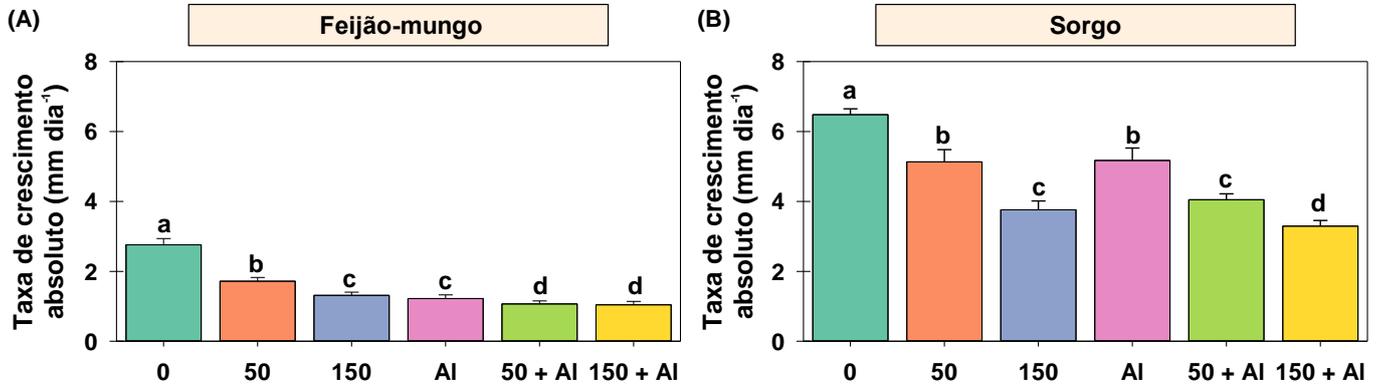
Variáveis analisadas	Feijão-mungo				Sorgo			
	QM	SW	BL	CV (%)	QM	SW	BL	CV (%)
Taxa de crescimento absoluto	2,14 **	0,37	0,71	7,5	3,15 **	0,58	0,75	8,9
Altura das plantas	19,9 **	0,36	0,82	2,7	39,9 **	0,65	0,69	7,3
Massa fresca de parte aérea	2,85 **	0,06	0,06	5,5	2,95 **	0,85	0,07	5,6
Massa fresca das raízes	17,3 *	0,27	0,12	6,8	18,9 **	0,45	0,15	9,4
Comprimento das raízes	175,6 *	0,84	0,81	5,3	181,9 *	0,49	0,94	3,1
<i>Graus de liberdade</i>	5	-	-	-	-	-	-	-

** = significativo a 1% de probabilidade pelo teste F; * = significativo a 5% de probabilidade pelo teste F, ns = não significativo. QM = Quadrado médio. SW = Teste de Shapiro-Wilk. BL = Teste de Bartlett. CV = Coeficiente de variância. Fonte: Autores (2023).

3.2 Respostas de crescimento das plantas de feijão-mungo e sorgo

A taxa de crescimento absoluto variou significativamente em resposta a exposição das plantas aos estresses salino e de alumínio (Tabela 1; Figura 2). Conforme mostrado na Figura 2, as plantas de sorgo apresentaram maiores valores da taxa de crescimento absoluto que as plantas de feijão-mungo. Estas respostas eram esperadas tendo em vista que as plantas de feijão-mungo são plantas com metabolismo fotossintético do tipo C3, enquanto que as plantas de sorgo são espécies vegetais com fotossíntese do tipo C4 (Guimarães et al., 2022). A taxa de crescimento absoluto é um indicador da velocidade média de crescimento de uma determinada planta ao longo de um período de avaliação e, portanto, pode-se afirmar que as plantas de sorgo apresentaram maiores incrementos na sua parte aérea que as plantas de feijão-mungo. Conforme mostrado na Figura 2B, as plantas de sorgo apresentaram redução na taxa de crescimento absoluto em resposta à salinidade, entretanto esta resposta foi mais negativa quando o alumínio esteve presente. Em contrapartida, as plantas de feijão-mungo expostas à 50 e 150 mM de NaCl na presença de 1,0 μ M de Al apresentaram valores estatisticamente iguais de taxa de crescimento absoluto (Figura 2A).

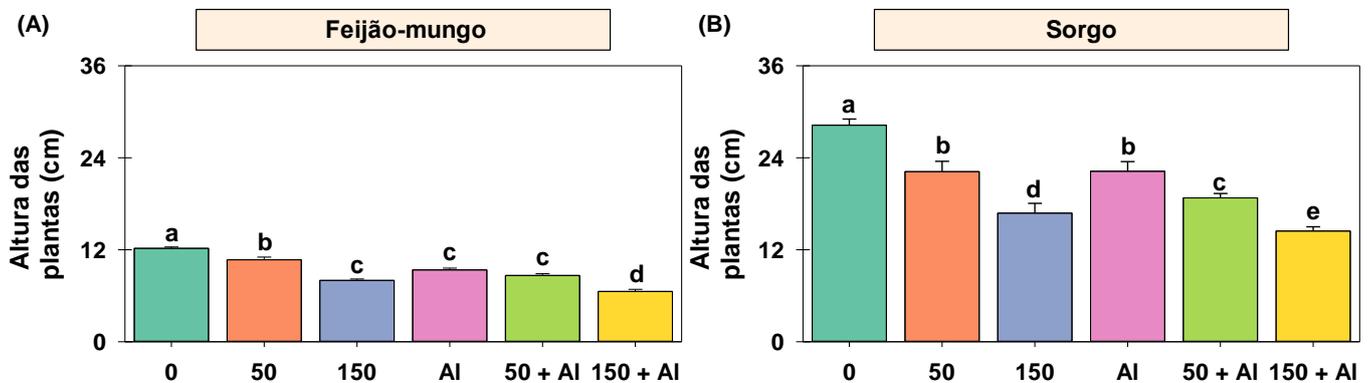
Figura 2 - Taxa de crescimento absoluto das plantas de feijão-mungo (A) e sorgo (B) submetidas aos estresses isolados e combinados de salinidade (0, 50 e 150 mM de NaCl) e alumínio (0 e 1,0 μ M de Al). Letras iguais indicam que não houve diferença significativa entre os tratamentos salinos no mesmo nível de alumínio (ausência ou presença), enquanto que o asterisco duplo (**) indica diferença significativa entre ausência ou presença de alumínio em cada nível de salinidade. Al = 1,0 μ M de Al.



Fonte: Autores (2023).

Conforme mostrado na Figura 3, as plantas de feijão-mungo apresentaram menor porte que as plantas de sorgo e isto foi independentemente do tipo e da combinação de estresses que foi aplicado. As plantas de feijão-mungo e de sorgo exibiram declínio em altura quando expostas aos estresses isolados e combinados de salinidade e alumínio. As plantas de feijão-mungo e sorgo expostas à 150 mM de NaCl exibiram redução de 34% e 41% na altura, respectivamente, em comparação às plantas não estressadas (Figura 3A). Segundo Ali (2017), a presença de alumínio influencia negativamente a altura de plantas de feijão-mungo chegando ainda a reduzir a área foliar, biomassa e níveis de pigmentos fotossintéticos. Sarker et al. (2019) observaram redução na altura de diferentes cultivares de trigo (Shatabdi, Kanchan, Sourav, Bijoy e Sufi) expostos a 100 μ M de Al aos 10 DAS. De modo geral, é possível afirmar que a presença do alumínio potencializou o efeito negativo da salinidade para as plantas de feijão-mungo e sorgo, principalmente quando estas plantas foram expostas simultaneamente a 150 mM de NaCl e 1,0 μ M de Al (Figura 3A).

Figura 3 - Altura das plantas de feijão-mungo (A) e sorgo (B) submetidas aos estresses isolados e combinados de salinidade (0, 50 e 150 mM de NaCl) e alumínio (0 e 1,0 μ M de Al). Letras iguais indicam que não houve diferença significativa entre os tratamentos. Al = 1,0 μ M de Al.

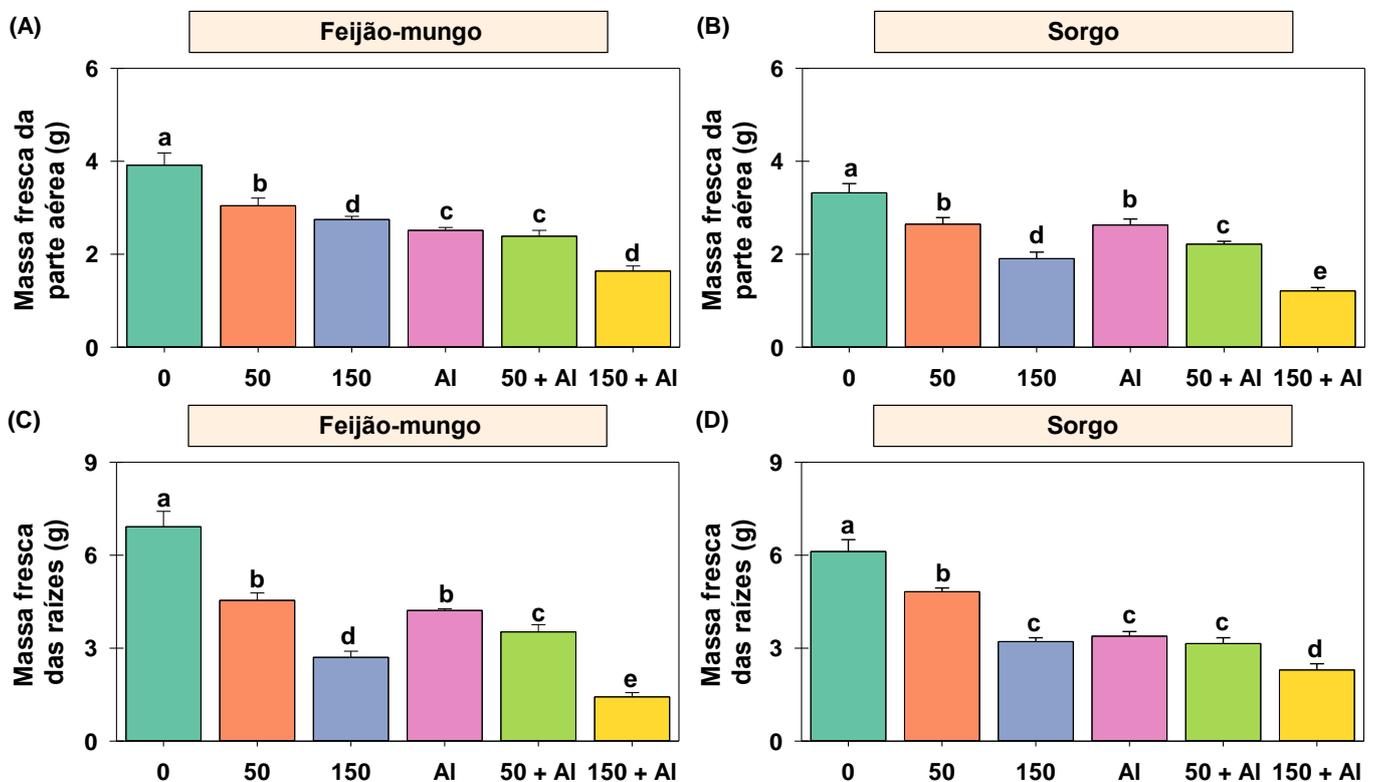


Fonte: Autores (2023).

Segundo Munns et al. (2020), os incrementos na massa fresca da parte aérea estão relacionados com um adequado acúmulo de nutrientes. No presente estudo, observou-se que as plantas de feijão-mungo e de sorgo apresentaram valores similares

de massa fresca da parte aérea (Figura 4A e 4B) e das raízes (Figura 4C e 4D). Além disso, estas plantas apresentaram redução significativa em resposta à salinidade e ao estresse por alumínio, principalmente quando estas plantas foram expostas à 150 mM de NaCl de forma combinada com 1,0 μ M de Al (Figuras 4A e 4B). As respostas de crescimento estão relacionadas a uma maior eficiência do metabolismo primário vegetal e uma melhor aclimação destas plantas às situações de estresses abióticos podem indicar um metabolismo vegetal mais robusto (Isayenkov & Maathuis, 2019; Sarker et al., 2019; Munns et al., 2020). Em valores percentuais, nota-se que as plantas de feijão-mungo e de sorgo exibiram reduções de 58% e 63% na massa fresca da parte aérea, respectivamente, quando expostas à salinidade com 150 mM de NaCl de forma combinada com 1,0 μ M de Al em comparação com as plantas controle (sem alumínio) (Figuras 4A e 4B).

Figura 4 - Massa fresca da parte aérea e raízes das plantas de feijão-mungo (A, C) e sorgo (B, D) submetidas aos estresses isolados e combinados de salinidade (0, 50 e 150 mM de NaCl) e alumínio (0 e 1,0 μ M de Al). Letras iguais indicam que não houve diferença significativa entre os tratamentos. Al = 1,0 μ M de Al.



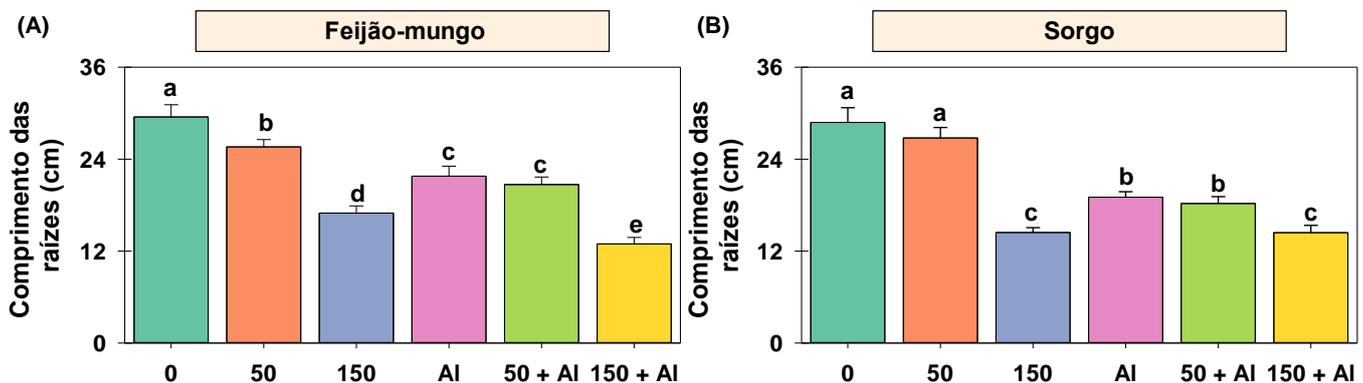
Fonte: Autores (2023).

As plantas C4 possuem sistema radicular mais desenvolvido e podendo alcançar mais de 2,0 m de profundidade e, portanto, são capazes de absorver nutrientes em áreas mais profundas do solo extraíndo e reciclando os nutrientes não absorvidos pelas culturas anuais que possuem raízes menos profundas (Braga et al., 2021). Nota-se que a combinação da salinidade aplicada com 150 mM de NaCl e do estresse por alumínio imposto com 1,0 μ M de Al resultam em redução de 79% e 62% na massa fresca das raízes das plantas de feijão-mungo e sorgo, respectivamente, em relação aos seus respectivos controles (Figuras 4C e 4D). Segundo Singh et al. (2017), o crescimento radicular é severamente reduzido devido a injúria causada pela presença do alumínio na rizosfera e as raízes danificadas pelo alumínio exploram um volume limitado de solo e são ineficientes na absorção de água e nutrientes. De fato, observou-se correlação positiva entre a massa fresca das raízes e a taxa de crescimento das plantas de feijão-mungo ($r = 0,79$) e de sorgo ($r = 0,86$) e também entre a massa fresca e o comprimento das raízes das plantas de feijão-mungo ($r = 0,95$) e de sorgo ($r = 0,91$). Estes resultados reforçam a afirmativa de que quanto menor a massa e comprimento das raízes

menor é o desenvolvimento destas plantas em termos de velocidade de crescimento e acúmulo de biomassa, tal como é observado nas plantas expostas simultaneamente a 150 mM de NaCl e 1,0 μ M de Al.

O estresse por metais e metaloides, tais como alumínio, interfere no crescimento das espécies vegetais, sendo os primeiros danos observados nas raízes (Nunes-Nesi et al., 2014; Rao et al., 2016). Além de reduzir a massa fresca das raízes das plantas de feijão-mungo e sorgo, a exposição a salinidade e ao estresse por alumínio, de forma isolada ou combinada, interferiu negativamente no comprimento do sistema radicular destas plantas (Figura 5). A exposição ao alumínio de forma isolada resultou em decréscimo no comprimento radicular das plantas de feijão-mungo e sorgo na ordem de 30% em relação ao controle não estressado (Figura 5A e 5B). Interessantemente, a exposição a salinidade em níveis mais baixos (50 mM de NaCl) não induziu alterações no comprimento das raízes de plantas de sorgo (Figura 5B). Diferentemente do que foi observado com os estresses isolados, a exposição das plantas de feijão-mungo e sorgo à combinação de 150 mM de NaCl e 1,0 μ M de Al induziu redução superior a 50% no comprimento das raízes destas plantas em relação ao controle (Figura 5). Segundo Singh et al. (2017), a toxicidade ao alumínio causa severos danos as plantas e o sistema radicular são fortemente prejudicado uma vez que a exposição ao alumínio tóxico provoca rigidez da parede celular, supressão no alongamento celular, redução no desenvolvimento dos pelos radiculares e encurvamento do ápice radicular.

Figura 5 - Comprimento das raízes de plantas de feijão-mungo (A, C) e sorgo (B, D) submetidas aos estresses isolados e combinados de salinidade (0, 50 e 150 mM de NaCl) e alumínio (0 e 1,0 μ M de Al). Letras iguais indicam que não houve diferença significativa entre os tratamentos. Al = 1,0 μ M de Al.



Fonte: Autores (2023).

4. Considerações Finais

As plantas de sorgo apresentaram melhores respostas aos estresses salino e por alumínio em relação às plantas de feijão-mungo. É possível que as plantas de sorgo tenham tido melhor desenvolvimento frente aos estresses devido apresentar metabolismo fotossintético do tipo C4 tendo em vista que este permite maior captação de CO₂ e acúmulo de biomassa em relação as plantas C3. No geral, a combinação dos estresses salino e por alumínio prejudicou o desenvolvimento das duas espécies vegetais estudadas em relação à aplicação dos estresses de forma isolada, sendo o sistema radicular mais negativamente impactado. Possivelmente, o comprometimento na captação de água e nutrientes pelas raízes das plantas sob estresses múltiplos induziu as respostas negativas observadas na taxa de crescimento e acúmulo de biomassa nestas plantas. Os resultados obtidos no presente estudo são promissores, entretanto são necessários maiores estudos que envolvam a salinidade e o estresse por excesso de alumínio na buscando de incrementar o potencial agrícola dessas culturas.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao Conselho de Desenvolvimento Científico (CNPq), a Coordenação de Aperfeiçoamento de Nível Superior (CAPES), a Universidade Federal do Piauí (UFPI), ao Grupo de estudos e pesquisa em Fisiologia do Estresse Vegetal (GEFE) e ao Laboratório de Fisiologia e Bioquímica Vegetal (CCN/UFPI) pelas bolsas concedidas e pelo suporte técnico e financeiro necessários para o desenvolvimento desta pesquisa.

Referências

- Ali, B. (2017). Salicylic acid induced antioxidant system enhances the tolerance to aluminium in mung bean (*Vigna radiata* L. Wilczek) plants. *Indian Journal of Plant Physiology*, 22, 178-189.
- Bonifacio, A., Carvalho, F. E., Martins, M. O., Neto, M. C. L., Cunha, J. R., Ribeiro, C. W., Margis-Pinheiro, M., & Silveira, J. A. (2016). Silenced rice in both cytosolic ascorbate peroxidases displays pre-acclimation to cope with oxidative stress induced by 3-aminotriazole-inhibited catalase. *Journal of Plant Physiology*, 201, 17-27.
- Braga, F. M., Ferreira, E. A., Cabral, C. M., de Freitas, I. C., Maciel, J. C., Freitas, M. S. S., Aspiazú, I., Santos, J. B., Fernandes, L. A., Frazão, L. A., & Sampaio, R. A. (2021). Revisão: Crescimento de plantas C3 e C4 em resposta a diferentes concentrações de CO₂. *Research, Society and Development*, 10(7), e33810716701-e33810716701.
- Chen, L. S., Qi, Y. P., Jiang, H. X., Yang, L. T., & Yang, G. H. (2010). Photosynthesis and photoprotective systems of plants in response to aluminum toxicity. *African Journal of Biotechnology*, 9(54), 9237-9247.
- CONAB (Companhia Nacional do Abastecimento). *Safra: série histórica de grãos*. <https://portaldeinformacoes.conab.gov.br/safra-serie-historica-graos.html>.
- Coutinho, C. S., Rocha, E. S. N., Lopes, D. I. S., & Freire, A. I. (2022). Avaliação de crescimento de plântula de feijão Mungo-verde em diferentes substratos. *Research, Society and Development*, 11(7), e58611730675-e58611730675.
- Ecco, M., Santiago, E. F., & Lima, P. R. (2014). Respostas biométricas em plantas jovens de cana-de-açúcar submetidas ao estresse hídrico e ao alumínio. *Comunicata Scientiae*, 5(1), 59-67.
- Emamverdian, A., Ding, Y., Mokhberdoran, F., & Xie, Y. (2015). Heavy metal stress and some mechanisms of plant defense response. *The Scientific World Journal*, 2015, Article ID 756120
- Foyer, C. H. (2018). Reactive oxygen species, oxidative signaling and the regulation of photosynthesis. *Environmental and Experimental Botany*, 154, 134-142.
- Guimarães, M. J. M., Simões, W. L., Barros, J. R. A., Alberto, K. D. C., & Willadino, L. G. (2022). Parâmetros bioquímicos, fisiológicos e produtividade de sorgo granífero irrigado com água salina. *Journal of Environmental Analysis and Progress*, 7(3), 159-168.
- Hernández, J. A. (2019). Salinity tolerance in plants: Trends and perspectives. *International Journal of Molecular Sciences*, 20(10), 2408.
- Hoagland, D., & Arnon, D. I. (1950). *The water culture method for growing plants without soil*. California: Agriculture Experimental Station Circular.
- Isayenkov, S. V., & Maathuis, F. J. (2019). Plant salinity stress: many unanswered questions remain. *Frontiers in Plant Science*, 10, 80.
- Mendes, J. B. S., Costa Neto, V. P., Sousa, C. D. A., Carvalho Filho, M. R., Rodrigues, A. C., & Bonifacio, A. (2020). Trichoderma and bradyrhizobia act synergistically and enhance the growth rate, biomass and photosynthetic pigments of cowpea (*Vigna unguiculata*) grown in controlled conditions. *Symbiosis*, 80, 133-143.
- Moraes, N. J., Costa Neto, V. P., Araújo, A. S. F., Figueiredo, M. V. B., Bonifacio, A., & Rodrigues, A. C. (2016). Bradyrhizobium sp. inoculation ameliorates oxidative protection in cowpea subjected to long-term composted tannery sludge amendment. *European Journal of Soil Biology*, 76, 35-45.
- Munns, R., Passioura, J. B., Colmer, T. D., & Byrt, C. S. (2020). Osmotic adjustment and energy limitations to plant growth in saline soil. *New Phytologist*, 225(3), 1091-1096.
- Negrão, S., Schmöckel, S. M., & Tester, M. J. A. O. B. (2017). Evaluating physiological responses of plants to salinity stress. *Annals of Botany*, 119(1), 1-11.
- Noctor, G., Mhamdi, A., & Foyer, C. H. (2016). Oxidative stress and antioxidative systems: recipes for successful data collection and interpretation. *Plant, Cell & Environment*, 39(5), 1140-1160.
- Nunes-Nesi, A., Brito, D. S., Inostroza-Blancheteau, C., Fernie, A. R., & Araújo, W. L. (2014). The complex role of mitochondrial metabolism in plant aluminum resistance. *Trends in Plant Science*, 19(6), 399-407.
- 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.
- Sarker, S. C., Ghosh, S. R., Hossain, M. J., Ghosh, R. C., Razia, S., Sushmoy, D. R., & Noor, M. M. A. (2019). Impact of aluminium (Al³⁺) stress on germination and seedling growth of five wheat genotypes. *SAARC Journal of Agriculture*, 17(1), 65-76.
- 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. *Environmental and Experimental Botany*, 137, 177-193.