

VARIABILIDADE GENÉTICA DE HÍBRIDOS DE MILHO QUANTO À SENSIBILIDADE OU TOLERÂNCIA AO ALUMÍNIO DURANTE A GERMINAÇÃO

Wagner Nunes Rodrigues¹; Tafarel Victor Colodetti²; Ismael Nacarati da Silva³; João Felipe de Brites Senra⁴; Gustavo de Freitas Mafort⁵; Samuel Ferreira Ribeiro⁶; Ariana Elisa Rodrigues Marteline⁷

Resumo – O milho (*Zea mays* L.) é uma das culturas agrícolas mais importantes desde a antiguidade. No entanto, seu cultivo em solos ácidos pode ser limitado pela presença do alumínio trocável (Al^{3+}), responsável por afetar a germinação e o desenvolvimento radicular, comprometendo a absorção de água e nutrientes e podendo causar perdas severas na produtividade da cultura. A identificação de materiais tolerantes ao alumínio tóxico pode favorecer a formação de lavouras mais resilientes ou mais tolerantes a solos com condições adversas de acidez. Com isso, este estudo avaliou a resposta germinativa de sete híbridos comerciais de milho expostos a ambientes com e sem presença de alumínio trocável, analisando parâmetros germinativos, tais como porcentagem e velocidade de germinação, comprimento de radículas e coleótilos, além da biomassa fresca das plântulas. Observa-se que a presença de Al^{3+} , reduziu significativamente o desenvolvimento da maioria dos híbridos, embora alguns apresentassem maior resistência, evidenciando variabilidade genética entre os genótipos avaliados. Os híbridos ExtendaxRR2 e P4285VYHR responderam relativamente melhor ao estresse por alumínio, enquanto SS204EVIP3, P40537PWU e BM855PRO2 foram mais sensíveis. A interação genótipo × ambiente foi determinante na variabilidade fenotípica observada.

Palavras-chaves: acidez; crescimento; tolerância; *Zea mays*.

¹D.Sc. Produção Vegetal, Agente de Pesquisa e Inovação em Desenvolvimento Rural do Incaper, wagner.rodrigues@incaper.es.gov.br

²D.Sc. Produção Vegetal, Agente de Pesquisa e Inovação em Desenvolvimento Rural do Incaper

³D.Sc. Ciência Animal, Agente de Pesquisa e Inovação em Desenvolvimento Rural do Incaper

⁴D.Sc. Genética e Melhoramento, Agente de Extensão em Desenvolvimento Rural do Incaper

⁵Técnico Agrícola, Graduando em Agronomia, Centro Universitário Unifacig

⁶Técnico Agrícola, Graduando em Agronomia, Centro Universitário Unifacig

⁷Técnica Agrícola, Graduanda em Agronomia, Centro Universitário Unifacig

GENETIC VARIABILITY OF CORN HYBRIDS REGARDING SENSITIVITY OR TOLERANCE TO ALUMINUM DURING GERMINATION

Abstract – Corn (*Zea mays* L.) has been one of the most important agricultural crops since ancient times. However, its cultivation in acidic soils can be limited by the presence of exchangeable aluminum (Al^{3+}), which affects germination and root development, compromising water and nutrient absorption and limiting the yield of the crop. The identification of materials tolerant to toxic aluminum can promote the development of more resilient or more resistant crops in soils with adverse acidity conditions. Thus, this study evaluated the germinative response of seven commercial corn hybrids exposed to environments with and without the presence of exchangeable aluminum, analyzing germinative parameters such as germination percentage and speed, radicle and coleoptile length, and fresh seedling biomass. It was observed that the presence of Al^{3+} significantly reduced the development of most hybrids, although some showed greater resistance, demonstrating genetic variability among the evaluated genotypes. The hybrids ExtendaxRR2 and P4285VYHR responded relatively better to aluminum stress, while SS204EVIP3, P40537PWU, and BM855PRO2 were more sensitive. The genotype \times environment interaction was a determining factor in the observed phenotypic variability.

Keywords: acidity; growth; tolerance; *Zea mays*.

VARIABILIDAD GENÉTICA DE HÍBRIDOS DE MAÍZ EN CUANTO A LA SENSIBILIDAD O TOLERANCIA AL ALUMINIO DURANTE LA GERMINACIÓN

Resumen – El maíz (*Zea mays* L.) es uno de los cultivos agrícolas más importantes desde la antigüedad. Sin embargo, su cultivo en suelos ácidos puede verse limitado por la presencia del aluminio intercambiable (Al^{3+}), responsable de afectar la germinación y el desarrollo radicular, comprometiendo la absorción de agua y nutrientes lo que puede causar graves pérdidas en la productividad del cultivo. La identificación de materiales tolerantes al aluminio tóxico puede favorecer la formación de cultivos más resilientes o más tolerantes a suelos con condiciones adversas de acidez. Con ello, este estudio evaluó la respuesta germinativa de siete híbridos comerciales de maíz expuestos a ambientes con y sin presencia del aluminio intercambiable, analizando parámetros germinativos, tales como el porcentaje y la velocidad de germinación, la longitud de las radículas y los coleóptilos, además de la biomasa fresca de las plántulas. Se observa que la presencia de Al^{3+} redujo significativamente el desarrollo de la mayoría de los híbridos, aunque algunos mostraron mayor resistencia, lo que evidencia la variabilidad genética entre los genotipos evaluados. Los híbridos ExtendaxRR2 y P4285VYHR respondieron relativamente mejor al estrés por aluminio, mientras que SS204EVIP3, P40537PWU y BM855PRO2 fueron más sensibles. La interacción genotipo \times ambiente fue determinante en la variabilidad fenotípica observada.

Palabras clave: acidez; crecimiento; tolerancia; *Zea mays*.

INTRODUÇÃO

O milho (*Zea mays* L.) é uma das espécies mais importantes nos âmbitos econômico, social e ambiental em escala global, sendo uma das principais culturas agrícolas desde a antiguidade. Essa espécie é cultivada em muitos países, localizados, principalmente, em regiões tropicais, podendo ser cultivada em diversas épocas do ano. Constitui base alimentar da dieta cotidiana da população, servindo como fonte rica em carboidratos (amido), com o consumo ocorrendo de diversas formas. Boa parte da produção mundial de milho é destinada à nutrição animal, sendo essencial nas formulações de rações, sendo, assim, insumo básico para produção de carne, leite e ovos (Galvão; Borém; Pimentel, 2017).

Ao longo dos anos, o intenso trabalho de melhoramento genético desenvolveu inúmeras cultivares de milho com tolerância a estresses hídricos, resistência a pragas e doenças, alto teor de óleo, amido ou proteína e híbridos adaptados para produção de silagem para dieta animal (Meirelles; Guimarães, 2024).

Apesar dos avanços, solos ácidos frequentemente apresentam impedimentos químicos à produtividade agrícola, causados pela presença de alumínio trocável (Al^{3+}). Essa condição é observada em cerca de 40% das áreas agricultáveis globalmente, limitando severamente a produção vegetal de culturas que ocupam áreas significativas, como é o caso do milho (Matonyei *et al.*, 2020; Liu *et al.*, 2022). A presença de concentrações elevadas de H^+ na solução do solo contribui para solubilização do alumínio, promovendo a sua forma fitotóxica, capaz de impedir o crescimento radicular e, conseqüentemente, da capacidade de absorção de água de nutrientes pelas plantas, como resultado, ocorre uma perda de vigor e da produtividade das plantações estabelecidas em solos com esse tipo de impedimento químico. Essas condições são particularmente severas em regiões tropicais e subtropicais úmidas, onde a ocorrência de solos ácidos e muito intemperizados é comum (Barros *et al.*, 2020). Para o milho, especificamente, a limitação da produtividade causada pela toxidez por alumínio pode chegar a 69% (Mazocatto *et al.*, 2002; Milane *et al.*, 2014; Pinto *et al.*, 2021; Alves *et al.*, 2022).

Durante a germinação, a toxidez do alumínio pode afetar a divisão e o alongamento celular na radícula, afetando a absorção de água e embebição da semente. Esse fenômeno prejudica a integridade das membranas celulares, comprometendo a atividade metabólica

inicial. Além disso, pode limitar o transporte de nutrientes essenciais para o crescimento, como cálcio e fósforo, resultando em perdas significativas no estabelecimento das plantas e, conseqüentemente, no potencial produtivo da lavoura (Kochian *et al.*, 2015; Singh *et al.*, 2017; Taiz *et al.*, 2017).

O objetivo deste estudo foi analisar a diversidade de respostas germinativas entre sete híbridos de milho na ausência ou presença de alumínio, visando quantificar a variabilidade genética para condições contrastantes para esse elemento e identificar padrões de respostas acerca da sensibilidade ou possível tolerância entre híbridos comerciais.

METODOLOGIA

A presente investigação científica se desenvolveu baseada em uma pesquisa explicativa, com base em um experimento de coleta de dados para verificação de falseamento de hipóteses. O experimento foi conduzido nos laboratórios de microscopia e de bioquímica do Centro Universitário Unifacig, campus Alfa Sul, no município de Manhuaçu-MG.

O experimento envolveu o teste de dois fatores de natureza qualitativa, com sete híbridos de milho formando os níveis de um fator e duas condições relacionadas ao contato das sementes com o alumínio trocável (ausência ou presença), formando os níveis do outro fator. Dessa forma, estabeleceu-se um esquema fatorial 7×2 . Como o ensaio foi desenvolvido em laboratório, sob condições controladas, o delineamento experimental empregado foi inteiramente casualizado, com seis repetições. Cada parcela experimental foi composta por uma amostra de 25 sementes de milho, padronizadas quanto ao tamanho e aspectos visuais. As parcelas foram aleatoriamente distribuídas e redistribuídas diariamente ao longo do desenvolvimento do trabalho, visando garantir a homogeneidade de possíveis efeitos de natureza desconhecida dentro do experimento.

De acordo com a disponibilidade local e com as indicações prévias de profissionais da região, selecionaram-se sete híbridos de milho mantidos e registrados por programas de melhoramento de diferentes instituições. Algumas das características desses híbridos são apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1 – Breve descrição dos híbridos de milho avaliados

Denominação ¹	Mantenedor ¹	Registro ¹	Características
AG8701PRO4	Monsanto do Brasil LTDA.	49951	Robustez em situações adversas e com boa adaptação a diferentes tipos de solo. É moderadamente tolerante ao complexo de enfezamento e tolerante à ferrugem-polissora (<i>Puccinia polysora</i>) ² .
AS1868PRO4	Monsanto do Brasil LTDA.	48468	Bom desempenho em altas densidades de plantio. É tolerante à mancha de turcicum (<i>Exserohilum turcicum</i>), à cercosporiose (<i>Cercospora zea-maydis</i>) e à podridão branca da espiga (<i>Stenocarpella maydis</i> ou <i>Diplodia maydis</i>) ³ .
BM855PRO2	Helix Sementes e Biotecnologia LTDA.	35526	Dupla aptidão (verão e safrinha). É resistente ao ataque da larva alfinete (<i>Diabrotica speciosa</i>), a herbicidas (glifosato) e tolerância ao ataque de lepidópteros ⁴ .
ExtendaxRR2	Helix Sementes e Biotecnologia LTDA.	36208	Ciclo precoce, com aptidão para produção de silagem e tolerância a herbicidas (glifosato) ⁵ .
SS204EVIP3	Syngenta Seeds LTDA.	44000	Ciclo precoce e elevada eficiência na absorção de nutrientes. É tolerante ao ataque de nematoides (<i>Meloidogyne javanica</i> , <i>M. incognita</i> , <i>Pratylenchus brachyurus</i>) ⁶ .
P40537PWU*	Corteva Agriscience do Brasil LTDA.	-	Ciclo precoce, com bom desempenho em altas densidades de plantio. É tolerante ao complexo de enfezamentos, tolerância à ferrugem-polissora (<i>P. polysora</i>) e à mancha de turcicum (<i>E. turcicum</i>). Esse híbrido apresenta ciclo precoce e tem como finalidade a produção de grãos ⁷ .
P4285VYHR	Corteva Agriscience do Brasil LTDA.	37440	Alta produtividade em diferentes ambientes, ciclo precoce e dupla aptidão. É tolerante a pragas e doenças e tem baixo fator de reprodução para nematoides (<i>P. brachyurus</i>) ⁸ .

Fonte: ¹Registro Nacional de Cultivares (Mapa, 2024); ²Agrocerec (2024a); ³Agrocerec (2024b); ⁴Biomatrix (2024a); ⁵Biomatrix (2024b); ⁶Nidera Sementes (2024); ⁷Pioneer (2024a); ⁸Pioneer (2024b).

Nota: *Denominação comercial.

As condições de presença ou ausência de alumínio trocável foram estabelecidas artificialmente pela adição de uma solução aquosa de concentração conhecida ou apenas de água, de acordo com o tratamento. Estabeleceu-se o nível de concentração de 1,0 cmol_c/dm³ de alumínio, para gerar uma condição considerada como de concentração elevada, segundo os manuais de recomendação de adubação e calagem dos estados do Espírito Santo (Prezotti *et al.*, 2007) e Minas Gerais (Ribeiro; Guimarães; Alvarez, 1999). A solução aquosa foi preparada pela diluição de cloreto de alumínio (AlCl₃.6H₂O) em água destilada. Os parâmetros de cada condição foram medidos com auxílio de um pHmetro e um condutímetro; e o potencial osmótico foi calculado empregando a equação de Van't Hoff (Taiz *et al.*, 2017) para as condições do experimento; sendo apresentados na Tabela 2.

Tabela 2 – Parâmetros das condições de ausência e presença de alumínio trocável

Parâmetros	Ausência de Al ³⁺	Presença de Al ³⁺
Concentração de Al ³⁺ (cmol _c /dm ³)	0,00	1,00
pH	6,14	3,44
Condutividade elétrica (µS/cm)	0,00	7.878,00
Potencial osmótico da solução (MPa)	0,00	-0,30

As sementes foram dispostas em recipientes transparentes, sobre camadas de papel *germitest* umedecidas com a solução ou com água, de acordo com o tratamento. O volume empregado para tal foi calculado para embebição das camadas de papel, baseada em pesagem em balança analítica de precisão (2,5 vezes).

Os recipientes contendo as sementes que receberam os tratamentos foram transferidas para câmara incubadora tipo B.O.D (*Bioquimical Oxygen Demand*), com fotoperíodo de 8 horas de luz (4 lâmpadas fluorescentes brancas de 900 lm de fluxo) e temperatura mantida a 25 °C. Foi realizada a reposição da umidade nos recipientes ao longo do período de avaliação, de acordo com a necessidade.

A germinação foi monitorada diariamente, com contagens de sementes germinadas em cada parcela experimental a partir do quarto dia (Brasil, 2009). As porcentagens de germinação durante a primeira contagem (PGP) e a contagem final (PGF) foram determinadas. O tempo médio de germinação (TMG) e o índice de velocidade de germinação (IVG) foram calculados usando os métodos descritos por Laboriau e Valadares (1976) e Maguire (1962), respectivamente. Após sete dias, duas sementes germinadas de cada parcela experimental foram aleatoriamente amostradas para mensuração do comprimento médio de radículas (CRA) e coleótilos (CCO). Calculou-se a razão entre o desenvolvimento radicular e da parte aérea pela relação entre comprimentos (R/C). As sementes germinadas foram pesadas em balança eletrônica de precisão para determinação da matéria fresca por plântula (MFP).

Os dados foram analisados usando o método da máxima verossimilhança restrita e melhor predição linear não viesada (REML/BLUP), usando o modelo descrito pela Equação 1.

$$Y_{ij} = \mu + G_i + A_j + GA_{ij} + \varepsilon_{ij} \quad (\text{Equação 1})$$

Em que: Y_{ij} representa a ij -ésima observação fenotípica para a variável em questão; μ representa a média geral; G_i representa o efeito aleatório do i -ésimo genótipo; A_j representa o efeito aleatório do j -ésimo ambiente; GA_{ij} é o efeito da interação entre o i -ésimo genótipo e o j -ésimo ambiente; e ε_{ij} representa o erro residual.

A decomposição da variância do modelo foi empregada para analisar a variabilidade genética, ambiental, da interação e fenotípica, permitindo estimar parâmetros genéticos, de acordo com a metodologia descrita por Resende e Duarte (2007).

A significância dos efeitos aleatórios do modelo estatístico foi testada usando o teste de razão de verossimilhança (LRT), empregando a expressão da Equação 2.

$$LRT = -2 * (\log L - \log L_R) \quad (\text{Equação 2})$$

Em que: $\log L$ representa o logaritmo do máximo (L) da função de verossimilhança restrita do modelo completo e $\log L_R$ é o logaritmo do máximo (L_R) da função de verossimilhança do modelo reduzido, excluindo-se o efeito testado. Os valores de LRT foram submetidos ao teste de χ^2 , verificando-se a significância a 1% e a 5% de probabilidade.

Foi empregada uma abordagem estatística multivariada para permitir o agrupamento hierárquico dos híbridos, buscando identificar padrões de similaridade entre eles. A matriz de valores genéticos foi preparada e usada em uma análise de componentes principais (PCA) para reduzir a dimensionalidade e extrair informações sobre a variabilidade entre híbridos. A matriz de coordenadas foi, então, usada para estimar as medidas de distâncias generalizadas de Mahalanobis, considerando o centróide da distribuição e a matriz de covariância inversa dos componentes principais. A matriz de distâncias de Mahalanobis foi usada para realizar o agrupamento hierárquico pelo método UPGMA (*Unweighted Pair Group Method with Arithmetic Mean*) e gerar dendogramas para facilitar a interpretação dos agrupamentos formados. O número ideal de agrupamentos foi estabelecido pela interpretação da curva de soma dos quadrados intra-cluster (WSS).

Todas as análises foram realizadas com auxílio do programa R-Studio (R Core Team, 2025), com emprego do pacote *sommer* (Covarrubias-Pazarán, 2016) para as análises de predição e estabelecimento dos modelos mistos; do pacote *FactoMineR* (Lê; Husson, 2008) para as análises de PCA; do pacote *MASS* (Venables; Ripley, 2002) para as distâncias generalizadas de Mahalanobis; do pacote *cluster* (Maechler et al., 2025) para análise de agrupamento; e dos pacotes *dendextend* (Galili, 2015) e *ggplot2* (Wickham, 2016) para confecção dos gráficos.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Figura 1 mostra o efeito da presença de alumínio trocável na germinação dos sete híbridos de milho. A comparação demonstrou, no geral, uma diminuição da proporção de sementes capazes de germinar (Figura 1A e 1B), notavelmente para AS1868PRO4, SS204EVIP3, ExtendaxRR2 e AG8701PRO4; da velocidade de germinação (Figura 1C e 1D), especialmente para SS204EVIP3, AS1868PRO4 e BM855PRO2; do crescimento inicial das radículas (Figura 1E) para todos

os híbridos; do crescimento cotiledonar (Figura 1F), para a maioria dos híbridos; do balanço entre o crescimento das partes vegetais (Figura 1G), especialmente para P40537PWU, ExtendaxRR2 e AS1868PRO4; e do acúmulo inicial de biomassa fresca (Figura 1H), notadamente para SS204EVIP3, AG8701PRO4 e

AS1868PRO4. A quantificação de perdas para parâmetros germinativos causada pela presença de Al^{3+} no meio durante a germinação de sementes é descrita por Mafort *et al.* (2024), que descrevem perdas de até 70% na taxa de germinação inicial.

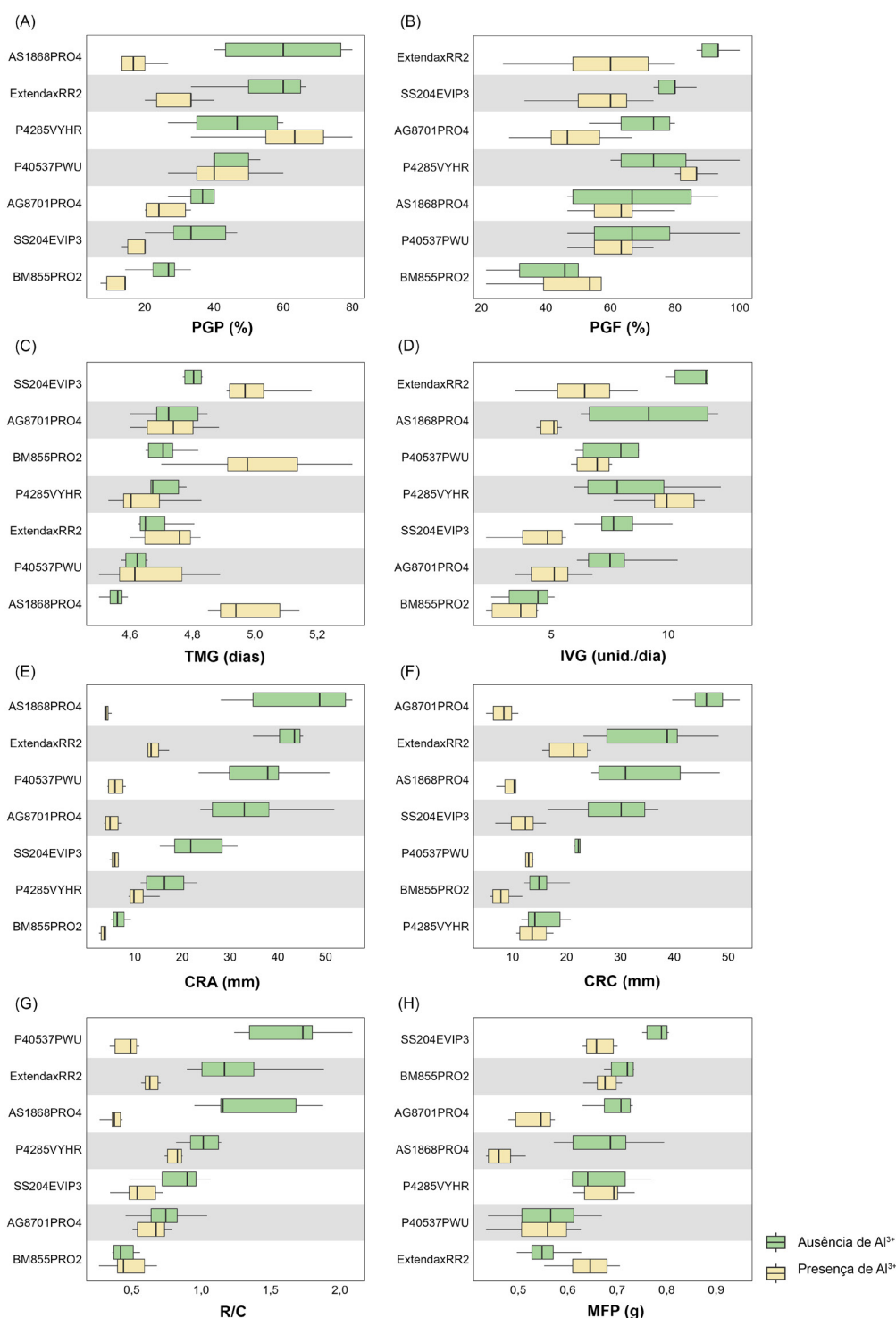


Figura 1 – Boxplots para porcentagem de germinação na primeira (A) e na contagem final (B), tempo médio (C) e índice de velocidade de germinação (D), comprimento de radículas (E) e coleótilos (F), razão raiz:coleótilo (G) e matéria fresca de plântulas (H) de sete híbridos de milho sujeitos a germinação em condições de ausência e presença de Al^{3+} no meio.

A presença de alumínio também interferiu diretamente no crescimento radicular, quando avaliados o comprimento da raiz e massa fresca da plântula. É possível notar ganhos isolados em alguns parâmetros de germinação na presença de alumínio (e.g., PGP e IVG para P4285VYHR e MFP para ExtendaxRR2), o que pode ser atribuído à ativação dos mecanismos de defesa fisiológica na semente, provocados pelo estresse da toxidez. Esse estresse inicial induz a produção de enzimas antioxidantes, promovendo a atividade metabólica e favorecendo a emergência da radícula (Ma; Ryan; Delhaize, 2001; Giannakoula et al., 2010). Entretanto, apesar desses efeitos iniciais, à medida que o tempo de exposição ao alumínio se prolonga, a divisão e o alongamento celular começam a ser inibidos, resultando em perdas para o crescimento das plântulas (Kochian et al., 2015). Nota-se que alguns híbridos, aparentemente, apresentaram maior tolerância, mantendo resultados semelhantes entre as duas condições, enquanto outros mostraram um declínio acentuado com a presença de alumínio, destacando

diferenças genéticas na resposta ao estresse químico. Essa análise é fundamental para selecionar híbridos mais tolerantes ao alumínio, especialmente em solos ácidos, onde a toxicidade desse elemento pode comprometer a formação da plantação.

Analisando os componentes da variância e estimativas dos parâmetros genéticos apresentados na Tabela 3, notou-se uma elevada contribuição de efeitos ambientais na determinação da variância fenotípica. A menor contribuição da variância genética para a variância fenotípica observada resultou em estimativas baixas de herdabilidade, apontando uma grande influência ambiental e da interação entre genótipos e ambientes sobre a variância fenotípica, indicando a existência de parâmetros germinativos diferenciados, entre híbridos, e dependentes das condições ambientais. Baixas herdabilidades para caracteres usualmente aplicados para caracterizar a tolerância ao Al^{3+} , tal como o crescimento inicial de raízes, também foram relatadas em outros estudos (Olung'ati et al., 2023; Singh et al., 2022).

Tabela 3 – Estimativas de componentes da variância e parâmetros genéticos para oito características relacionadas à germinação de sementes de sete híbridos de milho sujeitos a germinação em condições de ausência e presença de Al^{3+} no meio

Parâmetro	PGP (%)	PGF (%)	TMG (dias)	IVG (unid./dia)	CRA (mm)	CRC (mm)	R/C	MFP (g)
$\hat{\mu}_0$	44,0760	70,3571	4,6897	8,0365	29,0512	28,1607	1,0496	0,6697
$\hat{\mu}_{Al^{3+}}$	29,3537	59,5351	4,8218	5,8639	7,0857	12,2333	0,5743	0,6037
$\hat{\sigma}_G^2$	68,6730	77,0164	0,0008	1,9659	7,4146	0,4825	0,0000	0,0017
$\hat{\sigma}_A^2$	85,2100	43,9236	0,0062	2,0266	228,9794	116,6189	0,1008	0,0014
$\hat{\sigma}_{G \times A}^2$	130,7299	89,4422	0,0134	2,0073	91,9706	68,4710	0,0853	0,0054
$\hat{\sigma}_R^2$	133,9104	193,1103	0,0149	2,9935	33,4634	27,3388	0,0470	0,0045
$\hat{\sigma}_F^2$	418,5233	403,4925	0,0353	8,9932	361,8280	212,9111	0,2331	0,0129
h^2	0,1641	0,1909	0,0239	0,2186	0,0205	0,0023	0,0000	0,1284
CV_g	20,7444	12,8510	0,6130	18,5832	13,1257	3,5767	0,0000	6,3486
CV_e	28,9678	20,3493	2,5732	22,9315	27,8847	26,9237	22,6381	10,4229
CV_r	0,7161	0,6315	0,2382	0,8104	0,4707	0,1328	0,0000	0,6091
r_G	0,3444	0,4627	0,0593	0,4948	0,0746	0,0070	0,0000	0,2348
A_{cc}	0,8687	0,8398	0,5040	0,8931	0,7555	0,3094	0,0000	0,8307

Nota: Média geral no ambiente sem Al^{3+} ($\hat{\mu}_0$); Média geral no ambiente com Al^{3+} ($\hat{\mu}_{Al^{3+}}$); Variância genética ($\hat{\sigma}_G^2$); Variância ambiental ($\hat{\sigma}_A^2$); Variância da interação Genótipo \times Ambiente ($\hat{\sigma}_{G \times A}^2$); Variância residual ($\hat{\sigma}_R^2$); Variância fenotípica ($\hat{\sigma}_F^2$); Herdabilidade (h^2); Coeficiente de variação genética (CV_g); Coeficiente de variação experimental (CV_e); Coeficiente de Variação Relativa (CV_r); Correlação do desempenho genotípico (r_G); Acurácia seletiva (A_{cc}).

Os coeficientes de variação genética indicam uma considerável variabilidade entre híbridos para os parâmetros de germinação. Os coeficientes de variação relativa para PGP, PGF, IVG e MFP apresentaram valores moderadamente altos, indicando que, apesar dos efeitos ambientais desempenharem um papel significativo, há uma maior possibilidade de ganhos para a proporção e velocidade de germinação, assim como na biomassa fresca de plântulas, quando se considera a escolha de híbridos de milhos para essas condições de presença ou ausência de Al^{3+} no meio durante a germinação. A confiabilidade também pode ser verificada pelas maiores estimativas de acurácia seletiva para essas variáveis, indicando estabilidade moderada entre as avaliações.

A interação genótipo × ambiente impactou consideravelmente o desempenho dos genótipos, o que causou uma redução na previsibilidade de resultados gerais para parâmetros de germinação dos híbridos, o que é verificado pelas estimativas de correlação do desempenho genotípico de até 0,4948.

Mukri *et al.* (2024), avaliando métodos de desdobramento da interação entre genótipos e ambiente em milho, destaca a importância de validar o desempenho de híbridos em ambientes ecologicamente diferentes, devido a elevadas contribuições da interação para determinação de variáveis agrônomicas.

Com base nesses resultados, notou-se uma variação suficiente para identificação de híbridos com melhor desempenho germinativo, entretanto, a magnitude da influência ambiental e da interação torna importante que essa identificação seja feita especificamente para cada uma das condições contrastantes para o alumínio. Esse fato é confirmado pelos resultados da análise da estatística de desvio e de razão de verossimilhança (Tabela 4), que demonstra a significância estatística da interação entre o efeito dos híbridos e da condição para o alumínio para todas as características avaliadas. Dessa forma, o desdobramento da interação deve permitir identificar padrões de germinação diferentes entre híbridos, especificamente para cada condição ambiental.

Tabela 4 – Resumo da análise de desvio (*deviance*) e teste de razão de verossimilhança (LRT) para oito características relacionadas à germinação de sementes de sete híbridos de milho sujeitos a germinação em condições de ausência e presença de Al^{3+} no meio

Característica	<i>Deviance</i>				LRT		
	MC	E_G	E_A	E_{GXA}	E_G	E_A	E_{GXA}
PGP (%)	31,06	31,67	32,57	47,77	0,60	1,51	16,71**
PGF (%)	51,64	52,61	52,53	58,64	0,98	0,90	7,00**
TMG (dias)	45,64	45,66	46,71	60,90	0,02	1,07	15,26**
IVG (unid./dia)	34,22	35,50	36,47	45,22	1,29	2,25	11,00**
CRA (mm)	-35,06	-35,03	-27,75	9,34	0,03	7,31**	44,40**
CRC (mm)	-16,24	-16,24	-10,71	25,24	0,00	5,53*	41,48**
R/C	7,56	7,56	11,38	41,81	0,00	3,82	34,24**
MFP (g)	35,17	35,45	35,64	56,16	0,28	0,47	20,98**

Nota: MC: modelo completo; E_G : efeito genotípico; E_A : efeito ambiental; E_{GXA} : efeito da interação; PGP: porcentagem de germinação na primeira contagem; PGF: porcentagem de germinação na contagem final; TMG: tempo médio de germinação; IVG: índice de velocidade de germinação; CRA: comprimento de radículas; CRC: comprimento de coleóptilos; R/C: razão raiz:coleóptilo; MFP: matéria fresca de plântulas. *significativo a 5% e **significativo a 1% de probabilidade pelo teste de χ^2 a 1 grau de liberdade.

A elevada contribuição do efeito da interação entre o potencial genotípico com o ambiental é descrita tanto para características de crescimento da planta quanto para o desempenho produtivo do milho (Stansluos *et al.*, 2023; Guseva *et al.*, 2025), o que remete à necessidade de caracterizar os materiais de forma a identificar aqueles com comportamento mais estável ou aqueles com potencial para diferentes condições ambientais.

Os valores genéticos preditos para as características relacionadas à germinação mostram diferenças na

resposta dos híbridos de milho ao estresse causado pela presença de alumínio no meio durante a germinação (Tabela 5). De modo geral, a ausência de Al^{3+} favoreceu as taxas de germinação (PGP e PGF) e o crescimento radicular (CRA e CRC) da maioria dos híbridos. As magnitudes dos valores indicam a ocorrência de variações na tolerância ou sensibilidade ao alumínio entre os híbridos.

Tabela 5 – Valores genéticos preditos ($\hat{\mu} + \hat{G} + \hat{A}$) para características relacionadas à germinação de sementes de sete híbridos de milho sujeitos a germinação em condições de ausência e presença de Al³⁺ no meio

Genótipo	Valor	Genótipo	Valor	Genótipo	Valor	Genótipo	Valor
PGP (%)				PGF (%)			
Ausência de Al³⁺		Presença de Al³⁺		Ausência de Al³⁺		Presença de Al³⁺	
P4285VYHR	56,44	P40537PWU	63,19	P4285VYHR	82,98	ExtendaxRR2	84,78
SS204EVIP3	48,54	ExtendaxRR2	48,88	SS204EVIP3	82,40	P4285VYHR	72,48
ExtendaxRR2	44,63	P4285VYHR	44,55	ExtendaxRR2	72,41	AS1868PRO4	68,02
P40537PWU	39,95	AS1868PRO4	33,44	P40537PWU	71,65	SS204EVIP3	63,72
AS1868PRO4	38,68	AG8701PRO4	28,96	AS1868PRO4	67,90	AG8701PRO4	63,28
AG8701PRO4	30,37	BM855PRO2	28,73	BM855PRO2	55,83	P40537PWU	61,38
BM855PRO2	29,97	SS204EVIP3	22,96	AG8701PRO4	52,92	BM855PRO2	56,30
TMG (dias)				IVG (unid./dia)			
Ausência de Al³⁺		Presença de Al³⁺		Ausência de Al³⁺		Presença de Al³⁺	
SS204EVIP3	4,84	SS204EVIP3	4,91	P4285VYHR	9,98	ExtendaxRR2	10,57
P4285VYHR	4,76	P40537PWU	4,90	SS204EVIP3	8,59	P40537PWU	8,53
ExtendaxRR2	4,74	AG8701PRO4	4,88	P40537PWU	7,99	P4285VYHR	7,83
BM855PRO2	4,73	BM855PRO2	4,69	ExtendaxRR2	7,84	AS1868PRO4	7,02
P40537PWU	4,71	P4285VYHR	4,68	AS1868PRO4	7,66	AG8701PRO4	6,70
AS1868PRO4	4,69	AS1868PRO4	4,63	BM855PRO2	5,98	SS204EVIP3	6,52
AG8701PRO4	4,61	ExtendaxRR2	4,61	AG8701PRO4	5,69	BM855PRO2	4,72
CRA (mm)				CRC (mm)			
Ausência de Al³⁺		Presença de Al³⁺		Ausência de Al³⁺		Presença de Al³⁺	
SS204EVIP3	34,75	AS1868PRO4	25,06	SS204EVIP3	36,78	P4285VYHR	26,35
P4285VYHR	31,67	P4285VYHR	24,56	P4285VYHR	26,84	AG8701PRO4	20,48
P40537PWU	28,23	ExtendaxRR2	19,54	P40537PWU	25,41	BM855PRO2	19,48
ExtendaxRR2	27,29	P40537PWU	19,28	ExtendaxRR2	20,57	ExtendaxRR2	18,51
BM855PRO2	14,38	AG8701PRO4	18,84	BM855PRO2	14,12	P40537PWU	16,82
AS1868PRO4	10,94	BM855PRO2	18,16	AG8701PRO4	8,39	AS1868PRO4	15,10
AG8701PRO4	2,13	SS204EVIP3	15,62	AS1868PRO4	8,13	SS204EVIP3	14,90
R/C				MFP (g)			
Ausência de Al³⁺		Presença de Al³⁺		Ausência de Al³⁺		Presença de Al³⁺	
SS204EVIP3	1,52	ExtendaxRR2	1,14	SS204EVIP3	0,76	SS204EVIP3	0,71
P40537PWU	1,27	P4285VYHR	1,02	P4285VYHR	0,69	BM855PRO2	0,71
P4285VYHR	1,17	AS1868PRO4	1,00	P40537PWU	0,68	P4285VYHR	0,69
ExtendaxRR2	1,01	BM855PRO2	0,92	ExtendaxRR2	0,67	AG8701PRO4	0,67
BM855PRO2	0,78	AG8701PRO4	0,84	BM855PRO2	0,66	AS1868PRO4	0,58
AS1868PRO4	0,70	SS204EVIP3	0,83	AG8701PRO4	0,56	P40537PWU	0,54
AG8701PRO4	0,43	P40537PWU	0,77	AS1868PRO4	0,56	ExtendaxRR2	0,51

Nota: PGP: porcentagem de germinação na primeira contagem; PGF: porcentagem de germinação na contagem final; TMG: tempo médio de germinação; IVG: índice de velocidade de germinação; CRA: comprimento de radículas; CCO: comprimento de coleótilos; R/C: razão raiz:coleótilo; MFP: matéria fresca de plântulas.

O híbrido P4285VYHR se destacou pelo seu maior percentual de germinação inicial e final, além de maior índice de velocidade de germinação. Entretanto, ele é impactado pela toxicidade do alumínio, que causa perdas na ordem de 20% para PGP, IVG e CRA.

O híbrido SS204EVIP3 apresentou valores genéticos elevados para a proporção de sementes germinadas e para a velocidade de germinação, mas foi um dos mais impactados pelo efeito do alumínio. Na presença desse elemento, houve perda na ordem de 50% para a proporção de sementes germinadas inicialmente,

demonstrando um atraso no processo germinativo; assim como para os comprimentos de radícula e coleótilo. Esse mesmo híbrido ainda apresentou perdas de cerca de 20% na proporção final de germinação e em seu IVG. Assim, evidenciando uma maior sensibilidade ao estresse pela presença desse elemento.

Dentre os materiais avaliados, o híbrido AG8701PRO4 apresentou uma germinação mais lenta e menos vigorosa, mesmo na ausência de Al^{3+} e, assim, foi menos impactado pela presença do elemento. Esse híbrido foi capaz de germinar e desenvolver radículas e coleótilos ligeiramente maiores nessa condição, entretanto, ainda bem inferiores ao demonstrado por outros híbridos na ausência de alumínio trocável no meio.

Considerando-se os valores genéticos no ambiente com presença de Al^{3+} , é possível inferir que alguns híbridos, como ExtendaxRR2 e P4285VYHR, apesar de apresentarem perdas em alguns aspectos germinativos, demonstraram um nível maior de tolerância relativa ao alumínio em comparação com os demais. Enquanto outros, como SS204EVIP3, P40537PWU e BM855PRO2, foram mais sensíveis a presença desse elemento no meio.

A diferença nos agrupamentos entre híbridos para cada condição apresentada nos dendogramas (Figura 2) indica que o efeito detrimental causado pelo alumínio modulou a expressão das características de forma suficiente para modificar os padrões de germinação, entretanto, nota-se que muitos dos híbridos permaneceram no mesmo grupo, independentemente da presença de Al^{3+} , evidenciando o efeito genético sobre os padrões germinativos. Os coeficientes de correlação cofenética relativamente elevados demonstraram que o método de agrupamento foi adequado, sem distorções expressivas entre a matriz de distâncias gráficas e a matriz de distâncias originais.

Nota-se que o híbrido AG8701PRO4 permaneceu em um grupo isolado nos dois cenários, demonstrando que o seu desempenho germinativo não variou tanto com a presença do alumínio. Como ExtendaxRR2 e P4285VYHR apresentaram perdas em alguns aspectos, mas mantiveram valores elevados para outros sob influência do alumínio, era esperado que eles permanecessem relativamente próximos entre as duas condições.

Esses resultados revelam que é possível verificar níveis diferentes de tolerância e sensibilidade de híbridos de milho ao alumínio, permitindo identificar padrões diferenciados entre eles. O evidente impacto do alumínio mostra a importância da correção do solo durante o estabelecimento das plantas, podendo gerar não apenas as perdas relatadas nesse estudo, mas limitar o crescimento e o desenvolvimento das plantas no campo, seja pelo seu efeito tóxico ou pelo efeito da acidez sobre a disponibilidade de outros nutrientes.

Existem estudos que buscam descrever mecanismos de detoxificação, a expressão gênica e a produção de ácidos orgânicos em híbridos tolerantes, os quais explicam a ocorrência da tolerância ao alumínio por parte de alguns genótipos de milho (Milane *et al.*, 2014; Zhang *et al.*, 2017; Rahman; Upadhyaya, 2021). Entretanto, ainda existe a necessidade de se estabelecer estratégias práticas e eficientes para quantificar níveis de tolerância ou sensibilidade ao alumínio e para classificar corretamente as cultivares disponíveis no Brasil. Esses estudos, em paralelo a estratégias mais eficientes para o manejo de solos ácidos, devem contribuir para a sustentabilidade da produção agrícola em áreas afetadas pela toxidez por Al^{3+} (Milane *et al.*, 2014; Zhang *et al.*, 2017).

Níveis de sensibilidade diferentes remetem à necessidade de uma adequada correção da acidez do solo para que o Al^{3+} não cause prejuízos ao desenvolvimento das plantas. Além disso, observa-se a importância do uso de água de qualidade para o tratamento das sementes e para irrigação.

Aprofundar o conhecimento acerca da resposta de híbridos de milho a condições de diferentes concentrações de alumínio trocável tem especial importância para entender os mecanismos de adaptação da espécie a solos ácidos. Além de contribuir para estratégias de melhoramento genético e para recomendação mais racional de híbridos, visando uma agricultura mais resiliente. Otimizar a seleção de híbridos com melhor desempenho em condições adversas pode ser uma estratégia importante para aumentar o sinergismo entre o melhoramento de plantas e o manejo da fertilidade de solo.

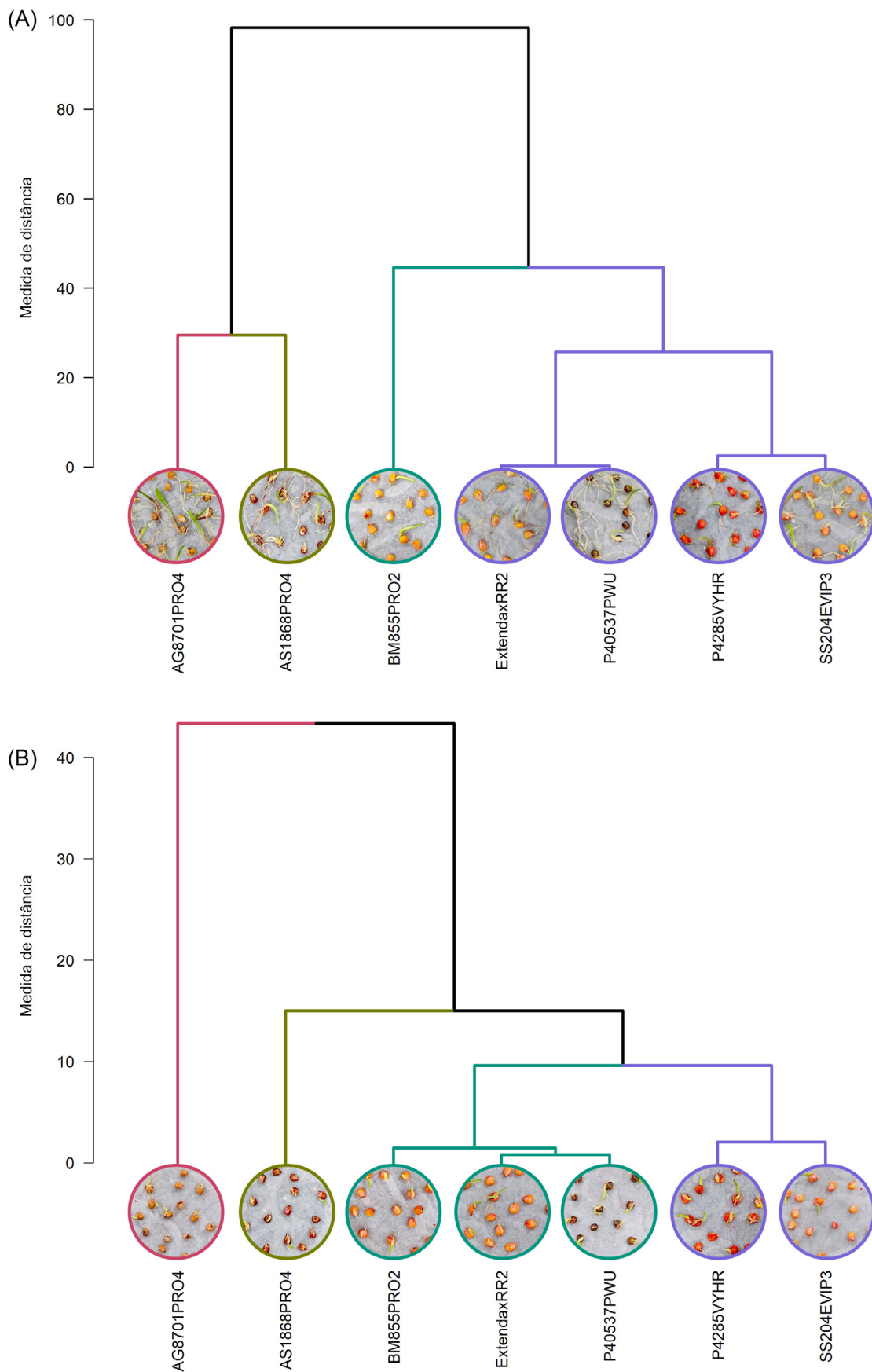


Figura 2 – Dendrogramas representativos dos agrupamentos de sete híbridos de milho sujeitos a germinação em condições de ausência (A) e presença (B) de Al^{3+} no meio (coeficientes de correlação cofenética de 0,8898 e 0,9626, respectivamente).

CONCLUSÃO

Há variabilidade genética entre híbridos de milho para características germinativas, mas os efeitos da presença de alumínio trocável e da interação entre efeitos genotípicos e ambientais se mostraram mais determinantes da variabilidade fenotípica observada.

A presença de alumínio trocável, no nível estudado, causou limitações de diferentes características da germinação das sementes para a maioria dos híbridos de milho.

É possível observar diferentes níveis de sensibilidade ou tolerância dos híbridos, enquanto ExtendaxRR2 e P4285VYHR apresentaram germinação relativamente melhor do que os demais sob condições de presença de alumínio, SS204EVIP3, P40537PWU e BM855PRO2 se mostraram mais sensíveis.

CONTRIBUIÇÃO DOS AUTORES

Gustavo de Freitas Mafort, Samuel Ferreira Ribeiro e Ariana Elisa Rodrigues Marteline realizaram pré-testes, prepararam as soluções e materiais e coletaram os dados dos testes de germinação, sob orientação de Wagner Nunes Rodrigues. Ismael Nacarati da Silva e Tafarel Victor Colodetti participaram da delimitação da metodologia e da organização, interpretação e discussão dos resultados. João Felipe de Brites Senra e Wagner Nunes Rodrigues construíram os scripts usados para realização das análises de dados.

CONFLITO DE INTERESSES

Os autores declaram não haver conflito de interesses.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Centro Universitário Unifacig pelo acesso aos laboratórios e equipamentos necessários para a realização do ensaio experimental.

REFERÊNCIAS

- AGROCERES. **Sementes de milho**: AG 8701 PRO4. Rio Verde-GO: Bayer Crop Science, 2024a. Disponível em: <https://www.agro.bayer.com.br/d/milho-agroceres-ag-8701-pro4-br>. Acesso em: 18 jul. 2025.
- AGROCERES. **Sementes de milho**: AS 1868 PRO4 – safrinha tropical terras altas. Rio Verde-GO: Bayer Crop Science, 2024b. Disponível em: <https://www.agro.bayer.com.br/d/milho-agroeste-as-1868-pro4-safrinha-tropical-terras-altas-br>. Acesso em: 18 jul. 2025.

ALVES, R. M. *et al.* Aluminium toxicity: oxidative stress during germination and early development in purple maize. **Revista Ciência Agronômica**, Fortaleza, v. 53, e20207676, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.5935/1806-6690.20220039>. Acesso em: 18 jul. 2025.

BARROS, V. A. *et al.* Root adaptation via common genetic factors conditioning tolerance to multiple stresses for crops cultivated on acidic tropical soils. **Frontiers in Plant Science**, Lausanne, v. 11, n. e5655339, p. 1-25, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.3389/fpls.2020.5655339>. Acesso em: 18 jul. 2025.

BIOMATRIX. **BM 855**: estável e produtivo para verão e safrinha. Patos de Minas-MG: Grupo Agroceres, 2024a. Disponível em: <https://sementesbiomatrix.com.br/produtos/bm-855>. Acesso em: 18 jul. 2025.

BIOMATRIX. **GLYFOS RR**: híbrido para refúgio que protege sua lavoura. Patos de Minas-MG: Grupo Agroceres, 2024b. Disponível em: <https://sementesbiomatrix.com.br/produtos/glyfos-rr>. Acesso em: 18 jul. 2025.

BRASIL. **Regras para análise de sementes**. Brasília-DF: Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento, 2009.

COVARRUBIAS-PAZARAN, G. Genome assisted prediction of quantitative traits using the R package *sommer*. **PLOS One**, San Francisco, v. 11, p. 1-15, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0156744>. Acesso em: 18 jul. 2025.

GALLI, T. Dendextend: an R package for visualizing, adjusting, and comparing trees of hierarchical clustering. **Bioinformatics**, Oxford, v. 31, n. 22, p. 3718-3720, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1093/bioinformatics/btv428>.

GALVÃO, J. C. C.; BORÉM, A.; PIMENTEL, M. A. **Milho**: do plantio à colheita. Viçosa-MG: Editora UFV, 2017.

GIANNAKOULA, A. *et al.* 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**, Edinburgh, v. 39, p. 487-494, 2010.

GUSEVA, S. A. *et al.* Evaluation of the influence of abiotic environmental factors on the cob structure elements formation of sweet corn cultivar samples in the Saratov Region. **Agricultural Science Euro-North-East**, Kirov, v. 26, n. 1, p. 70-81, 2025. Disponível em: <https://doi.org/10.30766/2072-9081.2025.26.1.70-81>. Acesso em: 18 jul. 2025.

KOCHIAN, L. V. *et al.* Plant adaptation to acid soils: the molecular basis for crop aluminum resistance. **Annual Review of Plant Biology**, Berkeley, v. 66, p. 571-598, 2015.

LABORIAU, L. G.; VALADARES, M. E. B. On the germination of seeds *Calotropis procera* (Ait.) f. **Anais da Academia Brasileira de Ciências**, Rio de Janeiro, v. 48, n. 2, p. 263-284, 1976.

LÊ, S. J. J.; HUSSON, F. FactoMineR: an R package for multivariate analysis. **Journal of Statistical Software**, Innsbruck, v. 25, n. 1, p. 1-18, 2008. Disponível em: <https://doi.org/10.18637/jss.v025.i01>. Acesso em: 18 jul. 2025.

LIU, H. *et al.* Aluminum stress signaling, response, and adaptive mechanisms in plants. **Plant Signaling & Behavior**, Abingdon, v. 17, n. 1, p. 1-11, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/15592324.2022.2057060>. Acesso em: 18 jul. 2025.

- MA, J. F.; RYAN, P. R.; DELHAIZE, E. Aluminium tolerance in plants and the complexing role of organic acids. **Trends in Plant Science**, Cambridge, v. 6, n. 6, p. 273–278, 2001. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/S1360-1385\(01\)01961-6](https://doi.org/10.1016/S1360-1385(01)01961-6). Acesso em: 18 jul. 2025.
- MAECHLER, M. *et al.* **Cluster**: cluster analysis basics and extensions. Vienna: R Foundation for Statistical Computing, 2025. Disponível em: <https://CRAN.R-project.org/package=cluster>. Acesso em: 13 jun. 2025. (Manual, versão 2.1.8.1).
- MAFORT, G. F. *et al.* Avaliação precoce da sensibilidade ao alumínio de híbridos de milho empregando teste de germinação. **Pensar Acadêmico**, Manhuaçu, v. 22, p. 485–501, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.21576/pensaracadmico.2024v22i5.4357>. Acesso em: 18 jul. 2025.
- MAGUIRE, J. D. Speed of germination—aid in selection and evaluation for seedling emergence and vigor. **Crop Science**, Lubbock, v. 2, n. 1, p. 176–177, 1962.
- MAPA – MINISTÉRIO DA AGRICULTURA, PECUÁRIA E ABASTECIMENTO. **Registro nacional de cultivares**. Brasília-DF: Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento, 2024. Disponível em: https://sistemas.agricultura.gov.br/snpc/cultivarweb/cultivares_registradas.php. Acesso em: 18 jul. 2025.
- MATONYEI, T. *et al.* Aluminum tolerance mechanisms in Kenyan maize germplasm are independent from the citrate transporter ZmMATE1. **Scientific Reports**, Londres, v. 10, n. 1, p. e7320, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1038/s41598-020-64107-z>. Acesso em: 18 jul. 2025.
- MAZZOCATO, A. C. *et al.* Tolerância ao alumínio em plântulas de milho. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 32, n. 1, p. 19–24, 2002.
- MEIRELLES, W. F.; GUIMARÃES, P. E. O. Milhos Especiais da Embrapa. In: RETORE, M.; PEZARICO, C. R. (ed.). **Tecnologias para a agricultura familiar**. 5. ed. Dourados: Embrapa Agropecuária Oeste, 2024. p. 71–76.
- MILANE, L. V. *et al.* Acidez e alumínio na germinação e desenvolvimento inicial de plântulas de milho. **Journal of Agronomic Sciences**, Umuarama, v. 3, n. 1, p. 188–198, 2014.
- MUKRI, G.; *et al.* A combination of analytical methods dissects genotype × environment interaction precisely and facilitates the selection of potential new field corn (*Zea mays* L.) hybrids. **Indian Journal of Genetics and Plant Breeding**, New Delhi, v. 84, n. 3, p. 336–345, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.31742/ISGPB.84.3.4>. Acesso em: 18 jul. 2025.
- NIDERA SEMENTES. **NS 80 VIP3**: em diferentes ambientes, um só híbrido; 2024. Disponível em: <https://www.niderasementes.com.br/portfolio/ns-80-vip3>. Acesso em: 18 jul. 2025.
- OLUNG'ATI, E. *et al.* Tolerance, heritability, and heterosis for aluminium toxicity tolerance for ALXMSV maize single crosses. **East African Journal of Agriculture and Biotechnology**, Nairobi, v. 6, n. 1, p. 359–368, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.37284/eajab.6.1.1471>. Acesso em: 18 jul. 2025.
- PINTO, V. B. *et al.* Uncovering the transcriptional response of popcorn (*Zea mays* L. var. everta) under long-term aluminum toxicity. **Scientific Reports**, Londres, v. 11, n. 1, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1038/s41598-021-99097-z>. Acesso em: 18 jul. 2025.
- PIONEER. **Milho**: P40537PWU. 2024a. Disponível em: <https://www.pioneer.com/br/portfolio-de-produtos/milho-todos/P40537PWU.html>. Acesso em: 18 jul. 2025.
- PIONEER. **Milho**: P4285VYHR. 2024b. Disponível em: <https://www.pioneer.com/br/portfolio-de-produtos/milho-todos/P4285VYHR.html>. Acesso em: 18 jul. 2025.
- PREZOTTI, L. C. *et al.* **Manual de recomendação de calagem e adubação para o Estado do Espírito Santo**: 5ª aproximação. Vitória-ES: SEEA; Incaper; Cedagro, 2007.
- R CORE TEAM. **R**: a language and environment for statistical computing. Vienna: R Foundation for Statistical Computing, 2025. Disponível em: <https://www.R-project.org>. Acesso em: 18 jul. 2025.
- RAHMAN, R.; UPADHYAYA, H. Aluminium toxicity and its tolerance in plant: a review. **Journal of Plant Biology Article**, Herndon, v. 64, p. 101–121, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s12374-020-09280-4>. Acesso em: 18 jul. 2025.
- RESENDE, M. D. V.; DUATE, J. B. Precisão e controle de qualidade em experimentos de avaliação de cultivares. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, Goiânia, v. 37, n. 3, p. 182–194, 2007.
- RIBEIRO, A. C.; GUIMARÃES, P. T. G.; ALVAREZ, V. H. **Recomendações para o uso de corretivos e fertilizantes em Minas Gerais**: 5ª aproximação. Viçosa-MG: CFSEMG, 1999.
- SINGH, S. *et al.* Toxicity of aluminium on various levels of plant cells and organism: a review. **Environmental and Experimental Botany**, Lancaster, v. 137, p. 1–63, 2017.
- SINGH, V. K. *et al.* Genetic variability for aluminium tolerance in sunflower (*Helianthus annuus* L.). **Czech Journal of Genetics and Plant Breeding**, Praha, v. 58, n. 4, p. 201–209, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.17221/110/2021-CJGPB>. Acesso em: 18 jul. 2025.
- STANSLUOS, A. A. L. *et al.* Genotype–Trait (GT) Biplot analysis for yield and quality stability in some sweet corn (*Zea mays* L. *saccharata* Sturt.) genotypes. **Agronomy**, Basel, v. 13, n. 6, p. 1–19, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/agronomy13061538>. Acesso em: 18 jul. 2025.
- TAIZ, L. *et al.* **Fisiologia e desenvolvimento vegetal**. Porto Alegre: Artmed, 2017.
- VENABLES, W. N.; RIPLEY, B. D. **Modern applied statistics with S**. 4.ed. New York: Springer, 2002.
- WICKHAM, H. **Ggplot2**: elegant graphics for data analysis. New York: Springer-Verlag, 2016.
- ZHANG, J. *et al.* The role of the plasma membrane H⁺-ATPase in plant responses to aluminum toxicity. **Frontiers in Plant Science**, Beijing, v. 8, 2017.