

## ESTRESSE POR ALUMÍNIO NO CRESCIMENTO DE MUDAS DE CULTIVARES DE CAFÉ ARÁBICA

**SAMUEL FERREIRA RIBEIRO<sup>1</sup>; GUSTAVO DE FREITAS MAFORT<sup>2</sup>; TAFAREL VICTOR COLODETTI<sup>3</sup>; WAGNER NUNES RODRIGUES<sup>4</sup>**

<sup>1</sup>Graduando em Engenharia Agrônômica pelo Centro Universitário UNIFACIG. E-mail: 2210064@sempre.unifacig.edu.br

<sup>2</sup>Graduando em Engenharia Agrônômica pelo Centro Universitário UNIFACIG. E-mail: 2210274@sempre.unifacig.edu.br

<sup>3</sup>Profissional do Instituto Capixaba de Pesquisa, Assistência Técnica e Extensão Rural, Centro de Pesquisa, Desenvolvimento e Inovação Sul. E-mail: tafarel.colodetti@incaper.es.gov.br

<sup>4</sup>Professor do Centro Universitário UNIFACIG. Profissional do Instituto Capixaba de Pesquisa, Assistência Técnica e Extensão Rural, Centro de Pesquisa, Desenvolvimento e Inovação Sul. E-mail: wagner.rodrigues@incaper.es.gov.br

### RESUMO

O presente trabalho foi desenvolvido com o objetivo de avaliar o crescimento de mudas de cultivares de café arábica submetidas a condições de diferentes concentrações de alumínio no solo. O ensaio experimental seguiu esquema fatorial 7×3, testando sete cultivares de café arábica e três níveis de concentração de alumínio (0,0; 0,5 e 1,0 cmol/dm<sup>3</sup>), em delineamento inteiramente casualizado, empregando-se três repetições. As plantas jovens foram avaliadas aos 90 dias após o estabelecimento dos tratamentos, com quantificação de parâmetros de crescimento e acúmulo de biomassa. Os resultados demonstraram a existência de diferenças significativas entre cultivares de café arábica quanto à resposta à presença e à concentração de alumínio no solo. Foi possível identificar diferentes níveis de sensibilidade e quantificar perdas para diferentes parâmetros de crescimento no desenvolvimento inicial das mudas. A cultivar Guará se destacou positivamente, apresentando crescimento superior para a maioria das variáveis avaliadas, mesmo sob condições de estresse por alumínio. Entretanto, é importante ressaltar que, embora Guará tenha apresentado maior resiliência, ainda assim sofreu perdas significativas. Catucaí Amarelo 20/15 cv 479, Catucaí Vermelho 785/15 e Paraíso MG H 419-1 se apresentaram mais sensíveis ao efeito do alumínio, com perdas acentuadas no crescimento foliar e de caules. A interação genótipo × ambiente evidenciada neste estudo revela a complexidade das respostas das diferentes cultivares ao estresse por alumínio, reforçando a importância de estratégias integradas que envolvam tanto a escolha de genótipos mais tolerantes quanto o uso de práticas agrônômicas adequadas à mitigação da acidez do solo, como a calagem.

**Palavras-chave:** Acidez; Biomassa; *Coffea arabica*; Fertilidade do solo.

### ALUMINUM STRESS ON THE GROWTH OF SEEDLINGS OF ARABICA COFFEE CULTIVARS

#### ABSTRACT

The present study was carried out with the objective of evaluating the growth of seedlings of Arabica coffee cultivars subjected to different concentrations of aluminum in the soil. The experimental trial followed a 7×3 factorial scheme, testing seven Arabica coffee cultivars and three levels of aluminum concentration (0.0, 0.5, and 1.0 cmol/dm<sup>3</sup>), in a completely randomized design, with three replications. The young plants were evaluated 90 days after the establishment of the treatments, with quantification of growth parameters and biomass accumulation. The results demonstrated significant differences among Arabica coffee cultivars regarding their response to the presence and concentration of aluminum in the soil. It was possible to identify different levels of sensitivity and quantify losses in various growth parameters during the early development of the seedlings. The cultivar Guará stood out positively, showing superior growth for most of the evaluated variables, even under aluminum stress

conditions. However, it is important to note that although Guará exhibited greater resilience, it still suffered significant losses. Catucaí Amarelo 20/15 cv 479, Catucaí Vermelho 785/15, and Paraíso MG H 419-1 proved more sensitive to the effect of aluminum, with marked reductions in leaf and stem growth. The genotype  $\times$  environment interaction evidenced in this study reveals the complexity of the responses of different cultivars to aluminum stress, reinforcing the importance of integrated strategies that involve both the selection of more tolerant genotypes and the adoption of agronomic practices aimed at mitigating soil acidity, such as liming.

**Keywords:** Acidity; Biomass; *Coffea arabica*; Soil fertility.

## 1 INTRODUÇÃO

O café é uma bebida popular em todo o mundo e o Brasil é o maior produtor e exportador mundial desse produto agrícola (International Coffee Organization, 2024). Em Minas Gerais, o cultivo do café arábica (*Coffea arabica* L.) desempenha um papel fundamental na economia e na cultura do estado. Apresentando clima favorável e regiões com altitudes elevadas, Minas Gerais oferece condições excepcionais para a produção de café arábica de qualidade. Segundo Mesquita *et al.* (2016), o café é o principal produto da pauta de exportações do agronegócio mineiro, gerando empregos, renda e sustentando milhares de famílias de agricultores. Além disso, Minas Gerais é o maior produtor nacional dessa espécie de café, representando cerca de 70% da produção nacional e 30% da produção mundial (Cavaton; Ferreira, 2020). Além de sua importância socioeconômica, a cafeicultura de arábica é uma tradição enraizada na própria história do estado de Minas Gerais (Araújo; Silva; Rocha, 2023).

Para a formação de uma lavoura de café produtiva, diversos fatores devem ser levados em consideração. Como uma grande diversidade de cultivares adaptadas à cafeicultura brasileira estão disponíveis, a escolha de uma cultivar adequada é fundamental para o sucesso da produção (Carvalho *et al.*, 2010; Rodrigues *et al.*, 2016). Além disso, é necessário empregar mudas de qualidade, capazes de formar cafeeiros com melhor distribuição de massa, maior eficiência na absorção de nutrientes e água, menos suscetíveis a estresses climáticos ou ataque de patógenos (Silva, 2017).

Diferentes cultivares de café apresentam diferenças genéticas que, muitas vezes, resultam na expressão de diferenças fisiológicas, morfológicas e químicas entre as plantas (Carvalho, 2008). Sendo possível que diferenças na composição do pergaminho ou na concentração de compostos fenólicos nas sementes possam ter efeito sobre o potencial germinativo das mesmas. Dessa forma, supõe-se que é possível estudar as possíveis diferenças entre cultivares, agrupando aquelas que apresentam comportamento germinativo semelhante. Essa informação pode ser útil no planejamento das atividades de produção de

mudas, de forma a gerar lotes mais homogêneos quanto a germinação para facilitar as operações de manejo no viveiro.

Além disso, diversos fatores extrínsecos à planta também irão influenciar no seu potencial germinativo, tal como a temperatura, a umidade, a luz e a salinidade ou concentração de solutos na solução do solo (Sales *et al.*, 2003). Dentre os diversos solutos, as formas trocáveis do alumínio, além de ter efeitos tóxicos nas raízes do café, podem prejudicar a germinação de suas sementes (Macedo *et al.*, 2008; Macedo; Lopes, 2008).

O alumínio é um elemento abundante nos solos, principalmente em solos ácidos, e interfere significativamente no desenvolvimento das plantas. Compostos de alumínio podem se tornar prontamente solúveis, sob condições de acidez elevada, gerando alumínio trocável que pode afetar o metabolismo e o vigor das plantas. A toxicidade do alumínio nas plantas é um fenômeno complexo, causado por efeitos deletérios que as formas trocáveis desse elemento podem causar, tal como a inibição da absorção de nutrientes, a limitação da fotossíntese e danos bioquímicos, os quais resultam na limitação do crescimento das raízes e na germinação das sementes (Souza; Miranda; Oliveira, 2007).

Associando-se os fatores descritos anteriormente, cria-se a hipótese de que diferentes cultivares de café arábica podem responder de modo diferente à concentração de alumínio no meio, resultando em diferenças já no crescimento inicial das mudas. Essas diferenças podem ser quantificadas de forma a classificar cultivares de café quanto a sensibilidade ao alumínio.

Nesse contexto, o presente trabalho foi desenvolvido com o objetivo de avaliar o crescimento de mudas de sete cultivares de café arábica, submetidas a condições de diferentes concentrações de alumínio no solo.

## **METODOLOGIA**

O trabalho foi desenvolvido como uma pesquisa explicativa, utilizando ensaio experimental, com manipulação das variáveis independentes para criar e comparar o efeito dos tratamentos sobre variáveis relacionadas ao crescimento das mudas. O trabalho foi desenvolvido em uma propriedade rural, localizada no córrego Barra de Santa Rosa, no município de Irupi-ES.

O ensaio experimental seguiu esquema fatorial 7×3, testando sete cultivares de café arábica submetidas a três níveis de concentração de alumínio. A parcela experimental foi composta por uma muda de café distribuída em delineamento inteiramente casualizado dentro de ambiente protegido, empregando-se três repetições.

As sete cultivares de café arábica foram selecionadas levando em consideração os critérios: (i) diversidade para descritores de importância agrônômica, visando ampliar a base amostral no experimento; (ii) potencial para cultivo na região do Caparaó; (iii) ineditividade ou escassez de estudos sobre a produção de mudas e sensibilidade ao alumínio, visando gerar conhecimento científico para cultivares mais recentes ou que ainda carecem de informação acerca de seu crescimento inicial. As cultivares selecionadas são descritas na Tabela 1.

**Tabela 1** – Cultivares selecionadas para o estudo e breve descrição de suas características.

Nome	Desenvolvimento/ Mantenedor	Características
Paraíso MG H 419-1	UFV	Porte baixo, resistente à ferrugem e boa resposta a poda. <sup>1</sup>
Acauãma	Fundação ProCafé	Porte baixo, resistente à ferrugem e ao déficit hídrico. <sup>1</sup>
IAC 125 RN	IAC	Maturação precoce, resistente à ferrugem e às duas raças de nematoide <i>Meloidogyne exigua</i> . <sup>2</sup>
Catucaí Amarelo 20/15 cv 479	IBC	Porte baixo, crescimento vigoroso e incidência relativamente menor de <i>Phoma</i> . <sup>3</sup>
Catucaí Vermelho 785/15	IBC	Tolerante à ferrugem e ao <i>Meloidogyne exigua</i> . <sup>3</sup>
Azulão	Fundação Procafé	Material vigoroso, com boa resposta à poda e com boa tolerância à seca. <sup>1</sup>
Guará	Fundação Procafé	Excelente comportamento no Cerrado Mineiro e Sul de Minas. Menor queda de frutos Maior aderência de frutos à planta. <sup>1</sup>

Fonte: Adaptados de <sup>1</sup>Carvalho *et al.* (2022); <sup>2</sup>Fazuoli *et al.* (2013) e <sup>3</sup>Carvalho *et al.* (2008).

Mudas das cultivares previamente listadas foram obtidas de viveiro idôneo, sendo padronizadas em termos de aspecto vegetativo, altura e número de folhas. Todas as mudas selecionadas apresentaram dois pares de folhas definitivas. As mesmas foram aleatoriamente selecionadas para compor os tratamentos com diferentes concentrações de alumínio. Essas mudas foram dispostas em ambiente protegido e submetidas à imposição dos tratamentos, mantendo-se o cultivo nos recipientes oriundos do viveiro (sacolinhas de polietileno 20 × 10 cm, com volume de 637 cm<sup>3</sup>).

Os três níveis de concentração de alumínio no solo foram formados através do preparo de soluções aquosas com cloreto de alumínio (AlCl<sub>3</sub>). As soluções foram preparadas e diluídas de forma a criar as três condições de concentração de alumínio, correspondentes à 0,0 cmol<sub>c</sub>/dm<sup>3</sup> (ausência de alumínio no solo); 0,5 cmol<sub>c</sub>/dm<sup>3</sup> (nível considerado de intermediário a elevado de alumínio no solo); e 1,0 cmol<sub>c</sub>/dm<sup>3</sup> (nível elevado de alumínio no solo).

As soluções foram usadas para tratar o solo no qual as mudas foram cultivadas por um período de 90 dias. As mudas foram irrigadas diariamente, de forma a repor a umidade perdida e plantas espontâneas foram removidas manualmente sempre que necessário.

Ao final desse período, o crescimento das mudas foi avaliado quanto a: altura (ALT; cm), medida com regra graduada; número de folhas (NFO; unidades), medido por contagem direta; e área foliar (AFO; cm<sup>2</sup>), medido pelo método não-destrutivo das dimensões lineares de Barros *et al.* (1973). Após essas mensurações, as plantas jovens serão coletadas e separadas em caules, folhas e raízes. As partes vegetais serão submetidas a secagem, até que o material atinja peso constante, e pesadas em balança de precisão para obter a massa de matéria seca de caules (MSC; g), folhas (MSF; g) e raízes (MSR; g).

Os dados obtidos foram submetidos à análise de variância e, respeitando-se a significância das fontes de variação, o teste de Scott-Knott foi empregado para o agrupamento das cultivares em grupos homogêneos e o teste de Tukey foi empregado para estudar a resposta às concentrações de alumínio. As análises estatísticas foram realizadas com auxílio do programa computacional SISVAR (Ferreira, 2011).

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

A análise de variância demonstrou a existência de diferenças significativas para a altura das plantas das diferentes cultivares, mas que a alteração da concentração de alumínio no solo não afetou significativamente esse parâmetro. Para número de folhas e matéria seca de raízes, houve efeito significativo para ambas fontes de variação, sem ocorrência de interação entre as mesmas. Para as demais variáveis dependentes, houve significância para a interação entre o efeito das cultivares e das concentrações de alumínio (Tabela 2).

**Tabela 2** – Resumo da análise de variância, médias gerais e coeficientes de variação para características de crescimento e acúmulo de matéria seca de plantas jovens de cultivares de café arábica submetido a diferentes condições de concentração de alumínio no solo (Irupi-ES).

Fonte de variação	GL <sup>1</sup>	Quadrados médios		
		ALT <sup>2</sup>	NFO <sup>3</sup>	AFO <sup>4</sup>
Cultivares (C)	6	55,8743*	12,4233*	85.689,6228*
Alumínio (Al)	2	5,0040	16,3333*	207.616,6567*
Interação (C*Al)	12	4,1521	2,2963	25.632,5503*
Erro	42	2,8571	1,3968	5.342,6390
Média geral		13,90	9,10	370,51
CV <sup>6</sup> (%)		12,16	12,99	19,73
Fonte de variação	GL <sup>1</sup>	MSC <sup>5</sup>	MSF <sup>7</sup>	MSR <sup>8</sup>

Cultivares (C)	6	0,1200*	0,4855*	1,0157*
Alumínio (Al)	2	0,0237*	0,1257	0,1485*
Interação (C*Al)	12	0,0113*	0,0692*	0,0067
Erro	42	0,0021	0,0178	0,0179
Média geral		0,41	0,73	0,73
CV <sup>6</sup> (%)		11,13	18,37	15,08

<sup>1</sup>Graus de liberdade; <sup>2</sup>altura (cm); <sup>3</sup>número de folhas; <sup>4</sup>área foliar (cm<sup>2</sup>); <sup>5</sup>matéria seca de caules (g); <sup>6</sup>coeficiente de variação; <sup>7</sup>matéria seca de folhas (g); <sup>8</sup>matéria seca de raízes (g); <sup>9</sup>matéria seca total (g); <sup>10</sup>razão de massa entre raízes e parte aérea; \*Significativo a 5% de probabilidade, pelo teste F.

Fonte: Os autores (2025).

A existências de respostas diferenciadas demonstram a variabilidade genética entre as cultivares de *C. arabica* em relação à sensibilidade ao alumínio trocável, sugerindo a possibilidade de selecionar genótipos menos sensíveis para condições de solos com problemas recorrentes de acidez trocável (Macedo; Lopes, 2008). Essa variabilidade ressalta a importância de pesquisas futuras para identificar mecanismos fisiológicos específicos que contribuem para a tolerância ao alumínio, o que poderia subsidiar programas de melhoramento genético direcionados (Lambers; Chapin; Pons, 2008; Colodetti *et al.*, 2014).

A Tabela 3 mostra os efeitos das diferentes concentrações de alumínio e das diferentes cultivares, assim como os desdobramentos das interações para os casos onde ela foi significativa. Observa-se que, embora a altura das plântulas varie entre os tratamentos, algumas cultivares apresentam desempenho superior, independentemente da concentração de alumínio. As cultivares Guará e Catucaí Vermelho 785/15 foram estatisticamente agrupados na categoria com plantas mais altas, indicando que mantêm crescimento significativamente superior às demais cultivares, independente do efeito da concentração de alumínio. Para o número de folhas, um comportamento semelhante foi observado, mas, nesse caso, as cultivares que formaram um grupo com mais folhas foram Paraíso MG H 419-1, Azulão e Guará. Para o acúmulo de matéria seca de raízes, também não houve interação, sendo a cultivar Guará isoladamente a que apresentou plantas com maiores médias de biomassa radicular.

Para o desdobramento da interação para a área foliar, a cultivar Guará apresentou isoladamente a maior média para a condição de ausência de Al<sup>3+</sup>, e a mesma formou um grupo homogêneo e de maiores médias com a cultivar Catucaí Amarelo 20/15 cv 479 para a maior concentração de Al<sup>3+</sup>. Para a matéria seca de caules, a cultivar Guará também se destacou para a condição de ausência de Al<sup>3+</sup>, para as condições de presença desse elemento, Guará e Acauãma formaram o grupo de maior média para 0,5 cmol<sub>c</sub>/dm<sup>3</sup> e Guará e Catucaí Vermelho 785/15 para 1,0 cmol<sub>c</sub>/dm<sup>3</sup>. Para matéria seca foliar, as cultivares Guará e Catucaí

Amarelo 20/15 cv 479 se destacaram para a condição de ausência de  $Al^{3+}$ , Guará e Acauãma para a condição de  $0,5 \text{ cmol}_e/\text{dm}^3$  de  $Al^{3+}$  e Guará isoladamente de  $1,0 \text{ cmol}_e/\text{dm}^3$  de  $Al^{3+}$ .

**Tabela 3** – Médias para as características avaliadas em plantas jovens de sete cultivares de café arábica submetidas a diferentes condições de concentração de alumínio no solo (Irupi-ES).

Característica	Cultivares	Concentração de alumínio ( $\text{cmol}_e/\text{dm}^3$ )			
		0,0	0,5	1,0	Média
ALT <sup>1</sup> (cm)	Paraíso MG H 419-1	14,33	13,67	14,00	14,00 b
	Acauãma	12,67	11,50	11,17	11,78 b
	IAC 125 RN	11,67	11,83	12,50	12,00 b
	Catucaí Amarelo 20/15 cv 479	13,67	14,00	14,33	14,00 b
	Catucaí Vermelho 785/15	16,67	16,00	17,67	16,78 a
	Azulão	10,83	11,17	11,50	11,17 b
	Guará	20,83	15,67	16,17	17,56 a
	Média	14,38 A	13,40 A	13,90 A	13,90
NFO <sup>2</sup>	Paraíso MG H 419-1	11,67	8,67	9,00	9,78 a
	Acauãma	9,67	8,00	8,33	8,67 b
	IAC 125 RN	8,00	8,33	6,67	7,67 c
	Catucaí Amarelo 20/15 cv 479	9,00	9,33	8,67	9,00 b
	Catucaí Vermelho 785/15	8,67	8,33	6,33	7,78 c
	Azulão	13,00	10,00	9,67	10,89 a
	Guará	10,00	10,67	9,00	9,89 a
	Média	10,00 A	9,05 B	8,24 B	9,10
AFO <sup>3</sup> ( $\text{cm}^2$ )	Paraíso MG H 419-1	472,63 Ab	249,42 Ba	295,41 Bb	339,15
	Acauãma	406,79 Ac	347,06 Aa	299,58 Ab	351,15
	IAC 125 RN	324,03 Ac	328,63 Aa	233,60 Ab	295,42
	Catucaí Amarelo 20/15 cv 479	476,68 Ab	275,29 Ba	415,76 ABa	389,24
	Catucaí Vermelho 785/15	459,76 Ab	263,77 Ba	283,59 Bb	335,71
	Azulão	359,09 Ac	293,29 Aa	255,81 Ab	302,73
	Guará	897,96 Aa	413,67 Ba	428,99 Ba	580,21
	Média	485,28	310,16	316,11	370,51
MSC <sup>4</sup> (g)	Paraíso MG H 419-1	0,39 Ac	0,42 Ab	0,39 Ab	0,40
	Acauãma	0,44 Bc	0,55 Aa	0,33 Cb	0,44
	IAC 125 RN	0,32 Ad	0,31 Ac	0,33 Ab	0,32
	Catucaí Amarelo 20/15 cv 479	0,51 Ab	0,34 Bc	0,35 Bb	0,40
	Catucaí Vermelho 785/15	0,57 Ab	0,47 Bb	0,50 ABa	0,51
	Azulão	0,23 Ae	0,24 Ad	0,25 Ac	0,24
	Guará	0,68 Aa	0,56 Ba	0,52 Ba	0,59
	Média	0,45	0,41	0,38	0,41
MSF <sup>5</sup> (g)	Paraíso MG H 419-1	0,68 Ab	0,67 Ab	0,59 Ab	0,65
	Acauãma	0,79 Ab	0,92 Aa	0,73 Ab	0,81
	IAC 125 RN	0,71 Ab	0,52 Ab	0,55 Ab	0,59
	Catucaí Amarelo 20/15 cv 479	1,12 Aa	0,65 Bb	0,68 Bb	0,82
	Catucaí Vermelho 785/15	0,69 Ab	0,45 Bb	0,13 Bc	0,42
	Azulão	0,55 Ab	0,64 Ab	0,72 Ab	0,64

	Guará	1,14 Aa	1,10 Aa	1,22 Aa	1,16
	Média	0,81	0,71	0,66	0,73
MSR <sup>6</sup> (g)	Paraíso MG H 419-1	0,69	0,52	0,53	0,58 d
	Acauãma	0,59	0,57	0,51	0,56 d
	IAC 125 RN	0,63	0,40	0,44	0,49 d
	Catucaí Amarelo 20/15 cv 479	0,87	0,66	0,71	0,75 c
	Catucaí Vermelho 785/15	1,09	0,94	0,98	1,00 b
	Azulão	0,41	0,36	0,37	0,38 e
	Guará	1,49	1,24	1,28	1,34 a
	Média	0,82 A	0,67 B	0,69 B	0,73

<sup>1</sup>altura; <sup>2</sup>número de folhas; <sup>3</sup>área foliar; <sup>4</sup>matéria seca de caules; <sup>5</sup>matéria seca de folhas; <sup>6</sup>matéria seca de raízes. Médias seguidas da mesma letra minúscula na coluna (entre cultivares) e maiúscula na linha (alumínio) não diferem estatisticamente entre si pelos testes de Scott-Knott e Tukey, respectivamente, a 5% de probabilidade.

Fonte: Os autores (2025).

Considerando o efeito das concentrações de Al<sup>3+</sup>, não se observou efeito sobre a altura das plantas, entretanto, o número de folhas e a matéria seca de raízes já foram comprometidos pela presença de Al<sup>3+</sup> no meio, independentemente da concentração. Para a área foliar, observou-se que as cultivares Paraíso MG H 419-1, Catucaí Amarelo 20/15 cv 479, Catucaí Vermelho 785/15 e Guará apresentaram perdas, resultando em médias inferiores para as duas condições de presença de Al<sup>3+</sup>. Para a matéria seca de caules, as cultivares Acauãma apresentou perdas com a concentração de 1,0 cmol<sub>c</sub>/dm<sup>3</sup> de Al<sup>3+</sup> e as cultivares Catucaí Amarelo 20/15 cv 479, Catucaí Vermelho 785/15 e Guará apresentaram perdas já com a concentração de 0,5 cmol<sub>c</sub>/dm<sup>3</sup>. Para a matéria seca foliar, observou-se perdas para as cultivares Catucaí Amarelo 20/15 cv 479 e Catucaí Vermelho 785/15 com a presença de alumínio, independentemente da concentração.

Esta análise fornece indícios importantes sobre as respostas diferenciais de crescimento das plantas jovens, as quais podem ser úteis para a auxiliar na seleção de cultivares para cultivo em solos ácidos e ricos em alumínio. Essa resposta reforça ainda a necessidade de identificar mecanismos genéticos e fisiológicos que conferem um nível maior de tolerância ao alumínio às cultivares mais resilientes. Essas informações são cruciais para o desenvolvimento de práticas agrícolas sustentáveis em regiões afetadas pela acidez do solo. Além disso, os resultados revelam a existência de interações complexas, revelando respostas específicas de cultivares a níveis variáveis de alumínio e permitindo a identificação de genótipos mais resilientes ao estresse causado pelo alumínio. Essa caracterização auxilia no desenvolvimento de estratégias para mitigação dos efeitos adversos da acidez do solo, promovendo assim a viabilidade a longo prazo da produção de café nas regiões afetadas, ampliando o conhecimento acerca da sensibilidade de algumas cultivares ao alumínio trocável



e reforçando a necessidade de estratégias para a correção da acidez no manejo do solo (Vieira *et al.*, 2008).

A análise permite destacar a cultivar Guará, que obteve padrões superiores de crescimento em quase todas as características, mesmo sob aumento das concentrações de  $Al^{3+}$ . Essa superioridade pode ser atribuída à sua capacidade de manter um maior sistema radicular funcional, que superou os das demais cultivares, mesmo sofrendo perdas causadas pela presença de  $Al^{3+}$ . Esse fato permite com que as plantas mantenham uma melhor absorção de água e nutrientes e explica o maior acúmulo de biomassa. Além disso, essa cultivar apresentou maior estabilidade da massa seca de folhas, sugerindo uma melhor preservação de seu desempenho fotossintético, uma característica essencial para suportar o crescimento em ambientes limitantes. Entretanto, essa cultivar ainda apresentou perdas consideráveis de área foliar e matéria seca de caules na presença de  $Al^{3+}$ .

Além disso, algumas cultivares demonstraram maior sensibilidade ao efeito do  $Al^{3+}$ , com perdas significativas em área foliar (Paraíso MG H 419-1, Catucaí Amarelo 20/15 cv 479 e Catucaí Vermelho 785/15), matéria seca de caules e de folhas (Catucaí Amarelo 20/15 cv 479 e Catucaí Vermelho 785/15).

Os resultados reforçam a necessidade de escolha criteriosa de cultivares em função da acidez do solo, especialmente em regiões tropicais com solos naturalmente ácidos. Além disso, os dados podem ser utilizados para seleção assistida por fenótipos em programas de melhoramento genético voltados à tolerância ao alumínio, contribuindo para a sustentabilidade da cafeicultura em ambientes marginais. Além de reforçar a necessidade de correção da acidez do solo para que o alumínio não comprometa o desenvolvimento das plantas de café, em especial para cultivares que apresentam maior sensibilidade ao efeito tóxico desse elemento.

Portanto, a avaliação precoce da sensibilidade ao alumínio de cultivares é uma estratégia importante, não apenas para fins de seleção, mas também para fundamentar estratégias de manejo do solo que visem garantir o desenvolvimento inicial vigoroso das plantas de café, assegurando maior viabilidade agrônômica e sustentabilidade da produção a longo prazo. Tendo em vista que os prejuízos podem ainda ser mais intensos se as plantas forem cultivadas sob essas condições de estresse por um período mais longo.

## **CONSIDERAÇÕES FINAIS**

Há diferenças significativas entre cultivares de café arábica quanto à resposta à presença e à concentração de alumínio no solo onde as mudas estão se desenvolvendo. Dessa

forma, é possível identificar diferentes níveis de sensibilidade e quantificar perdas para diferentes parâmetros de crescimento inicial das mudas.

A cultivar Guará se destaca positivamente, apresentando crescimento superior para a maioria das variáveis avaliadas, mesmo sob condições de estresse por alumínio. Entretanto, é importante ressaltar que, embora Guará tenha apresentado maior resiliência, ainda assim sofreu perdas significativas. Catucaí Amarelo 20/15 cv 479, Catucaí Vermelho 785/15 e Paraíso MG H 419-1 se apresentam mais sensíveis ao efeito do alumínio, com perdas acentuadas no crescimento foliar e de caules.

A interação genótipo x ambiente evidenciada neste estudo revela a complexidade das respostas das diferentes cultivares ao estresse por alumínio, reforçando a importância de estratégias integradas que envolvam tanto a escolha de genótipos mais tolerantes quanto o uso de práticas agronômicas adequadas à mitigação da acidez do solo, como a calagem.

## REFERÊNCIAS

- ARAÚJO, M. R. P.; SILVA, P. L.; ROCHA, A. P. S. CAFEICULTURA: Evolução do café no Brasil, Minas Gerais e no município de João Pinheiro-MG. **Revista Contemporânea**, Caruaru, v. 3, n. 11, p. 21683-21706, 2023.
- BARROS, R. S. *et al.* Determinação de área de folhas do café (*Coffea arabica* L. cv. 'Bourbon Amarelo'). **Revista Ceres**, Viçosa-MG, v. 20, p. 44-52, 1973.
- CARVALHO, A. M. *et al.* Correlação entre crescimento e produtividade de cultivares de café em diferentes regiões de Minas Gerais, Brasil. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília-DF, v. 45, n. 3, p.269-275, 2010. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2010000300006>. Acesso em: 9 jul. 2025.
- CARVALHO, C. H. S. *et al.* **Catálogo de cultivares de café arábica**. Brasília-DF: Embrapa Café, 2022. (Documentos, 16)
- CARVALHO, C. H. S. **Cultivares de café: origem, características e recomendações**. Brasília-DF: Embrapa Café, 2008.
- CAVATON, T.; FERREIRA, L. T. **Produção dos Cafés do Brasil da espécie arábica corresponde a 47% da mundial**. Brasília-DF: Portal Embrapa, 2020. Disponível em: <https://www.embrapa.br/busca-de-noticias/-/noticia/50525698/producao-dos-cafes-do-brasil-da-especie-arabica-corresponde-a-47-da-mundial>. Acesso em: 9 jul. 2025.
- COLODETTI, T. V. *et al.* Differential tolerance between genotypes of conilon coffee (*Coffea canephora*) to low availability of nitrogen in the soil. **Australian Journal of Crop Science**, Adelaide, v. 8, n. 12, p.1648-1657, 2014. Disponível em: [http://www.cropj.com/colodetti\\_8\\_12\\_2014\\_1648\\_1657.pdf](http://www.cropj.com/colodetti_8_12_2014_1648_1657.pdf). Acesso em: 9 jul. 2025.

FAGERIA, N. K. Otimização da eficiência nutricional na produção das culturas. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola Ambiental**, Campina Grande, v. 2, n. 1, p. 6-16, 1998.

FAZUOLI, L. C. *et al.* IAC 125 RN (IBC12), uma nova cultivar de *Coffea arabica* com resistência à ferrugem e às duas raças do nematoide *Meloidogyne exigua*. In: SIMPÓSIO DE PESQUISA DOS CAFÉS DO BRASIL, 8., Salvador, 2013. **Anais** [...] Brasília-DF: Embrapa, 2013. p. 1-4.

FERREIRA, D. F. Sisvar: a computer statistical analysis system. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 35, n. 6, p. 1039-1042, 2011.

INTERNATIONAL COFFEE ORGANIZATION. **Coffea market report**: June 2024. London: ICO, 2024. Disponível em: <https://www.icocoffee.org/documents/cy2023-24>. Acesso em: 9 jul. 2025.

LAMBERS, H.; CHAPIN, F. S.; PONS, T. L. Respiration. In: LAMBERS, H.; CHAPIN, F. S.; PONS, T. L. (eds.) **Plant Physiological Ecology**. New York: Springer, 2008. p.163-200. Disponível em: [https://doi.org/10.1007/978-0-387-78341-3\\_3](https://doi.org/10.1007/978-0-387-78341-3_3). Acesso em: 9 jul. 2025.

MACEDO, C. M. P. D. *et al.* Germinação e vigor de sementes de café submetidas ao estresse com alumínio. **Scientia Agraria**, Curitiba, v. 9, n. 2, p. 235, 2008. Disponível em: <https://doi.org/10.5380/rsa.v9i2.11010>. Acesso em: 9 jul. 2025.

MACEDO, C. M. P. D.; LOPES, J. C. Qualidade fisiológica de semente de café arábica na presença de alumínio. **Revista Brasileira de Sementes**, São Paulo-SP, v. 30, n. 1, p. 66-73, 2008. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0101-31222008000100009>. Acesso em: 9 jul. 2025.

MESQUITA, C. M. *et al.* **Manual do café**: implantação de cafezais. Belo Horizonte: Emater-MG, 2016. 50 p.

RODRIGUES, W. N. *et al.* Biometry and diversity of Arabica coffee genotypes cultivated in a high density plant system. **Genetics and Molecular Research**, Ribeirão Preto, v. 15, p. 1-12, 2016.

SALES, J. D. F. *et al.* Germinação de sementes de café (*Coffea arabica* L.) submetidas a diferentes concentrações e tempos de embebição em celulase. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 27, n. 3, p. 557-564, 2003. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S1413-70542003000300009>. Acesso em: 9 jul. 2025.

SILVA, D. F. **Avaliação da quebra de dormência em sementes de café (*Coffea arabica* L.)**. 2017. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Agronomia) – Centro Universitário do Cerrado, Patrocínio, 2017.

SOUZA, D. M. G.; MIRANDA, L. N.; OLIVEIRA, S. A. Acidez do solo e sua correção. In: NOVAIS, R. F. *et al.* (eds.). **Fertilidade do solo**. Viçosa-MG: Sociedade Brasileira de Ciências do Solo, 2007. p. 205-274.

VIEIRA, F. C. B. *et al.* Response of representative cover crops to aluminum toxicity, phosphorus deprivation, and organic amendment. **Australian Journal of Agricultural**

**Research**, Clayton, v. 59, n. 1, p. 52-61. Disponível em: <https://doi.org/10.1071/AR07120>. Acesso em: 9 jul. 2025.