

TOLERÂNCIA DE GENÓTIPOS DE CAFEIEIRO AO ALUMÍNIO EM SOLUÇÃO NUTRITIVA. II. TEORES DE P, Ca E Al E EFICIÊNCIA AO P E Ca⁽¹⁾

M. C. L. BRACCINI⁽²⁾, H. E. P. MARTINEZ⁽³⁾, P. R. G. PEREIRA⁽³⁾,
N. F. SAMPAIO⁽³⁾ & A. A. PEREIRA⁽⁴⁾

RESUMO

Foi instalado um experimento, em janeiro de 1994, em casa de vegetação do Departamento de Fitotecnia da Universidade Federal de Viçosa, Estado de Minas Gerais. Com o objetivo de avaliar o efeito do alumínio nos teores de P, Ca e Al e na eficiência ao fósforo e cálcio de nove genótipos de café, as plantas foram crescidas em solução nutritiva com 0 e 0,296 mmol L⁻¹ de alumínio, com pH 4,0, por um período de 115 dias. Após esse período, as plantas foram divididas em folhas superiores, folhas inferiores, primeiro par de folhas totalmente expandido, caule e raízes, para a determinação da matéria seca e de concentrações de fósforo, cálcio e alumínio. A tolerância ao alumínio foi associada ao menor acúmulo de fósforo nas raízes, à menor redução na translocação desse nutriente para a parte aérea, à menor redução na absorção de cálcio e à maior eficiência no uso do fósforo e do cálcio. Foi observado grande acúmulo de alumínio nas raízes, bem como um transporte restrito do elemento para a parte aérea, para todos os genótipos de café.

Termos de Indexação: *Coffea arabica* L., toxidez, absorção, eficiência nutricional.

⁽¹⁾ Parte da Tese de Mestrado do primeiro autor, apresentada à Universidade Federal de Viçosa. Executado com auxílio do CNPq. Recebido para publicação em dezembro de 1995 e aprovado em maio de 1998.

⁽²⁾ Estudante de Doutorado do Departamento de Fitotecnia, Universidade Federal de Viçosa - UFV. CEP 36571-000 Viçosa (MG). Bolsista do CNPq.

⁽³⁾ Professor Adjunto do Departamento de Fitotecnia, UFV. Bolsista do CNPq.

⁽⁴⁾ Pesquisador da Empresa de Pesquisa Agropecuária de Minas Gerais - EPAMIG. CEP 36571-000 Viçosa (MG).

SUMMARY: *ALUMINUM TOLERANCE OF COFFEE GENOTYPES IN NUTRIENT SOLUTION. II. P, Ca AND Al CONCENTRATIONS AND P AND Ca EFFICIENCIES*

An experiment was carried out in January of 1994 in the greenhouse at the Crop Science Department of the Universidade Federal de Viçosa, State of Minas Gerais, Brazil. The objective of this experiment was to evaluate the effects of aluminum on P, Ca and Al concentrations in the plants and on the P and Ca efficiencies of utilization by nine coffee genotypes. Plants were grown with 0 and 0.296 mmol L⁻¹ of aluminum in nutrient solution, in pH 4.0, for 115 days. After this period, plants were separated in higher leaves, lower leaves, first pair of completely expanded leaves, stem and roots to evaluate dry matter yield and phosphorus, calcium and aluminum concentrations in plant parts. Aluminum tolerance was associated with lower root phosphorus accumulation, lower reduction of phosphorus translocation to shoot, lower reduction of calcium uptake and higher phosphorus and calcium use efficiency. A large accumulation of aluminum in the roots was observed, reducing the Al transport to shoot, for all coffee genotypes.

Index terms: *Coffea arabica L., toxicity, absorption, nutrition efficiency.*

INTRODUÇÃO

A baixa produtividade e a pequena resposta de muitas culturas às fertilizações podem ser, em grande parte, atribuídas ao alumínio presente em níveis tóxicos. O alumínio trocável, além de ser um elemento nocivo ao crescimento do sistema radicular, interfere na absorção e movimentação de fósforo, cálcio e magnésio na planta, contribuindo, também, para a sorção do fósforo no solo (Calbo & Cambraia, 1980; Camargo, 1985; Bennet et al., 1986; Baligar et al., 1993).

Plantas não adaptadas, que crescem em solos contendo alumínio trocável em níveis tóxicos, têm o crescimento do sistema radicular prejudicado, uma vez que as raízes se tornam curtas e grossas. As anomalias e os danos causados ao sistema radicular ocasionam exploração de menor volume de solo pelas plantas, resultando em prejuízos na absorção de nutrientes e no aproveitamento da água do solo.

A habilidade das plantas em adquirir nutrientes na presença do alumínio, principalmente o fósforo, tem sido interpretada como uma expressão das diferenças na tolerância a esse metal entre variedades (Foy et al., 1972; Bennet et al., 1986). A toxidez de alumínio tem sido associada ao acúmulo de fósforo no sistema radicular e aos baixos teores na parte aérea que apresentam, com bastante frequência, sintomas de deficiência (Macklon & Sim, 1992). O alumínio precipita-se com o fósforo no apoplasto radicular, reduzindo a translocação para a parte aérea (Calbo & Cambraia, 1980). É possível que essa interação ocorra tanto na parede celular quanto externamente à plasmalema nas células da coifa (McCormick & Borden, 1974) ou nos vacúolos de células das raízes (Macklon & Sim, 1992). Além

disso, o alumínio pode reduzir a solubilidade do fósforo na solução externa às raízes, tornando-o menos disponível para as plantas (Pavan & Bingham, 1982; Camargo, 1985).

A tolerância ao alumínio pode estar também relacionada com a habilidade de absorver e translocar cálcio, como ocorre em trigo (Huang et al., 1992) e feijão (Foy et al., 1972). Entretanto, os mecanismos celulares pelos quais o alumínio interfere na nutrição do cálcio são, ainda, desconhecidos. O alumínio, segundo Clarkson & Sanderson (1971), bloquearia, neutralizaria ou reverteria as cargas negativas dos poros do espaço livre aparente, reduzindo sua capacidade de se ligar ao cálcio. Por outro lado, Huang et al. (1992) observaram que a inibição no influxo de cálcio através da membrana em cultivar de trigo sensível ao alumínio foi, possivelmente, via bloqueio dos canais de cálcio, o qual poderia ter importante papel no mecanismo celular da toxidez de alumínio em plantas.

Os desarranjos metabólicos provocados pelo alumínio parecem estar mais relacionados com os efeitos deletérios desse íon sobre a disponibilidade, absorção e utilização de diversos nutrientes, particularmente do fósforo e do cálcio (Calbo & Cambraia, 1980; Bennet et al. 1986; Baligar et al., 1993).

Em função da carência de informações sobre a toxidez de alumínio em cafeeiros, desenvolveu-se um experimento em casa de vegetação, com o objetivo de avaliar o efeito do alumínio, em solução nutritiva, nos teores de P, Ca e Al e na eficiência ao P e Ca de nove genótipos de café, com o intuito de elucidar alguns dos possíveis mecanismos fisiológicos envolvidos na tolerância a esse elemento.

MATERIAL E MÉTODOS

O presente trabalho foi realizado em casa de vegetação do Departamento de Fitotecnia da Universidade Federal de Viçosa.

Plantas germinadas em areia, apresentando dois pares de folhas definitivas, foram transplantadas para vasos que continham solução nutritiva de Hoagland & Arnon (1950), diluída a $\frac{1}{4}$ de força e modificada quanto à concentração de fósforo, utilizando-se uma concentração 10 vezes menor, obtendo-se as seguintes concentrações (mmol L⁻¹) de macro e micronutrientes: N: 3,750; P: 0,025; K: 1,250; Ca: 1,250; Mg: 0,500; S: 0,500; B: 11,570; Cu: 0,078; Fe: 22,380; Mn: 2,275; Mo: 0,026; Zn: 0,190. O alumínio foi fornecido nas concentrações de 0 e 0,296 mmol L⁻¹, adicionado como Al₂(SO₄)₃.18H₂O. O pH das soluções foi mantido em $4,0 \pm 0,2$ mediante ajustes diários com HNO₃ 0,1 mol L⁻¹ durante o período experimental de 115 dias. As soluções foram mantidas sob arejamento constante e foram trocadas inicialmente a cada 15 dias, sendo tal intervalo reduzido até a cada 5 dias, no final do experimento. A concentração de fósforo (0,025 mmol L⁻¹) e o pH da solução foram mantidos baixos para minimizar as possíveis precipitações com o alumínio.

O delineamento estatístico utilizado foi inteiramente casualizado, num esquema fatorial com 18 tratamentos, constituídos pela combinação de 9 genótipos e 2 níveis de alumínio, com 3 repetições. A parcela foi constituída de duas plantas por vaso.

Ao final do experimento, as plantas foram divididas em folhas superiores, folhas inferiores, primeiro par de folhas totalmente expandido, caule e raízes. A matéria seca de cada parte da planta foi determinada após a secagem das amostras em estufa de circulação forçada de ar a 72°C por 72 h. Amostras de 100 mg do material vegetal seco e moído foram digeridas em uma mistura de ácido nítrico e perclórico na proporção 4:1 e analisadas quanto a fósforo, cálcio e alumínio.

O cálcio foi determinado por espectrofotometria de absorção atômica; o fósforo, por colorimetria pelo método da vitamina C descrito por Braga & Defelipo (1974), e o alumínio, por colorimetria pelo método do aluminon descrito por Alvarez V. (1985). As concentrações de P, Ca e Al nas folhas superiores, inferiores e nas raízes foram obtidas. Os conteúdos dos elementos analisados foram calculados para a parte aérea, raízes e planta toda.

Para P e Ca, foram avaliadas a eficiência de utilização [EFU = (mg de matéria seca)²/mg do nutriente absorvido], segundo Siddiqi & Glass (1981), a eficiência de translocação [EFT = (mg do nutriente na parte aérea/mg total do nutriente absorvido)] e a eficiência de enraizamento [EFR = (mg matéria seca de raiz/mg total do nutriente

absorvido)], baseando-se no trabalho de Bailian et al. (1991). Os dados foram submetidos à análise de variância, e as médias comparadas pelo teste de Duncan, a 5%.

Com base nas classes de tolerância (T - tolerante, MT - moderadamente tolerante, MS - moderadamente sensível e S - sensível), estabelecidas em função das características de crescimento e/ou desenvolvimento, em trabalho anterior (Braccini et al., 1998), estudou-se o comportamento dos genótipos quanto aos percentuais de redução no conteúdo {%RCN = [1 - (Conteúdo na presença de Al/Conteúdo na ausência de Al)] x 100}, e percentuais de redução na Eficiência de Utilização {%REU = [1 - (Eficiência de Utilização na presença de Al/Eficiência de Utilização na ausência de Al)] x 100} para P e Ca.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A menor produção de matéria seca da parte aérea e do sistema radicular na presença do alumínio (Braccini et al., 1998) refletiu o efeito marcante desse íon sobre a absorção, translocação e uso eficiente de fósforo e de cálcio, nas diversas partes em que a planta foi dividida. Resultados semelhantes foram observados por Bennet et al. (1986), em milho, e por Baligar et al. (1993), em genótipos de sorgo.

Os genótipos apresentaram diferenças marcantes quanto à concentração do fósforo nos componentes da planta (Quadro 1). O Al reduziu significativamente a concentração de P e de Ca nas folhas superiores e inferiores. Na presença de alumínio, ocorreram reduções médias na concentração de P de 16,5 e 33,9% em folhas superiores e inferiores, respectivamente. Em todos os genótipos, observou-se acúmulo de P nas raízes. O teor médio de fósforo nas raízes elevou-se 15,4% na presença de alumínio.

Os resultados revelam que reduções na concentração desse elemento nas folhas superiores e inferiores estão associadas com o seu acúmulo nas raízes, evidenciando a ocorrência de precipitação de fosfato de alumínio nos tecidos radiculares. Resultados similares têm sido reportados na literatura para várias espécies de plantas (Pavan & Bingham, 1982; Camargo, 1985; Bennet et al., 1986), que admitiram, além de uma precipitação interna, uma interferência na translocação desse elemento para a parte aérea das plantas. Londoño & Valencia A. (1983) observaram que a maior parte do alumínio incorporado pelas raízes liga-se a sítios de adsorção na parede celular, e sobre essas superfícies o fosfato se precipita. Seja por precipitação nos espaços livres, seja por adsorção-precipitação na superfície das paredes celulares, ocorreu um impedimento da movimentação do fósforo dos tecidos radiculares.

Quadro 1. Concentração de fósforo, cálcio e alumínio em folhas superiores, inferiores e raízes das plantas de nove genótipos de café, em resposta a duas concentrações de alumínio em solução nutritiva

| Genótipo | Folha superior | | Folha inferior | | Raiz | |
|-------------------------------------|----------------|----------|----------------|-----------|----------|--------------|
| | -Al | +Al | -Al | +Al | -Al | +Al |
| Fósforo, g kg⁻¹ | | | | | | |
| UFV 2145 | 2,47dA | 2,30 aA | 1,87 aA | 1,20 bcB | 2,87 | 3,30 |
| UFV 2147 | 2,70 bcA | 2,10 aB | 1,80 aA | 1,13 bcdB | 2,83 | 3,00 |
| UFV 1359 | 2,73 bA | 2,17 aB | 1,73 aA | 1,17 bcdB | 2,80 | 3,13 |
| UFV 2877 | 2,70 bcA | 2,00 aB | 1,73 aA | 1,17 bcdB | 2,97 | 3,40 |
| UFV 2163 | 2,80 abA | 2,33 aB | 1,87 aA | 1,33 aB | 2,83 | 3,23 |
| UFV 2149 | 2,90 aA | 2,17 aB | 1,77 aA | 1,07 dB | 2,80 | 3,13 |
| UFV 2198 | 2,57 cdA | 2,23 aB | 1,83 aA | 1,10 cdB | 2,77 | 3,30 |
| UFV 3880 | 2,67 bcA | 2,33 aA | 1,83 aA | 1,20 bcB | 2,53 | 3,17 |
| UFV 2237 | 2,43 dA | 2,30 aA | 1,63 aA | 1,23 abB | 2,70 | 3,27 |
| Média ⁽¹⁾ | 2,66 | 2,21 | 1,78 | 1,18 | 2,79B | 3,21A |
| C.V. (%) | 5,91 | | 5,43 | | 6,16 | |
| Cálcio, g kg⁻¹ | | | | | | |
| UFV 2145 | 12,57 aA | 8,93 abB | 18,87 aA | 12,07 aB | 3,47 cdA | 3,13 aA |
| UFV 2147 | 11,33 bA | 8,37 bcB | 17,40 bcA | 11,50 aB | 4,30 bcA | 2,93 aB |
| UFV 1359 | 12,00 bA | 8,33 bcB | 16,67 cA | 12,67 aB | 5,07 abA | 3,60 aB |
| UFV 2877 | 12,67 aA | 7,73 cB | 18,43 abA | 8,33 aB | 5,23 aA | 3,40 aB |
| UFV 2163 | 11,37 bA | 9,50 aB | 17,93 abA | 13,77 aB | 3,13 dA | 2,97 aA |
| UFV 2149 | 11,90 bA | 8,87 abB | 18,43 abA | 12,33 aB | 3,80 cdA | 3,13 aB |
| UFV 2198 | 12,17 aA | 8,33 bcB | 18,83 aA | 12,57 aB | 3,87 cdA | 3,17 aA |
| UFV 3880 | 10,40 cA | 8,90 abB | 15,33 dA | 11,77 aB | 4,20 cA | 3,10 aA |
| UFV 2237 | 12,50 aA | 7,93 bcB | 18,50 abA | 11,00 aB | 3,90 cdA | 3,20 aA |
| Média ⁽¹⁾ | 11,88 | 8,54 | 17,82 | 11,78 | 4,11 | 3,18 |
| C.V. (%) | 4,90 | | 11,07 | | 11,06 | |
| Alumínio, mg kg⁻¹ | | | | | | |
| UFV 2145 | 56,20 | 92,50 | 221,04 | 193,55 | 75,34 aB | 4902,28 abA |
| UFV 2147 | 40,53 | 75,14 | 182,97 | 220,83 | 60,07 aB | 4341,19 dA |
| UFV 1359 | 38,04 | 68,19 | 188,68 | 177,22 | 64,26 aB | 4538,04 bcdA |
| UFV 2877 | 50,37 | 82,65 | 211,88 | 220,60 | 81,83 aB | 4972,94 aA |
| UFV 2163 | 38,10 | 71,03 | 221,88 | 218,33 | 77,55 aB | 4455,06 cdA |
| UFV 2149 | 45,96 | 61,58 | 216,60 | 212,16 | 60,94 aB | 4494,46 cdA |
| UFV 2198 | 45,91 | 73,13 | 280,12 | 205,79 | 69,98 aB | 4981,12 aA |
| UFV 3880 | 54,20 | 76,43 | 231,58 | 224,62 | 96,56 aB | 4341,11 dA |
| UFV 2237 | 53,48 | 74,47 | 223,91 | 183,42 | 70,84 aB | 4805,85 abcA |
| Média ⁽¹⁾ | 46,98 B | 75,01 A | 219,85 | 206,28 | 73,04 | 4648,01 |
| C.V. (%) | 26,69 | | 16,90 | | 9,37 | |

⁽¹⁾As médias seguidas de letras iguais, maiúscula na linha ou minúscula na coluna, não diferem entre si pelo teste Duncan, a 5%.

A absorção de nutrientes, principalmente fósforo, é influenciada pela morfologia da raiz. Os efeitos do alumínio restringindo a superfície específica das raízes podem ser considerados um possível mecanismo para restringir a absorção de fósforo. Entretanto, em solução nutritiva, alterações no sistema radicular não parecem ser o principal fator das mudanças ocorridas na composição das plantas submetidas ao estresse de alumínio, uma vez que o transporte de fósforo para a parte aérea foi mais afetado do que a própria absorção, em função das possíveis reações de adsorção-precipitação de fósforo nas raízes, reduzindo a translocação para a parte aérea.

A concentração de cálcio nas folhas inferiores apresentou tendência de ser maior do que a observada nas folhas superiores. Entretanto, em ambas as partes, ocorreu redução nos teores de cálcio quando as plantas foram submetidas ao estresse de alumínio. O genótipo UFV 2237 (sensível) apresentou maiores quedas na concentração de cálcio nas folhas superiores (36,6%) e inferiores (40,5%). Nas raízes, foi observada redução significativa na concentração de cálcio, apenas para os genótipos UFV 2147, UFV 1359, UFV 2877 e UFV 2149 (Quadro 1).

Nas folhas superiores, a concentração de cálcio reduziu-se, em média, de 1,19 para 0,85%, enquanto, nas folhas inferiores, esse decréscimo foi de 1,78 para

1,18%. Segundo Malavolta et al. (1979), uma concentração de cálcio em folhas do cafeeiro de 1,01% seria suficientemente baixa para não suportar uma ótima produção de café. Portanto, os resultados obtidos neste experimento acerca dos efeitos do alumínio na absorção de cálcio indicam que o excesso de alumínio pode ser importante na indução da deficiência de cálcio e, conseqüentemente, na diminuição da produção de café.

A redução na concentração de cálcio nas folhas pode ser atribuída ao efeito direto de alumínio na absorção desse nutriente pelas raízes, uma vez que a translocação não foi severamente afetada, como será mostrado adiante.

Massot et al. (1992), trabalhando com três genótipos de feijão, verificaram que a toxidez de alumínio foi associada com uma concentração reduzida de cálcio na parte aérea e raízes e que a inibição na absorção desse nutriente, pelo efeito do alumínio, foi mais pronunciada no genótipo susceptível do que no tolerante.

O alumínio reduziu significativamente o conteúdo de fósforo da parte aérea e das raízes, sendo as reduções mais acentuadas na parte aérea (Quadro 2). Os genótipos sensíveis apresentaram, em média, 53,6% de redução no conteúdo de fósforo da parte aérea e 33,6% na raiz, enquanto os tolerantes mostraram percentual de redução de 36,6 e 8,8%, respectivamente. Segundo Baligar et al. (1993), para genótipos de sorgo sensíveis e tolerantes ao alumínio, características de absorção de nutrientes, tais como: influxo nas raízes, transporte de nutrientes para parte aérea e inibição na absorção, permitiram uma boa discriminação, tendo os genótipos sensíveis apresentado, em média, 80% de redução na absorção de fósforo e os tolerantes 23%.

Foram observadas reduções da ordem de 58,6% no conteúdo de cálcio da parte aérea e de 55,8% nas raízes dos genótipos sensíveis, enquanto valores inferiores foram constatados para os genótipos tolerantes (Quadro 2). Baligar et al. (1993) verificaram que genótipos de sorgo tolerantes apresentaram, em média, 48% de inibição na absorção de cálcio e os sensíveis 89%.

Quanto à eficiência de utilização de fósforo, no grupo sensível, a redução foi de 27,2%, enquanto os genótipos tolerantes apresentaram pequeno aumento na eficiência de utilização de fósforo na parte aérea (Quadro 3). As raízes, de forma geral, revelaram maior redução na eficiência de utilização do que a parte aérea, possivelmente em função do maior acúmulo de fósforo no sistema radicular.

Neste trabalho, a tolerância mostrou-se associada à maior eficiência no uso do fósforo na presença do alumínio e à menor precipitação do fósforo nos tecidos radiculares. Efeitos similares de Al na absorção e no transporte de fósforo em cafeeiros foram descritos por Pavan & Bingham (1982) e Londoño & Valencia A. (1983).

Os genótipos tolerantes, UFV 1359 e UFV 2149, apresentaram aumento na eficiência de utilização de cálcio em todos os componentes da planta, enquanto o oposto foi observado para os genótipos sensíveis, UFV 2147, UFV 2198 e UFV 2237 (Quadro 3). Dessa forma, em café, a tolerância parece estar relacionada, além da menor redução na absorção de cálcio, com aumento na eficiência de utilização deste nutriente, na presença de alumínio, ou seja, a redução na absorção é compensada pela maior conversão em biomassa.

A eficiência de translocação de fósforo, dada pela proporção do elemento alocada na parte aérea, sofreu

Quadro 2. Médias do conteúdo de fósforo e de cálcio e respectivos percentuais de redução, causados pelo alumínio, por classe de tolerância, em nove genótipos de café

| Grupo | Classe ⁽¹⁾ | Genótipo ⁽²⁾ | Parte aérea ⁽³⁾ | | | Raiz | | |
|----------------|-----------------------|-------------------------|----------------------------|-------|---------|---------------|------|---------|
| | | | -Al | +Al | Redução | -Al | +Al | Redução |
| | | | — mg/planta — | | % | — mg/planta — | | % |
| Fósforo | | | | | | | | |
| I | S | 2, 9, 7 | 4,82 | 2,23 | 53,6 | 3,08 | 2,05 | 33,6 |
| II | T | 3, 6 | 3,87 | 2,46 | 36,6 | 2,74 | 2,50 | 8,8 |
| III | MT | 1, 5, 4 | 4,34 | 2,51 | 42,3 | 3,04 | 2,48 | 18,3 |
| IV | MS | 8 | 4,67 | 2,27 | 51,3 | 2,89 | 2,25 | 22,1 |
| Cálcio | | | | | | | | |
| I | S | 2, 9, 7 | 27,96 | 11,57 | 58,6 | 4,50 | 1,99 | 55,8 |
| II | T | 3, 6 | 22,97 | 13,41 | 41,6 | 4,33 | 2,68 | 38,1 |
| III | MT | 1, 5, 4 | 25,57 | 12,86 | 49,7 | 4,13 | 2,37 | 42,6 |
| IV | MS | 8 | 23,94 | 11,91 | 50,2 | 4,79 | 2,25 | 53,0 |

⁽¹⁾ S = sensível; T = tolerante; MT = moderadamente tolerante; MS = moderadamente sensível. ⁽²⁾ 1(UFV 2145), 2(UFV 2147), 3(UFV 1359) 4(UFV 2877), 5(UFV 2163), 6(UFV 2149), 7(UFV 2198), 8(UFV 3880), 9(UFV 2237). ⁽³⁾ Folhas superiores, folhas inferiores, galhos com exceção do caule.

Quadro 3. Médias da eficiência de utilização de fósforo e de cálcio e respectivos percentuais de redução ou aumento, causados pelo alumínio, por classe de tolerância, em nove genótipos de café

| Grupo | Classe ⁽¹⁾ | Genótipo ⁽²⁾ | EUPA ⁽³⁾ | | | EUR ⁽⁴⁾ | | |
|-------|-----------------------|-------------------------|-------------------------------|-------|---------|-------------------------------|-------|---------|
| | | | - Al | + Al | Redução | - Al | + Al | Redução |
| | | | (mg MSPA) ² /mg Nu | | % | (mg MSPA) ² /mg Nu | | % |
| | | | Fósforo | | | | | |
| I | S | 2, 9, 7 | 911,7 | 663,9 | 27,2 | 400,0 | 205,8 | 48,6 |
| II | T | 3, 6 | 715,3 | 752,2 | +5,2 | 350,7 | 255,4 | 27,2 |
| III | MT | 1, 5, 4 | 796,0 | 723,2 | 9,1 | 365,1 | 230,6 | 36,8 |
| IV | MS | 8 | 947,2 | 662,1 | 30,1 | 452,5 | 228,4 | 49,5 |
| | | | Cálcio | | | | | |
| I | S | 2, 9, 7 | 157,0 | 128,2 | 18,3 | 257,7 | 211,2 | 23,4 |
| II | T | 3, 6 | 120,6 | 137,8 | +14,2 | 228,7 | 240,1 | +5,0 |
| III | MT | 1, 5, 4 | 134,8 | 146,1 | +8,4 | 282,0 | 242,5 | 14,0 |
| IV | MS | 8 | 167,5 | 123,4 | 26,4 | 275,8 | 230,0 | 16,6 |

⁽¹⁾ S = sensível; T = tolerante; MT = moderadamente tolerante; MS = moderadamente sensível. ⁽²⁾ 1(UFV 2145), 2(UFV 2147), 3(UFV 1359) 4(UFV 2877), 5(UFV 2163), 6(UFV 2149), 7(UFV 2198), 8(UFV 3880), 9(UFV 2237). ⁽³⁾ EUPA = Eficiência de Utilização na Parte Aérea = (mg matéria seca da parte aérea)²/mg nutriente absorvido. ⁽⁴⁾ EUR = Eficiência de Utilização na Raiz = (mg matéria seca de raiz)²/mg nutriente absorvido.

redução significativa na presença do alumínio (Quadro 4). Entretanto, para o cálcio não foi observado efeito do alumínio na translocação (Quadro 4). Resultados semelhantes foram obtidos por Bennet et al. (1986).

A menor translocação de fósforo está relacionada com o acúmulo desse elemento nas raízes. Bennet et al. (1986) relataram que a translocação de fósforo e potássio para a parte aérea foi mais afetada do que a própria absorção, em dois cultivares de milho. Por outro lado, esses autores observaram que o transporte de cálcio não foi alterado pela presença de alumínio, à semelhança do obtido neste trabalho.

Houve maior eficiência de enraizamento, ou seja, maior produção de matéria seca de raízes por unidade de nutriente absorvido, na presença de alumínio, tanto em relação ao fósforo quanto em relação ao cálcio (Quadro 4). Tal fato pode ser atribuído a uma estratégia da planta em aumentar a produção de matéria seca de raiz por unidade de nutriente absorvido, numa condição de estresse, uma vez que o alumínio afetou o comprimento e a morfologia do sistema radicular das plantas de café, à semelhança do relatado por Foy (1988) e Taylor (1991).

Apesar de a parte aérea ter sido ligeiramente mais prejudicada pelo alumínio, em função da maior redução na produção de matéria seca e na absorção de fósforo e cálcio, observou-se maior acúmulo desse elemento no sistema radicular (Quadro 1), confirmando, mais uma vez, que o alumínio é um elemento de baixa mobilidade na planta, ou que os mecanismos de tolerância estão localizados na raiz.

Nas folhas superiores, observou-se pequeno aumento na concentração de alumínio. Embora não haja diferença estatística, os genótipos tolerantes

UFV 1359 e UFV 2149 foram os que apresentaram menores concentrações.

Nas raízes, detectaram-se elevadas concentrações de alumínio, entretanto, não foi possível estabelecer um padrão definido quanto ao acúmulo desse elemento. O genótipo UFV 2147 (sensível) apresentou menor concentração de alumínio nas raízes, enquanto o UFV 2237, também sensível, apresentou alta concentração, a qual não diferiu estatisticamente da observada nos genótipos tolerantes (UFV 1359 e UFV 2149), embora nestes últimos tenha sido verificada uma concentração um pouco inferior (Quadro 1).

A tolerância ao alumínio não se relacionou com a concentração desse elemento nos tecidos. A princípio, pode parecer contraditório o fato de não haver diferença estatística entre o genótipo UFV 1359 (tolerante) e UFV 2237 (sensível). Entretanto, UFV 1359 caracteriza-se por mostrar menor taxa de crescimento, o que leva à maior concentração do elemento por unidade de matéria seca produzida. No entanto, esse genótipo apresentou menor redução na produção de matéria seca da parte aérea e das raízes, na presença de alumínio (Braccini et al., 1998), bem como menor interferência na nutrição do fósforo e do cálcio.

O genótipo sensível (UFV 2237) apresentou alta concentração de alumínio, tendo sido a produção de matéria seca de raiz severamente afetada, queda de 1,10 para 0,58 g (Braccini et al., 1998). Portanto, a concentração de alumínio tornou-se maior, muito embora o seu conteúdo em suas raízes (2,79 mg) tenha sido o menor. Tal fato confirma sua maior sensibilidade.

A tolerância de cafeeiros ao alumínio pode estar associada à maior compartimentalização desse

Quadro 4. Eficiência de translocação de fósforo e de cálcio (EFT) e de enraizamento (EFR) das plantas de nove genótipos de café, em resposta a duas concentrações de alumínio em solução nutritiva

| Genótipo | EFT ⁽¹⁾ | | | EFR ⁽²⁾ | | |
|----------------------|---------------------|---------|-----------|--------------------|---------|-----------|
| | -Al | +Al | Média | -Al | +Al | Média |
| | mg NuPA/mg Nu TOTAL | | | mg MSR/mg Nu TOTAL | | |
| Fósforo | | | | | | |
| UFV 2145 | 0,617 | 0,524 | 0,570 ab | 133,7 | 144,9 | 139,3 bc |
| UFV 2147 | 0,609 | 0,493 | 0,551 abc | 137,8 | 169,3 | 153,6 a |
| UFV 1359 | 0,581 | 0,518 | 0,550 bc | 149,6 | 153,8 | 151,7 ab |
| UFV 2877 | 0,558 | 0,485 | 0,521 c | 150,0 | 151,5 | 150,8 abc |
| UFV 2163 | 0,582 | 0,496 | 0,539 bc | 147,2 | 156,5 | 151,9 ab |
| UFV 2149 | 0,590 | 0,476 | 0,533 bc | 146,2 | 167,1 | 156,8 a |
| UFV 2198 | 0,611 | 0,500 | 0,556 abc | 140,4 | 151,4 | 145,9 abc |
| UFV 3880 | 0,618 | 0,502 | 0,561 abc | 150,7 | 157,6 | 154,1 a |
| UFV 2237 | 0,616 | 0,565 | 0,590 a | 142,2 | 133,5 | 137,8 c |
| Média ⁽³⁾ | 0,598 A | 0,507 B | | 144,2 B | 154,0 A | |
| C.V. (%) | | 5,55 | | | 7,16 | |
| Cálcio | | | | | | |
| UFV 2145 | 0,887 | 0,859 | 0,873 a | 32,50 | 45,17 | 38,83 bc |
| UFV 2147 | 0,853 | 0,844 | 0,848 abc | 34,13 | 53,37 | 43,75 abc |
| UFV 1359 | 0,819 | 0,827 | 0,823 cd | 35,59 | 47,78 | 41,68 abc |
| UFV 2877 | 0,811 | 0,805 | 0,808 d | 36,26 | 58,11 | 47,18 a |
| UFV 2163 | 0,878 | 0,855 | 0,867 a | 38,79 | 48,96 | 43,87 a |
| UFV 2149 | 0,863 | 0,839 | 0,851 ab | 35,99 | 51,51 | 43,75 ab |
| UFV 2198 | 0,865 | 0,849 | 0,857 ab | 35,10 | 47,58 | 41,34 abc |
| UFV 3880 | 0,834 | 0,843 | 0,839 bc | 39,69 | 50,45 | 45,07 a |
| UFV 2237 | 0,870 | 0,862 | 0,866 a | 33,20 | 42,93 | 38,06 c |
| Média ⁽³⁾ | 0,853 | 0,843 | | 35,70 B | 49,54 A | |
| C.V. (%) | | 2,40 | | | 2,60 | |

⁽¹⁾EFT = mg do nutriente parte aérea (NuPa)/mg do conteúdo total do nutriente absorvido (NuTOTAL). ⁽²⁾EFR = mg de matéria seca de raiz (MSR)/mg do conteúdo total do nutriente absorvido (NuTOTAL). ⁽³⁾As médias seguidas de letras iguais, maiúscula na linha ou minúscula na coluna, não diferem entre si pelo teste Duncan, a 5%.

elemento nas raízes, uma vez que o genótipo UFV 2149 (tolerante), apesar da baixa concentração de alumínio (Quadro 1), foi o que apresentou maior conteúdo do elemento no sistema radicular (4,03 mg). Entretanto, a baixa concentração está associada ao efeito de diluição, uma vez que tal genótipo apresentou a maior produção de matéria seca de raiz (0,90 g), na presença de alumínio (Braccini et al., 1998). Por sua vez, a parte aérea mostrou alta conversão em biomassa, apesar de ser o conteúdo de alumínio nas raízes elevado, o que revela a existência de algum mecanismo de tolerância interna neste genótipo, tal como compartimentalização do alumínio em determinados sítios, ou formação de quelatos com proteínas e ácidos orgânicos (Foy, 1988; Taylor, 1991), resultando em menor translocação de alumínio para a parte aérea.

O genótipo UFV 2147 (sensível) apresentou concentração de alumínio nas raízes similar à que foi observada para o UFV 2149 (tolerante) (Quadro 1). Entretanto, neste caso, a maior sensibilidade está

associada à grande interferência do alumínio na nutrição do fósforo e do cálcio. Esse genótipo apresenta uma das maiores reduções na absorção, no acúmulo e na eficiência de utilização de tais nutrientes.

CONCLUSÕES

1. Os genótipos estudados acumularam quantidades elevadas de alumínio nas raízes.
2. A tolerância ao alumínio foi associada à menor precipitação de fósforo nas raízes e maior eficiência no uso deste nutriente.
3. A tolerância ao alumínio também foi relacionada com menor redução na absorção de cálcio e aumento na eficiência deste nutriente.
4. A compartimentação do alumínio nas raízes não se relacionou com a tolerância ou sensibilidade a este elemento.

LITERATURA CITADA

- ALVAREZ V., V.H. Caracterização química de solos. Viçosa, Universidade Federal de Viçosa, 1985. 77p.
- BAILIAN, L.; McKEAND, S.E. & ALLEN, H.L. Genetic variation in nitrogen use efficiency of loblolly pine seedlings. *For. Sci.*, 37:613-626, 1991.
- BALIGAR, V.C.; SCHAFFERT, R.E.; SANTOS, H.L.; PITTA, G.V.E. & BAHIA FILHO, A.F.C. Soil aluminium effects on uptake, influx, and transport of nutrients in sorghum genotypes. *Plant Soil*, 150:271-277, 1993.
- BENNET, R.J.; BREEN, C.M. & FEY, M.V. Aluminium toxicity and induced nutrient disorders involving the uptake and transport of P, K, Ca and Mg in *Zea mays* L. *South Afr. J. Plant Soil*, 3:11-17, 1986.
- BRACCINI, M.C.L.; MARTINEZ, H.E.P.; PEREIRA, P.R.G.; SAMPAIO, N.F. & SILVA, E.A.M. Tolerância de genótipos de cafeeiro ao alumínio em solução nutritiva: I. Crescimento e desenvolvimento da parte aérea e sistema radicular. *R. Bras. Ci. Solo*, 22:435-442, 1998.
- BRAGA, J.M. & DEFELIPO, B. Determinação espectrofotométrica de fósforo em extratos de solos e plantas. *R. Ceres*, 21:73-85, 1974.
- CALBO, A.G. & CAMBRAIA, J. Efeito do alumínio sobre a composição mineral de dois cultivares de sorgo (*Sorghum bicolor* L. Moench). *R. Ceres*, 27:369-378, 1980.
- CAMARGO, C.E.O. A concentração de fósforo na tolerância de cultivares de trigo à toxicidade de alumínio em soluções nutritivas. *Bragantia*, 44:49-64, 1985.
- CLARKSON, D.T. & SANDERSON, J. Inhibition of the uptake and long-distance transport of calcium by aluminum and other polyvalent cations. *J. Exp. Bot.*, 22:837-851, 1971.
- FOY, C.D.; FLEMING, A.L. & GERLOFF, G.C. Differential aluminium tolerance in two snapbean varieties. *Agron. J.*, 64:815-818, 1972.
- FOY, C.D. Plant adaptation to acid aluminum-toxic soils. *Comm. Soil Sci. Plant Anal.*, 19:959-987, 1988.
- HOAGLAND, D.R. & ARNON, D.I. The water culture method for growing plants without soil. Berkeley, Cal. Agric. Exp. Station, 1950. 347p. (Cal. Agric. Exp. Station Cir.)
- HUANG, J.W.; SHAFF, J.E.; GRUNES, D.L. & KOCHIAN, L.V. Calcium fluxes in Al-tolerant and Al-sensitive wheat roots measured by Ca-selective microelectrodes. *Plant Physiol.*, 98:230-237, 1992.
- LONDOÑO, M.E.A & VALENCIA A., G. Toxicidad de aluminio en plantas de café. *Cenicafé*, 34:61-97, 1983.
- MACKLON, A.E.S. & SIM, A. Modifying effects of a non-toxic level of aluminium on phosphate fluxes and compartmentation in root cortex cells of intact ryegrass seedlings. *J. Exp. Bot.*, 43:1483-1490, 1992.
- MALAVOLTA, E.; DANTAS, J.P.; MORIAS, R.S. & NOGUEIRA, F.D. Calcium problems in Latin America. *Comm. Soil Sci. Plant Anal.*, 10:29-40, 1979.
- MASSOT, N.; POSCHENRIEDER, C. & BARCELÓ, J. Differential response of three bean (*Phaseolus vulgaris* L.) cultivars to aluminum. *Acta Bot. Neerl.*, 41:293-298, 1992.
- McCORMICK, L.H. & BORDEN, F.Y. The occurrence of aluminium phosphate in plant roots. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.*, 38:931-933, 1974.
- PAVAN, M.A. & BINGHAN, F.T. Toxidez de alumínio em cafeeiros cultivados em solução nutritiva. *Pesq. Agropec. Bras.*, 17:1293-1302, 1982.
- TAYLOR, G.J. Current views of the aluminum stress response; the physiological basis of tolerance. *Current Topics Plant Biochem. Physiol.*, 10:57-93, 1991.
- SIDDIQI, M.Y. & GLASS, A.D.M. Utilization index: a modified approach to the estimation and comparison of nutrient utilization efficiency in plants. *J. Plant Nut.*, 4:289-302, 1981.