

TOXIDEZ DE ALUMÍNIO EM CAFEIROS CULTIVADOS EM SOLUÇÃO NUTRITIVA¹

M.A. PAVAN² e F.T. BINGHAM³

RESUMO - Experimentos com solução nutritiva foram conduzidos, durante dois anos, em casa de vegetação, para estudar a influência dos íons de Al no crescimento e produção de cafeeiros. O Al foi adicionado na solução nutritiva nas concentrações de 0,0, 0,074, 0,148, 0,296, 0,444 e 0,888 mmol dm⁻³. O crescimento radicular das plantas e a produção de café diminuíram progressivamente com o aumento da concentração de Al na solução. O sintoma inicial da toxidez de Al foi caracterizado por um retardamento no crescimento radicular, aumento no diâmetro das raízes e diminuição no número de raízes laterais por unidade de raiz principal. Os sintomas foliares foram observados após uma prolongada exposição das plantas ao Al: folhas jovens menores, cloróticas, com pequenos pontos necróticos na margem e com aspecto típico de "enrolamento"; e folhas velhas com clorose marginal, a qual progrediu para o centro do limbo. Os sintomas visuais observados nas folhas foram associados com uma concentração de Al acima de 300 µg g⁻¹. A toxidez de Al foi também caracterizada por uma redução na absorção de Ca, Mg e P e um aumento na absorção de K e Al.

Termos para indexação: *Coffea arabica* L., absorção, nutrição, formas iônicas de Al.

ALUMINUM TOXICITY IN COFFEE TREES CULTIVATED IN NUTRIENT SOLUTION

ABSTRACT - A solution culture experiment was designed to show the influence of low to excessive concentrations of Al on coffee yields. The treatments consisted of six Al concentrations: 0.0, 0.074, 0.148, 0.296, 0.444, and 0.888 mmol dm⁻³. Shoot, root and coffee fruit weights were progressively decreased under the Al treatments. There was significant reduction in all growth parameters even at lowest Al treatment. The lateral roots of Al stressed plants were thicker, shorter, and fewer in number than those of the control plants. The development of root tip was inhibited and the roots developed a brown color. The younger leaves of Al stressed plants were small, chlorotic, and curled along the margins. Aluminum toxicity symptoms on older leaves include marginal chlorosis which progressed to the center of leaf. Visual injury symptoms exhibited by coffee leaves were associated with leaf Al concentration above 300 µg g⁻¹. Aluminum toxicity was associated with reduced uptake of Ca, Mg and P, and increased uptake of K and Al.

Index terms: *Coffea arabica* L., absorption, nutrition, ionic forms of Al.

INTRODUÇÃO

As principais áreas de produção de café no Brasil estão localizadas em regiões caracterizadas por solos ácidos, baixa saturação de bases e, frequentemente, possuem alumínio (Al) trocável em quantidades suficientemente altas para afetar o crescimento normal de muitas espécies de plantas cultivadas (Demattê 1981).

O efeito nocivo de Al em plantas tem sido extensivamente pesquisado por muitos cientistas como Clarkson (1969), Adams & Lund (1966), Foy et al. (1978), Helyar (1978) e Kamprath (1970). Geralmente o efeito tóxico de Al é notado em raf-

zes de plantas antes que qualquer sintoma possa ser evidente na parte aérea (Kerridge et al. 1971). Os sintomas de toxidez de Al são também associados com deficiência de P (Foy & Brown 1963) e com reduzida absorção e translocação de Ca (Johnson & Jackson 1964 e Foy 1974).

O efeito de Al na absorção e metabolismo de P foi descrito nos trabalhos de Clarkson (1965 e 1966). Clarkson sugere duas reações entre Al e P; a primeira ocorrendo na superfície celular ou no interior dos espaços livres entre as células, resultando na fixação de P por uma reação de adsorção ou precipitação; a segunda ocorrendo internamente na célula, possivelmente no interior do mitocôndrio. As evidências citadas por Clarkson (1965 e 1966) não suportam a teoria de que Al aumenta a adsorção de P. McCormick & Borden (1972 e 1974) também observaram uma interação entre Al e P

¹ Aceito para publicação em 12 de maio de 1982.

² Eng.º Agr.º, Ph.D., IAPAR, Caixa Postal 1331, CEP 86100 - Londrina, PR.

³ Ph.D., Professor of Soil Science, Univ. of California, Riverside 92521, USA.

em tecidos de raízes os quais foram associados com reduzida acumulação de P na parte aérea das plantas.

Com relação a experimentos conduzidos em solução nutritiva, a concentração de P pode controlar a atividade dos íons de Al no meio, logicamente dependendo do pH. Por exemplo, no pH 4,0 precipitação de fosfato de alumínio pode ser quantitativamente significativa (Foy & Brown 1963). Portanto, a concentração de P em solução nutritiva mantida em pH ácido tem que ser suficientemente baixa para minimizar os complexos com íons de Al. Evidentemente, íons de Al podem combinar com íons de P na superfície das raízes, na parede das células, entre os espaços livres das células, no interior das células, ou na solução nutritiva (precipitação). Independente de como é precipitado ou imobilizado, o P se torna menos viável aos processos metabólicos das plantas. Em adição às reações de Al-P, o efeito de Al no crescimento de plantas tem sido associado com inibição da absorção de Ca. Johnson & Jackson (1964) demonstraram que o Al reduziu a absorção e acumulação de Ca na parte aérea de plantas de trigo. Esta redução na absorção de Ca não pode ser corrigida por adições suplementares de Ca na solução nutritiva. Detalhes adicionais dos efeitos tóxicos de Al em plantas podem ser obtidos nas revisões feitas por Foy et al. (1978), Adams (1978), Kamprath (1978) e Helyar (1978).

Embora haja um grande número de publicações referentes aos efeitos tóxicos de Al a muitas variedades de espécies de plantas cultivadas em solos ácidos, há relativamente poucos dados específicos para o café. Manetti & Santos (1977) publicaram o resumo de um trabalho de pesquisa no qual foram testadas a tolerância ao Al de quatro cultivares de *Coffea arabica* e uma cultivar de cruzamento interespecífico de *Coffea arabica* com *Coffea canephora*. Os autores concluíram que houve um efeito benéfico do Al a todas as cultivares de café quando este elemento foi adicionado em solução na concentração de 0,22 mmol dm⁻³. Devido aos limitados dados de pesquisa publicados, referentes ao efeito dos íons de Al em cafeeiros, foram conduzidos experimentos em solução nutritiva especificamente para estudar:

- os efeitos de Al no crescimento, produção e composição química de cafeeiros; e
- determinar as concentrações de Al em solução que induzem sintomas de toxidez.

MATERIAL E MÉTODOS

Plântulas de *Coffea arabica* L., cultivar Catuaí Vermelho (H 2077-2-5-99)⁴, germinadas em papel-toalha umedecido, foram transferidas em estádio "palito de fósforo" (aproximadamente 10 cm de altura) para tanques de plástico contendo solução nutritiva. Os tanques tinham capacidade para 150 litros de solução e foram posicionados de modo que 3/4 do volume total estavam abaixo do nível do solo. Cada tanque continha duas mudas de café crescendo em solução nutritiva completamente aerada. As soluções nutritivas eram trocadas automaticamente a cada 30 dias. A composição química da solução nutritiva é apresentada na Tabela 1.

TABELA 1. Composição da solução nutritiva usada para caracterizar a toxidez de Al em mudas de café.

Nutrientes	Composição molar mol dm ⁻³
Ca	1,25 x 10 ⁻³
Mg	0,50 x 10 ⁻³
K	1,28 x 10 ⁻³
Fe*(III)	0,22 x 10 ⁻³
Mn	2,25 x 10 ⁻⁶
Cu	1,93 x 10 ⁻⁸
Zn	0,48 x 10 ⁻⁷
MoO ₄	1,30 x 10 ⁻⁷
B(OH) ₄	1,15 x 10 ⁻⁵
SO ₄	0,50 x 10 ⁻³
NO ₃	3,75 x 10 ⁻³
P	3,00 x 10 ⁻⁵

* Ferro foi adicionado com F-EDDHA (Ethylene dihydroxyphenyl glycine).

O pH da solução nutritiva era ajustado continuamente a 4,0 ± 0,2 com adições automáticas de H₂SO₄ ou HNO₃. A concentração de P (3,0 x 10⁻⁵ mol dm⁻³) e o pH da solução nutritiva foram mantidos baixos para minimizar as precipitações de Al. Os tratamentos consistiram em aplicações de Al total solúvel (Al_t) em soluções nas concentrações de 0,0; 0,74; 0,148; 0,296; 0,444 e 0,888 mmol dm⁻³ adicionado com Al₂(SO₄)₃ · 18 H₂O. Embora as soluções fossem trocadas mensalmente, as concentrações

⁴ Identificação do material expedido pela Seção de Genética do Instituto Agrônomo de Campinas.

de Al nas soluções eram ajustadas a cada 2-3 dias aos níveis desejados. Esta operação consistiu da retirada de uma amostra de 200 ml da solução de cada tanque e Al analisado quimicamente por absorção atômica (Webber 1974). O volume de cada tanque foi mantido constante com adições diárias de água deionizada. Seguindo a técnica descrita acima, foram mantidas as concentrações desejadas de Al dentro de 10%. O delineamento experimental consistiu de seis tratamentos com cinco repetições, em um desenho estatístico de blocos ao acaso.

As mudas de cafeeiros foram mantidas com os tratamentos por, aproximadamente, dois anos. Ao final do experimento, os frutos de café foram colhidos em estádio "cereja", lavados em água deionizada, secados, beneficiados e pesados. O peso em gramas por planta de café beneficiado foi analisado estatisticamente. Amostras do café seco foram moídas, digeridas com ácido nítrico e perclórico e analisadas quimicamente. Amostras de folhas compostas pelo terceiro par de folhas, contadas a partir do par mais jovem dos ramos produtivos, foram coletadas, lavadas inicialmente em solução de detergente, enxaguadas em água deionizada, secadas a 70°C, moídas e passadas em uma peneira de malha 20. Amostras dos ramos laterais produtivos foram coletadas e preparadas para análises químicas. As raízes foram recuperadas das soluções, cuidadosamente lavadas e deixadas por duas horas em água deionizada. Após esse procedimento, as raízes foram secadas a 70°C, pesadas e moídas. Os tecidos moídos (folhas, frutos, ramos e raízes) foram homogeneizados e armazenados separadamente em tubos de vidro. Três amostras, de 100 mg cada, dos materiais vegetais foram transferidas para tubo teste, e digeridas com ácido nítrico e perclórico (Ganje & Page 1974) e analisadas para Al, Ca, Mg, K e Mn por espectrofotometria de absorção atômica e para P colorimetricamente pelo método de azul de molibdênio usando o ácido ascórbico como agente redutor. O restante das folhas, ramos e troncos das plantas foram separadamente lavados, secados a 70°C e pesados. O peso total da parte aérea das plantas incluiu o peso total das folhas, ramos e tronco. As taxas de absorções de Al, Ca, Mg, Mn, K, Fe e P foram calculadas de acordo com equação de William (1948), modificada por Carrol & Loneragan (1969). A distribuição desses elementos químicos nas mudas de cafeeiro foi calculada de acordo com a equação descrita por Edwards et al. (1976).

Determinação das formas iônicas de Al na solução

Antes e depois da renovação das soluções nutritivas, uma amostra de 200 ml da solução de cada tanque foi coletada e analisada quimicamente para Al, Ca, Mg, Mn, K, Fe, Cu, Zn, Cl, NO₃, SO₄, CO₃, HCO₃, P e carbono orgânico. Al, Ca, Mg, Mn, K, Fe, Cu e Zn foram determinados por espectrofotometria de absorção atômica; NO₃ - N, colorimetricamente com o ácido fenoldisulfônico (Bremner 1965); SO₄ - S, por um método indireto usando-se absorção atômica (Galindo et al. 1969);

Cl, por titulação com nitrato de prata (Jackson 1958); P, colorimetricamente pelo método de azul de molibdênio usando o ácido ascórbico como agente redutor (Jackson 1958); CO₃ e HCO₃, colorimetricamente usando fenolfitaléina e alaranjado de metila como indicadores, respectivamente (Jackson 1958). As concentrações de carbono total e inorgânico foram determinadas usando-se um analisador de carbono. O carbono orgânico foi determinado pela diferença entre o carbono total e o carbono inorgânico. Os resultados das determinações analíticas, incluindo todas as formas iônicas, expressos em mmol dm⁻³, pH e P_{CO₂} = 10^{-3,5} atm. foram usados em um programa

de computador Geochem (Sposito & Mattigod 1980) para estimar as formas iônicas de Al na solução. As formas de Al foram estimadas em relação ao Al total solúvel (Al_t), determinado analiticamente. Por exemplo, de acordo com os parâmetros termodinâmicos armazenados no programa Geochem (Sposito & Mattigod 1980), foram estimadas as concentrações das formas de Al tais como: Al³⁺, AlOH²⁺, Al(OH)₂⁺, AlSO₄⁺, Al(SO₄)₂⁽⁵⁾ e AlCl²⁺. As concentrações dessas formas iônicas foram correlacionadas com a absorção de Al pelas raízes das plantas do cafeeiro.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

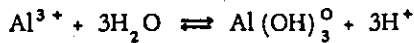
Alumínio na solução nutritiva

As formas iônicas de Al em solução nutritiva mantidas em pH 4,0 foram estimadas por um programa de computador (Sposito & Mattigod 1980) e são apresentadas na Tabela 2. O alumínio existiu na solução principalmente como Al³⁺ e formando complexos com OH⁻, SO₄²⁻, NO₃⁻, B(OH)₄⁻ e Cl⁻. A importância destes dados é que, nas condições do presente experimento, a forma Al³⁺ foi dominante na solução nutritiva. Embora tenham existido complexos de Al com HCO₃⁻, Cl⁻, NO₃⁻ e ARG.⁽⁶⁾, suas concentrações representaram menos de 1% do Al_t em pH 4,0. Praticamente, todo o Al que formou complexos com OH⁻ estava presente como a forma AlOH²⁺. No pH 4,0 íons OH⁻ não controlaram significativamente a solubilidade de Al. Entretanto, no pH 4,5 - 5,0 há formação significativa de complexos de Al com OH diminuindo a atividade de Al³⁺ na solução (Pavan 1981). Os argumentos teóricos e os resultados experimentais suportam a conclusão de que, em estudos de toxicidade de Al em plantas, o pH da solução tem que ser

⁵ Al³⁺ + 2SO₄²⁻ = Al(SO₄)₂⁻ log K = 5,11

⁶ Arginina

mantido ao redor de 4,0 para que a forma iônica dominante no meio seja Al^{3+} . Esta conclusão baseia-se na teoria de que a forma Al^{3+} seja preferencialmente absorvida pelas raízes das plantas (Foy et al. 1978). Os dados discutidos acima estão em acordo com os estudos de solubilidade de Al (Ragland & Coleman 1960, Raupach 1963a e 1963b e Jackson 1963), nos quais prevalece a seguinte reação:



Raupach (1963b) publicou que em pH 4,0 90% do Al solúvel está presente como Al^{3+} . Se no pH 4,0 é minimizada a formação de complexos entre Al e OH, por outro lado, a solubilidade de Al depende da concentração de P no meio. Portanto, a concentração de P na solução nutritiva tem que ser suficientemente reduzida para minimizar os complexos com Al. A Tabela 2 apresenta dados de Al formando complexos P. Este complexo ocorreu quando a concentração de Al na solução foi maior que $444 \mu mol dm^{-3}$. Estudos realizados em nosso laboratório mostraram que a concentração de Al_t na solução pode ser de até $370 \mu mol dm^{-3}$ desde que a concentração de P na solução não exceda $3,0 \mu mol dm^{-3}$. Estas conclusões estão de acordo com as observações feitas por Foy & Brown (1963) e Munns (1965) em relação à máxima concentração de P que não afeta significativamente a solubilidade de Al em solução mantida no pH 4,0. Foy & Brown (1963) também publicaram que era necessária uma relação P/Al igual ou superior a 2 na solução para que fossem neu-

tralizados os efeitos tóxicos do Al solúvel. No presente experimento, a relação P/Al é menor que 2 em todas as soluções contendo Al (Tabela 3), indicando que P não teve um efeito significativo para formar complexos com Al na solução.

Efeito do Al no desenvolvimento e produção do cafeeiro

Os efeitos dos tratamentos com Al na produção de café, peso da matéria seca da parte aérea e raízes, altura das plantas e a relação parte aérea/raízes são apresentados na Tabela 3. Os parâmetros analisados foram severamente afetados pelos tratamentos com Al. Houve uma redução no desenvolvimento e na produção de café mesmo na mais baixa concentração de Al_t em solução ($0,074 mmol dm^{-3}$). Esta concentração de Al na solução causou uma perda de 22, 30 e 27% no crescimento da parte aérea, raízes e produção de café, respectivamente. Concentrações de Al na solução de $0,296 mmol dm^{-3}$ diminuíram a produção de café para zero. Estes dados não confirmam aqueles publicados por Manetti & Santos (1977), nos quais as quatro cultivares de cafeeiro testadas, inclusive o Catuaí Vermelho indicador do presente trabalho, apresentaram uma resposta altamente favorável mesmo à concentração alta de Al na solução. Manetti & Santos (1977) publicaram que uma concentração de $0,22 mmol dm^{-3}$ favoreceu o desenvolvimento de mudas de café. No presente experimento, o Al caracterizou-se por ser um elemento tóxico e não-benéfico ao cafeeiro.

A relação parte aérea/raiz decresceu com adições de Al na solução. Similarmente, Andrew et al. (1973) encontraram uma diminuição na

TABELA 2. Distribuição das formas químicas de Al como metal livre (Al^{3+}) e em complexos com os principais ligantes na solução nutritiva mantida no pH 4,0.

Al_t	Al^{3+}	Al em complexos com ligantes					Al em complexos com OH^-		
		NO_3^-	Cl^-	$B(OH)_4^-$	SO_4^{2-}	PO_4^{3-}	$Al(OH)^{2+}$	$Al(OH)_2^+$	$Al(OH)_3^0$
$\mu mol dm^{-3}$									
74,1	64,17	$1,5 \times 10^{-6}$	$0,3 \times 10^{-2}$	0,10	5,0	-	4,58	0,29	0,04
147,9	128,44	$3,0 \times 10^{-6}$	$0,6 \times 10^{-2}$	0,20	9,5	-	9,12	0,57	0,07
296,0	258,30	$5,9 \times 10^{-6}$	$1,2 \times 10^{-2}$	0,47	17,7	-	18,20	1,15	0,13
444,0	371,50	$8,3 \times 10^{-6}$	$1,7 \times 10^{-2}$	0,68	23,4	20,3	26,30	1,66	0,20
888,0	741,30	$15,1 \times 10^{-6}$	$31,6 \times 10^{-2}$	1,23	38,0	52,6	51,30	3,16	0,38

relação parte aérea/raiz para espécies de legumes de pastagens sensíveis à toxidez de Al. Uma relação alta sugere que a massa radicular foi eficiente na absorção de água e nutrientes, suportando, assim, um bom desenvolvimento da parte aérea.

Efeito de Al nas composições químicas do cafeeiro

Os efeitos de Al em solução na concentração de Al, Ca, Mg, Mn, K e P nas folhas do cafeeiro são apresentados na Tabela 4. A concentração de Al nas folhas aumentou como resultado dos tratamentos com Al. Em geral, o Al adicionado na solução decresceu a concentração de Ca, Mg, P e Mn nos tecidos foliares e aumentou a concentração de Al e K. A redução na concentração total de Ca e Mg no cafeeiro foi aproximadamente balanceada pelo aumento em K e Al (Fig. 1). Andrew et al. (1973) concluíram que o aumento na absorção de K, atribuída aos efeitos de Al na absorção de Ca e

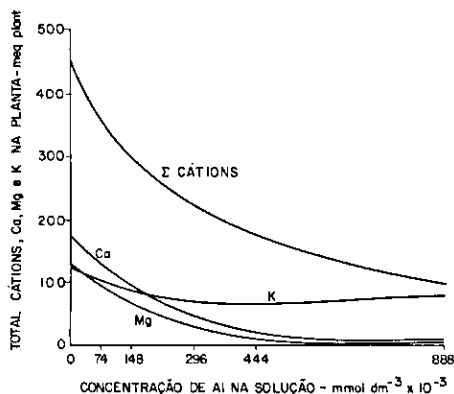


FIG. 1. Cátions totais, Ca, Mg e K por planta de cafeeiro em função da concentração de Al na solução nutritiva.

TABELA 3. Efeito do Al em solução nutritiva no peso seco das raízes e da parte aérea, no desenvolvimento das mudas e na produção de café, amostradas dois anos após o início dos tratamentos.

Al _t Solução mmol dm ⁻³	Peso seco		Café beneficiado g planta ⁻¹	Altura planta (cm)	Parte aérea/ raiz	P/Al Solução
	Raiz g planta ⁻¹	Parte aérea g planta ⁻¹				
0,000	133 a	292 a	26,9 a	92 a	2,12 a	-
0,074	103 b	198 b	19,6 b	80 b	1,92 b	0,42
0,148	102 b	176 c	11,8 c	73 c	1,72 c	0,21
0,296	87 c	106 d	-	63 d	1,22 d	0,11
0,444	68 d	82 e	-	51 e	1,21 d	0,07
0,888	61 d	71 e	-	50 e	1,16 e	0,04

As diferenças médias dentro das colunas foram calculadas pelo teste de Duncan (5%).

TABELA 4. Composição química das folhas (terceiro par de folha) de café amostradas dois anos após o início dos tratamentos.

Al _t Solução mmol dm ⁻³	Al μg g ⁻¹	Mn μg g ⁻¹	Fe μg g ⁻¹	Ca %	Mg %	P %	K %
0,000	44 a	118 a	115 a	1,17 a	0,40 a	0,11 a	1,35 ab
0,074	124 b	98 a	103 a	1,09 ab	0,33 ab	0,11 a	1,25 a
0,148	141 c	97 a	100 a	0,90 bc	0,34 ab	0,11 a	1,33 ab
0,296	150 c	66 b	112 a	0,76 c	0,31 bc	0,09 b	1,90 b
0,444	169 d	34 c	107 a	0,31 d	0,14 d	0,06 c	2,33 c
0,888	306 e	21 c	119 a	0,14 d	0,14 d	0,07 c	3,29 d

As diferenças de médias dentro das colunas foram calculadas pelo teste de Duncan (5%).

TABELA 5. Influência dos tratamentos com Al em solução nutritiva na taxa de absorção de nutrientes (Ca, Mg, K, Mn, Fe e P) e Al pelas raízes de cafeeiros.

Al _t Solução mmol dm ⁻³	Absorção						
	Ca	Mg	K	Mn	Fe	P	Al
	μ mol g-raiz ⁻¹ dia ⁻¹						
0,000	4,8 a	3,5 a	5,6 b	0,033 a	0,052 a	0,71 a	0,12 d
0,074	4,2 b	3,2 a	5,4 a	0,024 ab	0,045 b	0,64 b	0,15 d
0,148	3,5 c	2,6 b	5,4 a	0,022 b	0,041 b	0,56 c	0,17 d
0,296	2,2 d	1,4 c	5,4 a	0,011 c	0,038 c	0,42 d	0,23 c
0,444	0,7 e	0,6 d	5,7 b	0,005 d	0,034 c	0,34 e	0,30 b
0,888	0,3 f	0,4 d	6,3 c	0,003 d	0,043 b	0,31 e	0,41 a

As diferenças de médias dentro das colunas foram calculadas pelo teste de Duncan (5%).

TABELA 6. Influência dos tratamentos com Al em solução nutritiva na distribuição de nutrientes e Al nas raízes e parte aérea das mudas de café, amostradas dois anos após o início dos tratamentos.

Al _t Solução mmol dm ⁻³	Distribuição de nutrientes													
	Ca		Mg		K		Mn		Fe		P		Al	
	P.A. *	Raiz	P.A. *	Raiz	P.A. *	Raiz	P.A. *	Raiz	P.A. *	Raiz	P.A. *	Raiz	P.A. *	Raiz
	%													
0,000	88	12	68	32	75	25	93	7	57	43	72	28	74	26
0,074	79	21	68	32	74	26	92	8	50	60	72	28	70	30
0,148	70	30	59	41	72	28	90	10	48	52	71	29	64	36
0,296	69	31	68	32	70	30	85	15	41	59	52	47	33	67
0,444	79	21	68	32	74	26	83	17	40	60	40	60	25	75
0,888	80	20	75	25	78	24	83	17	33	67	36	64	25	75

* - P.A. = Parte aérea.

Mg, pode ter ocorrido devido à capacidade das plantas em preservar um balanço catiônico.

A influência do Al adicionado na solução nutritiva na taxa de absorção de alguns nutrientes por unidade de peso de raiz é apresentada na Tabela 5. As taxas de absorção de Ca, Mg, Mn, Fe e P diminuíram progressivamente com o aumento da concentração de Al na solução. A absorção de K aumentou significativamente, apenas, na mais alta concentração de Al na solução. A absorção de Al aumentou significativamente nos tratamentos com Al. Portanto, estes dados indicam que a toxidez de Al em mudas de café foi associada com uma diminuição na absorção de Ca, Mg, Mn, Fe e P e um aumento na absorção de Al.

A Tabela 6 mostra a influência de Al em solução na distribuição de alguns nutrientes nas raízes e parte aérea das mudas de cafeeiro. A percentagem de Ca, Mn, Fe e P que permaneceu nas raízes aumentou, e a que foi translocada para a parte aérea,

diminuiu com o aumento das doses de Al na solução nutritiva. A observação dos dados da Tabela 6 mostra que não houve efeito claro do Al na translocação do Mg para a parte aérea. A percentagem de Ca e Mg que permaneceu na parte aérea das plantas foi maior do que nas raízes, sugerindo que as folhas do cafeeiro foram o principal órgão armazenador de Ca e Mg. A redução nas percentagens de Mn e Fe na parte aérea das plantas com o aumento da concentração de Al na solução provavelmente esteve relacionada com a redução na absorção (Tabela 5). Os tratamentos com Al não afetaram significativamente a acumulação de K nas raízes ou folhas, embora a absorção de K tenha aumentado com a mais alta concentração de Al na solução.

A absorção de P foi reduzida com adição de Al na solução (Tabela 5). A percentagem de P que permaneceu nas raízes aumentou e a que permaneceu na parte aérea das plantas diminuiu com os tra-

tamentos de Al (Tabela 6). Este fato sugere que o Al reduziu o transporte de P para a parte aérea, provavelmente, devido à imobilização de P na superfície ou no interior das células das raízes. O complexo Al-P nas raízes pode ser suficientemente importante para induzir sintomas de deficiência de P na parte aérea das mudas de café.

Sintomas de toxidez de Al

O primeiro sintoma visual da toxidez de Al foi na redução do crescimento do sistema radicular do café na solução. O desenvolvimento da região apical das raízes foi inibido e as raízes sob o estresse de Al apresentavam uma coloração amarelo-escura. Clarkson (1965) relatou que a diminuição do crescimento de raízes de plantas sob o estresse de Al pode ser devida, em parte, à inibição da divisão celular. Em geral, as raízes laterais (primárias e secundárias) das plantas sob o estresse de Al foram caracterizadas por um maior diâmetro, apresentavam uma superfície externa irregular e eram menores do que as raízes de plantas crescendo em solução sem Al. As raízes das plantas controles (sem Al) eram longas, filiformes e de superfícies exter-

nas regulares e brancas. Também foi observado que a primeira raiz lateral das plantas sob o estresse de Al iniciou mais próximo da região apical da raiz principal. Tomando-se como base dados médios das plantas sob o estresse de Al, observou-se que a primeira raiz lateral iniciou cerca de 2 cm acima da região apical da raiz principal, ao passo que a de plantas normais (sem Al) iniciou cerca de 10 cm acima da região apical. Provavelmente, o efeito tóxico de Al na destruição das células da região meristemática apical da raiz principal tenha impedido a produção de compostos orgânicos (provavelmente hormônios) que controlam ou restringem o crescimento de raízes laterais próximas à região apical (Clowes 1961). Os resultados do presente experimento indicaram que as raízes das plantas do café foram o principal órgão a ser afetado por quantidades excessivas de Al na solução nutritiva.

Os sintomas visuais da toxidez de Al na parte aérea das plantas foram relacionados com as mudanças nas concentrações de outros constituintes minerais. A Fig. 2 mostra os efeitos de Al_t ($0,296 \text{ mmol dm}^{-3}$) na solução nutritiva nos sintomas foliares em mudas de cafés, amostradas dezoito meses após o início dos tratamentos. Em



FIG. 2. Vista geral dos sintomas de toxidez de Al em mudas de cafés em solução nutritiva.



FIG. 3. Sintomas da toxidez de Al em folhas jovens de cafeeiros; folhas pequenas, apresentando clorose e alguns pontos necróticos ao longo da margem e com um aspecto de enrolamento.



FIG. 4. Sintomas da toxidez de Al em folhas de cafeeiros localizada na parte média dos galhos produtivos; clorose e pontos necróticos iniciando na margem e progredindo para o interior do limbo da folha.

geral, as folhas jovens eram pequenas, apresentavam uma clorose e pontos necróticos ao longo da margem da folha e uma forma côncava e em calha devido, provavelmente, a um maior desenvolvimento da parte central do limbo em relação à margem das folhas e nervuras (Fig. 3). As folhas mais velhas de plantas sob o estresse de Al apresentaram uma clorose marginal que progrediu para o interior do limbo (Fig. 4). Estes sintomas da toxidez de Al nas folhas do cafeeiro foram associados com uma concentração de Al no terceiro par de folhas de $300 \mu\text{g g}^{-1}$ de tecido seco. De um modo geral, os sintomas de toxidez de Al em mudas de cafeeiro observados em solução nutritiva são semelhantes àqueles descritos em solos ácidos (Pavan 1981).

CONCLUSÕES

1. O primeiro sintoma notado da toxidez de Al em plantas de café foi uma redução no crescimento das raízes. As regiões apicais das raízes foram inibidas, as raízes laterais eram de maior diâmetro, menores, apresentaram um crescimento irregular e eram em menor número. Em geral, as raízes sob o estresse de Al mudaram a coloração de branca para amarelo-escura, particularmente na região apical. As primeiras raízes laterais de plantas afetadas por Al iniciaram próximo à região meristemática apical da raiz principal.

2. Os sintomas da toxidez de Al nas folhas do cafeeiro foram caracterizados inicialmente por um amarelecimento e pontos necróticos na margem das folhas jovens. Estas folhas eram menores e apresentavam um aspecto de calha. As folhas velhas apresentaram um amarelecimento que iniciou nas margens e progrediu para o interior do limbo. Uma concentração de Al nas folhas do cafeeiro de $300 \mu\text{g Al g}^{-1}$ foi associada com sintomas de toxidez. Adição de Al na solução diminuiu a absorção de Ca, Mg, Mn, Fe e P e aumentou a absorção de Al e K pelas raízes do cafeeiro.

3. Uma concentração de Al na solução de $0,074 \text{ mmol dm}^{-3}$ causou uma redução de 22, 30 e 27% no crescimento de parte aérea, raízes e produção de café, respectivamente. Não houve produção de café quando a concentração de Al na solução excedu $296 \mu\text{ mol dm}^{-3}$.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a inestimável ajuda dada pelo Dr. Garison Sposito, Professor de Físico-Química de Solos da Univ. California, Riverside, no programa de computador e interpretações da análise termodinâmica das soluções nutritivas.

REFERÊNCIAS

- ADAMS, F. Liming and fertilization of ultisols and oxisols. In: ANDREW, C.S. & KAMPRATH, E.J., ed. Mineral nutrition of legumes in tropical and subtropical soils. Melbourne, Australia, CSIRO, 1978. p.377-94.
- ADAMS, F. & LUND, Z.F. Effect of chemical activity of soil solution aluminum on cotton root penetration of acid subsoils. *Soil Sci.*, 101:193-8, 1966.
- ANDREW, C.S.; JOHNSON, A.D. & SANDLAND, R.L. Effect of aluminum on the growth and chemical composition of some tropical and temperate pasture legumes. *Aust. J. Agric. Res.*, 24:325-9, 1973.
- BREMNER, J.M. Inorganic forms of nitrogen. In: BLACK, C.A., ed. Methods of soil analysis. Madison, Am. Soc. Agron., 1965. p.1216-9. Part II.
- CARROL, M.D. & LONERAGAN, J.F. Response of plant species to concentration of zinc in solution. II. Rates of zinc absorption and their relation to growth. *Aust. J. Agric. Res.*, 20:457-63, 1969.
- CLARKSON, D.T. Effect of aluminum on the uptake and metabolism of phosphorus by barley seedlings. *Pl. Physiol.*, 41:165-72, 1966.
- CLARKSON, D.T. Metabolic aspects of aluminum toxicity and some possible mechanisms for resistance. In: RORISON, I.H., ed. Ecological aspects of the mineral nutrition of plants. Blackwell, Oxford, England, 1969. p.381-97.
- CLARKSON, D.T. The effect of aluminum and some other trivalent metal cations on cell division in the root apices of *Allium cepa*. *Ann. Bot. N.S.*, 29: 309-15, 1965.
- CLOWES, F.A.L. Apical meristems. Oxford, England, Blackwell Scientific Publishers. 1961. v.2. (Botanical Monographs).
- DEMATTE, J.D.I. Characteristic of brazilian soils related to root growth. In: RUSSEL, R.S.; IGUE, K. & MEHTA, Y.R., ed. The soil/root system in relation to brazilian agriculture. Londrina, IAPAR, 1981. p.21-41.
- EDWARDS, J.H.; HORTON, B.D. & KIRKPATRICK, H.C. Aluminum toxicity symptoms on peach seedlings. *J. Am. Soc. Hort. Sci.*, 101:139-42, 1976.
- FOY, C.D. Effect of aluminum on plant growth. In: CARSON, F.W., ed. The plant root and its environ-

- ment. Charlottesville, Univ. Press of Virginia, 1974. p.565-600.
- FOY, C.D. & BROWN, J.C. Toxic factors in acid soils. I. Characterization of aluminum toxicity in cotton. *Proc. Soil Sci. Soc. Am.*, 27:403-7, 1963.
- FOY, C.D.; CHANEY, R.L. & WHITE, M.C. The physiology of metal toxicity in plants. *An. Rev. Pl. Physiol.*, 29:511-66, 1978.
- GALINDO, G.G.; APPELT, H. & SCHALSCHA, E.B. Sulfur determination in soil extracts by an indirect atomic absorption spectrophotometric method. *Proc. Soil Sci. Soc. Am.*, 33:974-5, 1969.
- GANJE, T.J. & PAGE, A.L. Rapid dissolution of tissue for cadmium determination by atomic absorption spectrophotometry. *At. Absorp. News*, 13:131-4, 1974.
- HELYAR, K.R. Effects of aluminum and manganese toxicities on legume growth. In: ANDREW, C.S. & KAMPRATH, E.J., ed. *Mineral nutrition of legumes in tropical and subtropical soils*. Melbourne, Australia, CSIRO, 1978. p.207-31.
- JACKSON, M.L. Aluminum bonding in soils. A unifying principle in soil science. *Proc. Soil Sci. Soc. Am.*, 27:1-10, 1963.
- JACKSON, M.L. *Soil chemical analysis*. Englewood, Cliffs, New Jersey, Prentice-Hall, Inc., 1958. 498p.
- JOHNSON, R.E. & JACKSON, W.A. Calcium uptake and transport by wheat seedlings as affected by aluminum. *Proc. Soil Sci. Soc. Am.*, 28:381-6, 1964.
- KAMPRATH, E.J. Exchangeable aluminum as a criterion for liming leached mineral soils. *Proc. Soil Sci. Soc. Am.*, 34:252-4, 1970.
- KAMPRATH, E.J. Lime in relation to aluminum toxicity in tropical soils. In: ANDREW, C.S. & KAMPRATH, E.J., ed. *Mineral nutrition of legumes in tropical and subtropical soils*. Melbourne, Australia, CSIRO, 1978. p.232-45.
- KERRIDGE, P.C.; DAWSON, M.D. & MOORE, D.P. Separation of degrees of aluminum toxicity in wheat. *Agron.*, 63:586-91, 1971.
- MANETTI, F.J. & SANTOS, D. Tolerância ao alumínio em 4 cultivares de café (*Coffea arabica*, L.) e uma cultivar de cruzamento interespecífico de *Coffea arabica* com *Coffea canephora*. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE PESQUISAS CAFEEIRAS, 5, Guarapari, 1977. Resumos.
- MCCORMICK, L.H. & BORDEN, F.Y. Phosphate fixation by aluminum in plant roots. *Proc. Soil Sci. Soc. Am.*, 36:799-802, 1972.
- MCCORMICK, L.H. & BORDEN, F.Y. The occurrence of aluminum phosphate precipitate in plant roots. *Proc. Soil Sci. Soc. Am.*, 38:931-4, 1974.
- MUNNS, D.N. Soil acidity and growth of a legume. II. Reactions of aluminum and phosphate in solution and effects of aluminum, phosphate, calcium and pH on *Medicago sativa* L. and *Trifolium subterraneum* in solution culture. *Aust. J. Agric. Res.*, 16:743-55, 1965.
- PAVAN, M.A. Toxicity of Al (III) to coffee (*Coffea arabica*, L. in nutrient solution culture and in oxisols and ultisols amended with CaCO₃, MgCO₃, and CaSO₄.2H₂O. Riverside, University of California, 1981. Tese Doutorado.
- RAGLAND, J.L. & COLEMAN, N.T. The hydrolysis of aluminum salts in clay and soil systems. *Proc. Soil Sci. Soc. Am.*, 24:457-60, 1960.
- RAUPACH, M. Solubility of simple aluminum compounds expected in soils. II. Hydrolysis and conductance of Al³⁺. *Aust. J. Soil Sci.*, 1:36-45, 1963a.
- RAUPACH, M. Solubility of simple aluminum compounds expected in soils. IV. Reactions of aluminum hydroxide under acid conditions. *Aust. J. Soil Sci.*, 1:55-62, 1963b.
- SPOSITO, G. & MATTIGOD, S.V. A computer program for the calculation of chemical equilibria in soil solution and other natural water systems. Riverside, University of California, Kearney Foundation of Soil Science, 1980. 92p.
- WEBBER, M.D. Atomical absorption measurements of aluminum in plant digests and neutral salt extracts of soils. *Can. J. Soil Sci.*, 54:81-7, 1974.
- WILLIAM, R.F. The effects of phosphorus supply on the rates of intake of phosphorus and nitrogen and upon certain aspects of phosphorus metabolism in gramineous plant. *Aust. J. Sci. Res. B.*, 1:333-61, 1948.