

INFLUÊNCIA DO ALUMÍNIO SOBRE O COMPORTAMENTO NUTRICIONAL DE CULTIVARES DE MANDIOCA EM SOLUÇÃO NUTRITIVA¹

LUIZ EDSON MOTA DE OLIVEIRA² e ALEMAR BRAGA RENA³

RESUMO - Estudou-se, em solução nutritiva, a influência do alumínio (0, 5 e 10 ppm) sobre o comportamento de três cultivares de mandioca (*Manihot esculenta* Crantz) (Branca de Santa Catarina, Vassourinha SEL-514 e Riqueza), procurando captar diferenças de tolerância ao Al entre as cultivares e obter informações elucidativas do mecanismo da ação tóxica deste cátion nesta espécie. O teor de Al no sistema radicular das cultivares estudadas aumentou com a adição deste cátion na solução nutritiva. Entretanto, na parte aérea (lâmina foliar e pecíolo), apenas uma cultivar apresentou aumento no teor de Al, permanecendo as demais cultivares sem qualquer alteração. A presença do Al no meio de cultivo diminuiu o teor de P na parte aérea e aumentou-o no sistema radicular das cultivares estudadas. Os efeitos depressivos do Al sobre os teores de K, Ca e Mg nas cultivares estudadas foram, em média, maiores no sistema radicular que na parte aérea, sendo que na parte aérea a toxidez do Al atingiu mais o teor de Ca, e nas raízes, o de Mg. O Al reduziu a absorção e o teor d'água em todas as cultivares.

Termos para indexação: *Manihot esculenta*, toxidez de alumínio, nutrição mineral.

NUTRITIONAL BEHAVIOR OF CASSAVA CULTIVARS UNDER INFLUENCE OF ALUMINUM LEVELS IN NUTRIENT SOLUTION

ABSTRACT - This study aimed to evaluate the nutritional behavior of three cassava cultivars (*Manihot esculenta* Crantz) (Branca de Santa Catarina, Vassourinha SEL-514 and Riqueza), under influence of 0, 5 and 10 ppm of aluminum in nutrient solution. Differences in Al tolerance among the three cultivars, as well as the mechanism of toxic action of this cation were investigated. The amount of aluminum in the root system of the cultivars studied increased with the addition of this cation to the nutrient solution. However, in the leaf blade and petiole, only one cultivar showed increase in the content of aluminum whereas all other cultivars had not such alterations. The presence of aluminum in the medium reduced P concentration in aerial parts, but increased this element in the root systems of all cultivars. Reductions in concentrations of potassium, calcium and Mg, due to Al in the solution were on average, greater in the root systems than in aerial parts. In the roots, Al reduced mostly Mg, but in the aerial parts, Ca was more hardly reduced. Al also reduced both water absorption and water content of all three cultivars.

Index terms: aluminum toxicity, *Manihot esculenta*, mineral nutrition.

INTRODUÇÃO

De 20% a 25% do território brasileiro é constituído por solos sob Cerrado, caracterizados pela baixa fertilidade e pela insuficiência hídrica. A baixa fertilidade é consequência de vários fatores, entre os quais se salientam o baixo pH, a alta capacidade de fixação de P, a toxidez de Al e a escassez generalizada de nutrientes (Grupo de Implantação do CPAC - EMBRAPA, 1975).

O efeito primário da toxidez do Al sobre as plantas manifesta-se pelo bloqueio do crescimento das raízes, tornando-as curtas, grossas e com coloração marrom-escura (Foy 1974, Foy et al. 1978, Roy

et al. 1988). A inibição do crescimento radicular pode ser explicada pelo efeito inibitório do Al sobre a divisão e o alongamento celular (Clarkson 1966, 1969, Klimashevskii & Dedov 1976). As raízes danificadas pelo Al tornam-se ineficientes na absorção d'água (Lance & Pearson 1969, Mosquim et al. 1979, Roy et al. 1988) e de nutrientes (Bengtsson et al. 1988, Calbo 1978, Cambraia et al. 1987, Castells et al. 1987, Lance & Pearson 1969, Roy et al. 1988, Santoro et al. 1984), podendo a toxidez deste cátion, na parte aérea, ser evidenciada, em algumas plantas, por sintomas semelhantes aos de deficiência de P, e em outras, pela deficiência de Ca (Foy 1974, Foy et al. 1978, Taylor & Foy 1985a, 1985b).

Além da proeminente relação entre a toxidez de Al e a deficiência de P e de Ca, também o N, o K, o Mg, o Mn, o Cu e o Zn apresentam-se com teores reduzidos nos tecidos de certas plantas cultivadas sob níveis tóxicos de Al (Andrew et al. 1973, Calbo 1978, Cambraia et al. 1983, Chandias 1985, Lance &

¹ Aceito para publicação em 22 de julho de 1988.

² Eng. - Agr., Dr., Prof. - Adjunto, Dep. de Biol., ESAL, Caixa Postal 37, CEP 37200 Lavras, MG.

³ Eng. - Agr., Ph.D., Prof. - Titular, Dep. Biol. Veg., Centro de Ciências Biol. e da Saúde, UFV, CEP 36570 Viçosa, MG.

Pearson 1969, Lee 1971). Entretanto, algumas plantas submetidas a níveis tóxicos de Al acumulam P no sistema radicular (Andrew et al. 1973, Calbo 1978, Lee 1971), sugerindo que o Al possa reduzir a absorção ou a translocação deste elemento para a parte aérea, em decorrência da fixação do fosfato nas raízes, mediante uma reação de absorção-precipitação nos espaços intercelulares, na superfície celular ou mesmo dentro da célula (Clarkson 1966).

Conforme mencionado por Foy (1974, 1976), Foy et al. (1978) e Roy et al. 1988, existem nítidas diferenças na tolerância ao excesso de Al no meio de cultivo entre as espécies e as variedades de plantas. Dentre os fatores fisiológicos associados à tolerância diferencial das plantas à toxidez de Al, estão os relacionados com a capacidade de absorção e/ou transporte e/ou utilização de alguns elementos minerais na presença de Al, e os relacionados com a absorção e translocação do próprio Al (Foy et al. 1978, Suhayda & Haug 1986). Em muitas plantas a tolerância ao Al parece estar estreitamente associada com a capacidade de absorção e utilização de P na presença de Al (Andrew & Vandenberg 1973, Clark & Brown 1974, Foy et al. 1967). Entretanto, em várias plantas, a tolerância ao Al tem sido associada com a capacidade de absorção e transporte de Ca (Armiger et al. 1968, Foy et al. 1967), com a capacidade de absorção de K e Mg (Lee 1971), e com a eficiente utilização de Mg (Clark 1976).

Alguns resultados experimentais sobre adubação e/ou calagem têm indicado que existem diferenças genéticas entre as cultivares de mandioca quanto à tolerância a solos ácidos com baixa fertilidade e com alto nível de Al trocável e de manganês (Edwards et al. 1976, Howeler et al. 1976). Tem sido, também, constatado que a mandioca apresenta maior tolerância ao baixo pH, a altos níveis de Al e a baixos níveis de Ca, N e K do que várias espécies, e ainda tem a capacidade de tuberizar sob condições de severa deficiência de P (Edwards et al. 1976). No entanto, há grande carência de informações mais detalhadas sobre os efeitos do Al no crescimento, e, especialmente, sobre o comportamento nutricional de plantas de mandioca.

O propósito desta pesquisa foi o de estudar o comportamento de três cultivares de mandioca submetidas a diferentes níveis de Al, procurando captar diferenças de tolerância ao Al entre estas, e obter informações elucidativas do mecanismo da ação tóxica deste cátion nesta espécie.

MATERIAL E MÉTODOS

Nesta pesquisa foram utilizadas as cultivares de mandioca Branca de Santa Catarina, Vassourinha SEL-514 e Riqueza, obtidas da coleção da Universidade Federal de Viçosa. Foi utilizado o delineamento experimental de blocos casualizados, com arranjo fatorial completo 3 x 3, sendo três cultivares de mandioca e três níveis de Al (0 ppm, 5 ppm e 10 ppm de Al), com seis repetições de quatro plantas por parcela. As plantas para o experimento foram obtidas por enraizamento de brotações, de acordo com os métodos descritos por Cock et al. (1976) e Takatsu & Lozano (1975), com algumas modificações, descritas a seguir.

Obtenção e preparo das brotações para o enraizamento

Estacas com duas ou três gemas, obtidas de plantas vigorosas, foram desinfetadas com hipoclorito de sódio a 1%, por cinco minutos, e posteriormente lavadas com água comum. A seguir, as estacas foram plantadas em posição inclinada, em canteiros contendo uma mistura de terra e areia (1:1), previamente tratada com brometo de metila, em casa-de-vegetação. Quando as brotações atingiram uma altura entre 12 e 20 cm, foram cortadas, a aproximadamente 1 cm da superfície do canteiro, com uma faca esterilizada em álcool, e colocadas dentro de baldes de plástico contendo água destilada. Imediatamente após a colheita, as brotações foram levadas ao laboratório para serem selecionadas e uniformizadas. Com uma lâmina de barbear esterilizada em álcool, as brotações tiveram suas alturas reduzidas para 10 cm, e o número de folhas para dois ou três.

Enraizamento das brotações

Esta etapa foi realizada sob luz contínua, numa sala de crescimento com luminosidade de 10 klux a 12 klux, temperatura de $28^{\circ}\text{C} \pm 3^{\circ}\text{C}$ e umidade relativa entre 40% e 50%. As brotações foram tratadas por imersão de aproximadamente 2 cm de suas bases em uma solução de 1 ppm de ácido indolbutírico, durante 24 horas, e posteriormente, colocadas para enraizar em copos de vidro contendo água destilada suficiente para imergir 3 cm da base do caule. Durante o período de enraizamento o conteúdo de água dos copos foi mantido constante e, três vezes ao dia, as brotações foram pulverizadas com água destilada.

Aos dez dias, grupos de quatro plantas enraizadas foram transferidos para vasos de plástico contendo 1.650 ml de água destilada. Antes de serem transferidas para a casa-de-vegetação, as plantas foram submetidas, por três dias, a um fotoperíodo de doze horas na sala de crescimento.

Condições de cultivo das plantas

As plantas foram cultivadas inicialmente na casa-de-vegetação em 1.650 ml de solução nutritiva arejada, a qual continha a seguinte concentração de nutrientes, em ppm: N = 113 (100 na forma de NO_3^- e 13 na forma de NH_4^+); P = 2,15; K = 100; Ca = 103; Mg = 25; S = 45; Fe = 2,2; B = 0,5; Mn = 0,38; Zn = 0,05; Cu = 0,02 e Mo = 0,02.

Visando eliminar a influência da desuniformidade existente entre as plantas no início do experimento, as plantas de cada cultivar foram agrupadas e uniformizadas dentro de cada bloco experimental. Nas plantas da cultivar Branca de

Santa Catarina, as folhas em estágio de desenvolvimento mais avançado foram eliminadas, deixando-se apenas as folhas primordiais, sendo que nas cultivares Vassourinha SEL-514 e Riqueza, foram deixadas uma ou duas folhas mais desenvolvidas por planta.

Decorridos dez dias de cultivo na solução nutritiva sem Al, as plantas foram submetidas aos níveis de 0 ppm, 5 ppm e 10 ppm de Al, adicionados à solução nutritiva anteriormente descrita, durante 20 dias, quando então encerrou-se o experimento.

O nível das soluções nos vasos foi mantido pela adição diária de água destilada, com pH ajustado para 3,8. As soluções foram renovadas a cada período de quatro dias e sofreram, diariamente, correções do pH para 3,8 e da concentração de P para 2,15 ppm.

Características estimadas

Foram determinadas as seguintes características: teor de água e composição mineral da lâmina foliar, do pecíolo, do caule e da raiz; e absorção de água.

Para a determinação da composição mineral, a matéria seca foi moída em moinho Wiley, com peneira de 20 mesh, e submetida à digestão nitroperclórica (Lott et al. 1956). Em seguida, a solução mineral foi analisada para avaliação do P, pelo método de Lindeman (1968); para avaliação do K, por fotometria de chama; para avaliação do Ca e Mg, por espectrofotometria de absorção atômica; e para o Al, pelo método de HSU (1963).

A absorção de água foi medida pela diferença entre os volumes inicial e final das soluções nutritivas, no período de 48 horas, que antecedeu ao encerramento do experimento. Para esta determinação foram feitas a renovação das soluções nutritivas e a medição do volume de água adicionado, para compensar a solução absorvida, a cada período de 24 h.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Sintomas visuais de toxicidade

Os primeiros sintomas visíveis da toxicidade do Al manifestaram-se no sistema radicular das três cultivares pelo bloqueio no crescimento das raízes, tornando-as curtas, grossas, quebradiças e amarronzadas, à semelhança dos sintomas observados em outras plantas (Calbo 1978, Mosquim 1978). A intensidade destes sintomas foi semelhante nas três cultivares com o emprego de 10 ppm de Al, porém, com 5 ppm, os sintomas foram menos severos na cultivar Branca de Santa Catarina do que na cultivar Riqueza. Edwards et al. (1976), estudando a influência de níveis de alumínio de 0,0 ppm a 4,3 ppm sobre o crescimento de mandioca, não observaram qualquer sintoma de toxicidade, mesmo na cultivar que se mostrou mais sensível a este cátion.

Todas as cultivares tratadas com Al apresentaram os pecíolos com coloração púrpura mais pronunciada e as lâminas foliares com coloração verde um pouco

mais escura. O efeito do Al sobre o teor de P na parte aérea (Tabela 1), associado ao nível crítico de P para a mandioca (considerado superior a 0,4%, Centro Internacional de Agricultura Tropical 1976) e ao quadro sintomatológico de deficiência de P nesta espécie (Lozano et al. 1976) sugerem que os sintomas apresentados pelo pecíolo e pela lâmina foliar sejam os de deficiência deste elemento.

As folhas recém-formadas das plantas tratadas com Al exibiram pequenas manchas brancas translúcidas. Apesar de estes sintomas serem muito semelhantes aos descritos para a deficiência de Zn (Lozano et al. 1976), sugerindo uma possível influência inibitória do Al sobre a absorção de Zn, como se constatou em batatinha cultivada em solução nutritiva (Lee 1971), não pode ser eliminada também a possibilidade de que os sintomas sejam de deficiência de Ca, como sugerem os resultados da Tabela 2.

A intensidade dos sintomas de deficiência observados na parte aérea foi maior no tratamento com 10 ppm de Al que com 5 ppm. O grau dos sintomas de deficiência de P foi semelhante nas três cultivares. Entretanto, a intensidade dos sintomas da provável deficiência de Zn e/ou de Ca foi maior na cultivar Vassourinha SEL-514 que em Branca de Santa Catarina, e manifestou-se muito tardiamente na cultivar Riqueza, apenas ao nível de 10 ppm de Al.

Comportamento nutricional

Alumínio – O tratamento com Al não alterou significativamente a concentração deste cátion nos componentes da parte aérea das cultivares Branca de Santa Catarina e Riqueza, porém, aumentou-o na lâmina foliar e no pecíolo da cultivar Vassourinha SEL-514, na concentração de 10 ppm (Tabela 3). Entretanto, no sistema radicular das cultivares Vassourinha SEL-514 e Riqueza, o teor de Al aumentou progressivamente, com a adição deste elemento na solução nutritiva; e na cultivar Branca de Santa Catarina, o aumento estabilizou-se na concentração de 5 ppm. O acúmulo de Al nos componentes da parte aérea foi muito inferior ao ocorrido nas raízes, o que indica ser, este cátion, elemento de baixa mobilidade na planta, à semelhança dos resultados obtidos com batatinha (Lee 1971), leguminosas forrageiras (Andrew et al. 1973, Martins 1988, Mosquim 1978), sorgo (Calbo 1978), tomate (Foy et al. 1973) e soja (Castells et al. 1987).

O maior acúmulo de Al na lâmina foliar que no pecíolo e no caule mostra que estes últimos são órgãos de baixa capacidade de retenção deste cátion

TABELA 1. Médias dos teores de P na lâmina foliar, no pecíolo, no caule e na raiz de três cultivares de mandioca, em três concentrações de Al.

Alumínio (ppm)	Fósforo (mg/g de MS)		
	Cultivar		
	Branca de Santa Catarina	Vassourinha SEL-514	Riqueza
	Lâmina foliar		
0	5,04 Aa*	4,18 Ba	3,89 Ba
5	3,31 Ab	2,83 ABb	2,40 Bb
10	2,70 Ac	2,37 ABb	2,07 Bb
	Pecíolo		
0	3,74 Aa	2,45 Ba	2,23 Ba
5	1,78 Ab	1,59 Ab	1,47 Ab
10	1,65 Ab	1,49 Ab	1,34 Ab
	Caule		
0	6,38 Aa	4,03 Ba	3,28 Ba
5	2,69 Ab	2,05 ABb	1,61 Bb
10	1,84 Ac	1,81 Ab	1,49 Ab
	Raiz		
0	8,21 Ab	5,30 Bb	4,30 Bb
5	10,65 Aa	9,17 Aa	10,72 Aa
10	12,07 Aa	10,69 Aa	10,72 Aa

* As médias seguidas pela mesma letra minúscula na vertical e maiúscula na horizontal não diferem significativamente entre si, pelo teste de Tukey, ao nível de 5% de probabilidade.

em seus tecidos. O efeito não-significativo do Al sobre o seu teor, na lâmina foliar, sugere que a queda na produção de matéria seca (resultados não apresentados) não foi decorrente da influência direta deste cátion no processo fotossintético, o que, de certa forma, pode ser consubstanciado por vários trabalhos que não encontraram relação evidente entre a tolerância ao Al e o acúmulo deste elemento na parte aérea (Andrew et al. 1973, Foy et al. 1972, Mosquim 1978).

O acúmulo de Al ocorrido no sistema radicular das plantas tratadas com este cátion deveu-se, provavelmente, à sua retenção nas paredes celulares (Foy et al. 1972, Matsumoto et al. 1976) por radicais carboxílicos livres, dos ácidos poligalacturônicos (Clarkson 1967) na plasmalema (McCormick & Borden 1972), nos núcleos (Foy et al. 1972, Matsumoto et al. 1976) e nas mitocôndrias (Clarkson 1966, Foy et al. 1972) das células epidérmicas ou corticais

(McCormick & Borden 1972, Wright & Donahue 1953).

A estabilização do acúmulo do Al nas raízes da cultivar Branca de Santa Catarina, com 5 ppm, sugere que, nesta concentração, o Al saturou os radicais carboxílicos livres das paredes celulares. Entretanto, no sistema radicular das cultivares Vassourinha SEL-514 e Riqueza, o aumento progressivo no teor de Al, com a adição deste cátion no meio do cultivo, parece indicar que estas cultivares tenham paredes celulares mais ricas em radicais carboxílicos livres, ou então, que produzam paredes celulares com níveis mais elevados de compostos pécticos (Klimashevskii & Dedov 1976, Ruschel et al. 1968).

Fósforo – O teor de P na lâmina foliar e no caule da cultivar Branca de Santa Catarina diminuiu, progressivamente, com o aumento da concentração de Al na solução nutritiva (Tabela 1). Porém, no pecíolo da cultivar Branca de Santa Catarina e em toda parte

TABELA 2. Médias dos teores de Ca na lâmina foliar, no pecíolo, no caule e na raiz de três cultivares de mandioca, em três concentrações de Al.

Alumínio (ppm)	Cálcio (mg/g de MS)		
	Cultivar		
	Branca de Santa Catarina	Vassourinha SEL-514	Riqueza
	Lâmina foliar		
0	12,37 Aa*	12,85 Aa	12,79 Aa
5	8,90 Ab	9,58 Ab	8,68 Ab
10	6,77 Ac	7,88 Ac	7,13 Ac
	Pecíolo		
0	18,30 Aa	18,41 Aa	18,59 Aa
5	14,53 Ab	13,30 Ab	14,40 Ab
10	13,74 Ab	12,61 ABb	11,53 Bc
	Caule		
0	15,15 Aa	14,31 Aa	15,42 Aa
5	11,82 Ab	11,26 Ab	10,28 Ab
10	8,01 Ac	9,16 Ab	7,47 Ac
	Raiz		
0	3,94 Ba	4,38 Aa	4,13 ABa
5	2,60 Bb	2,92 Ab	2,74 ABb
10	1,69 Bc	2,06 Ac	1,78 ABc

* As médias seguidas pela mesma letra minúscula na vertical e maiúscula na horizontal não diferem significativamente entre si, pelo teste de Tukey, ao nível de 5% de probabilidade.

aérea das outras cultivares, a redução no teor de P estabilizou-se na concentração de 5 ppm de Al. Ao contrário da parte aérea, o sistema radicular apresentou uma elevação no teor de P que se estabilizou na concentração de 5 ppm de Al. Estes resultados indicam que o Al reduziu a translocação do P para a parte aérea, em decorrência da sua fixação nas raízes das cultivares estudadas. Resultados semelhantes foram obtidos em batatinha (Lee 1971) e em outras plantas (Andrew et al. 1973, Calbo 1978, Castells et al. 1987, Clarkson 1966, Foy et al. 1973, Taylor & Foy 1985a, b). A fixação do P nas raízes foi, provavelmente, o resultado das reações de absorção-precipitação entre o Al e o fosfato, ocorridas no espaço livre aparente e dentro das células epidérmicas ou corticais, conforme se mencionou anteriormente para o Al.

Em solução nutritiva sem Al, a cultivar Branca de Santa Catarina apresentou maior teor de P nos com-

ponentes da planta que as outras cultivares, o que sugere ter esta cultivar maior capacidade de absorver P nesta condição de cultivo. Todavia, quando as plantas foram tratadas com Al, as cultivares não diferiram quanto ao teor de P no sistema radicular, mas, na parte aérea (especialmente na lâmina foliar e na concentração de 5 ppm) o teor de P na cultivar Branca de Santa Catarina foi maior que na cultivar Riqueza. Isto sugere que, embora o Al tenha reduzido a translocação do P para a parte aérea de todas as cultivares, a maior tolerância da cultivar Branca de Santa Catarina ao Al pode estar relacionada, pelo menos em parte, com a maior capacidade de translocação de P para a lâmina foliar. Esta sugestão é aliçada em alguns resultados que demonstram a existência de correlação positiva entre o teor de P na parte aérea e a produção relativa de matéria seca total de mandioca (Edwards et al. 1976), e entre o teor de P nas folhas e a produção de raízes de mandioca

TABELA 3. Médias dos teores de Al na lâmina foliar, no pecíolo, no caule e na raiz de três cultivares de mandioca, em três concentrações de Al.

Alumínio (ppm)	Alumínio (mg/g de MS)		
	Cultivar		
	Branca de Santa Catarina	Vassourinha SEL-514	Riqueza
	Lâmina foliar		
0	0,261 Aa*	0,244 Ab	0,239 Aa
5	0,242 Aa	0,239 Ab	0,229 Aa
10	0,275 Ba	0,318 Aa	0,268 Ba
	Pecíolo		
0	0,208 Aa	0,158 Ab	0,154 Aa
5	0,203 Aa	0,161 Ab	0,160 Aa
10	0,258 Aa	0,250 Aa	0,202 Aa
	Caule		
0	0,164 Aa	0,179 Aa	0,171 Aa
5	0,165 Aa	0,124 Bb	0,145 ABa
10	0,157 Aa	0,175 Aa	0,143 Aa
	Raiz		
0	1,465 Ab	1,053 Ac	1,005 Ac
5	16,133 ABa	15,492 Bb	17,995 Ab
10	15,870 Ba	20,418 Aa	21,398 Aa

* As médias seguidas pela mesma letra minúscula na vertical e maiúscula na horizontal não diferem significativamente entre si, pelo teste de Tukey, ao nível de 5% de probabilidade.

(Centro Internacional de Agricultura Tropical 1976).

Potássio, cálcio e magnésio – Os efeitos depressivos do Al sobre os teores de K, Ca e Mg nas cultivares estudadas (Tabelas 4, 2 e 5) foram, em média, maiores no sistema radicular que na parte aérea, sendo que na parte aérea a toxidez de Al atingiu mais intensamente o teor de Ca, e nas raízes, o de Mg. Efeitos semelhantes do Al sobre a absorção destes cátions foram obtidos com outras plantas; por vários autores (Andrew et al. 1973, Calbo 1978, Bengtsson et al. 1988, Cambraia et al. 1983, 1987, Martins 1988).

O Al não afetou o teor de K da lâmina foliar nas cultivares Branca de Santa Catarina e Vassourinha SEL-514, e do pecíolo nesta última, (Tabela 4). Entretanto, nos demais componentes das plantas destas cultivares e em todos os componentes da cultivar Riqueza, o teor de K foi reduzido pelo Al. Verifica-se que apenas o sistema radicular apresentou reduções

progressivas no teor deste elemento com a adição de Al.

Os altos teores de K na lâmina foliar das cultivares de mandioca, mesmo quando cultivadas em presença de Al, associados ao conhecido efeito deste elemento na translocação de fotoassimilados (Anisimov & Bulatova 1975, Epstein 1972), explicam, provavelmente, a não interferência do Al na partição de fotoassimilados entre a parte aérea e as raízes (resultados não apresentados). Esta explicação é consolidada por Malavolta et al. (1955), que verificaram, em plantas de mandioca deficientes em K, um aumento na relação parte aérea/raiz e uma redução no teor de amido das raízes, indicando dificuldades na translocação de carboidratos produzidos nas folhas, para as raízes.

Os teores de cálcio nos componentes da parte aérea, especialmente nas lâminas foliares e nas raízes, foram reduzidos, progressivamente, pela adição

TABELA 4. Médias dos teores de K na lâmina foliar, no pecíolo, no caule e na raiz de três cultivares de mandioca, em três concentrações de Al.

Alumínio (ppm)	Potássio (mg/g de MS)		
	Cultivar		
	Branca de Santa Catarina	Vassourinha SEL-514	Riqueza
	Lâmina foliar		
0	25,58 Aa*	23,30 Aa	23,80 Aa
5	24,63 Aa	21,73 Ba	20,63 Bb
10	24,60 Aa	22,12 ABa	20,90 Bb
	Pecíolo		
0	75,53 Aa	57,57 Ba	59,78 Ba
5	66,89 Aa	51,83 Ba	45,59 Bb
10	48,44 Ab	47,78 Aa	39,01 Ab
	Caule		
0	58,24 Aa	46,12 Ba	48,91 ABa
5	40,72 Ab	35,15 ABb	26,65 Bb
10	31,36 Ab	31,95 Ab	24,26 Ab
	Raiz		
0	76,04 ABa	72,07 Ba	77,79 Aa
5	57,20 Ab	51,06 Bb	53,57 ABb
10	49,52 Ac	43,26 Bc	40,63 Bc

* As médias seguidas pela mesma letra minúscula na vertical e maiúscula na horizontal não diferem significativamente entre si, pelo teste de Tukey, ao nível de 5% de probabilidade.

de 5 e 10 ppm de Al no meio de cultivo, nas três cultivares estudadas (Tabela 2). Estes resultados, associados ao conhecimento de que a deficiência de Ca altera a integridade e a seletividade das membranas, bem como a organização e o alongamento celular (Epstein 1972), sugerem a possibilidade de que o efeito do Al no crescimento e no desenvolvimento das cultivares estudadas decorra não somente do efeito direto deste cátion sobre o crescimento radicular, mas também sobre a taxa de absorção e acumulação de Ca pelas plantas. Esta possibilidade é reforçada pelos resultados obtidos por vários autores. Foy et al. (1972) verificaram que a tolerância da cultivar de feijão "Dade" ao Al está relacionada com a maior absorção e acúmulo de Ca na parte aérea, paredes celulares, mitocôndrias e fração solúvel das raízes. Tem sido também verificado que o aumento da concentração de Ca no meio de cultivo previne a interferência do Al na absorção do Ca por raízes

de algodão (Lance & Pearson 1969) e diminui a severidade da toxidez nas raízes de cultivares de milho (Rhue & Grogan 1977).

O teor de Mg na lâmina foliar foi reduzido somente quando na concentração de 10 ppm de Al, porém, significativamente, apenas nas cultivares Branca de Santa Catarina e Vassourinha SEL-514 (Tabela 5). O efeito depressivo do Al sobre o teor de Mg dos demais componentes da planta foi semelhante ao descrito para o teor de K, para as três cultivares (Tabela 4), ainda que a intensidade deste efeito no teor de Mg tenha sido menor na parte aérea e maior no sistema radicular. Estes resultados sugerem que o baixo teor de Mg e Ca nas raízes, tenha agravado a toxidez direta do Al. Esta sugestão é consolidada por Rhue & Grogan (1977), que constataram ser o Mg, tão efetivo quanto o Ca na proteção das raízes de milho contra a toxidez do Al.

É possível que as reduções observadas na absor-

TABELA 5. Médias dos teores de Mg na lâmina foliar, no pecíolo, no caule e na raiz de três cultivares de mandioca, em três concentrações de Al.

Alumínio (ppm)	Magnésio (mg/g de MS)		
	Cultivar		
	Branca de Santa Catarina	Vassourinha SEL-514	Riqueza
	Lâmina foliar		
0	2,04 Aa*	2,28 Aa	2,05 Aa
5	2,14 ABa	2,27 Aa	1,90 Ba
10	1,71 Ab	1,88 Ab	1,75 Aa
	Pecíolo		
0	2,04 Aa	2,10 Aa	2,20 Aa
5	1,84 Aab	2,10 Aa	1,84 Ab
10	1,69 Bb	2,00 Aa	1,60 Bb
	Caule		
0	2,07 Aa	1,72 Ba	1,76 Ba
5	1,61 ABb	1,73 Aa	1,42 Bb
10	1,43 Ab	1,44 Ab	1,29 Ab
	Raiz		
0	4,39 Ba	4,91 Ba	4,74 ABa
5	2,07 Bb	2,20 ABb	2,53 Ab
10	1,86 Ab	1,78 Ac	1,72 Ac

* As médias seguidas pela mesma letra minúscula na vertical e maiúscula na horizontal não diferem significativamente entre si, pelo teste de Tukey, ao nível de 5% de probabilidade.

ção de K, Ca e Mg estejam relacionadas ao efeito inibitório do Al sobre a ATPase (Mg + K), que é a provável transportadora de cátions através do plasmalema (Fisher et al. 1970, Hodges & Leonard 1974), como foi verificado em ecótipos de *Agrostis tenuis* (Woolhouse 1969), em ervilha (Klimashevskii et al. 1970) e em sorgo (Calbo 1978).

Analisando os efeitos do Al sobre os teores de P, K, Ca e Mg pode-se deduzir que a redução no crescimento das plantas não foi uma consequência da deficiência de K (Tabela 4) e de Mg (Tabela 5), mas provavelmente das drásticas quedas nos teores de P (Tabela 1) e de Ca (Tabela 2), que impediram a utilização do K e do Mg nos processos metabólicos foliares. Esta hipótese é consubstanciada pelas consequências desastrosas da deficiência de P no metabolismo energético e na estrutura dos cloroplastídeos (Thompson & Weier 1962, Vesik et al. Marinos, citados por Epstein 1972) e da deficiência de Ca nas es-

truturas das mitocôndrias (Marinos 1962) e dos cloroplastídeos (Vesik et al. citados por Epstein 1972).

Os resultados sugerem que a maior tolerância da cultivar Branca de Santa Catarina ao Al pode estar relacionada, pelo menos em parte, com a mais eficiente utilização de K e de Mg, mesmo na presença dos aparentemente baixos teores de P e de Ca em seus tecidos.

Teor e absorção d'água

Com exceção do teor d'água na lâmina foliar das cultivares Branca de Santa Catarina e Vassourinha SEL-514, que se manteve constante nos tratamentos com Al, os teores na lâmina foliar da cultivar Riqueza e nos demais componentes das plantas das três cultivares foram reduzidos pelo Al (Tabela 6). Este mesmo efeito do Al, reduzindo o teor d'água, foi também observado em sorgo (Calbo 1978).

As reduções dos teores d'água pelo Al podem ser,

TABELA 6. Médias dos teores de d'água na lâmina foliar, no pecíolo, no caule e na raiz de três cultivares de mandioca, em três concentrações de Al.

Alumínio (ppm)	Teor d'água (%)		
	Cultivar		
	Branca de Santa Catarina	Vassourinha SEL-514	Riqueza
	Lâmina foliar		
0	79,43 Aa*	79,92 Aa	80,00 Aa
5	79,03 Aa	78,12 Aa	77,22 Ab
10	77,77 Aa	77,98 Aa	76,40 Ab
	Pecíolo		
0	91,90 Aa	91,28 Aa	91,17 Aa
5	90,35 Ab	89,68 ABb	88,47 Bb
10	88,42 Ac	89,15 Ab	88,02 Ab
	Caule		
0	91,53 Aa	91,13 Aa	91,05 Aa
5	89,45 Aa	89,12 Aab	87,42 Ab
10	86,47 Bb	88,72 Ab	86,72 ABb
	Raiz		
0	94,47 Aa	94,28 Aa	94,28 Aa
5	92,93 Ab	93,07 Ab	93,45 Ab
10	91,25 Ac	91,42 Ac	90,62 Bc

* As médias seguidas pela mesma letra minúscula na vertical e maiúscula na horizontal não diferem significativamente entre si, pelo teste de Tukey, ao nível de 5% de probabilidade.

provavelmente, explicadas pelo efeito deste cátion na redução dos teores de K (Tabela 4), pois sabe-se que quanto menor o teor de K nos tecidos, menor o potencial osmótico, e, conseqüentemente, menor a capacidade de retenção de água pelos mesmos (Alvarenga 1979, Noguchi & Sugawara 1966, Rains 1976).

A absorção d'água, expressa em ml/4 plantas/h, foi reduzida progressivamente pela adição de Al no meio de cultivo, nas três cultivares estudadas (Tabela 7). Resultados semelhantes deste efeito do Al foram obtidos em outras plantas (Lance & Pearson 1969, Mosquim et al. 1979). Diferenças entre as cultivares foram observadas apenas na concentração de 5 ppm de Al, sendo que nesta concentração, Branca de Santa Catarina foi a cultivar que apresentou menores reduções na absorção d'água. A cultivar Riqueza apresentou as maiores reduções, e Vassourinha SEL-514 situou-se intermediariamente.

A redução da absorção d'água, proporcionada pelo Al (Tabela 7), pode ser atribuída ao efeito depressivo deste elemento sobre a absorção de cátions (Tabelas 2, 4 e 5), reduzindo a pressão radicular e, conseqüentemente, a eficiência das raízes em absorção d'água (Tabela 8). A queda da absorção d'água pode ser atribuída também à redução da taxa transpiratória, como sugerem os valores da absorção d'água expressos em ml/g de MS lâmina foliar/h (Tabela 8), e à redução do crescimento das plantas, especialmente das raízes e lâminas foliares (resultados não apresentados).

Não foram observadas diferenças entre as cultivares quando a absorção d'água foi expressa em ml/g de MS da raiz/h e em ml/g de MS da lâmina foliar/h (Tabela 8), o que sugere que as diferenças entre as cultivares, quanto à absorção d'água (Tabela 7), foram conseqüências principalmente das reduções no crescimento das raízes e das lâminas foliares.

TABELA 7. Médias da absorção d'água (ml/4 plantas/h), expressas em valores relativos, de três cultivares de mandioca, em três concentrações de Al.

Alumínio (ppm)	Cultivar		
	Branca de Santa Catarina	Vassourinha SEL-514	Riqueza
0	*(5,12) 100,00	Absorção d'água (% do controle) (8,78) 100,00	(9,71) 100,00
5	67,33	57,58	52,12
10	42,65	36,05	37,81

* Valores absolutos do controle de cada cultivar em ml/4 de plantas/h.

TABELA 8. Médias da absorção d'água, expressas em ml/g de MS, raiz/h e em ml/g de MS da lâmina foliar/h, de três cultivares de mandioca, em três concentrações de Al.

Alumínio (ppm)	Cultivar		
	Branca de Santa Catarina	Vassourinha SEL-514	Riqueza
	Absorção d'água (ml/g MS da raiz/h)		
0	7,19 Aa*	6,88 Aa	5,98 Aa
5	5,54 Ab	4,67 Ab	4,92 Aa
10	5,10 Ab	4,29 Ab	4,63 Aa
	Absorção d'água (ml/g MS da lâmina foliar/h)		
0	1,65 Aa	1,50 Aa	1,44 Aa
5	1,50 Aab	1,28 Aab	1,28 Aa
10	1,36 Ab	1,17 ABb	1,01 Bb

* As médias seguidas pela mesma letra minúscula na vertical e maiúscula na horizontal não diferem significativamente entre si, pelo teste de Tukey, ao nível de 5% de probabilidade.

REFERÊNCIAS

- ALVARENGA, A.A. **Respostas morfofisiológicas de arroz de sequeiro e de irrigação ao potássio**. Viçosa, UFV, 1979. 43p. Tese Mestrado.
- ANDREW, C.S.; JOHNSON, A.D.; SANDLAND, R.L. Effect of aluminium on the growth and chemical composition of some tropical and temperate pasture legumes. *Aust. J. Agric. Res.*, 24:325-39, 1973.
- ANDREW, C.S. & VAN DEN BERG, P.J. The influence of aluminium on phosphate sorption by whole plants and excised roots of some pasture legumes. *Aust. J. Agric. Res.*, 24:341-51, 1973.
- ANISIMOV, A.A. & BULATOVA, T.A. Transport of IAA ¹⁴C in plants under different conditions of potassium nutrition. *Soviet Plant Physiol.*, 22:1078-82, 1975.
- ARMIGER, W.H.; FOY, C.F.; FLEMING, A.L.; CALDWELL, B.E. Differential tolerance of soybean varieties to an acid soil, high in exchangeable aluminium. *Agron. J.*, 60:67-70, 1968.
- BENGTSSON, B.; ASP, H.; BERGGREN, D. Influence of aluminium on phosphate and calcium uptake in beech (*Fagus sylvatica*) grown in nutrient solution and soil solution. *Physiol. Plant.*, 74:299-305, 1988.
- CHANDIAS, J.E.T. **Efeito do alumínio e de proporção NO₃/NH₄⁺ sobre o balanço iônico, a composição nitrogenada e a atividade da redutase do nitrato em sorgo (*Sorghum bicolor* L. Moench)**. Viçosa, UFV, 1985. 36p. Tese Mestrado.
- CALBO, A.G. **Efeito do alumínio sobre a absorção, o transporte e a distribuição de alguns elementos minerais em dois cultivares de sorgo (*Sorghum bicolor*, L. Moench)**. Viçosa, UFV, 1978. 43p. Tese Mestrado.

- CAMBRAIA, J.; CHANDIAS, J.A.T.; ESTEVÃO, M.M.; SANT'ANNA, R. Efeito do alumínio sobre o balanço iônico e sobre a capacidade das plantas de sorgo para modificar o pH das soluções nutritivas. *R. Ceres*, **34**:284-92, 1987.
- CAMBRAIA, J.; LEMOS FILHO, J.P.; ESTEVÃO, M.M.; OLIVA, M.A. Efeito do alumínio sobre os teores de Mg, Fe, Mn e Cu em sorgo. *R. Ceres*, **30**:45-54, 1983.
- CASTELLS, A.J.; BARROS, N.F.; SANT'ANNA, R.; NOVAIS, R.F.; NEVES, J.C.L. Efeito do alumínio sobre a absorção de cálcio, crescimento e composição mineral de cultivares de soja. *R. Ceres*, **34**:221-32, 1987.
- CENTRO INTERNACIONAL DE AGRICULTURA TROPICAL - CIAT, Cali, Colombia. Sistema de produção de yuca. In:..... *Informe anual*. Cali, Colombia, 1976. p. B-1 B-85.
- CLARK, R.B. Plant efficiencies in the use of calcium, magnesium and molibdenum. In: WRIGHT, M.J. ed. *Plant adaptation to mineral stress in problem soils*. Ithaca, New York, 1976. p.175-91.
- CLARK, R.B. & BROWN, J.C. Differential phosphorus uptake by phosphorus-stressed corn inbreds. *Crop Sci.*, **14**:505-508, 1974.
- CLARKSON, D.T. Effect of aluminium on the uptake and metabolism of phosphorus by barley seedlings. *Plant Physiol.*, **41**:165-72, 1966.
- CLARKSON, D.T. Interactions between aluminium and phosphorus on root surfaces and cell wall material. *Plant Soil*, **27**:347-56, 1967.
- CLARKSON, D.T. Metabolic aspect of aluminium toxicity and some possible mechanisms for resistance. In: RORISON, I.H. et al. eds. *Ecological aspects of the mineral nutrition of plants*. Oxford and Edinburg, Blackweel Scientific Publications, 1969. p.381-97.
- COCK, J.; WHOLEY, D.; LOZANO, J.C.; TORO, J.C. *Sistema rápido de propagação de yuca*. Cali, Colombia, CIAT. 1976. 13p.
- EDWARDS, D.G.; ASHER, C.J.; WILSON, G.I. Mineral nutrition of cassava and adaptation to low fertility conditions. In: COCK, J., et al. eds. *Proceeding of the fourth symposium of the International Society for Tropical Root Crops*. Cali, Colombia, CIAT. 1976. p.124-30.
- EPSTEIN, E. *Mineral nutrition of plants: principles and perspectives*. New York, John Wiley & Sons, 1972. 412p.
- FISHER, J.D.; HANSEN, D.; HODGES, T.K. Correlation between ion fluxes and ion stimulated adenosine triphosphatase activity of plant roots. *Plant Physiol.*, **46**:812-14, 1970.
- FOY, C.D. Effects of aluminium on plant growth. In: CARSON, E.W. ed. *The plant root and its environment*. Charlottesville, University Press of Virginia, 1974. p.601-42.
- FOY, C.D. Differential aluminium and manganese tolerances of plant species and varieties in acid soils. *Ci. e Cult.*, **20**:150-55, 1976.
- FOY, C.D.; FLEMING, A.L.; BURNS, G.R.; ARMIGER, W.H. Characterization of differential aluminium tolerance among varieties of wheat and barley. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.*, **31**:513-21, 1967.
- FOY, C.D.; FLEMING, A.L.; GERLOFF, G.C. Differential aluminium tolerance in two snapbean varieties. *Agron. J.*, **64**:815-18, 1972.
- FOY, C.D.; GERLOFF, G.C.; GABELMAN, W.H. Differential effects of aluminium on the vegetative growth of tomato cultivars in acid soil and nutrient solution. *Am. Soc. Hort. Sci.*, **98**:427-32, 1973.
- FOY, C.D.; CHANEY, R.L.; WHITE, M.C. The physiology of metal toxicity in plants. *Annu. Rev. Plant Physiol.*, **29**:511-66, 1978.
- GRUPO DE IMPLANTAÇÃO DO CPAC - EMBRAPA. Cerrado - Fisiologia e programa do centro de pesquisa. *Cerrado*, **7**:22-26, 1975.
- HODGES, T.K. & LEONARD, R.T. Purification of a plasma membrane-bound adenosine triphosphatase from plant roots. In: COLOWICK, S.R. & KAPLAN, M.O., eds. *Methods in enzymology*. New York, Academic Press, 1974. v.32/8, p.392-406.
- HOWELER, R.H.; CADAVID, L.F.; CALVO, F.A. The interaction of lime with minor elements and phosphorus in cassava production. In: COCK, J. et al. eds. *Proceeding of the fourth symposium of the International Society for Tropical Root Crops*. Cali, Colombia, CIAT, 1976. p.113-17.
- HSU, P.H. Effects of pH, phosphate and silicate on the determination of aluminium with aluminon. *Soil Sci.*, **96**:230-38, 1963.
- KLIMASHEVSKII, E.L. & DEDOV, V.M. Localization of the mechanism of growth-inhibiting action of Al³⁺ in elongating cell walls. *Soviet - Plant Physiol.*, **22**:1040-46, 1976.
- KLIMASHEVSKII, E.L.; MARKOVA, Y.A.; SEREGINA, M.L.; GRODZINSKII, D.M.; KOZARENKO, T.D. Specifics of the physiological activity of pea plants in connection with unequal resistance of different varieties to mobile aluminium. *Soviet Plant Physiol.*, **17**:372-78, 1970.
- LANCE, J.C. & PEARSON, R.W. Effects of low concentration of aluminium of growth and water and nutrient uptake by cotton roots. *Soil Ci. Soc. Am. Proc.*, **33**:95-98, 1969.
- LEE, C.R. Influence of aluminum on plant growth and mineral nutrition of potatoes. *Agron. J.*, **63**:604-8, 1971.
- LINDEMAN, W. Phosphate in Chlorella. UNITED NATIONS INT'L. CONF. ON THE PEACEFUL USES OF ATOMIC ENERGY, 2, *Proceedings...* s.l., s.ed., 1968.

- LOTT, W.L.; NERY, J.P.; GALLO, J.R.; MEDCALF, J.C. **A técnica da análise foliar aplicada ao cafeeiro.** Campinas, Instituto Agronômico de Campinas, 1956. (Boletim n. 79)
- LOZANO, J.C.; BELOTTI, A.; SCHOONHOVEN, A. Van; HOWELER, R.; DOLL, J.D.; BATES, T. **Problemas no cultivo da mandioca,** Cali, Colombia, CIAT, 1976. 127p.
- MALAVOLTA, E.; GRANER, E.A.; COURY, T.; BRASIL SOBRINHO, M.O.C.; PACHECO, J.A.C. Studies on the mineral nutrition of cassava. **Plant Physiol.**, **30**:81-82, 1955.
- MARINOS, N.G. Studies on submicroscopic aspects of mineral deficiencies. I - Calcium deficiency in the shoot apex of barley. **Am. J. Bot.**, **49**:834-41, 1962.
- MARTINS, C.E. **Tolerância de ecótipos de estilossantes à saturação de alumínio, em latossolo vermelho-escuro flico.** Viçosa, UFV, 1988. 105p. Tese Mestrado.
- MATSUMOTO, H.; HIRASAWA, E.; TORIKAI, H.; TAKAHASHI, E. Localization on absorbed aluminium in pea root and its binding to nucleic acids. **Plant Cell Physiol.**, **17**:127-37, 1976.
- MCCORMICK, L.H. & BORDEN, F.Y. Phosphat fixation by aluminum in plant roots. **Soil Sci. Soc. Am. Proc.**, **36**:799-802, 1972.
- MOSQUIM, P.R. **Influência do alumínio sobre o crescimento e o metabolismo em plantas de *Stylosanthes humilis* H.B.K.** Viçosa, UFV, 1978. 29p. Tese Mestrado.
- MOSQUIM, P.R.; CORDEIRO, A.T.; NEVES, J.C.L.; RENA, A.B. Influência do boro e do alumínio sobre o crescimento e a absorção d'água em *Stylosanthes humilis*. **Relat. Téc. EPAMIG. Projeto Bovinos.** 1979.
- NOGUCHI, Y. & SUGAWARA, T. **Potassium and Japonica rica: Summary of twenty-five years research.** Japan, University of Tokyo, 1966. 102p.
- RAINS, D.W. Mineral metabolismo. In: BONNER, J. & WARNER, J.E. eds. **Plant Biochemistry**, 3. ed. New York, Academic Press, 1976. p.561-97.
- RHUE, R.D. & GROGAN, C.O. Screening corn form Al tolerance using different Ca and Mg concentration. **Agron. J.**, **69**:755-60, 1977.
- ROY, A.K.; SHARMA, A.; TALUKDER, G. Some aspects of aluminum toxicity in plants. **Bot. Rev.**, **54**:145-78, 1988.
- RUSCHEL, A.P.; ALVAHYDO, R.; BARBOSA, I.; SAMPAIO, M. Influência do excesso de alumínio no feijão. (*Phaseolus vulgaris* L.) cultivado em solução nutritiva. **Pesq. agropec. bras.**, **3**:229-33, 1968.
- SANTORO, L.G.; SOARES, T.E.; MAGALHÃES, A.C. Effect of aluminum on nitrate reduction in *Zeamays* L. **Phyton**, **44**:75-80, 1984.
- SUHAYDA, C.G. & HAUG, A. Organic acids reduce aluminum toxicity in maize root membranes. **Physiol. Plant.**, **68**:189-95, 1986.
- TAKATSU, A. & LOZANO, J.C. Translocación del agente causal del añublo bacterial de la yuca (*Manihot esculenta* Crantz) en los tejidos del hospedero. **Fitopatologia**, **10**:13-32, 1975.
- TAYLOR, G.J. & FOY, C.D. Mechanisms of aluminum, tolerance in *Triticum aestivum* L. (Wheat). I. Defferential pH induced by winter cultivars in nutrient solutions. **Am. J. Bot.**, **72**:695-701, 1985a.
- TAYLOR, G. & FOY, C.D. Mechanisms of aluminum tolerance in *Triticum aestivum* L. (Wheat). II. Differential pH induced by spring cultivars in nutrient solutions. **Am. J. Bot.**, **72**:702-6, 1985b.
- THOMPSON, W.W. & MEIER, T.E. The structure of chloroplasts from mineral-deficient leaves of *Phaseolus vulgaris*. **Am. J. Bot.**, **49**:1047-55, 1962.
- WOOLHOUSE, H.W. Differences in the properties of the acid phosphatases of plant roots and their significance in the evolution of edaphic ecotypes. In: RORISON, I.H. et al. eds. **Ecological aspects of the mineral nutrition of plants:** Oxford and Edinburg, Blackwell Scientific Publications, 1969. p.357-80.
- WRIGHT, K.E. & DONAHUE, B.A. Aluminum toxicity studies with radicaactive phosphorus. **Plant Physiol.**, **28**:674-80, 1953.