

# ALUMÍNIO E NITROGÊNIO, NAS VARIAÇÕES DO pH E CAPACIDADE DE TROCA CATIÔNICA EM BRACHIARIA DECUMBENS<sup>1</sup>

MARIA LEONOR DA ROSA ARRUDA<sup>2</sup>, MANLIO SILVESTRE FERNANDES<sup>3</sup>  
e ROBERTO OSCAR P. ROSSIELLO<sup>4</sup>

**RESUMO** - Plantas de *Brachiaria decumbens* foram cultivadas em solução nutritiva, contendo Al (0; 0,75; 1,5; 3 e 6 ppm) e N(N-NO<sub>3</sub> e N-NH<sub>4</sub>). A mudança do pH foi acompanhada durante quatro semanas, e o próprio pH foi ajustado para 4,2 a cada 48 horas. Plantas sob NO<sub>3</sub><sup>-</sup> aumentaram o pH da solução acima de 5 até o nível de 1,5 ppm de Al; a partir desse nível, uma acumulação significativa de Al foi verificada nas raízes, o que resultou em drástica redução da capacidade de troca catiônica (CTC). Sob NO<sub>3</sub><sup>-</sup>, a variação do pH da solução guardou relação com o tamanho do sistema radicular, mas não com a magnitude da diferença entre o total de (N + P) - (Ca + K) absorvidos. Sob NH<sub>4</sub><sup>+</sup> a acidificação da solução foi relativamente uniforme, embora o consumo de ácido tenha sido muito mais elevado que o de base para ajustar a solução ao pH de referência. Nas plantas sob NH<sub>4</sub><sup>+</sup>, não houve acumulação significativa de Al em raízes e parte aérea, e os efeitos de Al sobre a CTC foram menos pronunciados do que sob NO<sub>3</sub><sup>-</sup>. Aparentemente, a fonte de N condiciona as respostas ao Al tóxico, nesta forrageira, por mecanismos que são discutidos no texto.

Termos para indexação: toxidez de Al, controle de pH.

## ALUMINIUM AND NITROGEN ON pH VARIATION AND CATION-EXCHANGE CAPACITY IN BRACHIARIA DECUMBENS

**ABSTRACT** - *Brachiaria decumbens* was grown in nutrient solution with nitrogen applied either as NO<sub>3</sub><sup>-</sup> or as NH<sub>4</sub><sup>+</sup>. Al was added (to four - week old plants) at 0, 0.75, 3, and 6 ppm. pH was read daily, and adjusted to 4.2 each 48 hours. Plants under NO<sub>3</sub><sup>-</sup> were able to raise the solution pH up to 5 at Al levels up to 1.5 ppm. Above this level, plants under NO<sub>3</sub><sup>-</sup> showed higher accumulation of Al and a marked reduction in root cation - exchange capacity (CEC). Changes in pH NO<sub>3</sub><sup>-</sup> - fed plants were related to the size of root system but not to imbalances in (N+P) - (Ca+K) uptake. Plants under NH<sub>4</sub><sup>+</sup> showed an uniform trend in pH change, and no effects of Al levels on root and shoot Al contents were detected. Effects of Al levels on root CEC were much less accentuated in plants under NH<sub>4</sub><sup>+</sup> than under NO<sub>3</sub><sup>-</sup>. The mechanisms through which N-carriers can affect the responses of *Brachiaria* plants to Al stress is discussed.

Index terms: Al toxicity, pH control.

## INTRODUÇÃO

Estudos em solução nutritiva têm mostrado que as diferenças de tolerância a níveis tóxicos de alumínio (Al), entre espécies e cultivares, estão associadas primariamente à magnitude das variações de pH em torno de suas raízes (Foy et al. 1965, Mugwira & Patel 1977, Helyar 1978). As formas iônicas do nitrogênio (N) desempenham um papel importante nesse processo, uma vez que a sua absorção e assimilação resulta em substancial produção citoplasmática de H<sup>+</sup> ou OH<sup>-</sup> (dependendo

de ser a forma dominante NH<sub>4</sub><sup>+</sup> ou NO<sub>3</sub><sup>-</sup>), com sua conseqüente extrusão no meio extracelular (Israel & Jackson 1978).

Outro mecanismo que parece favorecer a exclusão de Al do sistema radicular é uma baixa capacidade de troca catiônica (CTC) nas raízes (Helyar 1978). Uma menor CTC deve conferir maior tolerância ao Al, uma vez que essa condição deve favorecer uma absorção preferencial de cátions monovalentes sobre di ou trivalentes, a partir do chamado "espaço livre de Donnan" (Crooke & Knight 1962). Embora existam vários estudos sobre CTC de raízes, a extensão na qual esta característica é afetada por níveis de Al e formas de N não parece ter sido ainda estudada.

*Brachiaria decumbens* é uma espécie forrageira classificada como tolerante ao Al (Spain & Andrew 1976). Em estudo paralelo ao do presente trabalho, os autores observaram que *B. decumbens* apresentou um crescimento satisfatório, quando cultivada

<sup>1</sup> Aceito para publicação em 29 de agosto de 1983.  
Contribuição do Departamento de Solos, UFRRJ, km 47 Rod. Rio/São Paulo, CEP 23460 - Seropédica, RJ, com apoio financeiro do CNPq.

<sup>2</sup> Eng<sup>a</sup> - Agr<sup>a</sup>, M.Sc., Empresa de Pesquisa Agropecuária de Minas Gerais (EPAMIG), Caixa Postal 515, CEP 30000 - Belo Horizonte, MG.

<sup>3</sup> Eng<sup>o</sup> - Agr<sup>o</sup>, Ph.D., Professor-Adjunto da UFRRJ.

<sup>4</sup> Eng<sup>o</sup> - Agr<sup>o</sup>, M.Sc., Professor-Assistente da UFRRJ.

em solo com 72% de saturação de Al, desde que adequadamente suprida de N, P e K. Por comparação, *Cenchrus ciliaris*, uma espécie sensível, tolerou apenas 10% de saturação de Al, quando sob as mesmas condições (Arruda<sup>5</sup>).

Neste trabalho, estudou-se o efeito de formas de N ( $\text{NO}_3^-$  ou  $\text{NH}_4^+$ ) e níveis de Al, sobre as duas características acima citadas, variações de pH na solução, e CTC, em *B. decumbens*. O interesse deste trabalho é um melhor entendimento dos mecanismos básicos de respostas ao excesso de Al.

### MATERIAL E MÉTODOS

O experimento foi conduzido em casa de vegetação e as plantas foram cultivadas em solução nutritiva. A temperatura média no período experimental foi de 24°C e a umidade relativa do ar oscilou em torno de 70%. O delineamento experimental foi de tipo fatorial, com duas fontes de N, cinco concentrações de Al e três repetições. A composição da solução nutritiva usada, modificada a partir de Andrew et al. (1973), está indicada na Tabela 1.

Inicialmente, sementes de *Brachiaria decumbens*, obtidas de fonte comercial, foram postas a germinar em areia lavada, sendo umedecidas, quando necessário, com solução nutritiva. Quinze dias após a emergência, as plântulas foram transferidas para vasos de plástico pintados com

TABELA 1. Solução nutritiva básica usada no experimento, modificada a partir de Andrew et al. (1973).

Elementos	Concentração	Forma
K	1,0 m M	$\text{K}_2\text{SO}_4$
Cl	0,5 m M	NaCl
Mg	0,5 m M	$\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$
Cu	0,02 ppm	$\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$
Zn	0,05 ppm	$\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$
Mn	0,25 ppm	$\text{MnSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$
B	0,5 ppm	$\text{H}_3\text{BO}_3$
Mo	0,01 ppm	$\text{H}_2\text{MoO}_4$
Fe	1 ppm	Citrato férrico
P	2 ppm	$\text{KH}_2\text{PO}_4$
Ca* e N*	1 m M	$\text{Ca}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$
Ca**	1 m M	$\text{CaCl}_2$
N**	1 m M	$(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$

\* Plantas que receberam N-nítrico.

\*\* Plantas que receberam N-amoniacal.

<sup>5</sup>

Dados não-publicados.

tinta prateada, com oito litros de capacidade. Foi usada aeração de tipo descontínuo, com três períodos de 60 minutos em cada 24 horas. O ar foi bombeado através de tubulação plástica perfurada, presa ao fundo de cada vaso. A solução nutritiva era trocada semanalmente. Foram desenvolvidas nestas condições 10 plantas/vaso durante duas semanas. Após esse período, foi feito um desbaste, deixando-se seis plantas/vaso. O pH da solução foi ajustado para 4,2 e foram acrescentados os seguintes níveis de Al: 0; 0,75; 1,5; 3 e 6 ppm, na forma de  $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 18\text{H}_2\text{O}$ . Nesta fase experimental, o pH era medido diariamente e ajustado a cada 48 horas com  $\text{H}_2\text{SO}_4$  ou  $\text{NaOH}(0,1\text{N})$ . As concentrações de fósforo e nitrogênio da solução nutritiva foram testadas a cada 48 horas. As plantas foram colhidas quatro semanas após a aplicação dos tratamentos com Al. A capacidade de troca catiônica das raízes foi determinada em sub-amostras de 200 mg de material seco moído (Wiley 40 mesh) pelo método de Crooke (1964). Teores de Al nas raízes e parte aérea foram determinados segundo Otomo (1963).

### RESULTADOS E DISCUSSÃO

#### Variações de pH

Na Fig. 1, são mostrados os valores de pH na solução, medidos 48 horas após a troca semanal

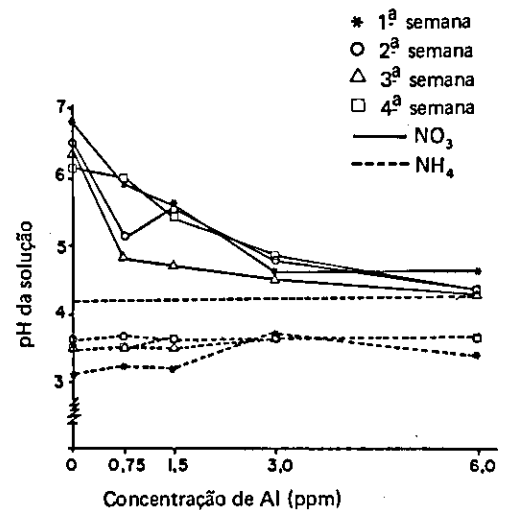


FIG. 1. Variação de pH da solução nutritiva durante quatro semanas, medidas 48 horas após a troca semanal, para plantas de *Brachiaria decumbens*, em resposta a cinco níveis de Al e duas fontes de N. A linha pontilhada indica o valor de pH de referência (4,2).

de solução nutritiva. As variações observadas no período seguinte (96 horas) foram similares, embora com maiores flutuações nos tratamentos com  $\text{NO}_3^-$ , possivelmente por causa do efeito de "envelhecimento", que poderia modificar as relações de solubilidade das espécies de Al presentes na solução (Rhue & Grogan 1977). Na Tabela 2, mostra-se a magnitude média das variações de pH ( $\Delta\text{pH}$ ) nas quatro semanas de crescimento, em relação ao pH de referência (4,2). Valores de  $\Delta\text{pH}$  positivos são observados sob  $\text{NO}_3^-$  e valores negativos sob  $\text{NH}_4^+$ , sendo que a magnitude de variação é muito maior nos tratamentos que levaram  $\text{NO}_3^-$  (Fig. 1 e Tabela 2). Um efeito de tamponamento da variação de pH, dependente do aumento da concentração de Al adicionado, é evidente nos tratamentos sob  $\text{NO}_3^-$ , e se reflete na progressiva redução na quantidade de ácido necessária para retornar ao pH de 4,2. Já sob  $\text{NH}_4^+$ , a quantidade de base necessária para retornar ao pH de referência foi muito mais elevada, sendo que, aparentemente, esse alto consumo de  $\text{OH}^-$  está relacionado à própria característica de tamponamento da solução nutritiva (Fig. 2), embora a adição de níveis crescentes de Al aumente progressivamente o consumo por unidade de peso seco produzido (Tabela 2 e Fig. 2).

As variações de pH observadas podem ser explicadas como consequência da absorção não balanceada de cátions sobre ânions ou vice-versa

(Mugwira et al. 1976, Israel & Jackson 1978, Helyar 1978). Para verificar essa possibilidade, as plantas foram analisadas, no final do experimento, quanto a N, P, Ca e K (dados não apresentados). Com base nessas análises, e para plantas cultivadas com  $\text{NO}_3^-$ , foi calculada a diferença entre ânions - A (N + P) - e cátions - C (Ca + K) -, sendo esses valores de ( $\mu\text{eq.g}^{-1}$  peso seco): 442; 780; 522; 432 e 364, para os níveis de 0, 0,75; 1,5; 3 e 6 ppm de Al, respectivamente.

Esses dados são indicativos de dois aspectos: primeiro, sob nutrição níttrica, os aumentos de Al na solução afetarão a eficiência global da absorção de nutrientes, embora as reduções não sejam proporcionais aos aumentos de Al; segundo, a magnitude da diferença A-C parece guardar pouca relação com os valores de  $\Delta\text{pH}$  sob nutrição níttrica (Tabela 2). Contudo, deve ser observado que sob  $\text{NO}_3^-$  as plantas ficaram sujeitas a variações bastante pronunciadas de pH (Fig. 1), o que, seguramente, deve ter afetado diretamente a taxa de absorção e a própria solubilidade de vários elementos, principalmente de Al, P, Ca e micronutrientes (Islam et al. 1980). Nessas condições, a magnitude do excesso A-C não guardará, necessariamente, relação com as variações de pH observadas na solução. Sob nutrição amoniacal, pode-se esperar um excesso de absorção catiônica, de tal forma que o resultado líquido do processo será a extrusão de prótons à solução, efeito este obser-

TABELA 2. Variações médias de pH da solução nutritiva, peso seco, consumo de ácido ou base para retornar a solução a pH 4,2 e teores de Al em raiz e parte aérea de plantas de *Brachiaria decumbens* em resposta a cinco concentrações de Al e duas fontes de N.

Concentração Al (ppm)	$\Delta\text{pH}$	$\text{NO}_3^-$				$\text{NH}_4^+$				
		p.s. (3) total (g)	$\mu\text{eq H}^+ (1)$ (p.s.) <sup>9</sup>	Al ( $\text{mg.g}^{-1}$ )		$\Delta\text{pH}$	p.s. total (g)	$\mu\text{eq H}^+ (1)$ (p.s.) <sup>9</sup>	Al ( $\text{mg.g}^{-1}$ )	
				Raiz	P. aérea				Raiz	P. aérea
0	2,24	20,95 a	300	1,93 d <sup>2</sup>	0,24 b	-0,75	25,41 a	890	0,36 a	0,16 a
0,75	1,30	18,46 ab	211	3,56 cd	0,24 b	-0,73	20,35 ab	1190	0,81 a	0,21 a
1,5	1,14	17,09 ab	212	6,52 c	0,26 ab	-0,64	18,88 b	1207	1,60 a	0,21 a
3,0	0,50	18,04 ab	60	11,83 b	0,26 ab	-0,54	16,18 b	1365	1,90 a	0,23 a
6,0	0,12	14,59 b	-0	15,73 a	0,42 a	-0,50	15,18 b	1550	2,91 a	0,30 a

<sup>1</sup> Representam os  $\mu\text{eq}$  de  $\text{H}^+$  ou  $\text{OH}^-$  gastos durante as quatro semanas, para retornar ao pH 4,2 a cada 48 horas, por unidade de matéria seca total coletada ao final desse período.

<sup>2</sup> Médias seguidas de letras comuns não diferem significativamente a 5% pelo Teste de Tukey.

<sup>3</sup> Peso seco total (raiz + parte aérea).

## CURVAS DE TITULAÇÃO POTENCIOMÉTRICA

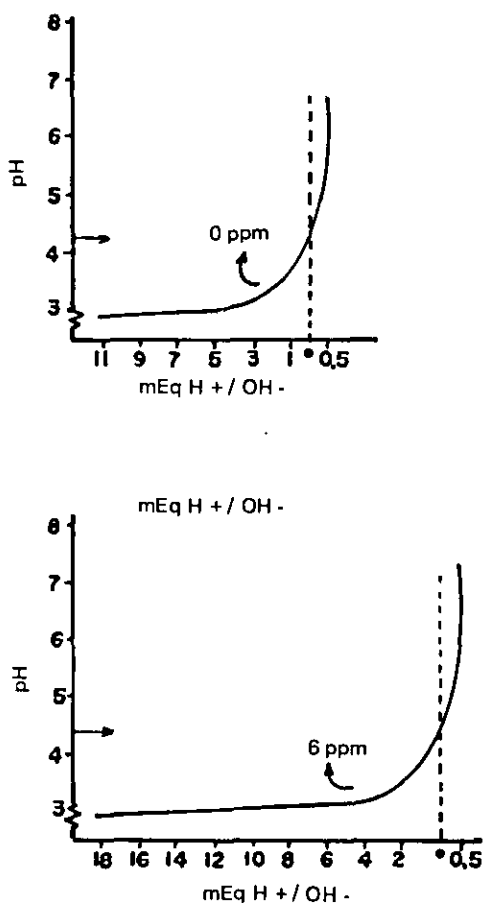


FIG. 2. Curvas de titulação da solução nutritiva (0 e 6 ppm de Al).

vado anteriormente em milho (Fernandes & Rosiello 1978, Luisi et al. Prelo) e arroz (Fernandes et al. 1981). Por outro lado, a magnitude do  $\Delta\text{pH}$  da solução mostra alta correlação com parâmetros relacionados ao tamanho do sistema radicular (Tabela 3). Assim, na presença de níveis crescentes de Al, as plantas têm reduzida a sua capacidade de afetar o pH da solução por efeitos combinados de redução na quantidade de nutrientes absorvidos por unidade de peso e de acumulação de matéria seca nas raízes. Isto é marcante nas plantas sob  $\text{NO}_3^-$ , onde, admitindo-se que pH 5 é um nível crítico para excluir Al (Helyar 1978), observa-se que as plantas não conseguem sustentar

TABELA 3. Coeficientes de correlação simples entre a variação de pH na solução nutritiva ( $\Delta\text{pH}$ ), o tamanho do sistema radicular, a capacidade de troca catiônica (CTC) e a acumulação de alumínio em raízes e parte aérea de *Brachiaria decumbens* em presença de nitrato ou amônio.

	$\text{NO}_3^-$	$\text{NH}_4^+$
$\Delta\text{pH} \times$ volume radicular	0,979**	0,904*
$\Delta\text{pH} \times$ peso seco de raízes	0,945*	0,861 n.s.
CTC $\times$ Al (raiz)	-0,905*	-0,402 n.s.
CTC $\times$ Al (parte aérea)	-0,720 n.s.	-0,517 n.s.
CTC $\times$ Al (raiz)	-0,928*	-0,458 n.s.
Al (parte aérea)		

n.s. = não significativo

\* significativo a  $P=0,05$

\*\* significativo a  $P=0,01$

esse nível de pH após 1,5 ppm de Al (Fig. 1). É de interesse mencionar que as plantas sob  $\text{NO}_3^-$  mantiveram, em toda a faixa de Al na solução, relações raiz/parte aérea superiores às de  $\text{NH}_4^+$ . O efeito dos tratamentos sobre o crescimento de *Brachiaria* é discutido em outro trabalho (Fernandes<sup>6</sup>). No presente caso, a menor relação raiz/parte aérea nas plantas sob  $\text{NH}_4^+$  não parece ser produto de acumulação de Al nas raízes, desde que o teor desse elemento nas mesmas foi muito menor do que nas plantas sob  $\text{NO}_3^-$  (Tabela 2). É possível que este efeito deva-se primariamente ao padrão de variação do pH da solução em ambos os casos (Fig. 1), o qual afeta diretamente a relação raiz/parte aérea (Islam et al. 1980, Luisi et al. Prelo).

#### Capacidade de troca catiônica

Na Tabela 4 são mostrados os valores de CTC observados nas plantas. Sob  $\text{NO}_3^-$ , a adição de Al resultou num percentual de redução muito maior que sob  $\text{NH}_4^+$ , existindo forte interação entre níveis de Al e as formas de N. Aparentemente, sob  $\text{NO}_3^-$ , a redução da CTC relaciona-se diretamente com a acumulação de Al nas raízes (Tabelas 2 e 3), conforme aumentam os níveis de Al na

<sup>6</sup>

Dados não-publicados.

TABELA 4. Efeito de cinco níveis de alumínio e duas formas de nitrogênio sobre a capacidade de troca catiônica (CTC) de *Brachiaria decumbens*, cultivada em solução nutritiva.

Al em solução (ppm)	CTC (meq/100 g raiz)	
	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>
0	19,4 a <sup>1</sup>	13,6 a <sup>2</sup>
0,75	14,9 b <sup>1</sup>	8,3 b <sup>2</sup>
1,5	12,3 bc <sup>1</sup>	8,4 b <sup>2</sup>
3,0	8,9 cd <sup>1</sup>	10,0 ab <sup>1</sup>
6,0	7,7 d <sup>1</sup>	9,6 b <sup>1</sup>
$\frac{6 \text{ Al}}{0 \text{ Al}}$ (%)	39,7	70,6

Médias seguidas da mesma letra na vertical ou do mesmo número na horizontal não diferem significativamente ao nível de 5% pelo teste de Tukey.

solução. Essa acumulação se daria primariamente ao nível dos grupos carboxílicos dos ácidos urônicos da parede celular (Helyar 1978), o que, em parte, deve refletir os progressivos ciclos de solubilização-precipitação das formas de Al em solução, a que devem ter sido submetidas essas plantas.

Sob NH<sub>4</sub><sup>+</sup>, a acumulação de Al nas raízes foi muito menor; não foi significativamente afetada pelo nível de Al, e não guardou relação aparente com a CTC (Tabela 3). Possivelmente, aos valores de pH da solução induzidos pela absorção de NH<sub>4</sub><sup>+</sup> (Fig. 1) as plantas toleram Al através de uma combinação da absorção reduzida devido à baixa CTC e do bloqueio intracelular de Al por ácidos orgânicos (Helyar 1978), que são produzidos em resposta à absorção de um excesso de cátions sobre ânions (Popp & Kinzel 1981). Esta última hipótese, embora não verificada diretamente neste trabalho, parece plausível para explicar a freqüente associação entre tolerância e altos níveis de NH<sub>4</sub> e de Al. Assim, em arroz, cultivares que mostraram média ou baixa tolerância a altos níveis de NH<sub>4</sub><sup>+</sup> no solo (Fernandes et al. 1981), mostraram-se igualmente tolerantes a altos níveis de Al em solução (Fageria & Zimmermann 1979).

Em termos de produção de matéria seca total, as plantas sob NH<sub>4</sub><sup>+</sup> acumularam maior quantidade que as plantas sob NO<sub>3</sub><sup>-</sup>. Por outro lado, quando se calcula a produção relativa (6Al/0Al x 100), verifica-se uma maior redução para

plantas sob NH<sub>4</sub><sup>+</sup> (40%) que sob NO<sub>3</sub><sup>-</sup> (30%). Esses resultados sugerem que, em ambas as fontes de N, a acumulação de Al (Tabela 2) pode estar interferindo diretamente com o metabolismo das plantas, independentemente dos mecanismos mencionados acima. Sob NO<sub>3</sub><sup>-</sup>, as plantas excluem Al parcialmente, por elevação do pH, a baixos níveis de Al na solução. A níveis mais elevados de Al na solução, aparentemente bloqueiam Al oferecendo uma maior relação raiz/parte aérea, o que deve resultar em um maior número de "sítios" de ligação para Al, reduzindo drasticamente a CTC das raízes, mas evitando a translocação de Al para a parte aérea.

#### REFERÊNCIAS

- ANDREW, C.S.; JOHNSON, A.D. & SAUDLAND, 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.
- CROOKE, W.M. The measurement of the cation-exchange capacity of plant roots. *Plant Soil*, 21:43-9, 1964.
- CROOKE, W.M. & KNIGHT, A.H. An evaluation of published data on the mineral composition of plants in the light of the cation-exchange capacities of their roots. *Soil Sci.*, 93:365-73, 1962.
- FAGERIA, N.K. & ZIMMERMANN, J.P. Seleção de cultivares de arroz para tolerância a toxidez de alumínio em solução nutritiva. *Pesq. agropec. bras.*, Brasília, 14(2):141-7, 1979.
- FERNANDES, M.S., DIDONET, H. & ROSSIELLO, R.O.P. Resposta de quatro cultivares de arroz (*Oryza sativa*, L.) à aplicação de nitrogênio amoniacal com um inibidor de nitrificação. *Pesq. agropec. bras.*, Brasília, 16(3):303-7, 1981.
- FERNANDES, M.S. & ROSSIELLO, R.O.P. Effects of NH<sub>4</sub> and a nitrification inhibitor on soil pH and phosphorus uptake by corn (*Zea mays* L.). *Cereal Res. Comm.*, 6:183-91, 1978.
- FOY, C.D.; BURNS, G.R.; BROWN, J.C. & FLEMING, A.L. Differential aluminum tolerance of two wheat varieties associated with plant-induced pH changes around their roots. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.*, 29:64-7, 1965.
- HELYAR, K.R. Effects of aluminium and manganese toxicities on legume growth. In: MINERAL nutrition of legumes in tropical and subtropical soils. Melbourne, CSIRO, 1978. p.207-32.
- ISLAM, A.K.M.S.; EDWARDS, D.G. & ASHER, C.J. pH optima for crop growth. Results of a flowing solution culture experiment with six species. *Plant Soil*, 54:339-57, 1980.
- ISRAEL, D.W. & JACKSON, W.A. The influence of nitrogen nutrition on ion uptake and translocation by leguminous plants. In: MINERAL nutrition of

- legumes in tropical and subtropical soils. Melbourne, CSIRO, 1978. p.113-30.
- LUISI, M.V.V.; ROSSIELLO, R.O.P. & FERNANDES, M.S. Acidificação do rizocilindro de milho em resposta à absorção de nutrientes e sua relação com o crescimento radicular. *R. bras., Ci. Solo. Prelo.*
- MUGWIRA, L.W.; ELGAWHARY, S.M. & PATEL, K.I. Differential tolerances of triticale, wheat, rye and barley to aluminum in nutrient solution. *Agron. J.*, 68:782-7, 1976.
- MUGWIRA, L.M. & PATEL, S.U. Root zone pH changes and ion uptake imbalances by triticale, wheat and rye. *Agron. J.*, 69:719-22, 1977.
- OTOMO, M. The spectrophotometric determination of aluminum with xylenol orange. *Bull. Chemical Society Japan.* 36:809-13, 1963.
- POPP, M. & KINZEL, H. Changes in the organic acid content of some cultivated plants induced by mineral ion deficiency. *J. Exp. Bot.*, 32:1-8, 1981.
- RHUE, R.D. & GROGAN, C.O. Screening corn for Al tolerance using different Ca and Mg concentrations. *Agron. J.*, 69:755-60, 1977.
- SPAIN, J.M. & ANDREW, C.S. Mineral characterization of species. Six tropical grasses x four aluminum treatments in water culture. *Annu. Rep. Div. Trop. Crops Pastures CSIRO*, 1976.