

Efeitos da toxicidade de duas espécies químicas de alumínio (Al) sobre o crescimento de plantas de milho cultivadas em solução nutritiva

José Carlos Pinto

Departamento de Agronomia, Universidade Estadual de Maringá, Av. Colombo, 5790, 87020-900, Maringá, Paraná, Brasil.
e-mail: jcpinto@uem.br

RESUMO. Os efeitos da toxicidade de duas espécies químicas de alumínio (Al) - monomérica e polimérica - sobre o crescimento de plantas de milho, *Zea mays* L. (Poaceae), foram estudados em solução nutritiva de baixo valor de força iônica. Com o aumento da atividade de Al em solução nutritiva, houve redução da produção de massa seca da parte aérea e do comprimento da raiz principal. Os efeitos da toxicidade de Al foram mais intensos nas raízes do que na parte aérea. As raízes laterais também foram sensíveis ao Al. Com o aumento da atividade de Al, houve redução nos valores de comprimento. A redução do comprimento foi de 80% nos 2 cm iniciais no sentido da base para o ápice da raiz principal na atividade de 3,9 μM de Al em relação ao tratamento sem Al. As duas espécies de Al apresentaram nível de toxicidade semelhante.

Palavras-chave: Alumínio, toxicidade, espécies químicas, solução nutritiva, crescimento, *Zea mays*.

ABSTRACT. Effects of two chemical aluminum (Al) species on the growth of maize plants cultivated in nutrient solution. The effects of two chemical aluminum (Al) species - monomeric and polymeric - on the growth of maize plants, *Zea mays* L. (Poaceae), cultivated in nutrient solution at low ionic strength were studied. The shoot dry matter production and the principal root growth were affected by the Al doses and species. The Al toxicity effects were more evident on the roots than on the shoot. The growth of the secondary roots was affected by Al doses. The growth of secondary roots was reduced by 80% in relation to the control when the Al activity in solution was 3.9 μM . The toxicity level of both Al species was similar.

Key words: Aluminum, toxicity, chemical species, nutrient solution, *Zea mays*.

Introdução

O alumínio (Al) é o metal mais importante da fração mineral dos solos (Segalen, 1973). À medida que o processo de acidificação se intensifica (pH inferior a 5,0) a estabilidade química dos minerais de Al é reduzida e com isso o Al é solubilizado e liberado para a solução do solo (Lindsay, 1979).

A toxicidade de Al é um dos principais fatores que limita a produtividade das culturas nos solos ácidos (Taylor, 1988). Os efeitos da toxicidade de Al nas plantas são mais importantes nas raízes do que na parte aérea (Pinto *et al.*, 1995a, 1996), provavelmente devido à acumulação preferencial do Al nas raízes, como acontece, principalmente, com as espécies “cultivadas”

(Calbo e Cambraia, 1980). Por outro lado, nas espécies “nativas” a concentração de Al ocorre, principalmente, na parte aérea (Haridasan, 1982). Um dos primeiros sintomas visuais da fitotoxicidade do Al é a redução do crescimento radicular (Pavan e Bingham, 1982; Cambraia *et al.*, 1991; Pinto *et al.*, 1998a), com o consequente aumento do diâmetro (Hairiah *et al.*, 1990) e do peso do segmento da raiz considerado (Pinto *et al.*, 1995b). As raízes danificadas exploram menor volume de solo e, com isso, a capacidade de absorção de água e de nutrientes é reduzida (Wright, 1989).

Estudos iniciados por Adams e Lund (1966), seguidos por Pavan e Bingham (1982), Kinraide e Parker (1989), Pinto *et al.* (1998b), entre outros, demonstraram haver melhor correlação entre a atividade de Al e crescimento das raízes em

relação à concentração total de Al na solução.

Na solução do solo, entretanto, o Al pode se apresentar sob diferentes formas e espécies químicas (Becquer, 1991). Somente uma parte do total de Al na solução do solo é considerada tóxica para as plantas. Wright *et al.* (1987) demonstraram que as espécies monoméricas de Al variaram de 2,8 a 62,3% do total de Al na solução.

O Al, sob a forma polimérica, foi considerado pouco tóxico para as plantas (Hue *et al.*, 1986). Entretanto, os resultados obtidos por Wagatsuma e Kaneko (1987), Parker *et al.* (1989) e Comin *et al.* (1999) demonstraram toxicidade sobre a raiz principal das plantas. O aumento do pH da solução nutritiva (valor superior a 4,7) favorece a formação de formas poliméricas de Al. Entre as formas poliméricas de Al, a $Al_{13} \{ (AlO_4Al_2(OH)_2)_4(H_2O)_{12} \}^{7+}$ parece ser a única tóxica (Hunter e Ross, 1991). Na literatura, existem poucos resultados demonstrando a presença do Al_{13} na solução natural dos solos (Becquer, 1991), tendo em vista ser uma forma instável (Bottero *et al.*, 1987). No entanto, estudos enfocando aspectos da toxicidade de Al em solução nutritiva devem considerar as espécies químicas de Al (Comin *et al.*, 1999).

O objetivo do presente trabalho foi estudar a influência de duas espécies de Al em solução nutritiva, com baixo valor de força iônica, sobre o desenvolvimento vegetativo de plantas de milho, *Zea mays* L. (Poaceae).

Material e métodos

Sementes de milho híbrido simples, HS7777, foram esterilizadas em uma solução de hipoclorito de sódio 1% (v.v⁻¹), lavadas abundantemente com água deionizada e germinadas em rolo de papel filtro umedecido, sob condições controladas (temperatura de $25 \pm 2^\circ C$ e umidade relativa de $95 \pm 3\%$). Após a germinação, as plântulas foram selecionadas, e o comprimento da raiz principal medido com régua milimetrada. Quinze plântulas foram transferidas para cada um dos recipientes plásticos contendo 7 litros de solução nutritiva, com a seguinte composição química (Pintro, 1992) (em μM): N-NH₄=300; N-NO₃=700; P-PO₄=5; K=400; Ca=200; Mg=100; S-SO₄=315; Mn=15; Zn=0,38; Cu=0,16; Fe=10; Na=5;; B=16; Mo=0,06;; EDTA=10. O valor do pH da solução nutritiva foi ajustado para 4,4. As concentrações nominais de Al foram de 0, 5, 10, 16, 22 e 28 μM . A forma

monomérica de Al^{3+} foi preparada a partir do sal $AlCl_3 \cdot 6H_2O$. A forma polimérica foi preparada a partir da metodologia descrita por Bottero *et al.* (1980), utilizando-se a relação $OH/Al=2,0$ com pH final de 4,05. O sal de Al foi $AlCl_3 \cdot 6H_2O$ e a base foi NaOH (50%, densidade 1,540). As soluções de Al monomérica e polimérica (25 mL 0,005M) foram submetidas ao processo de titulação com $NaHCO_3$ (0,1M), obtendo-se diferenças nas curvas de titulação, portanto espécies químicas diferentes. Para se estimar os valores das atividades correspondentes às concentrações de Al na forma monomérica foi utilizado o programa GEOCHEM (Sposito e Mattigod, 1980). As soluções nutritivas foram renovadas diariamente para amenizar as variações das concentrações/atividades dos elementos e do pH. A aeração foi constante e proporcionada por um sistema de difusores e de uma bomba de ar. O experimento foi conduzido em câmara de crescimento na temperatura de $25 \pm 2^\circ C$, umidade relativa de $70 \pm 3\%$, fotoperíodo de 14h com intensidade do fluxo de fótons de 200 $\mu moles \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$. O delineamento experimental foi completamente casualizado, constituído de 6 doses de Al, 2 espécies de Al e 3 repetições, totalizando 36 unidades experimentais. Após 7 dias de cultivo, as plantas foram colhidas, medindo-se os comprimentos da raiz principal e das raízes laterais. O crescimento relativo, (expresso em %), da raiz principal foi calculado dividindo-se o comprimento da raiz principal na presença de Al pelo comprimento da raiz principal sem Al, multiplicado por 100. Para medir o comprimento das raízes laterais foi utilizado o seguinte procedimento: a raiz principal foi estendida linearmente dentro de uma placa de plástico transparente, 25 cm de comprimento e com uma lâmina aproximada de 2 mm de água. Na parte de baixo da placa foi colocada uma folha de papel milimetrado, tendo o centro da folha referência zero de comprimento. O eixo da raiz principal coincidiu com o centro da folha de papel milimetrado. A seguir, com o auxílio de uma pinça, as raízes laterais foram estendidas horizontalmente em relação ao eixo da raiz principal. A cada cm, a partir da base em direção ao ápice da raiz principal, foram medidos os comprimentos médios das raízes laterais, expressos em mm. A parte aérea foi separada e secada em estufa com circulação de ar na temperatura de $65 \pm 3^\circ C$ durante 72h para determinação da massa seca. A produção relativa (expressa em %) da massa seca da parte aérea foi calculada dividindo-se a massa seca

produzida na presença de Al pela massa seca produzida na ausência de Al, multiplicada por 100.

Resultados e discussão

Os valores nominais das concentrações de Al monomérico de 0, 5, 10, 16, 22 e 28 µM resultaram em valores calculados de atividade de Al de 0,0; 1,9; 3,9; 6,3; 8,6; e 11,1 µM, respectivamente. Os valores calculados de força iônica de soluções variaram de 1980 a 2050 µM. Estes valores estão de acordo com os encontrados para a solução dos solos tropicais ácidos (Gillman e Bell, 1978; Edmeades et al., 1985; Pavan et al., 1995; Pintro et al., 1999).

Não foram constatadas diferenças significativas entre as espécies de Al (monomérica e polimérica) no crescimento relativo da raiz e na produção relativa de matéria seca da parte aérea das plantas de milho (Tabela 1). No entanto, com o aumento da atividade das duas espécies de Al na solução nutritiva houve redução significativa do crescimento da raiz principal e na produção de massa seca da parte aérea. Os efeitos da toxicidade de Al foram mais intensos nas raízes do que na parte aérea. Resultados com a mesma tendência foram constatados por Pintro et al. (1995a) e Pintro et al. (1996). A maior influência da toxicidade de Al sobre as raízes, em relação à parte aérea, poderia ser justificada pela maior concentração/atividade do Al neste órgão da planta. Os resultados obtidos por Pintro et al. (1996) demonstraram que a concentração média de Al nas raízes foi de 68 vezes superior em relação à concentração média encontrada na parte aérea das plantas de milho.

Tabela 1. Crescimento relativo da raiz principal (comprimento) e da parte aérea (massa seca) de plantas de milho cultivadas em solução nutritiva durante 7 dias em função de diferentes doses e espécies químicas de Al

Al (µM)		Raiz principal		Parte aérea	
Concentração	Atividade	Al monomérico	Al polimérico	Al monomérico	Al polimérico
0	0,0	100a*	100a	100a	100a
5	1,9	98a	99a	100a	101a
10	3,9	85a	90a	99a	98a
16	6,3	52b	55b	97ab	95ab
22	8,6	18c	22c	91b	90b
28	11,1	15c	20c	88b	87b

*Nas colunas, valores seguidos da mesma letra não diferem estatisticamente entre si ao nível de 5% de probabilidade pelo teste Tukey

À medida que a distância foi aumentando, no sentido da base para o ápice da raiz principal, o comprimento médio das raízes laterais se reduziu, principalmente para os valores de atividade 0,0 e 1,9 µM de Al (Figura 1). Nesses mesmos

valores de atividade de Al, os valores médios do comprimento das raízes laterais foram superiores aos demais valores de atividade de Al, principalmente na parte mais basal da raiz principal. Quando os valores de atividade de Al em solução nutritiva foram superiores a 3,9 µM, houve redução drástica no comprimento das raízes laterais. Nos dois primeiros centímetros, ao longo da raiz principal, o comprimento das raízes laterais foi superior a 50 mm nos valores de atividade de 0,0 e 1,9 µM de Al. Por outro lado, nos valores de atividade de Al superiores a 3,9 µM, os valores de comprimento das raízes laterais foram inferiores a 10 mm. No nível mais elevado de atividade de Al em solução (11,1 µM) os valores de comprimento das raízes laterais não ultrapassaram os 2 mm.

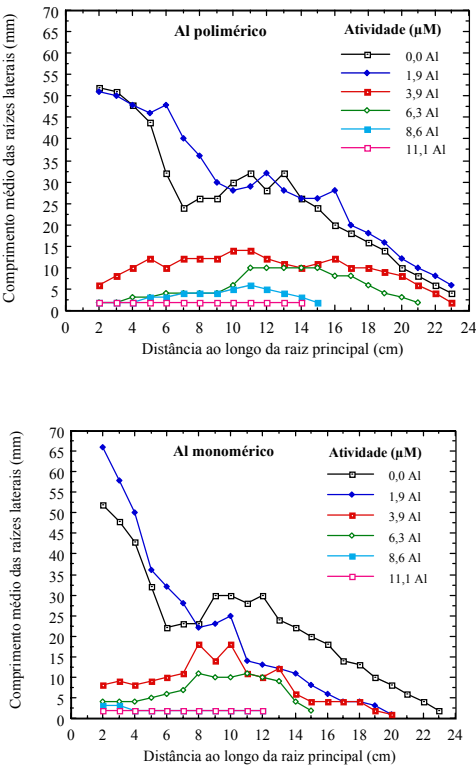


Figura 1. Comprimento médio das raízes laterais de plantas de milho (HS7777), cultivadas em solução nutritiva com baixo valor de força iônica e diferentes valores de atividade de Al durante 7 dias (distância ao longo da raiz principal é no sentido da base para o ápice)

As intensidades dos efeitos tóxicos das duas espécies de Al (monomérica e polimérica) nas plantas de milho foram semelhantes. Desse modo, em que pese haver dúvidas quanto à presença de Al polimérico (Al₁₃) na solução dos solos

(Becquer, 1991), quando os estudos de Al são conduzidos em solução nutritiva, além da preocupação em se definir valores de força iônica, de concentração e de atividade de Al (Pintro *et al.*, 1999), a especiação iônica também deveria ser considerada (Comin *et al.*, 1999).

Referências

- ADAMS, F.; LUND, Z.F. Effect of chemical activity of soil solution aluminum on cotton root penetration of acid subsoils. *Soil Sci.*, Baltimore, v.101, p.193-198, 1966.
- BECQUER, T. *Production Endogene de Protons par les Cycles de L'azote et du Soufre dans deux Sapinieres Vosgiennes: Bilans Saisonniers et Incidence sur la Toxicité de L'aluminium*. 1991. Thesis (Doctoral) - Université de Nancy I., Nancy, France, 1970.
- BOTTERO, J.Y. *et al.* Studies of hydrolyzed aluminum chloride solutions. 1. Nature of aluminum species and composition of aqueous solutions. *J. Phys. Chem.*, v.84, p.2933-2939, 1980.
- BOTTERO, J.Y. *et al.* Mechanism of formation of aluminium trihydroxide from keggins Al₁₃ polymers. *J. Colloid Interface Sci.*, Orlando, v.117, p.47-57, 1987.
- CALBO, A.G.; CAMBRAIA, J. Efeito do alumínio sobre a composição mineral de dois cultivares de sorgo (*Sorghum bicolor* L. Moench). *Revista Ceres*, Viçosa, v.27, p.369-378, 1980.
- CAMBRAIA, J. *et al.* Método simples para a avaliação de cultivares de sorgo quanto à tolerância ao alumínio. *R. Bras. Fisiol. Veg.*, Brasília, v.3, p.87-95, 1991.
- COMIN, J.J. *et al.* Differential effects of monomeric and polymeric aluminium on the root growth and on the biomass production of root and shoot of corn in solution culture. *Eur. J. Agr.*, Amsterdam, v.11, p.115-122, 1999.
- EDMEADES, D.C. *et al.* The chemical composition and ionic strength of soil solutions from New Zealand topsoils. *Austr. J. Soil Res.*, East Melbourne, v.23, p.151-165, 1985.
- GILLMAN, G.P.; BELL, L.C. Soil solution studies on weathered soil from tropical north Queensland. *Aust. J. Soil Res.*, East Melbourne, v.16, p.67-77, 1978.
- HAIRIAH, K. *et al.* Aluminium tolerance of the velvet beans *Mucuna pruriens* var. 'utilis' and *Mucuna deeringiana*. I. Effects of aluminium on growth and mineral composition. In: PLANT NUTRITION PHYSIOLOGY AND APPLICATIONS. Dordrecht, The Netherlands: Kluwer Academic Publishers, 1990. p. 365-374.
- HARIDASAN, M. Aluminium accumulation by some cerrado native species of central Brazil. *Plant Soil*, Dordrecht, v.65, p.265-273, 1982.
- HUE, N.V. *et al.* Effect of organic acids on aluminum toxicity in subsoils. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, Madison, v.50, p.28-34, 1986.
- HUNTER, D.; ROSS, D.S. Evidence for a phytotoxic hydroxy-aluminum polymer in organic soil horizons. *Science*, Washington, DC., v.251, p.1056-1058, 1991.
- KINRAIDE, T.B.; PARKER, D.R. Assessing the phytotoxicity of mononuclear hydroxy-aluminum. *Plant Cell Environ.*, Oxford, v.12, p.479-487, 1989.
- LINDSAY, W.L. *Chemical equilibria in soils*. New York: John Wiley & Sons, 1979.
- PARKER, D.R. *et al.* On the phytotoxicity of polynuclear hydroxy-aluminum species. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, Madison, v.53, p.789-796, 1989.
- PAVAN, M.A.; BINGHAM, F.T. Toxicity of aluminium to coffee seedlings grown in nutrient solution. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, Madison, v.46, p.993-997, 1982.
- PAVAN, M.A. *et al.* Estimativa da força iônica corrigida para pares de íons através da condutividade elétrica da solução do solo. *Rev. Bras. Ci. Solo*, Viçosa, v.19, p.345-347, 1995.
- PINTRO, J. *Toxicité des especes monomerique et polymerique d'aluminium em solution nutritive sur le mais*. 1992. (Diplome d'études approfondies en Biologie et Agronomie) Université de Rennes I et ENSA de Rennes, France, 1992.
- PINTRO, J.C. *et al.* Aluminium toxicity in corn plants cultivated in a low ionic strength nutrient solution. I. Discrimination of two corn cultivars. *Rev. Bras. Fisiol. Veg.*, Brasília, v.7, p.121-128, 1995a.
- PINTRO, J.C. *et al.* Aluminium toxicity in corn plants cultivated in a low ionic strength nutrient solution. II. Distribution of Al in the principal root tip zone. *Rev. Bras. Fisiol. Veg.*, Brasília, v.7, p.129-134, 1995b.
- PINTRO, J.C. *et al.* Aluminum effects on the growth and mineral composition of corn plants cultivated in nutrient solution at low aluminum activity. *J. Plant Nutr.*, Monticello, v.19, p.729-741, 1996.
- PINTRO, J. *et al.* Uptake of aluminium by the root tips of Al-sensitive and Al-tolerant cultivar of *Zea mays*. *Plant Physiol. Biochem.*, New Delhi, v.36, p.463-467, 1998a.
- PINTRO, J. *et al.* Effects of different calcium and sulfate concentrations in nutrient solutions on ionic strength values, aluminum activity, and root growth of maize plants. *J. Plant Nutr.*, Monticello, v.21, p.2381-2387, 1998b.
- PINTRO, J. *et al.* Influence of the ionic strength of nutrient solutions and tropical acid soil solutions on aluminum activity. *J. Plant Nutr.*, Monticello, v.22, p.1211-1221, 1999.
- SEGALEN, P. *L'aluminium dans les sols*. Paris: O.R.S.T.O.M., 1973.
- SPOSITO, G.; MATTIGOD, S.V. *GEOCHEM: 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.
- TAYLOR, G.J. The physiology of aluminum tolerance in higher plants. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.*, Monticello, v.19, p.1179-1194, 1988.

WAGATSUMA, T.; KANEKO, M. High toxicity of hydroxy-aluminum polymer ions to plant roots. *Soil Sci. Plant Nutr.*, Tokyo, v.33, p.57-67, 1987.

WRIGHT, R.J. Soil aluminum toxicity and plant growth. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.*, Monticello, v.20, p.1479-1497, 1989.

WRIGHT, R.J. *et al.* Estimation of phytotoxic aluminum in soil solution using three spectrophotometric methods. *Soil Sci.*, Baltimore, v. 144, p.224-232, 1987.

Received on July 05, 2001.

Accepted on June 19, 2002.