

INFLUÊNCIA DO Al^{3+} EM SOLUÇÃO NUTRITIVA NO CRESCIMENTO DE TRÊS ESPÉCIES FLORESTAIS UTILIZADAS NA RECUPERAÇÃO DE ÁREAS DEGRADADAS

INFLUENCE OF Al^{3+} IN NUTRIENT SOLUTION ON GROWTH OF THREE FOREST SPECIES USED IN RECOVERY OF DEGRADED AREAS

Rafael Antônio Presotto¹ Marcos Gervasio Pereira² Everaldo Zonta³ Edson Marcio Mattiello⁴

RESUMO

Um dos principais fatores limitantes no desempenho das culturas agrícolas e florestais na maioria dos solos tropicais é o efeito tóxico do Al^{3+} . No entanto, algumas espécies vegetais apresentam mecanismos de adaptação que lhes conferem tolerância a essas condições. O objetivo deste estudo foi avaliar o desenvolvimento de três espécies florestais cultivadas em solução nutritiva com diferentes níveis de Al^{3+} . Para tanto, mudas de *Acacia mangium*, *Mimosa artemisiana* e *Enterolobium contortisiliquum* foram cultivadas em solução nutritiva com quatro concentrações de Al^{3+} (controle, 185, 370 e 555 $\mu mol L^{-1}$) durante 95 dias. Ao final do experimento, as plantas foram segmentadas e uma fração conhecida das raízes foi digitalizada para estimativa de área e comprimento radicular. O caule, folhas e o restante das raízes foram secos em estufa de ventilação forçada, sendo determinada a biomassa e os teores de N, P e K no tecido vegetal. As espécies apresentaram padrões de crescimento diferenciados em função do aumento do teor de Al^{3+} na solução nutritiva, sendo que a *Acacia mangium* e a *Enterolobium contortisiliquum* foram mais tolerantes ao Al^{3+} , demonstrando potencial de uso na recuperação de áreas degradadas e com solos ácidos. Os teores de N nas partes das plantas não foram influenciados pelo Al^{3+} , no entanto, a concentração de P aumentou nas raízes das três espécies com níveis intermediários de Al^{3+} , resultando em redução de P na parte aérea da *Acacia mangium* e *Mimosa artemisiana*. A concentração de K na *Acacia mangium* foi reduzida somente no menor nível de Al^{3+} , enquanto para *Mimosa artemisiana* a redução foi gradativa.

Palavras-chave: Nutrição florestal; *Mimosa artemisiana*; *Enterolobium contortisiliquum*; *Acacia mangium*.

ABSTRACT

One of the main limiting factors in the performance of agricultural and forest crops in tropical soils is the toxic effect of Al^{3+} in soils. However, some plant species present adaptive mechanisms that confer tolerance to these conditions. The aim of this study was to evaluate the development of three tree species grown in nutrient solution with different levels of Al^{3+} . Therefore, seedlings of *Acacia mangium*, *Mimosa artemisiana* and *Enterolobium contortisiliquum* were produced in nutrient solution with four concentrations of Al^{3+} (control, 185, 370 and 555 $\mu mol L^{-1}$) during 95 days of cultivation. At the end of the experiment, the plants were targeted and a fraction of the known roots was scanned to estimate root area and length. The stem, leaves and remaining roots were dried in a forced air oven, being determined the biomass and N, P and K in plant tissue. The species showed different patterns of growth due to the increase of the activity of Al^{3+} in nutrient solution, and *Acacia mangium* and *Enterolobium contortisiliquum* were more tolerant to Al^{3+} , demonstrating potential use in the recovery of degraded areas with acid soils. The N concentration in the

- 1 Engenheiro Agrônomo, MSc., Agrônomo, Empresa de Pesquisa Agropecuária e Extensão Rural de Santa Catarina, Rua Floriano Peixoto, 116, Centro, CEP 89770-000, Seara (SC), Brasil. presotto_ufrj@hotmail.com
- 2 Engenheiro Agrônomo, Dr., Professor Titular do Departamento de Solos, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, BR 465 km 7, CEP 23897-000, Seropédica (RJ), Brasil. mgervasiopereira01@gmail.com
- 3 Engenheiro Agrônomo, Dr., Professor Associado do Departamento de Solos, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, BR 465 km 7, CEP 23897-000, Seropédica (RJ), Brasil. ezonta@ufrj.br
- 4 Engenheiro Agrônomo, Dr., Professor Adjunto do Departamento de Solos, Universidade Federal de Viçosa, Av. Peter Henry Rolfs s/n – Campus Universitário, CEP 36570-000, Viçosa (MG), Brasil. mattiello@ufv.br

Recebido para publicação em 7/04/2013 e aceito em 18/01/2017

plant parts were not influenced by Al^{3+} , however the concentration of P increased in the roots of three species with intermediate levels of Al^{3+} , resulting in reduction of P in shoots of *Acacia mangium* and *Mimosa artemisiana*. The concentration of K^+ in *Acacia mangium* was reduced only in the lower Al^{3+} , whereas for *Mimosa artemisiana* was gradually reduced.

Keywords: Forest nutrition; *Mimosa artemisiana*; *Enterolobium contortisiliquum*; *Acacia mangium*.

INTRODUÇÃO

Em solos com pH em $\text{H}_2\text{O} \leq 5,5$, o Al^{3+} encontra-se na forma iônica trivalente que é tóxico às plantas (CIAMPOROVÁ, 2002). Níveis de Al^{3+} que ocorrem naturalmente em solos ácidos variam de 10 a 100 μM , suficientes para inibição imediata e severa do crescimento radicular de espécies (EPSTEIN; BLOOM, 2006). A base fisiológica dos danos causados pelo Al^{3+} ainda não está completamente elucidada, entretanto, sabe-se que esse íon se associa fortemente a muitos ligantes doadores de oxigênio, como grupos carboxílicos, fosfatos e sulfatos; consequentemente interagem com as paredes celulares, membranas plasmáticas, proteínas e nucleotídeos (EPSTEIN; BLOOM, 2006). Por consequência ocorre a redução e/ou paralisação considerável da divisão celular do meristema apical das raízes, resultando em uma drástica diminuição no alongamento celular (ROUT et al., 2001; YAMAMOTO et al., 2002).

Espécies vegetais apresentam uma ampla variação quanto ao grau de tolerância ao Al^{3+} sendo que as tolerantes possuem diferentes mecanismos para sobreviverem na presença desse metal (ECHART; MOLINA, 2001). Os mecanismos de tolerância são extremamente complexos e vários estudos têm sido realizados na tentativa de elucidá-los. Atualmente esses mecanismos são classificados em dois tipos principais: aqueles que atuam impedindo a entrada do Al^{3+} pela raiz e outros que permitem acumulá-lo em locais específicos dos vegetais (HARTWIG et al., 2007).

Os problemas decorrentes da acidificação do solo podem ser corrigidos por calagem, contudo, a aplicação de calcário na superfície do solo não soluciona os problemas de acidez em profundidade. Por isso, a seleção de variedades tolerantes à toxidez de Al^{3+} é considerada como um componente de grande importância dentro das estratégias de manejo dos solos ácidos (ROSSIELLO; NETTO, 2006). Apesar de vários estudos demonstrarem o potencial de espécies agrícolas tolerarem o Al^{3+} , poucos são aqueles que avaliam o efeito desse elemento em espécies florestais, e em especial, naquelas utilizadas para recuperação de áreas degradadas. Segundo Piagentinni et al. (2002), as leguminosas arbóreas, além das associações com microrganismos, apresentam outras características desejáveis na recuperação de áreas degradadas: rápido recobrimento do solo, intensa formação de serrapilheira, sistemas radiculares profundos que absorvem nutrientes não disponíveis para outras culturas, eficientes na ciclagem de nutrientes.

Várias espécies da família Fabaceae (leguminosas) têm sido utilizadas na recuperação de áreas degradadas no Brasil, dentre elas destaca-se a espécie exótica *Acacia mangium* Willd., que apresenta capacidade de fixar N_2 atmosférico em associação com bactérias diazotróficas (GALIANA et al., 1991; BROCKWELL et al., 2005), de tolerar níveis elevados de Al^{3+} trocável e acidez (DIAS et al., 1990; FRANCO; FARIA, 1997; CAMPOS et al., 2003), de possuir baixa exigência nutricional (DIAS et al., 1991) e de formar simbiose tanto com fungos ecto como endomicorrízicos (FOUNOUNE et al., 2002). Essas espécies têm sido capazes de intensificar os ciclos biogeoquímicos de nutrientes em ambientes degradados, permitindo o retorno das principais funções ecológicas desses substratos (CHADA et al., 2004; REIS, 2006).

A espécie *Enterolobium contortisiliquum* (Vell.) Morong., conhecida popularmente como timbaúva, leguminosa da subfamília Mimosoideae é uma espécie nativa, de ocorrência natural nos estados do Pará, Maranhão, Piauí, Mato Grosso do Sul e Rio Grande do Sul (LORENZZI, 2002). Essa espécie tem potencial para reflorestamento misto de áreas de preservação permanente degradadas, pois apresenta rápido crescimento inicial (ARAÚJO; PAIVA SOBRINHO, 2011). A outra espécie testada neste estudo, *Mimosa artemisiana* Heringer & Paula (maricá, jurema-branca), cuja zona de ocorrência compreende os estados da Bahia, Espírito Santo e Rio de Janeiro, é uma leguminosa arbórea de rápido crescimento que pode ser usada, com sucesso, também na recuperação de áreas degradadas (SIBINEL, 2003).

Embora nesses estudos tenha sido observado um desenvolvimento diferenciado das espécies em relação às demais estudadas, pouco se sabe a respeito das mudanças na morfologia das raízes e as consequências sobre o desenvolvimento da parte aérea e da distribuição do teor de nutrientes em resposta ao

Al^{3+} . Neste contexto, estudos em solução nutritiva associados ao uso de análise digital de imagens têm demonstrado que parâmetros tais como área e comprimento radicular total, entre outros, podem auxiliar na identificação dos efeitos deletérios do Al^{3+} às raízes (ZONTA et al., 2000a; 2000b).

A partir do exposto, esse trabalho teve como objetivo comparar o desenvolvimento da parte aérea e do sistema radicular, bem como verificar as alterações nos teores de N, P e K na *Acacia mangium*, *Mimosa artemisiana* e *Enterolobium contortisiliquum* cultivadas em solução nutritiva com concentrações crescentes de Al^{3+} .

MATERIAL E MÉTODOS

O experimento foi conduzido em sistema hidropônico em casa de vegetação no Departamento de Solos da Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica - RJ, (latitude 22°45'32,38"S, longitude 43°41'50,01"W), temperatura média de 28°C e umidade relativa média de 80 %. Utilizou-se a solução nutritiva de Hoagland e Arnon modificada, com a seguinte concentração de macronutrientes (mmol L^{-1}): N: 3,75; K: 1,28; P: 0,03; Ca: 1,25; Mg: 0,5; e de micronutrientes ($\mu\text{mol L}^{-1}$): B: 11,5; Cu: 0,02; Fe (EDTA): 220; Mn: 2,25; Mo: 0,13 e Zn 0,05. A solução nutritiva recebeu arejamento intermitente e o pH foi ajustado para 4,0 com monitoramentos diários para maximizar a atividade do Al^{3+} , sendo substituída por uma nova solução, de igual formulação, a cada sete dias.

Para realização deste estudo foram utilizadas mudas de três espécies arbóreas: *Acacia mangium*, *Mimosa artemisiana* e *Enterolobium contortisiliquum*. As mudas foram obtidas no viveiro da EMBRAPA – Agrobiologia, apresentando um tamanho aproximado de 15 cm de altura e um mês pós-germinação.

Foi utilizado o desenho experimental inteiramente casualizado em um esquema fatorial (3 x 4) com três repetições, utilizaram-se três espécies arbóreas e quatro concentrações de Al^{3+} : 0; 185; 370 e 555 $\mu\text{mol L}^{-1}$. O Al^{3+} foi adicionado na forma de AlCl_3 a partir de uma solução estoque. A parcela experimental foi constituída de um vaso com 6 dm^3 de solução nutritiva contendo uma muda. As plantas foram fixadas em um suporte circular de isopor.

Após 95 dias de cultivo em solução, todas as plantas foram coletadas e segmentadas, uma amostra de 10 % da massa fresca das raízes foi destinada para digitalização e o restante das raízes, o caule e as folhas foram secas em estufa de ventilação forçada a 65°C, para posterior determinação de massa seca e teores de N, P, K (TEDESCO et al., 1995).

Para a digitalização das raízes utilizou-se um *scanner* de mesa (HP – Scanjet) configurado para captura de imagem com 256 cores em resolução de 100 dpi. Para evitar a sobreposição, as raízes foram dispostas manualmente com uma pinça sobre uma folha de acetato transparente que continha uma escala métrica de 2 cm. Nas imagens obtidas foram determinadas a área e comprimento radicular no programa SIARCS 3.0 (JORGE; CRESTANA, 1996), de acordo com o protocolo proposto por Zonta (2003) para plantas cultivadas em solução nutritiva.

Os dados obtidos foram submetidos aos testes de homogeneidade de variâncias (Cochran) e normalidade dos erros (Bartlett). Os tratamentos foram comparados pelo erro padrão das médias. As análises foram realizadas utilizando-se o *software* Saeg (2007) versão 9.1.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Biomassa

As espécies arbóreas apresentaram padrões de crescimento diferenciados com o aumento da atividade de Al^{3+} em solução nutritiva. Na Figura 1, podem ser observadas as respostas de biomassa de raiz, caule e folhas das espécies em função da concentração de Al^{3+} em solução nutritiva. A biomassa (raiz, caule e folhas) da *Acacia mangium* não foi influenciada significativamente pelas doses de Al^{3+} , apresentando um menor acúmulo de biomassa em relação às demais espécies. Resultados semelhantes foram observados por Vale et al. (1996) em que o crescimento radicular da *Acacia mangium* não foi influenciado pelo Al^{3+} trocável do solo, os autores ressaltam que esta espécie é adaptada a solos de baixa fertilidade.

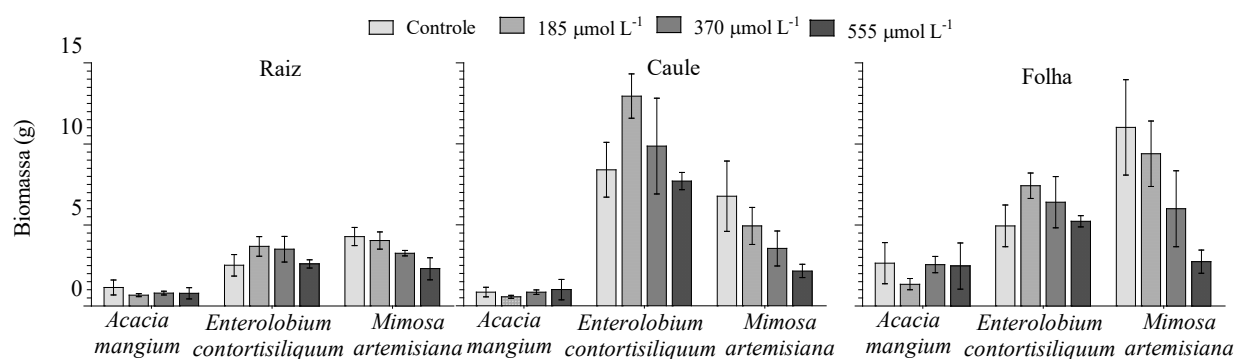


FIGURA 1: Biomassa (g) de raiz, caule e folha de três leguminosas arbóreas submetidas a concentrações crescentes de Al^{3+} . As barras indicam o desvio padrão das médias de cada tratamento.

FIGURE 1: Biomass (g) of root, stem and leaf of tree legume species subjected to increasing concentrations of Al^{3+} . The bars indicate the standard deviation of the mean of each treatment.

A *Enterolobium contortisiliquum* apresentou uma tendência de aumento da biomassa nas concentrações intermediárias (185 e 370 $\mu\text{mol L}^{-1}$) em relação ao controle, porém, na maior concentração de Al^{3+} (555 $\mu\text{mol L}^{-1}$), verifica-se que a massa foi similar ao controle (Figura 1). Esse padrão pode indicar algum mecanismo de proteção da espécie, no qual o Al^{3+} seja bioacumulado nas raízes não sendo translocado para a parte aérea, mantendo assim o aparelho fotossintético em funcionamento. Vários estudos com espécies florestais, incluindo os gêneros *Populus*, *Melaleuca*, *Melastoma* e *Eucalyptus*, indicam que o Al^{3+} induz a exsudação de ácidos orgânicos pelas raízes e a acumulação deste pode ser um possível fator para a resistência das plantas (WATANABE; OSAKI, 2002; NGUYEN et al., 2003; SILVA et al., 2004; NAIK et al., 2009). Supõe-se que algum mecanismo parece ter beneficiado a *Enterolobium contortisiliquum* nos níveis intermediários de Al^{3+} na solução nutritiva.

Já a *Mimosa artemisiana* apresentou-se sensível mesmo em baixas concentrações de Al^{3+} (185 $\mu\text{mol L}^{-1}$), resultando em redução gradativa no acúmulo de biomassa paralela ao aumento da concentração de Al^{3+} (Figura 1). Em relação ao controle, o maior nível de Al^{3+} (555 $\mu\text{mol L}^{-1}$) promoveu redução de 75 %, 68 % e 46 % da biomassa de raiz, caule e folhas, respectivamente. Trabalhando com *Mimosa caesalpinifolia* Benth, Costa Filho et al. (2013) observaram que, em solo com 6,9 mmol dm^{-3} de Al^{3+} , a calagem não foi necessária para o bom desenvolvimento das plantas, entretanto, esta espécie, conhecidamente, desenvolve-se bem em solos de baixa fertilidade (RIBASKI et al., 2003).

Os efeitos do Al^{3+} na biomassa foram semelhantes entre as partes da planta (raiz, caule e folhas) dentro de cada espécie, dessa forma, a soma da biomassa total representa bem a tendência de cada espécie frente aos níveis de Al^{3+} (Figura 2).

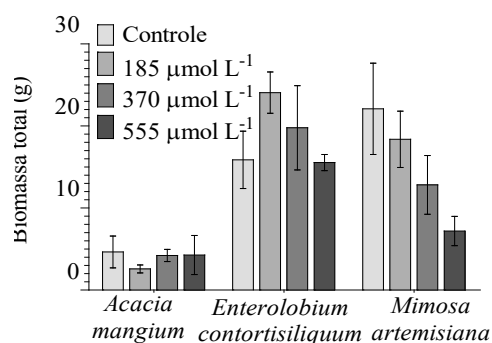


FIGURA 2: Biomassa total (g) de três leguminosas arbóreas submetidas a concentrações crescentes de Al^{3+} . As barras indicam o desvio padrão das médias de cada tratamento.

FIGURE 2: Total biomass (g) of legume trees subjected to increasing concentrations of Al^{3+} . The bars indicate the standard deviation of the mean of each treatment.

Entre as espécies avaliadas, a *Mimosa artemisiana* apresentou maior acúmulo de matéria seca no tratamento sem Al^{3+} , o que indica que em solos com baixos níveis Al^{3+} , esta promoveria maior deposição de matéria seca no solo, o que seria um fator extremamente importante no processo de recuperação de áreas degradadas. Já em solos com maiores teores de Al^{3+} a espécie *Enterolobium contortisiliquum* seria indicada, por ter apresentado uma resposta positiva para matéria seca com níveis intermediários de Al^{3+} e nula para doses mais elevadas de Al^{3+} em solução nutritiva. Já a espécie *Acacia mangium* poderia ser introduzida nas duas situações por não ter apresentado resposta ao Al^{3+} em solução e, apesar do baixo aporte de matéria seca em comparação às demais, sua utilização seria interessante para fins de diversificação. Essa variabilidade de resposta entre as espécies, foi verificada também por Costa et al. (2011), estudando estrutura e diversidade da comunidade arbórea de uma floresta superomontana, no Planalto de Poços de Caldas (MG), quando encontraram um gradiente de distribuição das espécies arbóreas que se correlacionou, entre outros atributos, com a saturação por alumínio.

Área e comprimento radicular

De acordo com Echart e Molina (2001), o critério mais utilizado para quantificar a toxicidade ao Al^{3+} é a comparação do crescimento das raízes de plantas crescidas em solução nutritiva ácida, com a concentração adequada de Al^{3+} , com plantas cultivadas sem esse elemento. O mesmo autor sugere outras características, como número de raízes, coloração e ramificação das mesmas, para a identificação da toxidez por Al^{3+} .

Em analogia ao que foi verificado para a biomassa, as espécies apresentaram padrões diferenciados para os parâmetros radiculares avaliados, frente ao estresse com Al^{3+} (Figura 3). O comprimento e área radicular da *Enterolobium contortisiliquum* apresentaram respostas positivas com a adição de Al^{3+} em solução até a concentração de $370 \mu\text{mol L}^{-1}$, com posterior redução, já na maior concentração de Al^{3+} , o comprimento radicular foi semelhante ao controle. A área e comprimento radicular da *Mimosa artemisiana* apresentaram redução significativa nas concentrações de 370 e $555 \mu\text{mol L}^{-1}$ em relação ao controle e $185 \mu\text{mol L}^{-1}$, sendo semelhantes entre si. De maneira similar ao observado para o acúmulo de matéria seca, a *Acacia mangium* não foi influenciada pela adição de Al^{3+} em solução. Lemos, Silva e Jacob Neto (2016) estudando espécies arbóreas, mostraram que o sombreiro foi mais suscetível à presença de Al^{3+} no solo, reduzindo comprimento e o diâmetro das raízes nas maiores concentrações de Al^{3+} , enquanto as espécies arbóreas acácia e sabiá foram mais tolerantes à toxidez.

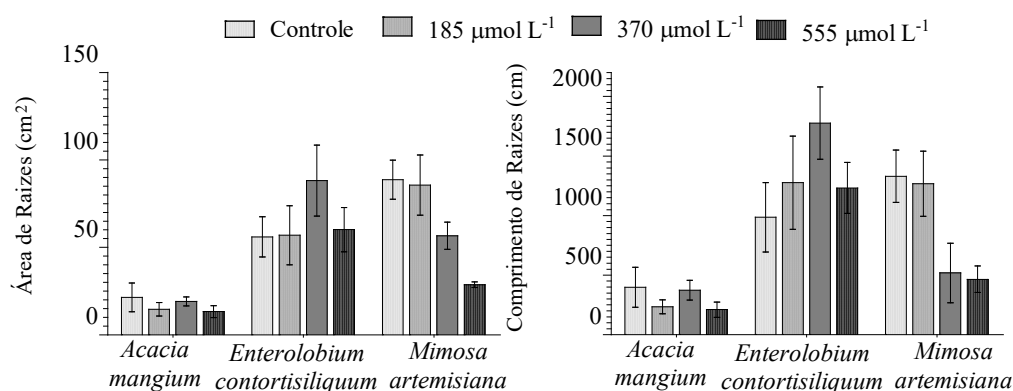


FIGURA 3: Área e comprimento radicular de três leguminosas arbóreas submetidas a concentrações crescentes de Al^{3+} . As barras indicam o desvio padrão das médias de cada tratamento.

FIGURE 3: Root area and length of legume trees subjected to increasing concentrations of Al^{3+} . The bars indicate the standard deviation of the means of each treatment.

Teores de macronutrientes

Os teores de N total na raiz, caule e folhas das espécies em função dos níveis de Al^{3+} em solução

nutritiva são apresentados na Figura 4, na qual se constata que o N não foi influenciado significativamente pelos tratamentos.

As espécies apresentaram diferenças significativas entre si, devido às suas características intrínsecas, entretanto, a comparação das espécies em relação à concentração de nutrientes pode ser importante do ponto de vista de sua ciclagem. Nesse sentido, *Enterolobium contortisiliquum* e *Mimosa artemisiana* apresentam maior potencial quanto ao aporte de N. Essa afirmativa é possível na medida em que se comparam as Figuras 1 e 2 (Biomassa) com a Figura 4, pode-se inferir um maior conteúdo de N.

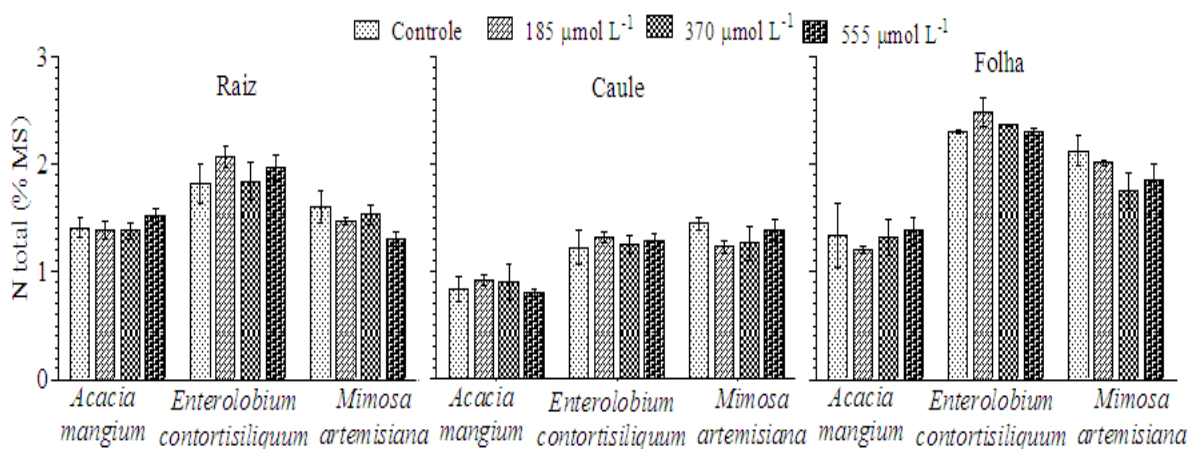


FIGURA 4: Teores totais de N da folha, caule e raiz de três leguminosas arbóreas submetidas a concentrações crescentes de Al^{3+} . As barras indicam o desvio padrão das médias de cada tratamento.

FIGURE 4: Total N leaf, stem and root of legume trees subjected to increasing concentrations of Al^{3+} . The bars indicate the standard deviation of the means of each treatment.

O Al^{3+} influenciou significativamente a concentração de fósforo nas raízes das três espécies estudadas. Para a *Acacia mangium*, a concentração de P nas raízes aumentou gradativamente com o aumento dos níveis de Al^{3+} em solução (Figura 5). No entanto, nas raízes da *Enterolobium contortisiliquum* e a *Mimosa artemisiana*, a tendência de aumento foi observada até as concentrações de 370 e 185 $\mu\text{mol L}^{-1}$, respectivamente, com posterior redução. Na parte aérea (caule e folha), os teores de P reduziram com o aumento da atividade Al^{3+} em solução nutritiva para a *Acacia mangium* e *Mimosa artemisiana*.

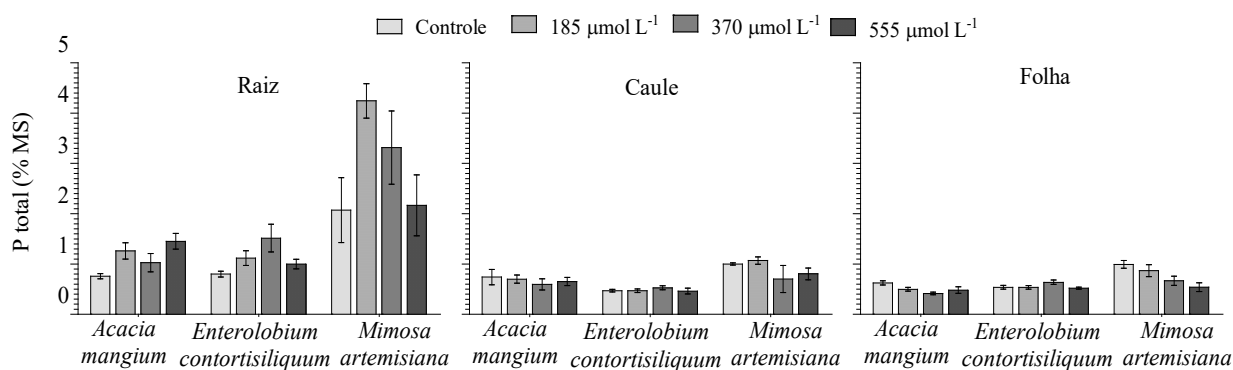


FIGURA 5: Teores totais de P da folha, caule e raiz de três leguminosas arbóreas submetidas a concentrações crescentes de Al^{3+} . As barras indicam o desvio padrão das médias de cada tratamento.

FIGURE 5: Total P leaf, stem and root of legume trees subjected to increasing concentrations of Al^{3+} . The bars indicate the standard deviation of the means of each treatment.

Resultados similares foram obtidos por Mattiello et al. (2008) em estudos com cafeeiro. A influência do Al^{3+} na absorção e transporte de P em plantas também já foi apontada por outros autores, sendo atribuído ao fato do Al^{3+} prejudicar o crescimento das raízes (FOY, 1976), além disso, o Al^{3+} liga-se ao P, tanto na superfície quanto no interior das células, formando compostos de baixa solubilidade (CLARKSON, 1966). Assim, a menor absorção de P pelas raízes associada à precipitação desse elemento resultam em menor translocação e consequentemente deficiência nutricional na parte aérea (MATTIELO et al., 2008). Em relação ao teor de K^+ no tecido vegetal (Figura 6), constatou-se redução desse elemento nas folhas, raízes e caule da *Mimosa artemisiana* em resposta ao aumento dos teores de Al^{3+} em solução nutritiva. Em comparação ao controle, o maior nível de Al^{3+} resultou em redução de 31 % do teor de K nas folhas, 56 % no caule e 54 % nas raízes. Na *Acacia mangium*, a concentração de K^+ nas raízes apresentou tendência atípica, em relação ao controle, ou seja, o menor nível de Al^{3+} resultou em drástica redução do K^+ , com gradativa recuperação com o aumento do Al^{3+} . Já a *Enterolobium contortisiliquum* não foi influenciada significativamente pelos tratamentos.

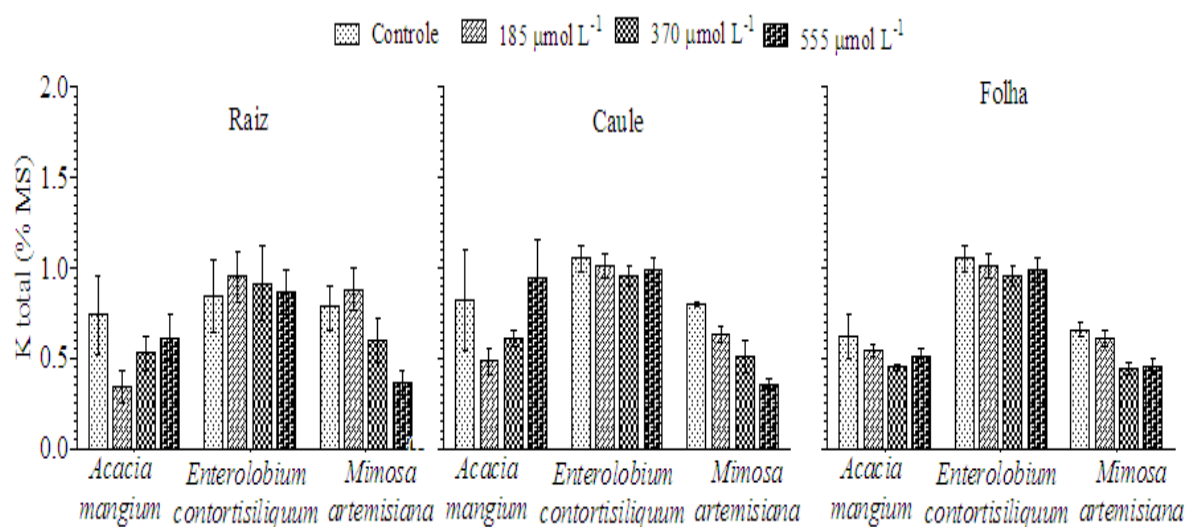


FIGURA 6: Teores totais de K da folha, caule e raiz de três leguminosas arbóreas submetidas a concentrações crescentes de Al^{3+} . As barras indicam o desvio padrão das médias de cada tratamento.

FIGURE 6: Total K leaf, stem and root of legume trees subjected to increasing concentrations of Al^{3+} . The bars indicate the standard deviation of the means of each treatment.

Estudando o efeito do alumínio no influxo de nutrientes em cevada, Nichol et al. (1993) constataram redução significativa de 13 % na taxa de influxo de K devido à presença de 100 mM de Al^{3+} . Os autores afirmam que provavelmente o Al^{3+} inibe o influxo de cátions e estimula o influxo de ânions. Silva et al. (2010) estudando os efeitos do Al^{3+} em duas cultivares de trigo também constataram redução significativa no teor de K^+ e sugeriram que a menor concentração de K^+ nas raízes pode estar envolvida com o efluxo de K^+ no ajuste osmótico no processo de extrusão de ácidos orgânicos pelas raízes (SAMAC; TESFAYE, 2003; GONÇALVES et al., 2005).

CONCLUSÕES

Acacia mangium e a *Enterolobium contortisiliquum* foram mais tolerantes ao Al^{3+} , demonstrando potencial de uso na recuperação de áreas degradadas e com solos ácidos. Os teores de N nas partes das plantas não foram influenciados pelo Al^{3+} , no entanto, a concentração de P aumentou nas raízes das três espécies com níveis intermediários de Al^{3+} , resultando em redução de P na parte aérea da *Acacia mangium* e *Mimosa artemisiana*. A concentração de K na *Acacia mangium* foi reduzida somente no menor nível de Al^{3+} , enquanto para *Mimosa artemisiana* a diminuição foi gradativa.

REFERÊNCIAS

- ARAÚJO, A. P.; PAIVA SOBRINHO, S. Germinação e produção de mudas de tamboril (*Enterolobium contortisiliquum* (VELL.) MORONG) em diferentes substratos. **Revista Árvore**, Viçosa, MG, v. 35, n. 3, p. 581-588, 2011.
- BROCKWELL, J. et al. **Nitrogen fixation in Acacias**: an untapped resource for sustainable plantations, farm, forestry and land reclamation. [s. l.]: ACIAR Monograph, 2005. 132 p.
- CAMPOS, M. L. et al. Avaliação de três áreas de solo construído após mineração de carvão a céu aberto em Lauro Müller, Santa Catarina. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 27, n. 6, p. 1123-1137, 2003.
- CHADA, S. et al. Sucessão vegetal em uma encosta reflorestada com leguminosas. **Revista Árvore**, Viçosa, MG, v. 28, n. 6, p. 801-809, 2004.
- CIAMPOROVÁ, M. Morphological and structural responses of plant roots to aluminium at organ, tissue, and cellular levels. **Biologia Plantarum**, Netherlands, v. 45, n. 2, p. 161-171, 2002.
- CLARKSON, D. T. Effect of aluminum on the uptake and on metabolism of phosphorus by barley seedlings. **Plant Physiology**, Rockville, v. 41, n. 1, p. 165-172, 1966.
- COSTA, M. P. et al. Estrutura e diversidade da comunidade arbórea de uma floresta superomontana, no Planalto de Poços de Caldas (MG). **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 21, n. 4, p. 711-725, 2011.
- COSTA FILHO, R. T. et al. Calagem e adubação fosfatada no crescimento de mudas de *Mimosa caesalpiniiifolia* Benth. em Latossolo Vermelho-Amarelo. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 23, n. 1, p. 89-98, 2013.
- DIAS, L. E. et al. Formação de mudas de *Acacia mangium*, I. Resposta a calcário e fósforo. In: CONGRESSO FLORESTAL BRASILEIRO, 6., 1990, Campos do Jordão. **Anais...** Campos do Jordão: Sociedade Brasileira de Silvicultura; Sociedade Brasileira de Engenheiros Florestais, 1990. p. 449-453.
- DIAS, L. E. et al. Formação de mudas de *Acacia mangium* Willd.: I. Resposta a nitrogênio e potássio. **Revista Árvore**, Viçosa, MG, v. 15, n. 1, p. 11-22, 1991.
- ECHART, C. L.; MOLINA, S. Fitotoxicidade do alumínio: efeitos, mecanismo de tolerância e seu controle genético. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 31, n.1, p. 531-541, 2001.
- EPSTEIN, E.; BLOOM, A. J. **Nutrição mineral de plantas**: princípios e perspectivas. 2. ed. Londrina: Planta, 2006. 403 p.
- FOUNOUNE, H. et al. Ectomycorrhization of *Acacia mangium* Willd. and *Acacia holosericea* A. Cunn. ex G. Don in Senegal. Impact on plant growth, populations of indigenous symbiotic microorganisms and plant parasitic nematodes. **Journal of Arid Environmental**, Netherlands, v. 50, n. 2, p. 325-332, 2002.
- FOY, C. D. Differential aluminum and manganese tolerances of plant species and varieties in acid soils. **Ciência e Cultura**, Campinas, v. 28, n. 2, p. 150-155, 1976.
- FRANCO, A. A.; FARIA, S. M. The contribution of N₂-fixing tree legumes to land reclamation and sustainability in the tropics. **Soil Biology and Biochemistry**, Elmsford, v. 29, n. 5/8, p. 897-903, 1997.
- GALIANA, A. et al. Nitrogen-fixing potencial of the micropropagated clones of *Acacia mangium* inoculated with different *Bradyrhizobium* spp. strains. **Plant Soil**, Netherlands, v. 135, p. 161-166, 1991.
- GONÇALVES, J. F. et al. Aluminium effect on organic acid production and accumulation in sorghum. **Journal of Plant Nutrition**, New York, v. 28, n. 3, p. 507-520, 2005.
- HARTWIG, I. et al. Mecanismos associados à tolerância ao alumínio em plantas. **Semina: Ciências Agrárias**, Londrina, v. 28, n. 2, p. 219-228, 2007.
- JORGE, L. A. C.; CRESTANA, S. Siarcs 3.0: novo aplicativo para análise de imagens digitais aplicado a ciência do solo. In: CONGRESSO LATINO AMERICANO DE CIÊNCIA DO SOLO, 13., 1996. **Anais...** Campinas: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 1996. CD-ROM.
- LEMO, J. J.; SILVA, A. C.; JACOB NETO, J. Diminuição do crescimento de plântulas de espécies arbóreas utilizadas na arborização urbana em função da indução da toxidez de alumínio. **Semioses**, Rio de Janeiro, v. 9, n. 2, p. 22-37, 2016.
- LORENZI, H. Árvores brasileiras: manual de identificação e cultivo de plantas arbóreas nativas do Brasil. 4. ed. Nova Odessa: Instituto Plantarum, 2002. 384 p.

- MATTIELLO, E. M. et al. Produção de matéria seca, crescimento radicular e absorção de cálcio, fósforo e alumínio por *coffea canephora* e *coffea arabica* **sob influência da atividade do alumínio em solução. Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 32, p. 425-434, 2008.
- NAIK, D. et al. Rhizosphere carbon deposition, oxidative stress and nutritional changes in two poplar species exposed to aluminum. **Tree Physiology**, Victoria, v. 29, n. 3, p. 423-436, 2009.
- NGUYEN, T. N. et al. Role of exudation of organic acids and phosphate in aluminum tolerance of four tropical woody species. **Tree Physiology**, Victoria, v. 23, n. 15, p. 1041-1050, 2003.
- NICHOL, B. E. et al. The effects of aluminum on the influx of calcium, potassium, ammonium, nitrate, and phosphate in an aluminum-sensitive, cultivar of barley (*Hordeum vulgare* L.). **Plant Physiology**, Rockville, v. 101, n.4, p. 1263-1266, 1993.
- PIAGENTINNI, P. M. et al. Crescimento de diferentes espécies arbóreas e arbustivas em depósito de beneficiamento de minérios de zinco em Vazante, MG. In: SIMPÓSIO NACIONAL SOBRE RECUPERAÇÃO DE ÁREAS DEGRADADAS, 5., 2002, Belo Horizonte. **Anais...** Belo Horizonte: Sociedade Brasileira de Recuperação de Áreas Degradadas, 2002. p. 413-415.
- REIS, L. L. **Monitoramento da recuperação de ambiental de áreas de mineração de bauxita na Floresta Nacional de Sacará-Taquera, Porto Trombetas (PA)**. 2006. 159 f. Tese (Doutorado em Agronomia, Ciência do Solo) - Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica, 2006.
- RIBASKI, J. et al. **Sabiá (*Mimosa caesalpiniiifolia*): árvore de múltiplo uso no Brasil**. [s. l.]: Embrapa Florestas, 2003. 4 p. (Comunicado técnico, 104).
- ROSSIELLO, R. O. P.; NETTO, J. J. Toxidez por alumínio em plantas: novos enfoques para um velho problema. In: FERNANDES, M. S. (Ed.). **Nutrição mineral de plantas**. Viçosa: SBCS, 2006. p. 115-152.
- ROUTE G. R. et al. Aluminium toxicity in plants: a review. **Agronomie**, Paris, v. 21, p. 3-21, 2001.
- SAEG. **Sistema para Análises Estatísticas, Versão 9.1**. Viçosa, MG: Fundação Arthur Bernardes, 2007.
- SAMAC, D. A.; TESFAYE, M. Plant improvement for tolerance to aluminum in acid soils - a review. **Plant Cell, Tissue and Organ Culture**, Dordrecht, v. 75, n. 3, p. 189-207, 2003.
- SIBINEL, A. H. M. **Resposta da leguminosa *Mimosa artemisiana* a inoculação de diferentes fungos micorrízicos arbusculares na recuperação de áreas degradadas**. 2003. 73 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia, Ciências do Solo) - Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica, 2003.
- SILVA, I. R. et al. Responses of eucalypt species to aluminum: the possible involvement of low molecular weight organic acids in the Al tolerance mechanism. **Tree Physiology**, Victoria, v. 24, n. 11, p. 1267-1277, 2004.
- SILVA, S. et al. Differential aluminium changes on nutrient accumulation and root differentiation in an Al sensitive vs. tolerant wheat. **Environmental and Experimental Botany**, Elmsford, v. 68, n. 1, p. 91-98, 2010.
- TEDESCO, M. J. et al. **Análise de solo, plantas e outros materiais**. 2. ed. Porto Alegre: Departamento de Solos, UFRGS, 1995. 174 p. (Boletim técnico, n. 5).
- VALE F. R. et al. Crescimento radicular de espécies florestais em solo ácido. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 31, n. 9, p. 609-616, 1996.
- WATANABE, T.; OSAKI, M. Role of organic acids in aluminum accumulation and plant growth in *Melastoma malabathricum*. **Tree Physiology**, Victoria, v. 22, n. 11, p. 785-792, 2002.
- YAMAMOTO, Y. et al. Aluminum toxicity is associated with mitochondrial dysfunction and the production of reactive oxygen species in plant cells. **Plant Physiology**, Rockville, v. 128, n. 1, p. 63-72, 2002.
- ZONTA, E. **Estudos da tolerância ao alumínio em arroz de sequeiro e seus efeitos sobre a interface solo-planta**. 2003. 139 f. Tese (Doutorado em Agronomia, Ciências do solo) -Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica, 2003.
- ZONTA, E. et al. Efeitos do estresse de alumínio sobre a morfologia radicular de uma cultivar tolerante de arroz de sequeiro. In: REUNIÃO BRASILEIRA DE FERTILIDADE DO SOLO E NUTRIÇÃO DE PLANTAS, 24., 2000, Santa Maria. **Anais...** Santa Maria: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2000a.
- ZONTA, E. et al. Uso da dimensão fractal na investigação dos efeitos de alumínio nas raízes de arroz. In: REUNIÃO BRASILEIRA DE FERTILIDADE DO SOLO E NUTRIÇÃO DE PLANTAS, 24., 2000, Santa Maria. **Anais...** Santa Maria: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2000b.