
USO DO SILÍCIO NA REDUÇÃO DA TOXIDEX DE ZINCO EM MUDAS DE EUCALIPTO

Sílvio Júnio Ramos, Evaristo Mauro de Castro, Sheila Isabel do Carmo Pinto, Valdemar Faquin, Cynthia de Oliveira e Giuslan Carvalho Pereira

RESUMO

A crescente industrialização tem levado à contaminação dos solos por diferentes metais pesados, que passam a apresentar problemas para o desenvolvimento normal de muitas espécies de plantas. Dentre esses metais, o zinco (Zn) apresenta-se como um elemento potencialmente tóxico, desde que presente em concentrações excessivas. Entre os vários efeitos benéficos do silício (Si), cita-se a diminuição ou eliminação dos efeitos adversos de metais pesados no meio. Nesse sentido, o objetivo do trabalho foi avaliar a produção de matéria seca e as modificações anatômicas nas raízes de mudas de *Eucalyptus urophylla* sob concentrações crescentes de Zn, na presença e ausência de Si. As mudas de *E. urophylla* foram cultivadas em vasos contendo 3l de solu-

ção nutritiva de Clark (pH 5,5), em esquema fatorial 6x2, sendo seis concentrações de Zn (0, 2, 50, 150, 300 e 450 $\mu\text{mol}\cdot\text{l}^{-1}$) na ausência e presença de silício (0 e 1,78 $\text{mmol}\cdot\text{l}^{-1}$). Após oito semanas, avaliou-se a produção de matéria seca da parte aérea e do sistema radicular; os teores de macro e micronutrientes e Si nas raízes, o índice de translocação e as variáveis envolvendo a anatomia das raízes. Verificou-se que a adição do silício pouco amenizou o efeito negativo do Zn sobre a produção de matéria seca de *E. urophylla* e, de maneira geral, pouco influenciou nos teores e nos índices de translocação dos nutrientes avaliados. As alterações anatômicas causadas pelo excesso de Zn foram menores na presença de Si em solução.

Introdução

O crescente emprego de fertilizantes e pesticidas no solo, aliado ao aumento das atividades industriais, são os principais responsáveis pela contaminação do solo, cursos

de água e lençol freático por metais pesados (Malavolta, 1994). Estas contaminações têm se agravado com o aumento demográfico e com a crescente industrialização, gerando graves problemas ambientais que necessitam de

efetiva solução tecnológica (Salt *et al.*, 1995). O zinco (Zn), apesar de ser um micronutriente, apresenta-se como um elemento potencialmente tóxico quando presente em concentrações excessivas, podendo afetar o crescimento

e o metabolismo de espécies vegetais (Marschner, 1995).

Entre as inúmeras estratégias de remediação, a fitorremediação é uma alternativa promissora, destacando-se a introdução de maciços florestais em áreas contaminadas

PALAVRAS CHAVE / Anatomia Radicular / Fitotoxidez de Zinco / Índice de Translocação /

Recibido: 11/12/2008. Modificado: 05/02/2009. Aceptado: 10/02/2009.

Sílvio Júnio Ramos. M.Sc. e Doutorando em Ciência do Solo, Universidade Federal de Lavras (UFLA), Brasil. Endereço: C.P. 3037, CEP 37200-000, Lavras, MG, Brasil. e-mail: silviojramos@gmail.com

Evaristo Mauro de Castro. Doutor em Fitotecnia, UFLA, Brasil. Professor, UFLA, Brasil.

Sheila Isabel do Carmo Pinto. Doutoranda em Ciência do Solo, UFLA, Brasil.

Valdemar Faquin. Doutor em Solos e Nutrição de Plantas, Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo (ESALQ/USP), Brasil. Professor, UFLA, Brasil.

Cynthia de Oliveira. Mestranda em Fisiologia Vegetal, UFLA, Brasil.

Giuslan Carvalho Pereira. Mestrando em Ecologia Aplicada, UFLA, Brasil.

SILICON USE TO ALLEVIATE ZINC TOXICITY TO EUCALYPTUS SEEDLINGS

Sílvio Júnio Ramos, Evaristo Mauro de Castro, Sheila Isabel do Carmo Pinto, Valdemar Faquin, Cynthia de Oliveira and Giuslan Carvalho Pereira

SUMMARY

Industrial growth has led to soil contamination by different heavy metals that constitute a problem for the normal development of several plants species. Among such metals, zinc (Zn) has a toxic potential when found in high levels in the soil. On the other hand, silicon (Si) can alleviate the toxic effects of metals on plants. The objective of this study was to evaluate the dry matter production and anatomical changes in roots of *Eucalyptus urophylla* seedlings under various concentrations of Zn in the presence or absence of Si in the nutrient solution. Seedlings of *E. urophylla* were cultivated in pots containing 3l of Clark nutritive solution (pH 5,5) in a ran-

domized 6x2 factorial design, with six Zn levels (0, 2, 50, 150, 300 and 400 $\mu\text{mol}\cdot\text{l}^{-1}$), with and without silicon (0 and 1.78 $\text{mmol}\cdot\text{l}^{-1}$). After eight weeks the dry matter production of shoots and roots, macro and micronutrients, Si concentration, translocation indices and the root's anatomy were evaluated. Si addition to the solution did not influence the negative effect of Zn on dry matter production of *E. urophylla*. In general, the concentration had little influence on the concentration and translocation index of the evaluated nutrients. The anatomic alterations caused by the excess Zn were smaller when Si was added to the solution.

USO DEL SILICIO EN LA REDUCCIÓN DE LA TOXICIDAD DEL ZINC EN PLÁNTULAS DE EUCALIPTO

Sílvio Júnio Ramos, Evaristo Mauro de Castro, Sheila Isabel do Carmo Pinto, Valdemar Faquin, Cynthia de Oliveira y Giuslan Carvalho Pereira

RESUMEN

El aumento en la industrialización ha producido la contaminación de los suelos por diferentes metales pesados, generando problemas para el desarrollo normal de muchas especies de plantas. Entre estos metales, el zinc (Zn) se presenta como un elemento potencialmente tóxico cuando se encuentra a en concentraciones excesivas. Entre los varios efectos benéficos del silicio (Si) se puede citar la disminución o eliminación de los efectos adversos de los metales pesados en el medio. El objetivo de este trabajo fue evaluar la producción de materia seca y modificaciones en la anatomía radicular de plántulas de *Eucalyptus urophylla* en virtud del aumento de las concentraciones de Zn en ausencia y en presencia de Si en solución nutritiva. Las plántulas de *E. urophylla* fueron cultivadas en vasos conteniendo 3l de solución nutritiva

de Clark (pH 5,5), en esquema factorial 6x2, con seis concentraciones de Zn (0, 2, 50, 150, 300 y 450 $\mu\text{mol}\cdot\text{l}^{-1}$) en ausencia y presencia de Si (0 y 1,78 $\text{mmol}\cdot\text{l}^{-1}$). Después de ocho semanas se evaluó la producción de materia seca de la parte aérea y del sistema radicular, las concentraciones de macro y micronutrientes, el Si en las raíces, el índice de translocación y las variables que afectan la anatomía de las raíces. Se verificó que la adición de Si afectó poco el efecto negativo del Zn sobre la producción de materia seca de *E. urophylla* y, en general, tuvo poco efecto en las concentraciones y en los índices de translocación de los nutrientes evaluados. Las alteraciones anatómicas causadas por el exceso de Zn fueron menores en la presencia de Si en la solución.

com metais pesados. Neste sentido, o eucalipto, pelas suas características de crescimento rápido, sistema radicular bastante desenvolvido e facilidade de adaptação a condições estressantes, apresenta-se com grande potencial para emprego em programas de recuperação de áreas degradadas pela deposição de metais pesados no solo (Dell *et al.*, 1995).

Apesar da existência de trabalhos abordando o efeito da toxidez de metais pesados no crescimento e nutrição mineral em espécies arbóreas (Paiva *et al.*, 2004; Soares *et al.*, 2005), raros são os trabalhos que avaliaram o efeito de agentes amenizantes do estresse por metais pesados. Neste sentido, a utilização de substâncias, que beneficiam o crescimento das plantas, atuando como agentes mitigadores da fitoto-

xidez dos metais, propiciando condições que permitem o estabelecimento dos vegetais, pode ser um fator a mais a auxiliar na recuperação destas áreas contaminadas.

Embora não tenha sido demonstrada a essencialidade do silício (Epstein e Bloom, 2006), entre os seus vários efeitos benéficos, pode-se mencionar sua influência na absorção e na translocação de vários macro e micronutrientes e a diminuição ou eliminação dos efeitos adversos do excesso de metais no meio sobre as plantas (Epstein, 1994). Neuman e Nieden (2001) verificaram em *Cardaminopsis halleri*, que o uso de silício proporcionou amenização da toxidez de zinco, e que o principal mecanismo de tolerância envolvido para esse metal foi a formação de silicatos de zinco

em solução. Segundo Liang *et al.* (2007) a complexação ou co-precipitação dos íons metálicos tóxicos com o silício, a imobilização dos íons metálicos no meio de crescimento e a compartimentação dos metais dentro das plantas, são os mecanismos-chaves mediados por esse elemento para a amenização dos efeitos tóxicos dos metais às plantas. Outros autores também têm relatado a importância do silício como agente amenizante na fitotoxidez de metais como o Al, Mn, As e Cd (Baylis *et al.*, 1994; Iwasaki *et al.*, 2002; Guo *et al.*, 2005; Liang *et al.*, 2005).

Alguns estudos têm mostrado alterações na arquitetura e estrutura de raiz induzida por uma variedade de condições estressantes. Segundo Barceló e Poschenrieder (1990) quando os metais atingem concen-

tração de toxidez nas plantas, podem causar alterações na morfologia das raízes, ocasionando redução do seu alongamento, danos nas suas extremidades, redução do número de raízes absorventes, redução na biomassa radicular, aumento da suberização e lignificação, redução no diâmetro dos vasos e alterações estruturais da hipoderme e endoderme.

Nesse sentido, o objetivo do trabalho foi avaliar a produção de matéria seca e as modificações anatômicas nas raízes de mudas de *Eucalyptus urophylla* sob concentrações crescentes de Zn, na presença e ausência de Si em solução nutritiva.

Material e Métodos

O experimento foi realizado em casa de vegetação no

Departamento de Ciência do Solo da Universidade Federal de Lavras (UFLA), Brasil. Mudanças de *Eucalyptus urophylla* foram produzidas em substrato Plantmax e com cerca de 10cm de altura, foram transplantadas para bandejas coletivas com capacidade para 36l, contendo solução nutritiva de Clark (1975), preparada com reagentes puros para análise, e que continha ($\text{mmol}\cdot\text{l}^{-1}$) $6,90 \text{ N-NO}_3^-$; $0,90 \text{ N-NH}_4^+$; $0,07 \text{ P}$; $1,80 \text{ K}$; $2,60 \text{ Ca}$; $0,60 \text{ Mg}$; e $0,50 \text{ S}$; e ($\mu\text{mol}\cdot\text{l}^{-1}$) $7,0 \text{ Mn}$; $0,5 \text{ Cu}$; 19 B ; $0,60 \text{ Mo}$; e 38 Fe complexado com $\text{Na}_2\text{-EDTA}$. Nessa etapa as mudas foram mantidas por uma semana em solução com um terço da força iônica. Posteriormente estas foram transferidas para solução com meia-força onde permaneceram por um mês. Após este período de aclimação as mudas de eucalipto foram transferidas solução de cultivo com a força iônica total, quando receberam os tratamentos experimentais. As mudas foram selecionadas quanto ao vigor e transplantadas para vasos de 3l, sendo a parcela experimental constituída por uma planta por vaso. Durante toda fase experimental, a solução de cultivo foi submetida à aeração constante e o pH mantido em $5,5 \pm 0,2$ pela correção com NaOH ou HCl $0,1\text{mol}\cdot\text{l}^{-1}$. Os tratamentos foram distribuídos em esquema fatorial 6×2 , sendo seis concentrações de Zn (0, 2, 50, 150, 300 e $450\mu\text{mol}\cdot\text{l}^{-1}$ na ausência e presença de Si (0 e $1,78\text{mmol}\cdot\text{l}^{-1}$ na forma de silicato de potássio), com correção para o K nos tratamentos sem adição de Si. O delineamento experimental utilizado foi o inteiramente casualizado com quatro repetições.

Após oito semanas avaliou-se a produção de matéria seca das raízes, que foram secas em estufa ($65\text{-}70^\circ\text{C}$) até peso constante. Em seguida, determinou-se os teores de macro e micronutrientes de acordo com a metodologia proposta

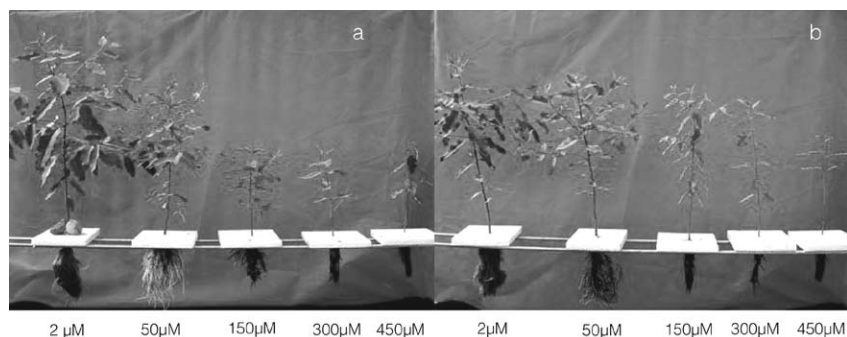


Figura 1. Mudanças de *Eucalyptus urophylla* aos 54 dias de cultivo, em função das concentrações de Zn, na ausência (a) e presença (b) de Si em solução nutritiva.

por Malavolta *et al.* (1997). Os teores de Si foram determinados conforme Gallo e Furlani (1978). Multiplicando-se os teores com a matéria seca produzida, foi determinado o acúmulo de nutrientes e Si. Uma vez obtidos esses dados, estimou-se o índice de translocação (IT) conforme (Abichequer e Bohnen, 1998).

Ao final do período experimental, para verificar as alterações anatômicas, coletou-se raízes de todos os tratamentos, na qual foram fixadas em FAA 70 (formaldeído + ácido acético + álcool etílico 70%) por 72h. Posteriormente, essas foram conservadas em álcool 70% para realização das análises em microscopia de luz (ML).

As análises em ML foram realizadas no laboratório de Anatomia Vegetal do Departamento de Biologia, UFLA, onde foram feitos cortes transversais das raízes a $4 \pm 0,5\text{cm}$ do ápice, utilizando-se um micrótomo de mesa manual. Os cortes foram submetidos à clarificação em solução de hipoclorito de sódio 50%, de produto comercial, por um período de 5min, seguido de três lavagens em água destilada. Em seguida, o material foi corado utilizando safranina e azul de astra de acordo com a metodologia proposta por Kraus e Arduin (1997).

Posteriormente foram montadas lâminas semi-permanentes com água glicerina e feita a lutagem com esmalte. As lâminas foram observadas ao microscópio de luz (Ken-a-Vision TT18) e fotografadas para compara-

ção utilizando câmera digital (Canon Power Shot A620). As determinações das características anatômicas foram feitas, a partir das fotos, com auxílio do software Sigma Scan. As características avaliadas nas raízes foram: espessura da epiderme, exoderme, endoderme, córtex e, diâmetro do cilindro vascular e xilema. Para essas medições, foram montadas três lâminas, sendo duas medições por lâmina, totalizando seis repetições por tratamento.

Os resultados para produção de matéria seca do sistema radicular, os teores de macro e micronutrientes mais Si nas raízes, o índice de translocação e as variáveis envolvendo a anatomia das raízes de *E. urophylla* foram submetidos à análise de variância e regressão polinomial utilizando o programa estatístico SISVAR (Ferreira, 2000).

Resultados e Discussão

As concentrações de Zn e Si no meio de cultivo, bem como a interação entre estes fatores, afetaram significativamente os parâmetros avaliados nas mudas de *E. urophylla*, embora a interação entre estes fatores não tenha sido significativa para os teores de K, Mg, Fe e Si e para o índice de translocação (IT) do P, K e Ca.

O aumento da concentração de Zn na solução exerceu efeito negativo sobre a produção de matéria seca da parte aérea (MSPA) e raízes (MSR) (Figura 1). Observou-se que a MSPA e MSR apresentaram

redução linear com o aumento da concentração de Zn na ausência de Si; contudo, os mesmos parâmetros analisados na presença do Si apresentaram reduções quadráticas, indicando que a presença deste elemento na solução foi capaz de amenizar os efeitos da toxidez de Zn, principalmente nas

concentrações de 150 e $300\mu\text{mol}\cdot\text{l}^{-1}$ (Figura 2a, b). A produção máxima de matéria seca da parte

aérea (19,2g) foi obtida na concentração de $59,5\mu\text{mol}\cdot\text{l}^{-1}$ de Zn na presença de Si (Figura 2a). Nessa mesma concentração de Zn, omitindo Si, houve uma redução de 12,5% na produção de matéria seca da parte aérea.

Nas raízes a toxidez de Zn foi ainda mais acentuada que na parte aérea, com produção de matéria seca quase nula na maior concentração desse elemento (Figura 2b). Raízes escuras, espessas, pouco desenvolvidas e menos maleáveis foram os sintomas observados nas maiores concentrações de Zn (300 e $450\mu\text{mol}\cdot\text{l}^{-1}$). Soares *et al.* (2001) avaliando a toxidez de Zn no crescimento e nutrição de *Eucalyptus maculata* e *E. urophylla* em solução nutritiva, também observaram raízes escuras e pouco desenvolvidas. De acordo com Baccouch *et al.* (1998) este tipo de alteração pode ser consequência da deficiência induzida de Ca, uma vez que o Zn em altas concentrações pode inibir competitivamente a absorção de Ca (Malavolta *et al.*, 1997). Portanto, sob tais condições, as mudas apresentam sintomas típicos de deficiência de Ca, dada a sua função como constituinte dos pectatos de Ca da lamela média na parede celular, bem como no processo de divisão celular (Marschner, 1995). Contudo, neste trabalho os teores de Ca nas raízes não foram afetados significativamente pelos fatores em estudo.

A máxima produção de MSR (7,7g) foi alcançada na concentração de $13,8\mu\text{mol}\cdot\text{l}^{-1}$

de Zn na presença de Si (Figura 2b), enquanto na ausência de Si, na mesma concentração de Zn, verificou-se redução de 2,6% na produção de MSR. As doses críticas de toxidez de Zn na solução capazes de reduzir em 10% a produção de MSPA e MSR na presença de Si foram 138 e 154 $\mu\text{mol}\cdot\text{l}^{-1}$ de Zn, respectivamente. Sem adição de Si, estes valores decresceram acentuadamente para 48 e 46 $\mu\text{mol}\cdot\text{l}^{-1}$ de Zn, respectivamente. Os valores apresentados para as doses críticas de toxidez de Zn em solução nutritiva para a MSPA e MSR foram semelhantes aos obtidos por Soares *et al.* (2001) em experimento sem adição de Si, em que a parte aérea e raízes apresentaram, respectivamente, concentrações críticas de 41,4 e 40,3 $\mu\text{mol}\cdot\text{l}^{-1}$ de Zn para a espécie *E. urophylla*. Estes resultados indicam que a adição de Si na solução nutritiva pode atenuar o efeito negativo das concentrações intermediárias do Zn sobre o crescimento da MSPA e MSR, no entanto, nas maiores concentrações de Zn aplicadas, a presença do Si não foi capaz de amenizar a toxidez do Zn. Também, independentemente das concentrações de Zn aplicadas, não verificou-se a formação de precipitados de Zn na forma de hidróxidos ou a formação de silicatos de zinco em solução, como observado por King (1996) e Neuman e Nieden (2001).

Os teores dos nutrientes avaliados, à exceção do Mg, aumentaram significativamente com as concentrações crescentes de Zn, mostrando reflexo do efeito de concentração destes elementos, uma vez que se observou acentuada redução na produção de matéria seca das raízes (Figura 2b). No caso do Mg, houve uma diminuição no seu teor (Figura 2e), o que se deve provavelmente, ao resultado da similaridade do raio iônico entre Zn^{2+} e Mg^{2+} , a qual promoveu inibição competitiva no processo de absorção deste nutriente com o Zn (Marschner, 1995; Faquin, 2005). Neste tecido, a adição de Si reduziu os teores de P e Cu (Figura 2c, g). A diminuição do teor de P com a adição

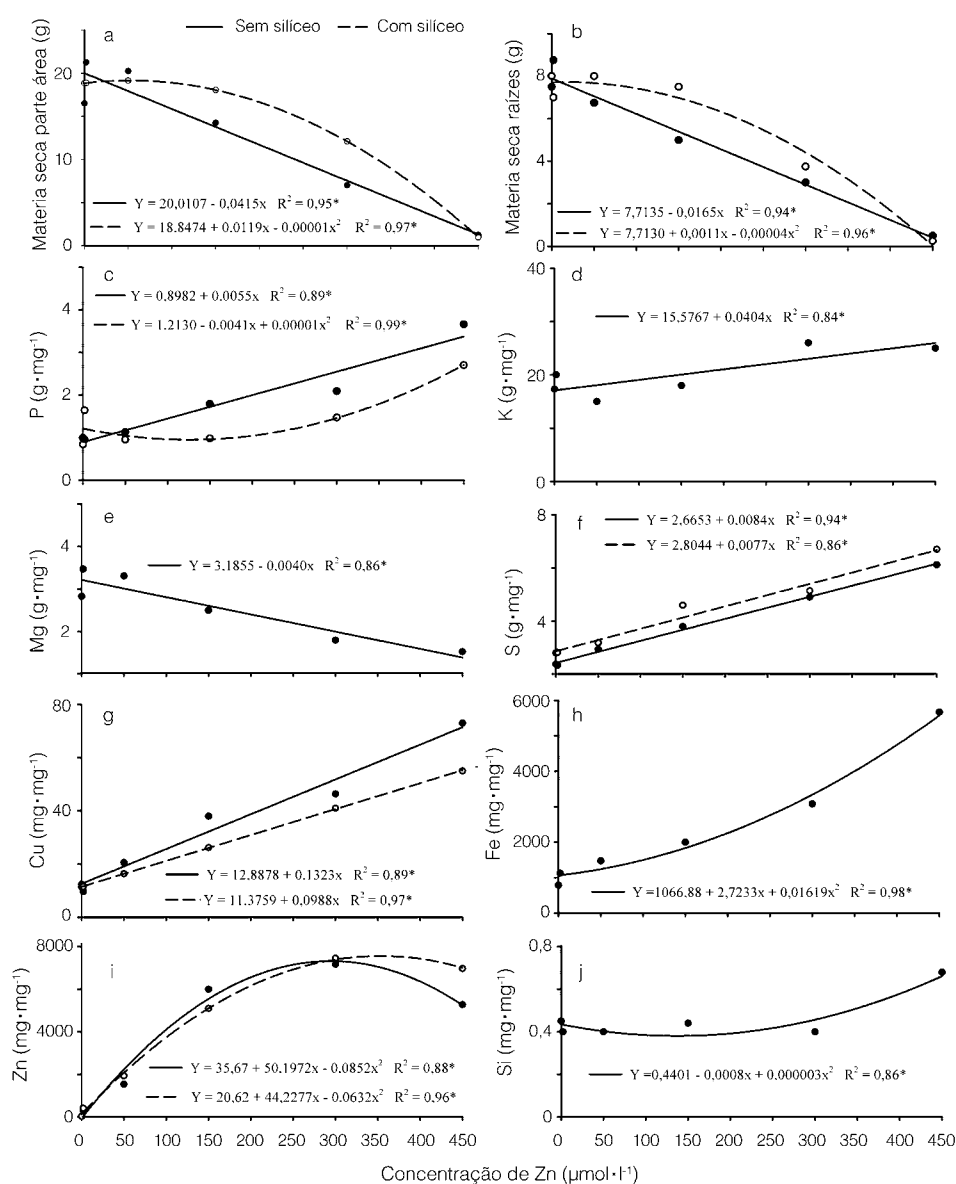


Figura 2. Matéria seca da parte aérea (a), do sistema radicular (b) e teor de P (c), K (d), Mg (e), S (f), Cu (g), Fe (h), Zn (i) e Si (j) em raízes de *Eucalyptus urophylla* em função da concentração de Zn, na presença e ausência de Si em solução (* $p \leq 0,05$).

de Si também foi observada por Ma e Takahashi (1990), na qual relatam a interação negativa do Si com o P no processo de absorção, o que pode, reduzir o teor de P na presença de Si (Figura 2c). O teor de Zn na matéria seca das raízes aumentou progressivamente até a concentração de 300 $\mu\text{mol}\cdot\text{l}^{-1}$ de Zn aplicada, acima desta concentração, tanto na presença como na ausência de Si, o oposto ocorreu. Isso mostra uma relação positiva entre a concentração de Zn nas raízes e a capacidade de absorção desse elemento da solução até

a concentração de 300 $\mu\text{mol}\cdot\text{l}^{-1}$ de Zn (Figura 2i). Comportamento semelhante ao descrito anteriormente, foi observado por Soares *et al.* (2001) ao avaliarem a toxidez de zinco no crescimento e nutrição de *E. maculata* e *E. urophylla* em solução nutritiva.

As concentrações de Zn proporcionaram incremento no teor radicular de Fe (Figura 2h), indicando que o efeito do Zn não afetou a absorção de Fe pelas raízes, no entanto, a translocação do Fe absorvido para a parte aérea foi negativamente afetada. Portanto, apesar do teor de Fe nas raízes ter sido elevado pelo excesso de Zn em solução, esse exerceu alta interferência na translocação de Fe, isso sugere que a deficiência de Fe é um dos fatores que prejudica o crescimento das plantas expostas à toxidez de Zn, mas não é necessariamente

a causa. O efeito fitotóxico de Zn sobre a translocação de Fe também foi observado em espécies de *E. maculata* e *E. urophylla* em estudo realizado por Soares *et al.* (2001).

De acordo com Paiva *et al.* (2000) a presença de metais pesados, ao afetar o índice de translocação, pode provocar uma série de desarranjos fisiológicos nas plantas, pois passa-se a ter deficiência ou excesso de determinados nutrientes, o que prejudica o desenvolvimento e o crescimento normal dessas plantas. Nesse sentido, as concentrações de Zn in-

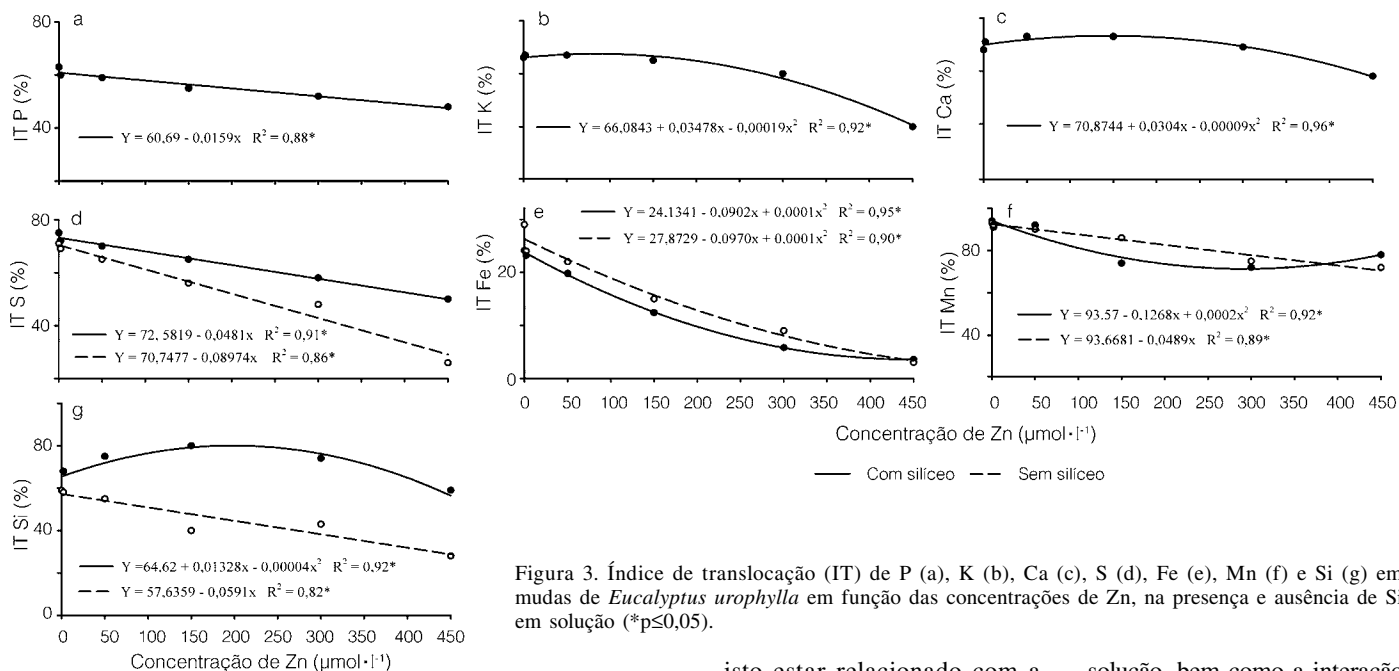


Figura 3. Índice de translocação (IT) de P (a), K (b), Ca (c), S (d), Fe (e), Mn (f) e Si (g) em mudas de *Eucalyptus urophylla* em função das concentrações de Zn, na presença e ausência de Si em solução (* $p \leq 0,05$).

fluenciaram significativamente o índice de translocação (IT) do P, K, Ca, S, Fe, Mn e Si na espécie avaliada (Figura 3). De maneira geral, observou-se redução na translocação desses elementos nas concentrações mais elevadas de Zn, havendo efeito significativo da adição de Si para IT do S, Fe, Mn e Si. Desta maneira, houve evidência de que altas concentrações de Zn em solução causaram redução na translocação de nutrientes, principalmente para o Fe, que independentemente da adição de Si, teve sua translocação reduzida a valores próximos a 5% na maior

concentração de Zn (Figura 3e). Desta forma, a capacidade da planta em limitar a translocação para a parte aérea é um dos mecanismos pelo qual o sistema radicular pode contribuir para a tolerância de algumas espécies de plantas aos metais pesados. Soares *et al.* (2001) avaliando a toxicidade de zinco no crescimento e nutrição de *E. maculata* e *E. urophylla* em solução nutritiva, obteve resultados semelhantes para a translocação de Fe. Agarwala *et al.* (1977) também observaram que o excesso de Zn reduz a translocação de Fe em cevada, sem, entretanto,

isto estar relacionado com a ação induzida do Zn. Inibições na translocação de Fe e Ca também foram observados por Ruano *et al.* (1987) em plantas de feijão-vagem cultivadas sob concentrações crescentes de Zn em solução nutritiva. É sabido que o excesso de Zn pode interferir no metabolismo de carboidratos, inibindo o transporte de nutrientes (Samarakoon e Rauser, 1979) e afetando o crescimento da planta. Desta forma, os efeitos adversos do excesso de Zn para o eucalipto parecem resultar da ação tóxica direta desse elemento para a planta.

O aumento na concentração de Zn e a presença de Si em

solução, bem como a interação entre esses fatores, afetaram significativamente a espessura da epiderme, exoderme, endoderme, córtex, cilindro vascular e xilema (Figura 4). De maneira geral, estas variáveis apresentaram maior espessamento na maior concentração de Zn aplicada. Contudo, as mesmas variáveis analisadas na presença de Si apresentaram menor espessamento.

De maneira geral, a epiderme da raiz apresentou-se unisseriada, tal como relatado por Esaú (1993). Entretanto, na medida em que aumentou a concentração de Zn, observou-se diferença nas paredes das células epidérmicas no que

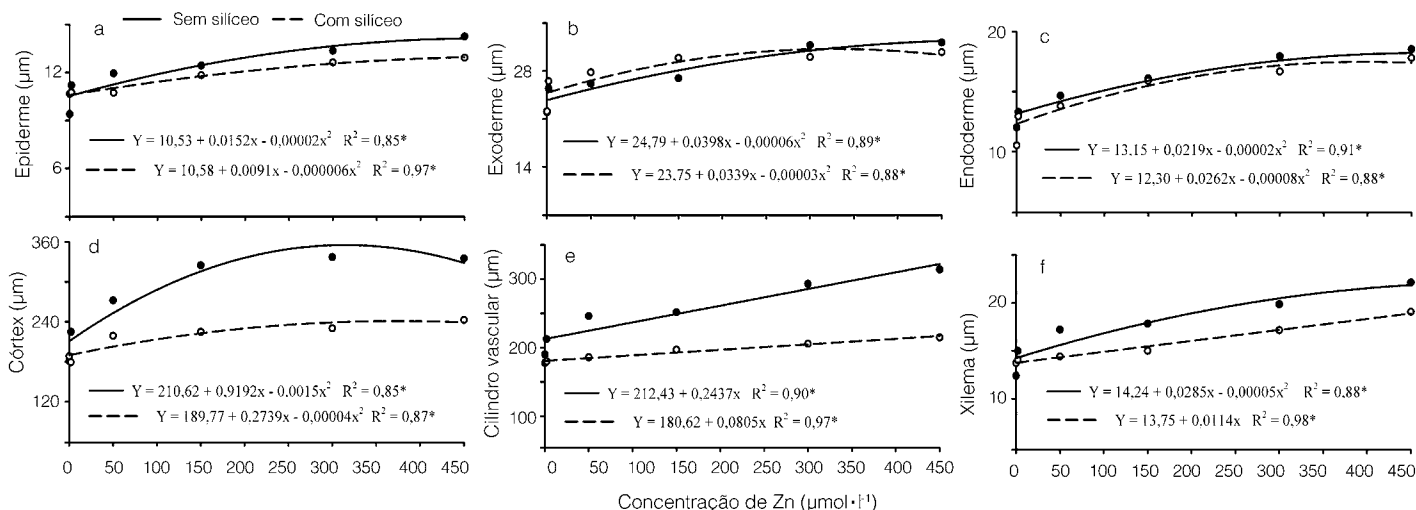


Figura 4. Espessura da epiderme (a), exoderme (b), endoderme (c), cortex (d), cilindro vascular (e) e xilema (f) em raízes de *Eucalyptus urophylla* em função da concentração de Zn, na presença e ausência de Si em solução (* $p \leq 0,05$).

diferem em espessura, observando-se um ligeiro aumento nos tratamentos em que foram aplicadas as maiores concentrações de Zn (Figura 4a).

Observou-se aumento na espessura da exoderme e endoderme, em resposta da planta à contaminação do meio de cultivo (Figura 4b, c), funcionando assim, como filtros no processo de absorção. Segundo Enstone *et al.* (2003) a exoderme e endoderme constituem barreiras apoplásticas que exercem, além de suas funções básicas, papel importante de proteção contra estresses diversos. De acordo com Lux *et al.* (2004) a proporção da raiz ocupada pelas barreiras apoplásticas é importante para a proteção de seus tecidos internos contra o efeito tóxico dos metais. Muitos estudos relatam que a endoderme é um dos principais locais de alocação de metais pesados nas raízes e, o espessamento deste tecido pode contribuir para a redução da translocação de nutrientes (Lux *et al.*, 2004; Ederli *et al.*, 2004) confirmando assim, os resultados encontrados nesse experimento (Figura 3).

Segundo Vázquez *et al.* (1992) os metais pesados podem ser adsorvidos nas paredes celulares de tecidos radiculares, dentre eles, no xilema, causando aumento na espessura de suas paredes. Ederli *et al.* (2004) ao avaliarem o crescimento de raízes de *Phragmites australis* em resposta a adição de Cd em solução, também verificaram aumento na espessura das paredes celulares do xilema, esse fato, segundo os autores, foi devido à possível deposição deste metal nas paredes.

A anormalidade dos tecidos, acima da concentração de $300\mu\text{M}\cdot\text{l}^{-1}$ de Zn, manifestou-se por diferença na integridade do cilindro vascular e alterações nas células corticais. Na concentração de $450\mu\text{M}\cdot\text{l}^{-1}$ de Zn, alterações nas células corticais foram características anatômicas marcantes nas raízes das plantas, tanto na ausência como na presença de Si em solução.

De maneira geral, as observações anatômicas confirmam o menor espessamento dos tecidos radiculares com a adição de Si, no entanto, a sua presença pouco influenciou os drásticos efeitos causados pela maior concentração de Zn aplicada.

Conclusões

- A adição do silício pouco amenizou o efeito negativo do Zn sobre a produção de matéria seca de *Eucalyptus urophylla* e, de maneira geral, pouco a influenciou nos teores e nos índices de translocação dos nutrientes avaliados.

- As alterações anatômicas causadas pelo excesso de Zn foram menores na presença de Si em solução.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao CNPq pela concessão das bolsas aos autores. Trabalho financiado pela Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG), Minas Gerais, Brasil.

REFERÊNCIAS

Abichequer AD, Bohnen H (1998) Eficiência de absorção, translocação e utilização de fósforo por variedades de trigo. *R. Bras. Cienc. Solo*. 22: 21-26.

Agarwala SC, Bisht SS, Sharma CP (1977) Relative effectiveness of certain heavy metals in producing toxicity and symptoms of iron deficiency in barley. *Can. J. Bot.* 55: 1299-1307.

Baccouch S, Chaoui A, Ferjani EE (1998) Nickel toxicity: effects on growth and metabolism of maize. *J. Plant Nut.* 21: 577-588.

Barceló J, Poschenrieder CH (1990) Plant water relations as affected by heavy metal stress: a review. *J. Plant Nut.* 13: 1-37.

Baylis AD, Gragopoulos C, Davidson KJ, Birchall JD (1994) Effect of silicon on the toxicity of aluminium in soybean. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.* 25: 537-546.

Clark RB (1975) Characterization of phosphates in intact maize roots. *J. Agric. Food Chem.* 23: 458-460.

Dell B, Malajczuk N, Grove TS (1995) *Nutrient disorders in plantation eucalypts*. BPD Graphic Associates. Canberra, Australia. 104 pp.

Ederli L, Reale L, Ferranti F, Pasaqualini S (2004) Responses induced by high concentration of cadmium in *Phragmites australis* roots. *Physiol. Plant.* 121: 66-74.

Enstone DE, Peterson CA, Ma FS (2003) Root endodermis and exodermis: Structure, function, and responses to the environment. *J. Plant Growth Reg.* 21: 335-351.

Epstein E, Bloom JA (2006) *Nutrição Mineral de Plantas: Princípios e Perspectivas*. Planta. Londrina, Brasil. 403 pp.

Epstein E (1994) The anomaly of silicon in plant biology. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA.* 91: 11-17.

Esaú K (1993) *Anatomia de Plantas com Sementes*. Blucher. São Paulo, Brasil. 293 pp.

Faquin V (2005) *Nutrição Mineral de Plantas*. UFLA, FAEPE. Lavras, Brasil. 183 pp.

Ferreira DF (2000) *SISVAR 4.3: sistema de análise estatística*. Software. UFLA, DEX. Lavras, Brasil.

Gallo JR, Furlani PR (1978) Determinação de silício em material vegetal, pelo método colorimétrico do azul de molibdênio. *Brag.* 37: 5-11.

Guo W, Hou YL, Wang SG, Zhu YG (2005) Effect of silicate on the growth and arsenate uptake by rice (*Oriza sativa* L.) seedlings in solution culture. *Plant Soil.* 272: 173-181.

Iwasaki K, Maier P, Fecht M, Horst WJ (2002) Effects of silicon supply on apoplastic manganese concentrations in leaves and their relation to manganese tolerance in cowpea (*Vigna unguiculata* (L.) Walp.). *Plant Soil* 238: 281-288.

King LD (1996) Soil heavy metals. En Alvarez V VH (Ed) *O solo nos grandes domínios morfoclimáticos do Brasil e o desenvolvimento sustentado*. SBCS. Viçosa, Brasil. pp. 823-836.

Kraus JE, Arduin M (1997) *Manual básico de métodos em morfologia vegetal*. Soropédica. Rio de Janeiro, Brasil. 198 pp.

Liang YC, Wong JWC, Wei L (2005) Silicon-mediated enhancement of cadmium tolerance in maize (*Zea mays* L.) grown in cadmium contaminated soil. *Chemosphere* 58: 475-483.

Liang Y, Sun W, Zhu YG, Christie P (2007) Mechanisms of silicon-mediated alleviation of abiotic stresses in higher plants: A review. *Env. Pollut.* 147: 422-428.

Lux A, Sottníková A, Opatrná J, Greger M (2004) Differences in structure of adventitious roots in *Salix* clones with contrasting characteristics of cadmium accu-

mulation and sensitivity. *Physiol. Plant.* 120: 537-545.

Ma J, Takahashi E (1990) Effect of silicon on the growth and phosphorus uptake of rice. *Plant Soil* 126: 115-119.

Malavolta, E. (1994) *Fertilizantes e seu Impacto Ambiental: Micronutrientes e Metais Pesados: Mitos, Mistificação e Fatos*. Petroquímica. São Paulo, Brasil. 153pp.

Malavolta E, Vitti GC, Oliveira SA (1997) *Avaliação do Estado Nutricional das Plantas: Princípios e Aplicações*. 2ª ed. Potafos. Piracicaba, Brasil. 319 pp.

Marschner H (1995) *Mineral Nutrition of Higher Plants*. 2ª ed. Academic Press. San Diego, CA, EEUU. 902 pp.

Neumann D, Nieden U (2001) Silicon and metal tolerance of higher plants. *Phytochem.* 56: 685-692.

Paiva HN, Carvalho JG, Siqueira JO, Miranda JPR, Fernandes AR (2004) Absorção de nutrientes por mudas de ipê-roxo (*Tabebuia impetiginosa* (Mart.) Standl.) em solução nutritiva contaminada por cádmio. *R. Árvore.* 28: 189-197.

Paiva HN, Carvalho JG, Siqueira JO (2000) Efeito de Cd, Ni, Pb e Zn sobre mudas de cedro (*Cedrella fissilis* Vell.) e de ipê-roxo (*Tabebuia impetiginosa* (Mart.) Standley) em solução nutritiva. *R. Árvore.* 24: 369-378.

Ruano A, Barcelo J, Poschenrieder C (1987) Zinc toxicity-induced variation of mineral element composition in hydroponically grown bush bean plants. *J. Plant Nut.* 10: 373-384.

Salt DE, Prince RC, Pickering IJ, Raskin I (1995) Mechanisms of cadmium mobility and accumulation in Indian mustard. *Plant Physiol.* 109: 1427-1433.

Samarakoon AB, Rauser W (1979) Carbohydrate level and photoassimilate export from leaves of *Phaseolus vulgaris* exposed to excess cobalt, nickel and zinc. *Plant Physiol.* 63: 1165-1169.

Soares CRF, Graziotti PH, Siqueira JO, Carvalho JG, Moreira FMS (2001) Toxidez de zinco no crescimento e nutrição de *Eucalyptus maculata* e *Eucalyptus urophylla* em solução nutritiva. *Pesq. Agrop. Bras.* 36: 339-348.

Soares CRFS, Siqueira JO, Carvalho JG, Moreira FM (2005) Fitotoxicidade de cádmio para *Eucalyptus maculata* e *E. urophylla* em solução nutritiva. *R. Árvore.* 29: 175-183.

Vázquez MD, Poschenrieder CH, Barceló J (1992) Ultrastructural effects and localization of low cadmium concentrations in bean roots. *New Phytol.* 120: 215-226.