

FITOTOXIDEZ DE CÁDMIO PARA *Eucalyptus maculata* E *E. urophylla* EM SOLUÇÃO NUTRITIVA¹

Cláudio Roberto Fonsêca Sousa Soares², José Oswaldo Siqueira³, Janice Guedes De Carvalho³ e Fátima Maria Souza Moreira³

RESUMO – Estudaram-se os efeitos de doses crescentes de Cd em solução nutritiva no crescimento e absorção mineral de mudas de *Eucalyptus maculata* e *E. urophylla* e respectivos sintomas de fitotoxidez em casa de vegetação. Mudas foram mantidas por cinco semanas em vasos contendo 2 L de solução nutritiva de Clark, adicionando-se 0, 45, 90, 135 e 180 μM de Cd fornecido como CdSO_4 . Após uma semana de exposição aos tratamentos, *E. maculata* exibiu pontuações avermelhadas nas nervuras, clorose internerval, necrose, murchamento das folhas e escurecimento das raízes. Além desses sintomas, *E. urophylla* apresentou morte das gemas apicais e acentuada queda de folhas. A dose crítica de Cd para reduzir em 10% a matéria seca da parte aérea foi baixa; 2,4 μM e 1,5 μM de Cd para *E. maculata* e *E. urophylla*, respectivamente. Os níveis críticos de toxidez na parte aérea foram de 14,5 mg kg^{-1} em *E. maculata* e 10,8 mg kg^{-1} de Cd em *E. urophylla*. Esses resultados indicaram que *E. maculata* é provavelmente menos sensível ao Cd do que *E. urophylla*. Foi também observado que o Cd reduziu a translocação de Cu em até 24 e 43% em *E. maculata* e *E. urophylla*, respectivamente. A translocação de Fe caiu de 36% em média, nas duas espécies no controle para apenas 12% com 180 μM Cd. A elevação nas doses de Cd reduziu os teores de Ca e Mg na parte aérea das espécies, atingindo-se teores de Mg abaixo da faixa considerada adequada em *E. urophylla*. Ficaram evidenciadas a fitotoxidez de Cd no *Eucalyptus* e a relação desta com a diminuição da translocação de Cu e Fe e com a diminuição dos teores foliares de Mg.

Palavras-chave: Absorção mineral, árvores florestais, eucalipto, metais pesados, níveis críticos de toxidez e translocação.

CADMIUM PHYTOTOXICITY TO *Eucalyptus maculata* AND *E. urophylla* IN NUTRIENT SOLUTION

ABSTRACT – The effects of increasing concentration of Cd in nutrient solution on growth, mineral uptake and phytotoxicity symptoms in *Eucalyptus maculata* and *E. urophylla* seedlings were studied under greenhouse conditions. Seedlings were kept for five weeks in 2 L pots containing Clark's nutrient solution amended with 0, 45, 90, 135 and 180 μM as CdSO_4 . After one week of exposure to Cd treatments seedlings of *E. maculata* exhibited nerval reddish spots, interveinal leaf chlorosis, leaf necrosis, drought and root darkening, whereas *E. urophylla* showed additionally apical dieback and leaf fall. The critical dose to reduce shoot dry matter by 10% was low; 2.4 μM and 1.5 μM of Cd to *E. maculata* and *E. urophylla*, respectively, while toxicity critical concentration in the shoots were 14.5 and 10.8 mg kg^{-1} dry matter for these species, respectively.

¹ Recebido em 16.06.2003 e aceito para publicação em 25.11.2004.

² Departamento de Ciência do Solo da UFLA, Cx. Postal 37, 37200-000 Lavras-MG. Bolsista da CAPES. E-mail: <crfsoares@gmail.com>.

³ Departamento de Ciência do Solo da UFLA, Cx. Postal 37, 37200-000 Lavras-MG. E-mail: <siqueira@ufla.br>; <janicegc@ufla.br>; <fmoreira@ufla.br>.



*These results indicate that **E. maculata** is probably less sensitive to Cd than **E. urophylla**. It was also found that Cd reduced translocation of Cu by 24 and 43% as compared to control in **E. maculata** and **E. urophylla**, whereas translocation of Fe was reduced from 36% on average for the two species in the control to 12% at 180 μM of Cd. Shoot concentrations of Ca and Mg was also reduced in both species, reaching levels below those considered adequate for **E. urophylla**. Increasing concentration of Cd in nutrient solution reduced Ca and Mg contents in shoots of species, reaching Mg contents below those of the range considered suitable for **E. urophylla**. Relationships of Cd phytotoxicity in **Eucalyptus** with Cu and Fe translocation as well as with Mg foliar contents were shown.*

*Key-words: Critical toxic levels, **eucalypts**, forest trees, heavy metals, metal translocation, mineral uptake.*

1. INTRODUÇÃO

A ciclagem biogeoquímica de metais pesados e o fluxo natural desses elementos na biosfera têm sido alterados em função da crescente atividade de mineração e produção de resíduos industriais ricos em metais que contaminam o solo e demais componentes dos ecossistemas (ALLOWAY, 1993). Grandes esforços têm sido feitos visando à recuperação de solos contaminados com esses metais, sendo uma das alternativas para isso o emprego de plantas extratoras, processo conhecido por fitoremediação (ACCIOLY e SIQUEIRA, 2000). Para se obter sucesso com esse processo é necessário conhecer o potencial fitotóxico de elementos contaminantes das espécies vegetais com potencial para introdução em áreas contaminadas (SANITÀ di TOPPI e GABBRIELLI, 1999). Devido às características de crescimento rápido, sistema radicular bastante desenvolvido e facilidade de adaptação a condições estressantes (DELL et al., 1995), o eucalipto apresenta-se com grande potencial para emprego em programas de recuperação de áreas degradadas pela deposição de metais pesados no solo (ABOUELKHAIR et al., 1995; GRAZZIOTTI, 1999; ACCIOLY, 2001).

Estudos da fitotoxidez de metais pesados no crescimento e absorção mineral de espécies de eucalipto foram recentemente desenvolvidos com Zn e Cu (SOARES et al., 2000; 2001), havendo carência destes em outros elementos potencialmente tóxicos, como é o caso do Cd. Contaminações ambientais com Cd são freqüentes em áreas de rejeito de minério de Zn, composto de lixo e lodo de esgoto, indústrias de plástico e lubrificante e, em alguns casos, na aplicação de fertilizantes fosfatados ricos em Cd (BERGMANN, 1992). Por ser um elemento de alta mobilidade e toxicidade e universalmente conhecido por não apresentar papel metabólico nas plantas ou animais (BARCELÓ e POSCHENRIEDER, 1992), o Cd apresenta elevado

potencial de risco ambiental (ARDUINI et al., 1996). No solo, a maior parte do Cd apresenta-se em forma trocável (RIBEIRO FILHO et al., 1999), sendo facilmente absorvido pelas plantas causando fitotoxidez. Esta se manifesta normalmente pela clorose foliar acompanhada pela diminuição da taxa fotossintética, podendo inibir a respiração, transporte de elétrons nas mitocôndrias e atividade enzimática (SANITÀ di TOPPI e GABBRIELLI, 1999). De acordo com Leita et al. (1995), o efeito fitotóxico de Cd nas plantas envolve três diferentes estágios. Primeiramente, há um efeito indireto na abertura dos estômatos ocasionado pelo aumento no potencial osmótico das folhas. Em seguida, o Cd age diretamente nas células-guarda e causa severa inibição no crescimento das raízes que limita a absorção de água e promove o fechamento dos estômatos. Quando a concentração se torna elevada, há um declínio metabólico, com perda da turgidez foliar e fechamento estomatal hidropassivo. Em termos gerais, consideram-se como tóxicas as concentrações de Cd entre 5-30 mg kg^{-1} na matéria seca da parte aérea da maioria das espécies (KABATA-PENDIAS e PENDIAS, 1985). Não foi encontrado nenhum relato sobre níveis críticos de toxidez e sintomas de fitotoxidez de Cd no eucalipto. Por isso, o presente trabalho teve por objetivo avaliar o efeito de doses crescentes de Cd no crescimento e absorção mineral de duas espécies de *Eucalyptus* em solução nutritiva.

2. MATERIAL E MÉTODOS

O estudo foi desenvolvido em casa de vegetação no Departamento de Ciência do Solo da Universidade Federal de Lavras, no período de abril a junho de 1997. Mudanças de *Eucalyptus maculata* Hook e *Eucalyptus urophylla* S.T. Blake foram produzidas em substrato contendo areia + vermiculita (50% v/v), irrigadas semanalmente com solução nutritiva de Clark (1975)

preparada com reagentes PA e que continha: 7,26 mM N – NO₃⁻; 0,90 mM N – NH₄⁺; 0,07 mM P; 1,80 mM K; 2,60 mM Ca; 0,60 mM Mg; 0,50 mM S; 7,0 μM Mn; 2 μM Zn; 0,5 μM Cu; 19 μM B; 0,60 μM Mo; e 38 μM Fe complexado com Na₂-EDTA; nessa etapa foi usada solução meia-força. Duas semanas após a emergência do primeiro par de folhas, as mudas foram transplantadas para bandejas coletivas com capacidade para 30 L contendo a mesma solução nutritiva de Clark meia-força, com aeração constante e pH mantido em 5,5 pela adição de NaOH ou HCl 0,1 N, onde permaneceram durante 15 dias. Em seguida, a solução foi substituída pela mesma solução a 100%, permanecendo nesta por mais 15 dias, quando atingiram altura média de 20 cm. As mudas foram padronizadas quanto à altura e vigor e transplantadas duas plantas por vaso de 2 L que constituiu uma parcela. Os tratamentos foram resultantes do esquema fatorial 2 x 5: duas espécies de eucalipto e cinco doses de Cd (0, 45, 90, 135 e 180 μM Cd fornecido como CdSO₄) e dispostos no delineamento experimental em blocos casualizados, com quatro repetições. A solução nutritiva contendo a respectiva dose de Cd foi renovada semanalmente e o pH, mantido em 5,5 pela adição de NaOH ou HCl 0,1 N.

Após cinco semanas de exposição ao Cd, procedeu-se à colheita das plantas, dividindo-as em parte aérea e raízes. Foram determinados a área foliar por meio do emprego do Transparent Belt Conveyer mod. LI-3050A (LI-COR, inc. Lincoln-USA) e o comprimento de raízes por meio do Comair Root Length Scanner mod. TM 001 (Hawker de Havilland Victoria Limited, Port Melbourne-Austrália). Após essas avaliações, as plantas foram lavadas e secadas em estufa com circulação de ar a 65 °C até massa constante, pesadas e moídas em moinho tipo Wiley equipado com peneira com malha de 0,38 mm. Além da massa de matéria seca da parte aérea (caule + folha) e raízes, foram calculadas a razão entre a matéria seca de raiz e da parte aérea (R/PA) e a razão comprimento de raiz e matéria seca de raiz (C/MSR). Para determinação dos teores de nutrientes, efetuou-se a digestão nítrico-perclórica do material seco e moído, obtendo-se extratos para determinação dos teores de P pelo método colorimétrico, K por fotometria de chama, Ca e Mg por espectrofotometria de absorção atômica. Os teores de Cd, Cu, Zn, Mn e Fe também foram determinados por espectrofotometria de absorção atômica, conforme metodologia descrita por Malavolta et al. (1989). O acúmulo de P, K, S, Ca,

Mg, Cd, Cu, Zn, Mn e Fe foram calculados com base nos teores e produção de matéria seca. Mediante o acúmulo de nutrientes e metais pesados, calcularam-se os índices de translocação (IT) desses elementos de acordo com Abichequer e Bohnen (1998), com o uso da seguinte equação:

$$IT = \left(\frac{\text{quantidade acumulada na parte aérea}}{\text{quantidade acumulada na planta}} \right) \times 100.$$

Os resultados foram submetidos à análise de variância, por meio do uso do programa estatístico SAEG (EUCLYDES, 1983). As equações de regressão foram escolhidas pelo melhor ajuste, através do programa Table Curve 2D for Windows v. 2.03 (Jandel Corporation), e o valor de F das regressões foi corrigido pelo programa Fcalc32 for Windows v. 1.1 (MOURA FILHO e CRUZ, 1996). As doses críticas de toxidez de Cd na solução para redução da produção de parte aérea e raízes (dose de Cd na solução nutritiva que reduz em 10% a matéria seca da parte aérea e raízes) e os níveis críticos de toxidez na planta (teor foliar de Cd requerido para inibir em 10% a matéria seca da parte aérea) foram estimados com base nas equações de regressão obtidas em cada espécie, em resposta às doses do elemento em solução.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1. Sintomas de fitotoxidez e crescimento das plantas

Sintomas de fitotoxidez foram observados em ambas as espécies após uma semana de exposição das plantas aos tratamentos com Cd. Em *E. maculata*, as doses superiores a 90 μM causaram pontuações avermelhadas nas nervuras, clorose internerval, necrose e murchamento das folhas com posterior aspecto coriáceo. Além desses sintomas, *E. urophylla* apresentou, na dose de 180 μM Cd, curvatura vertical das folhas basais, morte das gemas apicais e queda total das folhas. Raízes escurecidas e pouco desenvolvidas foram os sintomas observados em ambas as espécies, mesmo na dose mais baixa de Cd em solução (45 μM). Os sintomas de toxidez de Cd anteriormente descritos foram bastante semelhantes aos observados em Zn nessas espécies (SOARES et al., 2001). Conforme Breckle e Kahle (1992), a ocorrência desses sintomas pode estar relacionada com a deficiência múltipla de vários nutrientes essenciais a formação, multiplicação e funcionamento de cloroplastos e ao efeito fitotóxico do Cd na extensibilidade ou síntese de material de parede celular (BARCELÓ e POSCHENRIEDER, 1992).

O aumento das doses de Cd na solução nutritiva exerceu efeito negativo acentuado no crescimento das espécies (Figura 1). Na parte aérea das plantas, foram verificadas reduções de até 75 e 94% na produção de matéria seca e área foliar, respectivamente. Nas raízes, observou-se diferença entre as espécies para o comprimento total e produção de matéria seca, com maior crescimento de *E. urophylla* no controle sem Cd. Apesar disso, as raízes dessa espécie foram inibidas pela presença de Cd na solução. Na dose mais baixa de Cd (45 µM), houve decréscimo de 48% na matéria seca e de 41% do comprimento total. Em *E. maculata* houve menor decréscimo dessas características (36

e 17%, respectivamente), indicando a maior suscetibilidade de *E. urophylla* ao Cd. A razão R/PA foi baixa, situando-se em torno de 0,30 a 0,36 e sem influência de Cd. Esses resultados indicam que as raízes e a parte aérea foram igualmente afetadas pelo metal. No entanto, verificou-se acréscimo na razão comprimento de raiz (C) e matéria seca de raiz (MSR) com o aumento das doses de Cd [$Y=5,13+0,41X^{1/2}$ ($R^2=0,94$; $p \leq 0,01$); em que Y é a razão C/MSR e X a dose de Cd]. Os valores dessa relação variaram de 5,1 m/g no controle a 10,6 m/g com 180 µM Cd, indicando que o Cd foi mais prejudicial para a matéria seca do que para o comprimento das raízes dessas espécies.

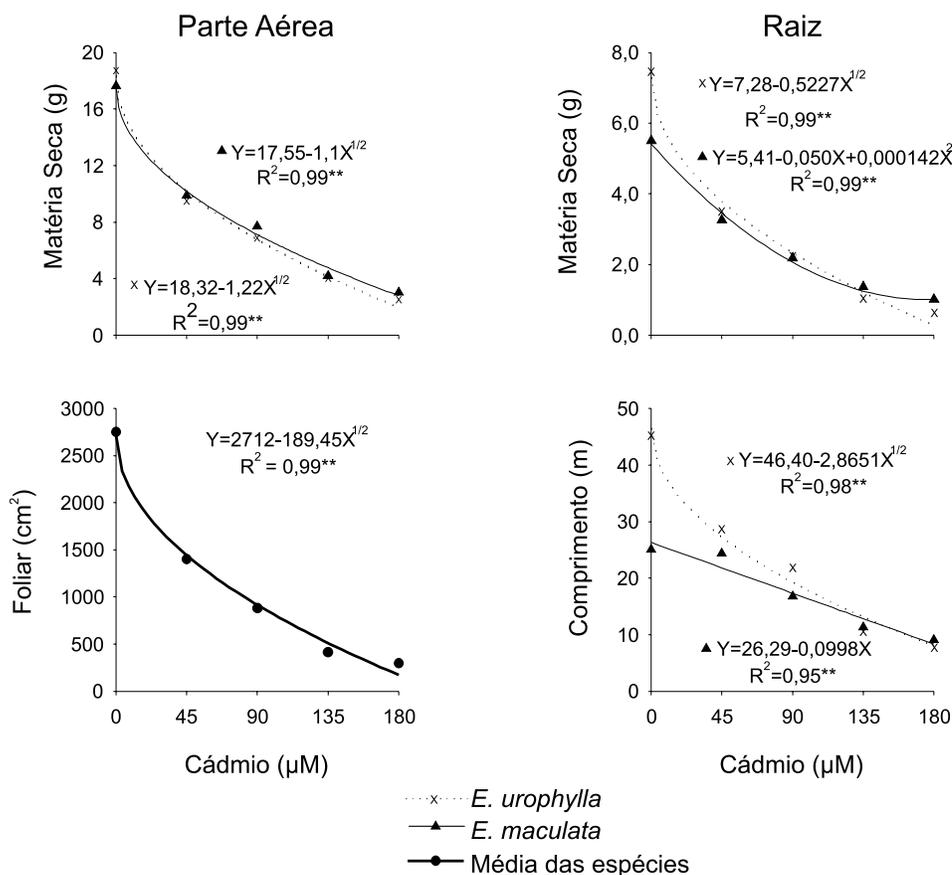


Figura 1 – Matéria seca da parte aérea e raízes, área foliar e comprimento de raiz de mudas de *Eucalyptus* em resposta ao aumento das doses de Cd em solução nutritiva (** $p \leq 0,01$).

Figure 1 – Shoot and root dry matter, foliar area and root length in *Eucalyptus* seedlings related to increasing doses of Cd in nutrient solution (** $p \leq 0.01$).

As doses críticas de toxidez de Cd em solução (DCT), determinadas com base nas respostas em crescimento relativo de matéria seca da parte aérea e de raízes, encontram-se na Tabela 1. Na matéria seca da parte aérea, as DCT foram de 2,4 e 1,5 μM de Cd para *E. maculata* e *E. urophylla*, respectivamente, indicando que essa última é mais suscetível ao Cd. As DCT de Cd na matéria seca da parte aérea dessas espécies são inferiores às DCT estimadas por Paiva et al. (2000) para cedro (6,7 μM) e ipê-roxo (49,8 μM), indicando a maior suscetibilidade dessas espécies de eucalipto em relação às nativas estudadas por aqueles autores. Essa diferença de comportamento entre as espécies pode ter base genética ou fisiológica, como a existência de agentes filtrantes presentes nas raízes capazes de promover a complexação do Cd na parede celular ou em outras estruturas apoplásticas (MARCHIOL et al., 1996). É interessante notar que as DCT de Cd nessas espécies são menores que as encontradas em Zn (170 e 73 μM) e Cu (3,3 e 8,3 μM) (SOARES et al., 2001, 2000) nas mesmas condições, confirmando a elevada fitotoxidez do Cd (LEITA et al., 1995). ADT_{50} na matéria seca da parte aérea de *E. maculata* e *E. urophylla* foi de 63,1 e 54,5 μM Cd, respectivamente (Tabela 1). Estas são superiores aos 30 μM encontrados nesse elemento por Brune e Dietz (1995) em cevada, indicando a maior tolerância do eucalipto em relação a essa espécie.

3.2. Teores e translocação de metais pesados e nutrientes

O aumento das doses de Cd influenciou os teores de Cd, Cu, Zn, Mn e Fe nas plantas (Figura 2). Resposta quadrática foi observado no teor de Cd da parte aérea,

independentemente da espécie, atingindo-se teores superiores a 350 mg kg^{-1} desse elemento. Na dose 45 μM Cd, houve acréscimo de quase 4.000% em relação ao controle, indicando o elevado potencial de absorção pelas raízes e translocação desse elemento no eucalipto. O nível crítico de toxidez (NCT) de Cd na matéria seca da parte aérea de *E. maculata* foi de 14,5 mg kg^{-1} , sendo este superior ao encontrado em *E. urophylla*, 10,8 mg kg^{-1} . Isso corrobora os resultados de DCT e tende a indicar a maior suscetibilidade de *E. urophylla* ao Cd. Os valores de NCT encontram-se na faixa considerada tóxica (5-30 mg kg^{-1}) para as plantas em geral (KABATA-PENDIAS e PENDIAS, 1985). Nas espécies muito sensíveis como soja, alfafa, feijão ou cevada, o NCT varia de 5-10 mg kg^{-1} Cd, enquanto naquelas menos sensíveis como alface, tomate, nabo, milho e repolho esse valor situa-se entre 50 e 200 mg kg^{-1} (MACNICOL e BECKETT, 1985). Considerando esses valores, verificou-se que as espécies de eucalipto estudadas apresentam alta suscetibilidade ao Cd. O teor de Cd na matéria seca das raízes aumentou linearmente com a elevação das doses aplicadas (Figura 2), com acréscimo de até 1.850% em relação ao controle, indicando a relação direta entre a concentração de Cd na solução e a capacidade de absorção desse elemento pelas raízes.

A presença de Cd na solução interferiu na concentração de outros elementos na planta (Figura 2). O teor de Cu na matéria seca da parte aérea reduziu em até 35% com 45 μM Cd, não atingindo, entretanto, teores de 0,4 a 1,5 mg kg^{-1} considerados deficientes para o crescimento do *Eucalyptus* (DELL et al., 1995). Ao contrário da parte aérea, as doses de Cd proporcionaram incremento no teor radicular de Cu em ambas as espécies, indicando que o efeito do Cd não afeta a absorção de Cu pelas raízes, e sim a translocação do Cu absorvido para a parte aérea, que foi negativamente afetado (Figura 3). Na dose de 180 μM Cd, verificou-se redução de 24 e 43% na translocação de Cu em *E. maculata* e *E. urophylla*, respectivamente, em relação ao controle.

Os teores de Zn na parte aérea de *E. urophylla* não foram influenciados pelas doses de Cd em solução, enquanto na de *E. maculata* houve redução de 48% em 45 μM Cd. Isso pode ser devido à inibição da absorção, consequência do decréscimo no teor de Zn nas raízes dessa espécie. Íons de mesma valência podem competir por sítios de absorção, limitando, assim, a absorção de um ao outro (GUSSARSSON et al., 1995). O Cd

Tabela 1 – Doses críticas de toxidez de Cd (μM) em solução nutritiva para reduzir o crescimento da parte aérea e das raízes de duas espécies de *Eucalyptus*

Table 1 – Critical doses for Cd toxicity (μM) in nutrient solution to reduce shoot and root growth of two *Eucalyptus* species

Doses críticas	<i>E. maculata</i>		<i>E. urophylla</i>	
	Parte aérea	Raízes	Parte aérea	Raízes
DCT ⁽¹⁾	2,4	9,0	1,5	6,4
DT ₅₀ ⁽²⁾	63,1	62,8	54,5	44,7

1. Dose na solução requerida para reduzir em 10% a variável de crescimento
2. Dose na solução requerida para reduzir em 50% a variável de crescimento



apresenta elevada complexação a proteínas de baixa massa molecular (5.000-13.000 MM), que são também responsáveis pela absorção e transporte de Zn nas plantas (WOOLHOUSE, 1983).

O teor de Mn na parte aérea também sofreu decréscimo (59%) na dose de 45 μM Cd, porém sem atingir a faixa considerada deficiente em *E. maculata*, que é de 12-15 mg kg^{-1} (DELL e ROBINSON, 1993) e

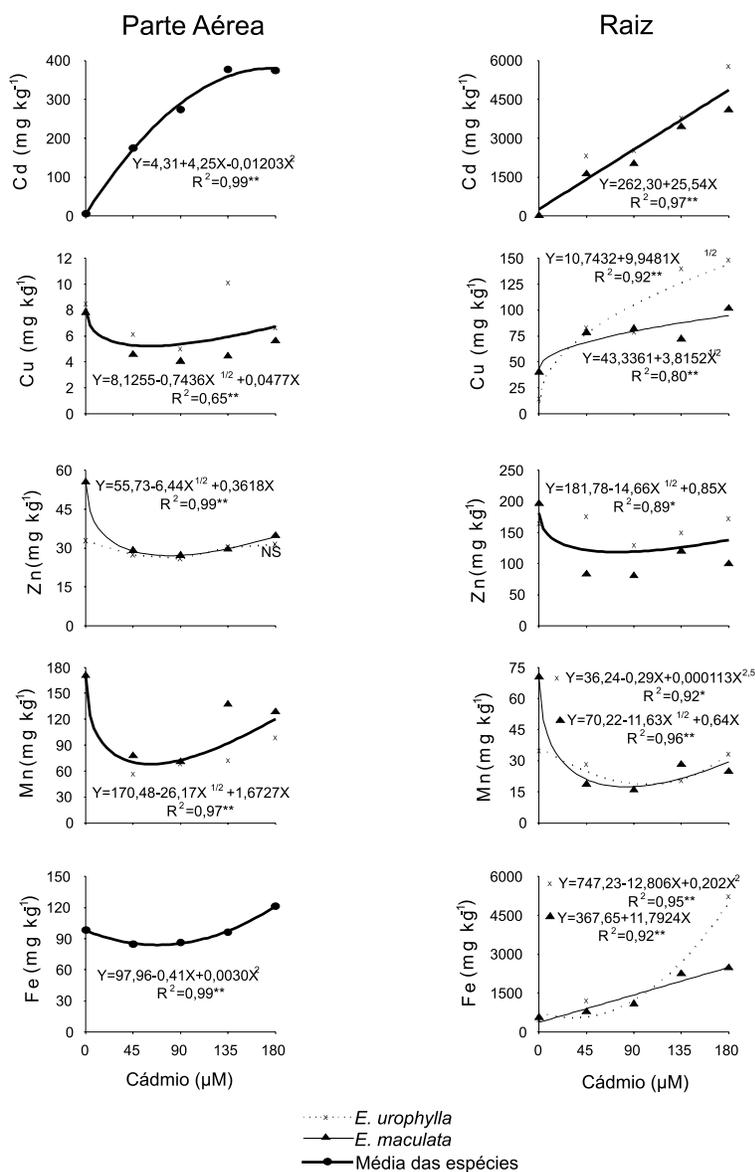


Figura 2 – Teores de Cd, Cu, Zn, Mn e Fe na matéria seca da parte aérea e raízes de mudas de *Eucalyptus* em resposta ao aumento das doses de Cd em solução nutritiva (** $p \leq 0,01$; * $p \leq 0,05$; e NS - efeito não-significativo).
Figure 2 – Cd, Cu, Mn and Fe contents in *Eucalyptus* shoot and root dry matter related to increasing doses of Cd in nutrient solution (** $p \leq 0,01$; * $p \leq 0,05$; NS – now - significant effect).

de 5-16 mg kg⁻¹ para *E. urophylla* (DELL et al., 1995). O teor de Mn nas raízes sofreu variação diferenciada entre as espécies. Houve decréscimo de até 75% em *E. maculata* e de 48% em *E. urophylla*, ficando evidente o antagonismo entre esses dois elementos no processo de absorção, como mostrado em Alloway (1993). Apesar da redução nos teores de Mn na parte aérea e raízes das espécies, a translocação desse elemento foi elevada (média = 84%) e sem influência das doses de Cd. A adição de Cd aumentou o teor de Fe nas raízes, mas esse aumento não se refletiu nos teores desse elemento na parte aérea. O Cd não afetou a absorção de Fe, mas reduziu a translocação do Fe absorvido, que foi baixa nessas espécies (36% no controle), para apenas 12%, com 180 µM Cd (Figura 3). Portanto, apesar de os teores de Cu e Fe nas raízes e parte aérea terem aumentado com as doses de Cd em solução, este afetou negativamente a translocação desses elementos, podendo ser uma das possíveis causas do efeito adverso do Cd no eucalipto.

Os teores de nutrientes na matéria seca da parte aérea das plantas foram influenciados pelo aumento das doses de Cd em solução, exceto para K e S (dados não mostrados). Houve aumento de 275%, nos teores de P na parte aérea (Figura 4), provavelmente devido à redução no crescimento causando o efeito de concentração. Ao contrário do P, houve redução nos teores de Ca e Mg. Neste último, os teores na parte aérea atingiram valores abaixo da faixa estabelecida como adequada (2,1-2,3 g kg⁻¹) para *E. urophylla* (DELL et al., 1995), atingindo-se teor mínimo de 1,5 g kg⁻¹. Apesar disso, a translocação de Mg foi pouco afetada pelas doses de Cd em solução, verificando-se índice de translocação superior a 71% (dados não apresentados). Os baixos teores foliares de Mg, aliados ao decréscimo da translocação de Fe, corroboram os sintomas de clorose internerval observados, uma vez que esses elementos participam da molécula de clorofila e são essenciais para o funcionamento dos cloroplastos (BRECKLE e KAHLE, 1992; MARSCHNER, 1995).

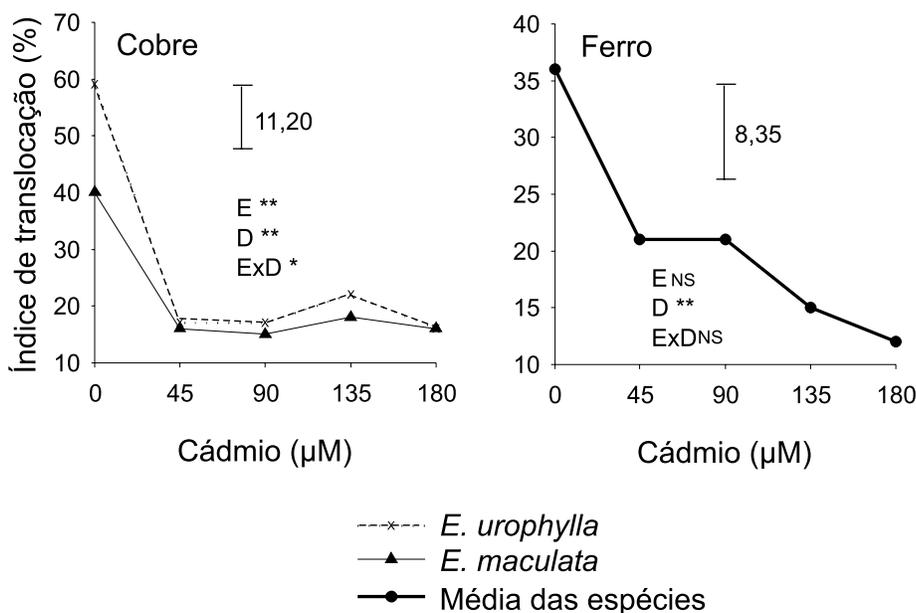


Figura 3 – Índice de translocação (%) de cobre e ferro em duas espécies de *Eucalyptus* em resposta ao aumento das doses de Cd em solução nutritiva. E (espécie), D (dose de Cd) e interação ExD (** $p \leq 0,01$; * $p \leq 0,05$; e NS - efeito não significativo). A barra vertical representa a DMS (dose) do teste de Tukey a 5% de probabilidade.

Figure 3 – Copper and iron translocation indices (%) in two *Eucalyptus* species related to increasing Cd doses in nutrient solution. (E) = species, (D) = Cd dose, EXD = interaction species X doses (** $p \leq 0,01$; * $p \leq 0,05$; NS – now - significant effect). Vertical bar represents SMD (dose) from Tukey test at 5% probability level.

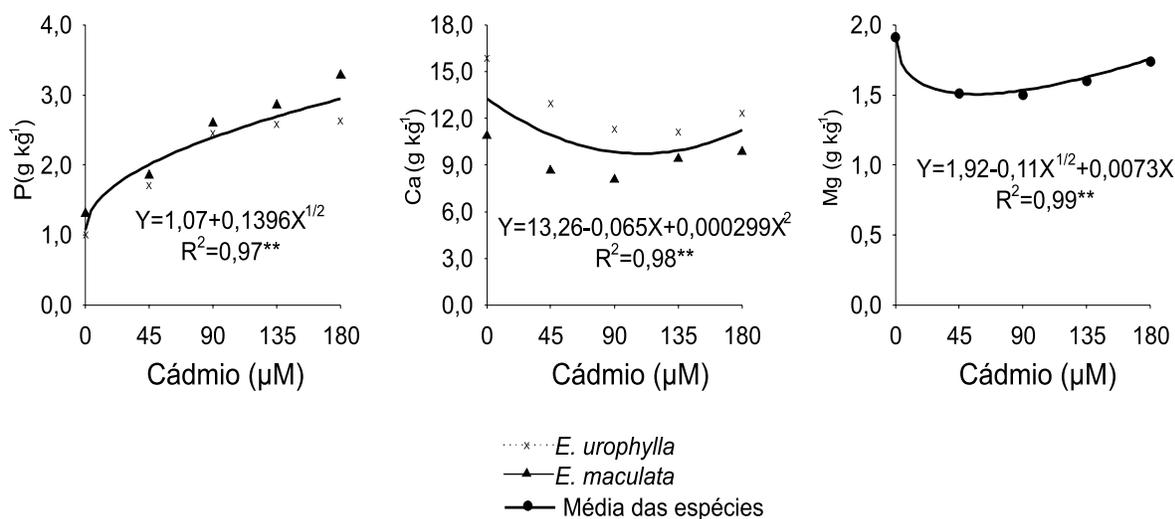


Figura 4 – Teores de P, Ca e Mg na matéria seca da parte aérea de mudas de *Eucalyptus* em resposta ao aumento das doses de Cd em solução nutritiva (** $p \leq 0,01$).

Figure 4 – P, Ca and Mg contents in shoot dry matter of *Eucalyptus* seedlings related to increasing Cd doses in nutrient solution (** $p \leq 0.01$).

4. CONCLUSÕES

- *E. maculata* e *E. urophylla* mostraram-se muito suscetíveis ao Cd, com a ressalva de que o aumento das doses desse elemento em solução diminuiu a translocação de Cu e Fe e os teores foliares de Mg.

- Os principais sintomas de fitotoxicidez de Cd foram o murchamento das folhas, pontuações avermelhadas nas nervuras, clorose internerval, necrose, morte das gemas apicais, escurecimento das raízes e inibição do crescimento das plantas.

- *E. maculata* foi provavelmente menos sensível ao Cd, uma vez que apresentou doses críticas de Cd na solução mais elevadas do que *E. Urophylla*.

- Os níveis críticos de toxidez de Cd na parte aérea do *E. maculata* e *E. urophylla* não diferiram dos valores considerados tóxicos para a maioria das espécies.

5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABICHEQUER, A.D.; BOHNEN, H. Eficiência de absorção, translocação e utilização de fósforo por variedades de trigo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.22, p.21-26, 1998.

ABOUELKHAIR, K.S.; AMER, M.O.; ELSOKKARY, I.H. Effect of zinc, cadmium and lead on the growth, root characters and mineral contents of *Acacia saligna*, *Casuarina glauca* and *Eucalyptus camaldulensis* seedlings. **Journal Agricultural Science Mansoura University**, v.20, p.2501-2518, 1995.

ACCIOLY, A.M.A. **Amenizantes e estratégias para o estabelecimento de vegetação em solos de áreas contaminadas por metais pesados**. 2001. 170f. Tese (Doutorado em Solos e Nutrição de Plantas). Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2001.

ACCIOLY, A.M.A.; SIQUEIRA, J.O. Contaminação química e biorremediação do solo. **Tópicos em Ciência do Solo**, v.1, p.299-351, 2000.

ALLOWAY, B.J. **Heavy metals in soils**. New York: John Wiley, 1993. 339p.

ARDUINI, I.; GODBOLD, D.L.; ONNIS, A. Cadmium and copper uptake and in Mediterranean tree seedlings. **Physiology Plantarum**, v.97, p.111-117, 1996.

- BARCELÓ, J.; POSCHENRIEDER, Ch. Respuestas de las plantas a la contaminación por metales pesados. **Suelo y Planta**, v.2, p.345-361, 1992.
- BERGMANN, W. **Nutritional disorders of plants. Development, visual and analytical diagnosis**. New York: 1992. 741p.
- BRECKLE, S.W.; KAHLE, H. Effects of toxic heavy metals (Cd, Pb) on growth and mineral nutrition of beech (*Fagus sylvatica* L.). **Vegetatio**, v.101, p.43-53, 1992.
- BRUNE, A.; DIETZ K.J. A comparative analysis of element composition of roots and leaves of barley seedlings grown in the presence of toxic Cd, Mo, Ni and Zn concentration. **Journal Plant Nutrition**, v.18, p.853-868, 1995.
- CLARK, R.B. Characterization of phosphates in intact maize roots. **Journal Agriculture Food Chemistry**, v.23, p.458-460, 1975.
- DELL, B.; MALAJCZUK, N.; GROVE, T.S. **Nutrient disorders in plantation eucalypts**. Canberra, BPD Graphic Associates, 1995. 104p.
- DELL, B.; ROBINSON, J.M. Symptoms of mineral nutrient deficiencies and the nutrient concentration ranges in seedlings of *Eucalyptus maculata* Hook. **Plant Soil**, v.156, p.255-261, 1993.
- EUCLYDES, R.F. **Manual de Utilização do Programa SAEG (Sistema para Análises Estatísticas e Genética)**. Viçosa, MG: Universidade Federal de Viçosa, 1983. 59p.
- GRAZZIOTTI, P.H. **Comportamento de fungos ectomicorrízicos, *Acacia mangium* e espécies de *Pinus* e *Eucalyptus* em solo contaminado por metais pesados**. 1999. 177f. Tese (Doutorado em Solos e Nutrição de Plantas). Universidade Federal de Lavras, 1999.
- GUSSARSSON, M. et al. Cadmium and copper interactions on the accumulation and distribution of Cd and Cu in birch (*Betula Pendula* Roth) seedlings. **Plant Soil**, v.171, p.185-187, 1995.
- KABATA-PENDIAS, A.; PENDIAS, H. **Trace elements in soils and plants**. Boca Raton: CRC Press, 1985. 315p.
- LEITA, L. et al. Transpiration dynamics in cadmium-treated soybean (*Glycine max* L.) plants. **Journal Agronomy Crop Science**, v.175, p.153-156, 1995.
- MACNICOL, R.D.; BECKETT, P.H.T. Critical tissue concentrations of potentially toxic elements. **Plant Soil**, 85:107-129, 1985.
- MALAVOLTA, E.; VITTI, G.C.; OLIVEIRA, S.A. **Avaliação do estado nutricional das plantas: princípios e aplicações**. Piracicaba, POTAFÓS, 1989. 201p.
- MARCHIOL, L. et al. Physiological responses of two soybean cultivars to cadmium. **Journal Environmental Quality**, v.25, p.562-566, 1996.
- MARSCHNER, H. **Mineral nutrition of higher plants**. 2. ed. San Diego: Academic Press, 1995. 902p.
- MOURA FILHO, G.; CRUZ, C.D. Fcalc for Windows v. 1.1 - **Programa para cálculo do F corrigido em análises de regressão: Teste dos coeficientes**. Viçosa, MG: Universidade Federal de Viçosa, 1996.
- PAIVA, H.N.; CARVALHO, J.G.; SIQUEIRA, J.O. 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. **Revista Árvore**, v.24, p.369-378, 2000.
- RIBEIRO FILHO, M.R. et al. Metais pesados em solos de rejeitos de indústria de processamento de zinco. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.23, p.453-464, 1999.
- SANITÀ di TOPPI, L.; GABBRIELLI, R. Response to cadmium in higher plants. **Environmental Experimental Botany**, v.41, p.105-130, 1999.
- SOARES, C.R.F.S. et al. Toxidez de zinco no crescimento e nutrição de *Eucalyptus maculata* e *Eucalyptus urophylla* em solução nutritiva. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.36, p.339-348, 2001.
- SOARES, C.R.F.S. et al. Crescimento e nutrição mineral de *Eucalyptus maculata* e *Eucalyptus urophylla* em solução nutritiva com concentração crescente de cobre. **Revista Brasileira Fisiologia Vegetal**, v.12, p.213-225, 2000.
- WOOLHOUSE, H.W. Toxicity and tolerance in the responses of plant to metals. In: LANGE, O.L. et al. (Eds.). **Encyclopedia of Plant Physiology**. New Series, v.12C, p.245-300, 1983.