

## Utilização do Salgueiro (*Salix humboldtiana* Willd) como espécie fitorremediadora em rejeitos da indústria de Zinco

Utilization of Willow (*Salix humboldtiana* Willd) as a species for phytoremediation of zinc industry waste

Marcelo Pedrosa Gomes<sup>1</sup>, Teresa Cristina Lara Lanza de Sá e Melo Marques<sup>2</sup>,  
Guilherme Henrique Silva<sup>3</sup> e Angela Maria Soares<sup>4</sup>

### Resumo

Avaliaram-se, em casa de vegetação, os efeitos de um solo contaminado por rejeitos da indústria de zinco, nos teores de metais pesados e no estado nutricional de raízes e parte aérea de plantas jovens de salgueiro. Mudanças com um ano de idade foram transferidas e cultivadas por 30 dias em vasos de 6 L, contendo 0, 15 e 30% v/v de solo contaminado com (mg kg<sup>-1</sup> de solo) 18600 de Zn, 140 de Cd, 450 de Cu e 410 de Pb. As plantas em solo contaminado apresentaram elevados teores foliares de metais pesados, variando de (mg kg<sup>-1</sup> matéria seca): Zn = 362 a 878 e Cd = 19 a 35, resultando em sintomas de fitotoxidez. Excetuando-se Mn, Fe e S, os teores de nutrientes (P, K, Ca, Mg e N) não foram influenciados pelo nível de contaminação do solo, indicando pouca influência dos metais pesados no estado nutricional do salgueiro.

**Palavras-chave:** acúmulo de metais pesados, solos contaminados, tolerância

### Abstract

An experiment was carried out in a greenhouse to evaluate the effect of contaminated soil by zinc industry wastes in heavy metal levels and in root and shoot nutritional status of young willow plants. One year old plantlets were transferred and cultivated for thirty days in 6 L pots containing 0, 15 e 30 % (v/v) of contaminated soil with (mg kg<sup>-1</sup> soil) 18600 of Zn, 140 of Cd, 450 of Cu and 410 of Pb. Plants grown in this contaminated soil showed high levels of metals in leaves, ranging from (mg kg<sup>-1</sup> DW): Zn = 362 to 878 and Cd = 19 to 35, and exhibited Zn and Cd phytotoxicity symptoms. Except for Mn, Fe and S; nutrient (P, K, Ca, Mg and N) levels in plants were not affected by the contaminated soil, showing a low heavy metal influence on their nutritional status.

**Keywords:** contaminated soil, heavy metal content, toxicity, tolerance

### INTRODUÇÃO

As atividades antrópicas, como mineração, atividades industriais e agrícolas, constantemente adicionam metais pesados ao ambiente. Por não serem biodegradáveis e, quando em elevadas concentrações, serem tóxicos à comunidade biológica em geral, faz-se necessário o desenvolvimento de técnicas visando a remoção destes elementos. A utilização de plantas no processo de remediação de áreas degradadas, tem se mostrado promissora, sendo um processo economicamente viável, de simples execução e fácil monitoramento (PIRES *et al.*, 2003). Algumas

espécies vegetais já têm sua eficiência comprovada (ACCIOLY; SIQUEIRA, 2000) e, vários são os estudos que demonstram o potencial das plantas para a remediação de áreas degradadas por metais pesados (MARQUES *et al.*, 2000; LUX *et al.*, 2004; NASCIMENTO *et al.*, 2004).

Nas plantas, os metais pesados desencadeiam respostas fisiológicas e alterações em níveis estruturais e ultraestruturais, como geração de espécies reativas de oxigênio que danificam lipídeos de membranas, proteínas, pigmentos e ácidos nucléicos resultando em sintomas visuais como a redução no crescimento, na produtividade e em alterações morfológicas (MARQUES *et al.*,

<sup>1</sup>Mestrando em Biologia Vegetal pela Universidade Federal de Minas Gerais, Departamento de Botânica - Laboratório de Interação Microrganismo-Planta e Recuperação de Áreas Degradadas, Instituto de Ciências Biológicas, Cx P. 486 - 31279-901 Belo Horizonte, MG - E-mail: [marcelopgom@yahoo.com.br](mailto:marcelopgom@yahoo.com.br)

<sup>2</sup>Pós-doutoranda em Química do Solo pela Universidade Federal de Lavras, Departamento de Ciência do Solo, Campus UFLA - Cx. P. 3037 - 37200-000 - Lavras, MG - E-mail: [tmarques004@hotmail.com](mailto:tmarques004@hotmail.com)

<sup>3</sup>Mestrando em Zootecnia pela Universidade Federal de Viçosa, Departamento de Zootecnia, Viçosa, MG - E-mail: [guiufla@yahoo.com.br](mailto:guiufla@yahoo.com.br)

<sup>4</sup>Professora (Associado) da Universidade Federal de Lavras, Departamento de Biologia, Campus UFLA - Cx. P. 3037 - 37200-000 - Lavras, MG - E-mail: [amsoares@dbi.ufla.br](mailto:amsoares@dbi.ufla.br)

2000; LUX *et al.*, 2004; WÓJCIK *et al.*, 2005).

Geralmente, o teor e o acúmulo dos metais nos tecidos vegetais são funções de sua disponibilidade no solo, estágio de desenvolvimento da planta, tempo de exposição aos metais e às diferentes espécies químicas dos elementos, sendo que os teores de metais nas raízes e na parte aérea aumentam com a elevação da concentração de metais na solução do solo (GUS-SARSSON *et al.*, 1995). Ao serem absorvidos, os metais fluem preferencialmente no apoplasto radicular, até encontrar a endoderme onde são obrigados a fluir através do simplasto. Muitos estudos relatam que a endoderme é um dos principais locais de alocação de metais pesados nas raízes (EDERLI *et al.*, 2004; LUX *et al.*, 2004; WÓJCIK *et al.*, 2005) estando inclusive relacionada à taxa de translocação dos metais para a parte aérea das plantas. Fatores como a regulação da absorção de metais, o acúmulo desses metais nas raízes e a baixa translocação para a parte aérea, são considerados mecanismos pelos quais o sistema radicular pode contribuir para a tolerância aos metais pesados (ARDUINI *et al.*, 1996). A plasticidade anatômica radicular também é uma estratégia importante das plantas no processo de tolerância.

A identificação de espécies arbóreas com capacidade de serem empregadas nos programas de fitorremediação é de interesse já que, os metais absorvidos permanecerão mais tempo imobilizados nos tecidos vegetais, retardando seu retorno ao solo (BAKER, 1987). Devido ao seu rápido crescimento e à capacidade de acumular altos níveis de metais pesados em seus tecidos, as espécies do gênero *Salix* têm se mostrado adequadas para a fitorremediação de áreas contaminadas por metais, como por exemplo, o Cd (GREGER; LANDBERG, 1999; LUX *et al.*, 2004). Este trabalho

teve como objetivo avaliar a tolerância de plantas jovens de *Salix humboldtiana* Willd. por meio de estudo de variáveis de crescimento e estado nutricional, quando cultivadas em solo contaminado pelos metais pesados Zn, Cd, Cu e Pb.

## MATERIAL E MÉTODOS

O experimento foi conduzido em casa de vegetação do Departamento de Biologia da Universidade Federal de Lavras (UFLA), no município de Lavras-MG. Utilizou-se solo contaminado com metais pesados coletado em área de rejeito da Companhia Mineira de Metais (CMM) situada em Três Marias, MG, cuja contaminação ocorre pela deposição de rejeitos de indústria de processamento de zinco, que foram misturados ao solo por vários anos (RIBEIRO-FILHO *et al.*, 1999). A análise química deste solo revelou os seguintes resultados: (em mg kg<sup>-1</sup> de solo) 18600 de Zn; 140 de Cd; 450 de Cu e 410 de Pb, extraídos por água régia (FORSTER, 1995). Devido à elevada contaminação do solo contaminado, este foi misturado na proporção de 0%, 15% e 30% (v/v) com um Latossolo Amarelo (LA) não contaminado (100%, 85% e 70% v/v), respectivamente, coletado (0-20 cm) no campus da UFLA. Antes de proceder as misturas, o LA recebeu calcário dolomítico para elevar a saturação de base para próximo ao solo contaminado (V = 81%), incubando-o por 15 dias. Após este período aplicou-se 400 mg kg<sup>-1</sup> de P (superfosfato simples) e 50 kg<sup>-1</sup> de N (nitrato de amônia), em seguida realizaram-se as misturas desejadas. As caracterizações químicas do LA e do solo contaminado, em condições naturais, sem manejo, são apresentadas na Tabela 1.

Após o período de manejo e estabilização das misturas, procedeu-se as análises de pH e teores de metais pesados, apresentadas na Tabela 2.

**Tabela 1.** Características químicas do solo contaminado e do Latossolo Amarelo coletado no Campus da UFLA (controle).

**Table 1.** Chemical characteristics of contaminated soil and Yellow Latosol collected on the campus of UFLA (control).

Solo	pH	Matéria Orgânica g kg <sup>-1</sup>	(P K) <sup>a</sup>		(Ca Mg H+Al) mmolc dm <sup>-3</sup>	Al <sup>b</sup>		
	(H <sub>2</sub> O)		mg kg <sup>-1</sup>					
Controle	6,7	20	2,0	33	2,4	0,4	1,7	0,0
Contaminado	6,3	35	43	103	26	19	21	1

<sup>a</sup>Extraído por Mehlich

<sup>b</sup>Digestão com água régia conforme Foster (1995)

**Tabela 2.** pH e teores de metais pesados das misturas de solo contaminado e Latossolo Amarelo nas proporções 0%, 15% e 30% (v/v).

**Table 2.** pH and heavy metal levels of contaminated and Yellow Latosol mixture in 0%, 15% e 30% (v/v) proportions.

Solo	pH	Cd	Cu	Zn	Pb
	(H <sub>2</sub> O)				
Controle	6,9	2,0	30,0	76,0	20,0
Cont. 15%	6,52	21,0	67,5	2790	61,5
Cont. 30%	6,49	45,0	132,8	5521,1	124,0

Mudas de *S. humboldtiana* oriundas de estacas, adquiridas no Instituto Estadual de Florestas de Lavras, foram transplantadas e cultivadas em vasos com capacidade para 6 L da mistura. As plantas utilizadas no experimento apresentavam um ano de idade e altura homogênea. O experimento foi conduzido por 30 dias e durante este período as plantas foram irrigadas para manter o solo com umidade próxima a 60% do VTP (Volume Total de Poros). O delineamento experimental utilizado foi o inteiramente casualizado, constando de três tratamentos (0%, 15% e 30% v/v de solo contaminado) e cinco repetições, sendo a unidade amostral uma planta por vaso.

Durante o período experimental observaram-se os sintomas de toxidez e ao final deste período, as plantas foram coletadas e separadas em raízes e parte aérea, e após serem lavadas com água destilada, foram colocadas em sacos de papel e levadas para estufa com circulação constante de ar a 70°C até massa constante para posterior determinação da matéria seca. Estes materiais foram moídos em moinho tipo Wiley equipado com peneira com malha de 0,38 mm para a digestão nitro-perclórica e posterior análise dos teores de P, K, Ca, Mg, S, Zn, Fe, Mn, Cu, Cd e Pb. A determinação dos teores de P foi realizada pelo método colorimétrico, K por fotometria de chama, S por turbidimetria (MALAVOLTA *et al.*, 1989) e os teores de Ca, Mg, Zn, Fe, Mn, Cu, Cd e Pb foram determinados por espectrometria de absorção atômica. O N total foi extraído por digestão pelo método de Kjeldahl e posteriormente dosado por titulação. Por meio de acúmulo de nutrientes calcularam-se os índices de translocação (IT) dos nutrientes pela razão entre a quantidade acumulada na parte aérea e a quantidade acumulada na planta (ALBICHEQUER; BOHNEN, 1998).

Os resultados obtidos foram submetidos à análise de variância e as médias comparadas pelo teste de Tukey, a 5% de probabilidade.

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

### Crescimento e sintomas da fitotoxidez das plantas

Os diferentes níveis de contaminação não afetaram significativamente a produção de matéria seca das raízes (3,2 g) e parte aérea (3,95 g) durante o tempo de exposição das plantas aos metais pesados ( $P > 0,05$ ). A manutenção da área fotossintetizante, mesmo quando expostas a níveis elevados de metais no solo, pode ser

indicativo da tolerância da espécie aos metais. Sabe-se que os metais pesados são capazes de interferir na biossíntese de clorofilas, na atividade de enzimas do ciclo de Calvin e no PSII (DI CAGNO *et al.*, 2001), o que afeta as taxas de assimilação de carbono. Uma estratégia do vegetal pode consistir em diminuir a translocação dos metais pesados para a parte aérea, retendo-os nas raízes, evitando assim os efeitos deletérios destes metais no processo fotossintético. Segundo Lux *et al.* (2004), o gênero *Salix* é caracterizado por apresentar espécies com características variáveis de tolerância e acúmulo de metais pesados.

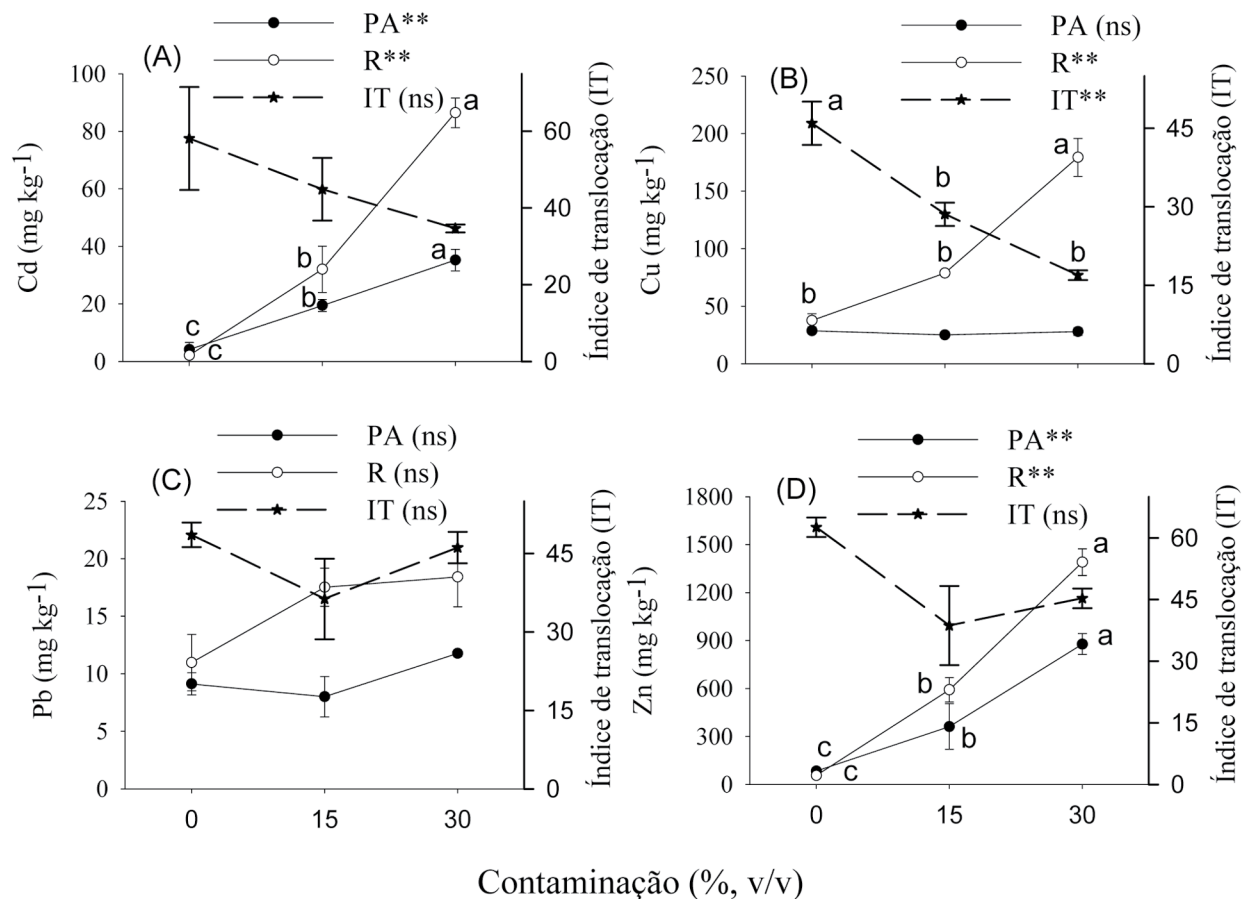
Apesar de não observadas diferenças significativas entre tratamentos na produção de biomassa, sintomas visuais de fitotoxidez foram observados para as plantas dos tratamentos contendo 15% e 30% de solo contaminado. Escurecimento das raízes, variação na arquitetura do sistema radicular e o desenvolvimento de raízes laterais mais espessas, bem como amarelamento, cloroses intervenais, seca das pontas, tamanho reduzido, murchamento e avermelhamento das folhas foram observados, principalmente, nas plantas do maior nível de contaminação. Sintomas visuais como a diminuição no crescimento, redução de fitomassa e alterações na arquitetura sistema radicular, são sintomas comuns em plantas expostas ao estresse por metais pesados (SANITÀ DI TOPPI; GABBRIELLI, 1999; MARQUES *et al.*, 2000) e podem ocorrer mesmo em espécies consideradas tolerantes ou até mesmo acumuladoras, evidenciando o potencial fitotóxico destes metais.

### Teores e translocação de metais pesados e nutrientes

Com exceção dos teores de Pb e dos teores de Cu na parte aérea de *S. humboldtiana*, os teores dos metais pesados nas plantas foram significativamente afetados pelo nível de contaminação do solo, sendo crescente com o aumento dos metais no solo (Figura 1).

Aumentos de 1538% e 4154% nas raízes e de 467% e 826% na parte aérea dos tratamentos contendo 15% e 30% de contaminação, respectivamente, em relação ao controle, foram verificados para concentrações de Cd nos tecidos das plantas. Esses valores indicam o elevado potencial de absorção e translocação do Cd (Figura 1A).

O teor de Cu na massa seca da parte aérea não foi afetado pelos níveis de contaminação, porém, nas raízes, os teores de Cu foram crescentes com o aumento da contaminação (Figura



**Figura 1.** Teores e índice de translocação (IT) de Cd (A), Cu (B), Pb (C) e Zn (D) na matéria seca da parte aérea (PA) e raízes (R) de plantas jovens de *S. humboldtiana* em resposta ao aumento do nível de contaminação do solo por metais pesados. A barra vertical representa erro padrão da média (EPM) (n=5). (Médias seguidas pela mesma letra não diferem entre si pelo teste Tukey a 5% de probabilidade. ns, \* e \*\* - valor não significativo ( $p > 0,05$ ), significativo ( $p \leq 0,05$ ) e significativo ( $p \leq 0,01$ ) pelo teste F).

**Figure 1.** Levels and translocation index (IT) of Cd (A), Cu (B), Pb (C) and Zn (D) in dry matter of shoot (PA) and root (R) of *S. humboldtiana* plantlets in response to an increase of contamination level of soil by heavy metal. Vertical bars represent SEM (n=5). (Means followed by same latter do not differ by Tukey test at 5% probability. ns, \* and \*\* - value not significant ( $p > 0,05$ ), significant ( $p < 0,05$ ) and significant ( $p < 0,01$ ) by F test).

1B). O índice de translocação (IT) é mais baixo para o Cu (Figura 1B) em relação ao Cd (Figura 1A). Com o aumento da contaminação, o metal é menos translocado para a parte aérea, ficando em grande parte retido nas raízes. Portanto, o nível de contaminação do solo não afeta a capacidade de absorção de Cu pelas raízes, e sim a sua translocação para a parte aérea. Alterações na capacidade de translocação de nutrientes podem ser também, atribuídas a modificações no sistema vascular e à redução no número e diâmetro dos vasos de xilema (BARCELÓ *et al.*, 1988).

Não foram verificadas diferenças para os teores e índice de translocação de Pb entre os tratamentos (Figura 1C). Além disso, as plantas cultivadas na presença da contaminação apresentaram teores muito baixos de Pb, inferiores ao considerados tóxicos por Kabata-Pendias e Pendias (1985), indicando que o Pb não foi problema nesse solo para a espécie em estudo.

Para os teores de Zn, foram verificados aumentos de 1045% na parte aérea das plantas do tratamento contendo 30% de solo contaminado em relação ao controle e de 1066% e 2504% nas raízes para os tratamentos contendo 15% e 30% de solo contaminado, respectivamente (Figura 1D), também em relação ao controle. Considerando-se que em elevadas quantidades o Zn é um agente fitotóxico e, levando-se em conta os elevados teores de Zn nas plantas cultivadas em solo contaminado, pode-se inferir que este contribuiu aditivamente com os efeitos nocivos do Cd sobre as plantas destes tratamentos. Além disso, estudos relatam que existe uma interação sinérgica entre Cd e Zn tanto para a absorção quanto para a translocação (YANG *et al.*, 2004), o que pode ser também observado neste estudo. O Zn translocado para a parte aérea nos tratamentos contaminados foi estatisticamente inferior ao tratamento controle. Como observado

para o Cd, na presença do solo contaminado, a proporção de Zn translocada para a parte aérea reduziu em relação ao controle (Figura 1D). Porém, entre os tratamentos contaminados, o IT foi estatisticamente igual entre si.

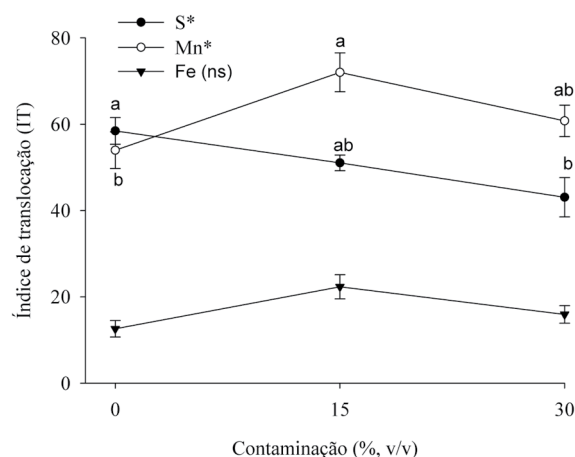
De modo geral, Cd, Cu e Zn apresentaram maiores teores no sistema radicular em comparação à parte aérea. O acúmulo de metais nos tecidos radiculares pode servir como estratégia de tolerância da planta, pela imobilização dos metais nas paredes celulares ou adsorvendo-os pelos carboidratos extracelulares. De fato, no mecanismo de tolerância baseado na estratégia de exclusão, as plantas evitam a aquisição do metal ou restringem seu transporte à parte aérea, sendo estes retidos nas raízes (BAKER, 1987). Esse processo evita ou diminui os possíveis efeitos danosos dos metais no sistema fotossintetizante e, portanto na parte aérea da planta.

Apenas os teores de Fe na parte aérea do salgueiro não foram estatisticamente influenciados pelo nível de contaminação do solo, sendo verificados maiores teores no tratamento controle (Tabela 3).

Nas raízes, verificaram-se diferenças significativas entre tratamentos para os teores dos nutrientes S, Fe e Mn (Tabela 3). O nutriente Mn apresentou menor teor no tratamento contendo 15% de solo contaminado, sendo os demais tratamentos estatisticamente iguais entre si. A quantidade de Mn translocado para a parte aérea aumentou no tratamento de 15% em relação ao controle e foi estatisticamente igual ao tratamento de 30% de contaminação (Figura 2).

Em mudas de *Cedrella fisillis*, Paiva *et al.* (2004) verificaram aumento no IT do Mn na dose de 44 mg Cd kg<sup>-1</sup> e redução do IT na dose de 132 mg Cd kg<sup>-1</sup>, ao passo que Yang *et al.* (1996a,b) ve-

rificaram redução na proporção translocada de Mn, em diferentes espécies, com a aplicação de Cd e de Ni. A resposta das plantas quanto ao conteúdo de Mn é, portanto, variável, podendo ser antagônica ou sinérgica, dependendo da dose dos outros metais a que a planta encontra-se submetida (KABATA-PENDIAS; PENDIAS, 1985). Nesse estudo, verifica-se que as plantas do tratamento 15% de solo contaminado apresentaram comportamento antagônico enquanto as do tratamento 30% de solo contaminado, comportamento sinérgico.



**Figura 2.** Índice de translocação de Fe, Mn e S em plantas jovens de *S. humboldtiana* em resposta ao aumento do nível de contaminação do solo por metais pesados. A barra vertical representa erro padrão da média (EPM) (n=5). (Médias seguidas pela mesma letra, não diferem entre si pelo teste Tukey a 5% de probabilidade. ns - valor não significativo (p > 0,05) pelo teste F).

**Figure 2.** Translocation index of Fe, Mn and S in *S. humboldtiana* plantlets in response to an increase of contamination level of soil by heavy metal. Vertical bars represent SEM (n=5). (Means followed by same latter do not differ by Tukey test at 5% probability. ns - value not significant (p > 0,05) by F test).

**Tabela 3.** Teores de N, P, K, Ca, Mg, S, Fe e Mn (mg kg<sup>-1</sup>) na matéria seca da parte aérea e raízes de plantas jovens de *S. humboldtiana* em resposta ao aumento do nível de contaminação do solo por metais pesados.

**Table 3.** Levels of N, P, K, Ca, Mg, S, Fe and Mn (mg kg<sup>-1</sup>) in dry matter of shoot and root in *S. humboldtiana* plantlets in response to an increase of the contamination level of the soil by heavy metal.

Tratamentos	N	P	K	Ca	Mg	S	Fe	Mn
Parte aérea								
Controle	2,1	3,5	58,6	10,2	16,0	4,5	540a	73,0
Cont. 15%	1,4	3,9	74,4	9,9	16,3	4,0	450ab	54,4
Cont. 30%	1,2	4,1	86,8	10,6	20,2	4,9	388b	65,2
CV(%)	ns	ns	ns	ns	ns	ns	10,54*	ns
Raízes								
Controle	0,9	3,2	55,3	6,6	17,1	3,5b	4314a	68,6a
Cont. 15%	0,7	3,1	40,4	7,3	10,9	4,9b	2018b	23,6b
Cont. 30%	0,9	3,2	60,5	7,7	12,7	8,5a	2715ab	53,8a
CV(%)	ns	ns	ns	ns	ns	22,02*	26,5**	23,6

Médias seguidas pela mesma letra, na coluna, não diferem entre si, pelo teste Tukey a 5% de probabilidade (n=5). ns, \* e \*\* - valor não significativo (p > 0,05), significativo (p ≤ 0,05) e significativo (p ≤ 0,01) pelo teste F.

Means followed by same latter, in column, do not differ by Tukey test at 5% probability. ns, \* and \*\* - value not significant (p > 0,05), significant (p < 0,05) and significant (p < 0,01) by F test.

Os teores de Fe na massa seca da parte aérea foram menores no tratamento com 30% de contaminação e, nas raízes, os teores de Fe reduziram nos tratamentos contaminados (Tabela 3). Foi verificada redução de 28% nos teores de Fe da parte aérea das plantas do tratamento 30%, e redução média de 76% nos teores de Fe das raízes dos tratamentos com contaminação, em relação ao controle. Não foi verificada diferença significativa entre os IT do Fe entre os tratamentos (Figura 2). Metais pesados, como o Cd, apresentam a capacidade de diminuir a energia disponível para o funcionamento de transporte de membranas (GHNAYA, *et al.*, 2005), que o pode influenciar na aquisição de nutrientes como verificado para o Fe. Além disso, durante o processo de absorção, íons de mesma valência podem competir por sítios de absorção, limitando a absorção um do outro (GUSSARSSON *et al.*, 1995). Apesar de ainda pouco compreender-se, acredita-se que íons divalentes como  $Cd^{2+}$ ,  $Zn^{2+}$ ,  $Cu^{2+}$   $Fe^{2+}$ , utilizem os mesmos carreadores de membrana ou canais de cátions de  $Ca^{2+}$  e  $Mg^{2+}$ . Reduções nos teores de Fe na parte aérea podem estar relacionadas aos sintomas visuais de cloroses já que o íon está relacionado ao processo biossintético das clorofilas.

Os teores de S na massa seca das raízes apresentaram-se maiores no tratamento de maior nível de contaminação (Tabela 3). Não foram verificadas diferenças nos teores de S na massa seca da parte aérea. A diferença nos teores radiculares de S pode estar relacionada ao menor IT de S apresentado pelas plantas do tratamento 30% (Figura 2). Possivelmente, o nível de contaminação não afeta a capacidade de absorção de S e sim a de translocação do íon para a parte aérea.

Não foram verificadas diferenças entre tratamentos quanto aos teores de N, P, K, Ca e Mg, tanto nas raízes, quanto na parte aérea (Tabela 3). Resultados semelhantes foram verificados por Yang *et al.* (2004), onde a tolerância de *Sedum alfredii* ao Cd esteve intimamente relacionada à capacidade da espécie em manter um balanço nutricional favorável às atividades essenciais da planta, o que também pode ser atribuído à espécie em estudo.

## CONCLUSÃO

- A produção da matéria seca das raízes e da parte aérea não foi afetada pela adição de até 30% (v/v) de solo contaminado com metais pesados, durante 30 dias de exposição.

- Uma das estratégias de sobrevivência da espécie *S. humboldtiana* em solos contaminados por elevadas concentrações de Cd, Cu e Zn, é reduzir a translocação dos metais para a parte aérea.
- A presença de metais pesados não afeta os teores dos nutrientes N, P, K, Ca e Mg nos tecidos da planta. Entretanto, os teores dos nutrientes S, Fe e Mn são alterados na presença dos metais pesados.
- Devido à baixa translocação dos metais pesados da raiz para a parte aérea, permitindo a manutenção de um balanço nutricional favorável e pouca influência dos metais na produção de biomassa da parte aérea, esta espécie possui características promissoras para programas de fitorremediação em áreas degradadas por metais pesados.

## AGRADECIMENTOS

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG) pelo apoio financeiro

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ACCIOLY, A.M.A.; SIQUEIRA, J.O. Contaminação química e biorremediação do solo. In: NOVAIS, R.F. ALVAREZ V., V.H.; SCHAEFER, C.E.G.R.(Eds.). **Tópicos em Ciência do Solo**. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2000. cap. p.299-352, v.1.
- ALBICHEQUER, A.D.; BOHNEN, H. Eficiência de absorção, translocação e utilização de fósforo por variedades de trigo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.22, p.21-26, 1998.
- ARDUINI, I.; GODBOLD, D.L.; ONNIS, A. Cadmium and copper uptake and in Mediterranean tree seedlings. **Physiologia Plantarum**, Copenhagen, v.97, n.1, p.111-117, 1996.
- BAKER, A.J.M. Metal tolerance. **The New Phytologist**, Cambridge v.106, n.1, p.93-111, 1987.
- BARCELÓ, J.; VÁSQUEZ, M.D.; POSHENRIEDER, C. Structural and ultrastructural disorders in cadmium-treated bush bean plants. **The New Phytologist**, Cambridge, v.108, n.1, p.37-49, 1988.
- DI CAGNO, R.; GUIDI, L.; DE GARA, L.; SOLDATINI, G.F. Combined cadmium and ozone treatments affect photosynthesis and ascosbate defenses in sunflower. **New Phytologist**, New York, v.151, n.3, p.627-636, 2001.

- EDERLI, L.; REALE, L.; FERRANTINI, F.; PASQUALINI, S. Responses induced by high concentration of cadmium in *Phragmites australis* roots. **Physiologia Plantarum**, Copenhagen, v.121, n.1, p.66-74, 2004.
- FORSTER, J.C. Heavy metals. In: ALEF, K.; NANNIPIERI, P (Eds.). **Methods in applied soil microbiology and biochemistry**. New York: Academic Press, 1995, p.49-121.
- GHNAYA, T.; NOUAIRI, I.; SLAMA, I.; MESSEDI, D.; GRIGNON, C.; ABDELLY, C.; GHORBEL, M.H. Cadmium effects on growth and mineral nutrition of two halophytes: *Sesuvium portacastrum* and *Mesembryanthemum crystallinum*. **Journal of Plant Physiology**, Stuttgart, v.162, n.10, p.1133-1140, 2005.
- GREGER, M.; LANDEBERG, T. Use of willow in phytoextraction. **International Journal of Phytoremediation**, Abingdon, v.1, n.2, p.115-123, 1999.
- GUSSARSSON, M.; ADALSTEINSSON, P.J.; ASP, H. Cadmium and copper interactions on the accumulation and distribution of Cd and Cu in birch (*Betula Pendula* Roth) seedlings. **Plant and Soil**, The Hague, v.171, p.185-187, 1995.
- KABATA-PENDIAS, A.; PENDIAS, H. **Trace elements in soils and plants**. London: CRC Press, Boca Raton, 1985, 315p.
- LUX, A.A.; SOTTNIKOVÁ, A.; OPATRŇÁ, J.; GREGER, M. Differences in structure of adventitious roots in *Salix* clones with contrasting characteristics of cadmium accumulation and sensitivity. **Physiologia Plantarum**, Copenhagen, v.120, n.4, p.537-545, 2004.
- MALAVOLTA, E.; VITTI, G.C.; OLIVEIRA, S.A. **Avaliação do estado nutricional da planta: princípios e fatos**. Piracicaba: Potafós, 1989. 201p.
- MARQUES, T.C.L.L.S.M.; MOREIRA, F.M.S.; SIQUEIRA, J.O. Crescimento e absorção de metais em mudas de espécies arbóreas em solo contaminado com metais pesados. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.35, n.1, p.121-132, 2000.
- NASCIMENTO, C.W.A.; BARROS, D.A.S.; MELO, E.E.C.; OLIVEIRA, A.B. Alterações químicas em solos e crescimento de milho e feijoeiro após aplicação de lodo de esgoto. **Revista Brasileira de Ciências do Solo**, Viçosa, v.28, p.385-392, 2004.
- PAIVA, H.N.; CARVALHO, J.G.; SIQUEIRA, J.O.; MIRANDA, J.R.P.; FERNANDES, A.R. Absorção de nutrientes por mudas de ipê-roxo (*Tabebuia impetiginosa* (Mart.) Standl.) em solução nutritiva contaminada por cádmio. **Revista Árvore**, Viçosa, v.28, n.2, p.189-197, 2004.
- PIRES, F.R.; SOUZA, C.M.; SILVA, A.A.; PROCÓPIO, S.O.; FERREIRA, L.R.; Fitorremediação de solos degradados com herbicidas. **Planta Daninha**, Londrina, v.21, n.2, p.335-341, 2003.
- RIBEIRO FILHO, M.R.; CURTI, N.; SIQUEIRA, J.O.; P Motta, P.E.F. Metais pesados em solos de rejeitos de indústria de processamento de zinco. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.23, p.453-464, 1999.
- SANITÀ DI TOPPI L.; GABBRIELLI, R. Response to cadmium in higher plants. **Environmental and Experimental Botany**, Oxford, v.41, n.2, p.105-130, 1999.
- WÓJCIK, M.; VANGRONSVELD, J.; D'HAEN, J.; TUKIENDORF, A. Cadmium tolerance in *Thlaspi caerulescens*. **Environmental and Experimental Botany**, Oxford, v.53, p.163-171. 2005.
- YANG, X., BALIGAR, V.C., MARTENS, D.C., CLARK, R.B. Plant tolerance to nickel toxicity: II. Nickel effects on influx and transport de mineral nutrients in four plant species. **Journal of Plant Nutrition**, Philadelphia, v.19, n.2, p.265-279, 1996a.
- YANG, X., BALIGAR, V.C., MARTENS, D.C., CLARK, R.B. Cadmium effects on influx and transport of mineral nutrients in plant species. **Journal of Plant Nutrition**, Philadelphia, v.19, n.3-4, p.643-656, 1996b.
- YANG, X.E.; LONG, X.X.; YE, H.B.; HE, Z.L.; CLAVERT, D.V.; STOFELLA, P.J. Cadmium tolerance and hyperaccumulation in a new Zn-hyperaccumulating plant species (*Sedum alfredi* Hance). **Plant and Soil**, Dordrecht, v.259, p.181-189, 2004.

Recebido em 01/06/2010

Aceito para publicação em 24/02/2011