

Comportamento de espécies herbáceas em misturas de solo com diferentes graus de contaminação com metais pesados⁽¹⁾

Marco Aurélio Carbone Carneiro⁽²⁾, José Oswaldo Siqueira⁽³⁾ e Fátima Maria de Souza Moreira⁽³⁾

Resumo – O objetivo deste trabalho foi avaliar, em casa de vegetação, o comportamento de espécies herbáceas em relação ao excesso de Cd e Zn no solo. O gradiente de contaminação foi estabelecido a partir de mistura de solo contaminado com solo sem contaminação em diferentes proporções. As sementes foram semeadas em tubetes contendo 250 mL de solo, e após 90 dias as plantas foram colhidas e avaliadas. A maioria das espécies apresentou redução no crescimento com aumento da contaminação do solo e elevadas concentrações de Cd e Zn na matéria seca da parte aérea (MSPA), na mistura com 15% de solo contaminado. A espécie *Pffafia* sp. mostrou-se tolerante à contaminação, crescendo em misturas de solo contendo até 90 mg kg⁻¹ de Cd e 1.450 mg kg⁻¹ de zinco. Além disso, apresentou concentração superior a 100 mg kg⁻¹ de Cd na MSPA, sendo considerada hiperacumuladora desse metal. *Sida glaziovii*, *Bidens pilosa*, *Rhynchelytrum repens*, *Cenchrus echinatus* e *Nicandra physaloides*, por sua vez, foram severamente afetadas pela contaminação, ao contrário de *Trifolium repens*, *Euchlaena mexicana*, *Cynodon dactylon*, *Avena strigosa*, *Cenchrus ciliaries* e *Cyperus* sp. que apresentaram crescimento satisfatório. As espécies avaliadas mostram-se promissoras para estudos adicionais sobre a reabilitação de áreas contaminadas com metais pesados.

Termos para indexação: cádmio, zinco, poluente, toxicidade do solo.

Behavior of herbaceous species in soil mixes with different degree of contamination with heavy metal

Abstract – In a study developed under greenhouse conditions using soil mixes with different degrees of contamination with heavy metal the behavior of herbaceous species in relation to the excess of Cd and Zn in the soil was evaluated. Gradient of soil contamination was established through soil mixes of heavy metal contaminated with uncontaminated soils at different proportions. Seeds of different species and origins were sowed in 250 mL plastic tubes and plants allowed to grow for 90 days when they were harvested and assessed. It was found a similar behavior for most species that exhibited growth depressions due to increasing soil contamination. At soil mix with 15% of contamination soil, plants showed high concentration of Cd and Zn. In contrast to those species *Pffafia* sp. exhibited high tolerance to contamination, growing quite abundantly in soil mix with 90 and 1,450 mg kg⁻¹ of Cd and Zn, respectively. Moreover, this species showed Cd concentration higher than 100 mg kg⁻¹, being considered Cd hiperacumulador. *Sida glaziovii*, *Bidens pilosa*, *Rhynchelytrum repens*, *Cenchrus echinatus* and *Nicandra physaloides* were severely affected by the contaminants. While the species *Trifolium repens*, *Euchlaena mexicana*, *Cynodon dactylon*, *Avena strigosa*, *Cenchrus ciliaries* and *Cyperus* sp. presented adequate growth. These species are promising for further studies on rehabilitation of heavy metal degraded land.

Index terms: cadmium, zinc, pollutants, soil toxicity.

Introdução

⁽¹⁾ Aceito para publicação em 24 de julho de 2002.

Trabalho financiado pelo convênio Companhia Mineira de Metais, Faep e Fapemig.

⁽²⁾ Universidade Federal de Goiás, Campus Avançado de Jataí, Centro de Ciências Agrárias, Rod. BR 364, km 192, CEP 75800-000 Jataí, GO. E-mail: mcarbone@jatai.ufg.br

⁽³⁾ Universidade Federal de Lavras, Dep. de Ciências do Solo, Caixa Postal 37, CEP 37200-000 Lavras, MG. E-mail: siqueira@ufla.br, fmoreira@ufla.br

A poluição do solo com metais pesados, pela intensificação das atividades industriais, agrícolas e urbanização, é um problema crescente e responsável por sérios impactos ao ambiente (Sengupta, 1993). Uma das atividades que mais contribuem para a poluição do solo com esses agentes é a mineração e a indústria metalúrgica, principalmente a de metais não

ferrosos, que ao promoverem a extração de alguns metais, produzem grandes quantidades de rejeitos, muitas vezes com elevados teores de Ni, Cr, Cu, Pb, Cd e Zn, que afetam severamente a vegetação (Baker et al., 1994) e as atividades biológicas do solo, como respiração e decomposição, no local e em áreas adjacentes (Vangronsveld et al., 1997). A destruição da cobertura vegetal em áreas contaminadas agrava a degradação do solo, promovendo erosão hídrica e eólica e a lixiviação dos contaminantes para o lençol freático, desencadeando progressivo grau de contaminação de outras áreas. Essas áreas precisam ser reabilitadas, e para tal exigem estudos de diversas naturezas sobre o solo, a vegetação e a água (Cunningham et al., 1996).

Uma das estratégias de reabilitação *in situ* dessas áreas é a fitorremediação, que consiste na introdução de vegetação no solo (Baker et al., 1994) mediante diferentes técnicas como a fitoestabilização (Accioly & Siqueira, 2000). Na fitoestabilização utilizam-se plantas e agentes amenizantes do solo, como calcário (Accioly, 2001), para remover, imobilizar ou tornar os contaminantes menos nocivos ao ecossistema. Um dos requisitos básicos para o sucesso de qualquer técnica de revegetação é encontrar plantas tolerantes aos contaminantes. Estudo sobre a viabilidade de espécies arbóreas para a reabilitação de áreas contaminadas por metais pesados tem merecido destaque por causa da maior imobilização destes na biomassa vegetal por períodos mais longos (Eltrop et al., 1991). No entanto, existem evidências de que as plantas herbáceas possuem maior tolerância ao excesso de metais no solo do que as arbóreas (Baker, 1987).

Estudos realizados em regiões temperadas com espécies de plantas tolerantes a metais pesados, como *Agrostis tenuis*, *Agrostis stolonifera*, *Festuca rubra* e *Brassica* sp., mostraram o sucesso do estabelecimento da vegetação herbácea nessas áreas (Ebbs & Kochian, 1998; Salt et al., 1998). Plantas tolerantes e que acumulam grandes quantidades de metais em seus tecidos são designadas hiperacumuladoras (Baker, 1987), por apresentarem concentrações superiores a 100 mg kg⁻¹ de Cd e de 10.000 mg kg⁻¹ de Zn na matéria seca, como ocorre com algumas brássicas (*Brassica juncea*, *B. rapa* e *Thlaspi caerulescens*) cujas concentrações de Cd

e Zn atingem, respectivamente, 175 e 52.000 mg kg⁻¹ (Salt et al., 1995; Cunningham & Ow, 1996). Carneiro et al. (2001) observaram que a semeadura conjunta de várias espécies de plantas herbáceas, incluindo uma espécie de brássica tolerante ao Cd e ao Zn, aumentou a possibilidade de sucesso da revegetação em solos contaminados pelo excesso desses metais, possivelmente pela maior absorção de Cd e Zn pela brássica.

Estudos com esse enfoque não são conhecidos nas condições brasileiras, onde a contaminação do solo e a existência de áreas degradadas pelo excesso de metais são cada vez mais numerosas, portanto, o conhecimento do comportamento de espécies herbáceas com potenciais para fitorremediação dessas áreas se reveste da maior importância.

O objetivo deste trabalho foi avaliar o comportamento de espécies herbáceas em relação ao excesso de Cd e Zn no solo.

Material e Métodos

O estudo foi realizado em casa de vegetação do Departamento de Ciência do Solo da Universidade Federal de Lavras (Ufla), utilizando solo contaminado com vários metais pesados coletado em área de rejeito da Companhia Mineira de Metais (CMM) situada em Três Marias, MG. O solo foi classificado como antropogênico, pois não apresentava distinção entre os horizontes pedogenéticos naturais, por causa da grande deposição de rejeitos industriais. A análise química revelou os seguintes resultados: (em mg kg⁻¹ de solo) 18.600 de Zn; 140 de Cd; 450 de Cu; 410 de Pb; 35 de Ni e 1 de Cr, extraído por água régia (Forster, 1995). Foram empregadas misturas de solo contendo 0%; 7,5%; 15%; 30%; 45% e 60% (v/v) de solo contaminado com metais pesados, nos quais foram semeadas 31 espécies herbáceas (Tabela 1), em delineamento inteiramente casualizado, com cinco repetições. As espécies utilizadas foram selecionadas pela disponibilidade de sementes. Na diluição empregou-se Latossolo Vermelho ácrico típico, coletado (0-20 cm) no campus da Ufla. Antes de proceder a mistura, o solo recebeu calcário dolomítico para elevar a saturação de base para 70%, incubando-o por 15 dias. Após esse período, aplicaram-se 200 mg kg⁻¹ de P (superfosfato simples) e 50 mg kg⁻¹ de N (nitrito de amônio), procedendo as misturas de modo a obter as proporções de solo contaminado desejadas. Com exceção dos teores de metais pesados, as misturas variaram muito pouco quanto às características químicas, apre-

sentando, em média, pH em água, 6,5; P, 77 mg dm⁻³; K, 208 mg dm⁻³; Ca, 5,3 mmol_c dm⁻³; Mg, 3,2 mmol_c dm⁻³ e V, 78%. As concentrações de Zn e Cd nas misturas, assim como as regressões para os teores desses elementos nas diferentes misturas de solo, encontram-se na Tabela 2.

As misturas preparadas foram acondicionadas em tubetes com capacidade de 250 mL de solo, nos quais foram semeadas as diferentes espécies. Cada tubete recebeu de três a cinco sementes, com posterior desbaste para uma planta. O experimento foi conduzido por 90 dias e durante esse período os tubetes foram irrigados diariamente com água deionizada de modo a manter a umidade em nível

adequado ao desenvolvimento das plantas (aproximadamente 60% do volume total de poros). As plantas foram colhidas, separadas em parte aérea e raízes, lavadas com água destilada e secadas em estufa com circulação forçada a 70°C até peso constante, obtendo-se o peso da matéria seca da parte aérea (MSPA) e das raízes (MSR). Esses materiais foram moídos em moinho tipo Willey para determinação dos teores de Cd e Zn nos extratos dos tecidos (Hunter, 1975) por espectrofotometria de absorção atômica. Consideraram-se apenas esses dois metais por apresentarem as maiores quantidades no solo em estudo, além de exercerem efeitos fitotóxicos mais acentuados nas plantas.

Tabela 1. Nome comum e científico, família e procedência das espécies estudadas.

Nome comum	Nome científico	Família	Procedência
Picão-preto	<i>Bidens pilosa</i> L.	Compositae	Ufla ⁽¹⁾
Guanxuma	<i>Sida glaziovii</i> K. Schum	Malvaceae	Ufla ⁽¹⁾
Lobeira	<i>Nicandra physaloides</i> Gaertn.	Solanaceae	Ufla ⁽¹⁾
Amendoim-bravo	<i>Arachis pintoi</i> L.	Leguminosae	Matsuda ⁽²⁾
Capim-favorito	<i>Rhynchelytrum repens</i> (Willd.) Hubb.	Gramineae	Ufla ⁽¹⁾
Braquiária decumbens	<i>Brachiaria decumbens</i> Stapf	Gramineae	Embrapa ⁽³⁾
B. decumbens CMM	<i>Brachiaria decumbens</i> Stapf	Gramineae	CMM ⁽⁴⁾
B. ruziziensis	<i>Brachiaria ruziziensis</i> Germain Evrad	Gramineae	Embrapa ⁽³⁾
B. brizantha	<i>Brachiaria brizantha</i> Stapf	Gramineae	Embrapa ⁽³⁾
B. humidicola	<i>Brachiaria humidicola</i> (R.) Scheweickt	Gramineae	Embrapa ⁽³⁾
Capim-carrapicho	<i>Cenchrus echinatus</i> L.	Gramineae	Ufla ⁽¹⁾
Aveia-preta	<i>Avena strigosa</i> Schreb	Gramineae	DZO Ufla ⁽⁵⁾
Milheto	<i>Pennisetum americanum</i> Schumach	Gramineae	DZO Ufla ⁽⁵⁾
Sorgo	<i>Sorghum sudanensis</i> L.	Gramineae	DZO Ufla ⁽⁵⁾
Capim-rhodes	<i>Chloris gayana</i> Kunth	Gramineae	DZO Ufla ⁽⁵⁾
Capim-colonião	<i>Panicum maximum</i> Jacq. cv. Colonião	Gramineae	Embrapa ⁽³⁾
Capim-colonião CMM	<i>Panicum maximum</i> Jacq. cv. Colonião	Gramineae	CMM ⁽⁴⁾
Capim-tanzânia	<i>Panicum maximum</i> Jacq. cv. Tanzânia	Gramineae	Embrapa ⁽³⁾
Capim-mombaça	<i>Panicum maximum</i> Jacq. cv. Mombaça	Gramineae	Embrapa ⁽³⁾
Capim-andropogon	<i>Andropogon gayanus</i> Kunt cv. Baeté	Gramineae	Embrapa ⁽³⁾
Capim-andropogon CMM	<i>Andropogon gayanus</i> Kunt cv. Baeté	Gramineae	CMM ⁽⁴⁾
Capim-gordura	<i>Melinis minutiflora</i> Beauv	Gramineae	DZO Ufla ⁽⁵⁾
Capim-setária	<i>Setaria sphacelata</i> Schumach Moss	Gramineae	Embrapa ⁽³⁾
Teosinto	<i>Euchlaena mexicana</i> Schrad	Gramineae	DZO Ufla ⁽⁵⁾
Capim-urocloa	<i>Urocloa mosambicensis</i> L.	Gramineae	Embrapa ⁽⁶⁾
Tiririca	<i>Cyperus</i> sp.	Cyperaceae	Ufla ⁽¹⁾
Calaminaceae CMM	<i>Pffafia</i> sp.	Amaranthaceae	CMM ⁽⁷⁾
Trevo-branco	<i>Trifolium repens</i> L.	Gramineae	DZO Ufla ⁽⁵⁾
Capim-búfalo	<i>Cenchrus ciliates</i> L.	Gramineae	Embrapa ⁽⁵⁾
Capim CMM	<i>Paspalum</i> sp.	Gramineae	CMM ⁽⁴⁾
Grama-seda	<i>Cynodon dactylon</i> (L.) Pers	Gramineae	CMM ⁽⁷⁾

⁽¹⁾Campus da Universidade Federal de Lavras. ⁽²⁾Semente Matsuda. ⁽³⁾Embrapa-Centro Nacional de Pesquisa de Gado de Corte. ⁽⁴⁾Área contaminada com metais pesados da Companhia Mineira de Metais, Três Marias, MG. ⁽⁵⁾Departamento de Zootecnia da Ufla. ⁽⁶⁾Embrapa-Centro de Pesquisa Agropecuária do Trópico Semi-Árido. ⁽⁷⁾Área contaminada por minério de calamina da Companhia Mineira de Metais, Vazante, MG.

Tabela 2. Concentrações de cádmio e zinco (Mehlich-1) nas misturas de solo com diferentes proporções de solo contaminado estudado.

Metais (mg dm ⁻³)	Proporção de solo contaminado (%)						Equação de ajuste ⁽¹⁾	R ²
	0	7,5	15	30	45	60		
Zn	20	273	456	896	1.274	1.352	Y = 94,05 + 23,42x	0,96**
Cd	<1	9	25	49	79	85	Y = 1,05 + 1,53x	0,97**

⁽¹⁾Y: concentração de metal no solo; X: proporção de solo contaminado. **Significativo a 1% de probabilidade, pelo teste F.

Os resultados foram submetidos à análise de variância e, com base nas respostas das espécies à contaminação, estimaram-se, pelas regressões, as proporções de solo contaminado necessário para reduzirem 50% (P_{50}) da matéria seca da parte aérea de cada espécie e a concentração de Cd e Zn no solo nessa proporção.

Resultados e Discussão

A *Pffafia* sp. apresentou efeito depressivo na produção de matéria seca da parte aérea (MSPA) a partir de 30% de solo contaminado, ao passo que *A. gayanus* CMM foi severamente afetado, não crescendo neste grau de contaminação (Figura 1). Hou-

ve forte efeito negativo do aumento da contaminação na produção de matéria seca da parte aérea em todas as espécies estudadas, o qual pode ser constatado pelo sinal negativo do coeficiente “b” da equação de regressão (Tabela 3).

As espécies *S. glaziovii*, *B. pilosa*, *R. repens*, *C. echinatus* e *N. physaloides* germinaram, emitindo radículas, que em contato com o solo contaminado, mesmo na menor contaminação (7,5%), adquiriram coloração escura e posteriormente necrose, com morte da plântula, demonstrando alta sensibilidade à contaminação do solo com metais pesados.

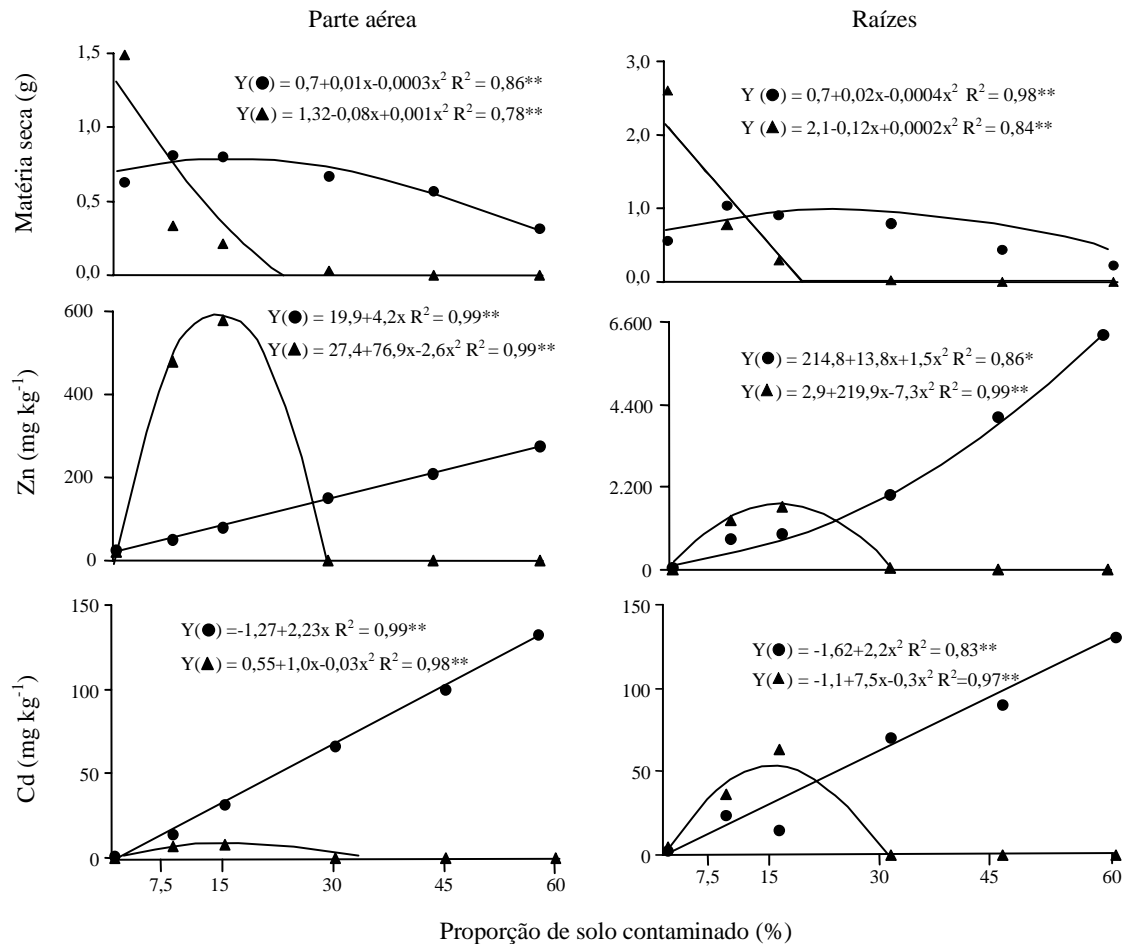


Figura 1. Matéria seca e concentrações de Cd e Zn da parte aérea e das raízes de *Andropogon gayanus* CMM (▲) e de *Pffafia* sp. (●), em razão da proporção de solo contaminado com metais pesados. * e **Significativo a 5% e a 1%, de probabilidade, respectivamente, pelo teste F.

Os materiais originados de áreas contaminadas, designados CMM, como *A. gayanus*, *P. maximum* cv. Colonião, *Paspalum* sp. e *B. decumbens* mostraram-se sensíveis à contaminação do solo. Essas espécies não ocorrem naturalmente na área de estudo; foram introduzidas no local da fábrica da CMM, em Três Marias, MG, através de plantio, na tentativa recente de revegetar, onde sobrevivem em moitas. Os resultados indicam não estarem adaptadas ao excesso de metais no solo, pois comportam-se de modo semelhante às espécies obtidas de áreas não contaminadas (Tabela 3).

Misturas contendo acima de 15% de solo contaminado reduziram drasticamente a biomassa de raízes de capim-andropogon (Figura 1). Em *Pffafia* sp. constatou-se máxima produção de raízes (0,94 g) na mistura com 30% de solo, apresentando redução, em relação ao controle, a partir de 50% de solo contaminado (Figura 1), corroborando os resultados encontrados na MSPA e evidenciando a tolerância dessa espécie aos metais pesados no solo. O impacto que os metais pesados exercem na produção de raízes depende da

sensibilidade da planta e da intensidade de contaminação, sendo consideradas espécies tolerantes aquelas que apresentam produção de raízes significativas em solos contaminados (Punz & Sieghardt, 1993), como evidenciado na *Pffafia* sp. A produção de raízes é uma característica importante quanto à fitoestabilização de áreas contaminadas com metais pesados, pois protege o solo da erosão, reduz a lixiviação, favorece a agregação e a atividade microbiana do solo.

O comportamento apresentado pela *Pffafia* sp. pode ser decorrente do fato de a espécie ocorrer naturalmente em áreas de mineração, pois segundo Watanabe (1997), a vegetação encontrada em áreas contaminadas representa importante fonte potencial de ecótipos tolerantes à poluição e apresenta-se adaptada ao ambiente estressante. As plantas tolerantes são endêmicas de solos poluídos, o que sugere significativa adaptação ecofisiológica, manifestando resistência a contaminação do solo com metais pesados (Raskin et al., 1994). Os mecanismos de resistência a metais pesados são vários, como o

Tabela 3. Resposta de espécies herbáceas à elevação de solo contaminado com metais pesados na mistura⁽¹⁾.

Espécie	Matéria seca da parte aérea		Matéria seca das raízes	
	Equação	R ²	Equação	R ²
<i>Brachiaria humidicola</i>	$Y=1,9-0,09x+0,001x^2$	0,96**	ND	
<i>Brachiaria decumbens</i>	$Y=3,1-0,16x+0,002x^2$	0,99**	$Y=1,7-0,08x+0,001x^2$	0,95**
<i>Brachiaria brizantha</i>	$Y=3,1-0,15x+0,002x^2$	0,97**	$Y=2,8-0,14x+0,002x^2$	0,97**
<i>Brachiaria ruziziensis</i>	$Y=4,3-0,23x+0,003x^2$	0,92**	$Y=1,8-0,1x+0,001x^2$	0,87**
<i>Brachiaria decumbens</i> CMM	$Y=2,6-0,12x+0,001x^2$	0,75**	$Y=2,1-0,1x+0,001x^2$	0,79**
<i>Sorghum sudanensis</i>	$Y=2,2-0,1x+0,001x^2$	0,90**	$Y=1,1-0,05x+0,0006x^2$	0,89**
<i>Euchlaena mexicana</i>	$Y=2,5-0,08x+0,0006x^2$	0,99**	$Y=1,1-0,04x+0,0004x^2$	0,96**
<i>Urocloua mosambicensis</i>	$Y=2,5-0,1x+0,001x^2$	0,99**	$Y=2,3-0,09x+0,0008x^2$	0,98**
<i>Cynodon dactylon</i>	$Y=1,1-0,03x+0,0001x^2$	0,99**	$Y=0,7-0,02x+0,0001x^2$	0,98**
<i>Andropogon gayanus</i>	$Y=2,1-0,1x+0,001x^2$	0,98**	$Y=2,7-0,13x+0,002x^2$	0,97**
<i>Panicum maximum</i> cv. Tanzânia	$Y=2,4-0,1x+0,001x^2$	0,98**	$Y=1,3-0,05x+0,0006x^2$	0,97**
<i>Panicum maximum</i> cv. Mombaça	$Y=2,5-0,1x+0,001x^2$	0,96**	$Y=1,4-0,06x+0,0006x^2$	0,93**
<i>Panicum maximum</i> cv. Colonião	$Y=1,9-0,09x+0,001x^2$	0,95**	$Y=1,1-0,05x+0,0005x^2$	0,99**
<i>Panicum maximum</i> cv. Colonião CMM	$Y=1,3-0,05x+0,0004x^2$	0,97**	$Y=1,2-0,05x+0,0005x^2$	0,98**
<i>Arachis pintoi</i>	$Y=1,0-0,05x+0,0006x^2$	0,92**	$Y=1,7-0,1x+0,001x^2$	0,84**
<i>Setaria sphacelata</i>	$Y=2,3-0,1x+0,001x^2$	0,97**	$Y=1,6-0,06x+0,0006x^2$	0,98**
<i>Melinis minutiflora</i>	$Y=3,3-0,2x+0,003x^2$	0,82**	$Y=2,0-0,12x+0,002x^2$	0,82**
<i>Paspalum</i> sp. CMM	$Y=1,0-0,04x+0,0004x^2$	0,99**	$Y=0,7-0,02x+0,0002x^2$	0,93**
<i>Cenchrus ciliaries</i>	$Y=2,2-0,08x+0,0007x^2$	0,96**	$Y=2,0-0,07x+0,0005x^2$	0,94**
<i>Cyperus</i> sp.	$Y=0,8-0,03x+0,0003x^2$	0,93**	$Y=3,4-0,12x+0,001x^2$	0,88**
<i>Trifolium repens</i>	$Y=0,6-0,02x+0,0002x^2$	0,96**	$Y=0,6-0,02x+0,0002x^2$	0,98**
<i>Chloris gayana</i>	$Y=2,1-0,11x+0,0012x^2$	0,91**	$Y=1,4-0,08x+0,001x^2$	0,81**
<i>Avena strigosa</i>	$Y=1,0-0,04x+0,0003x^2$	0,95**	$Y=0,2-0,01x+0,0001x^2$	0,81**
<i>Pennisetum americanum</i>	$Y=2,1-0,09x+0,001x^2$	0,98**	$Y=0,8-0,03x+0,0002x^2$	0,98**

⁽¹⁾Y: matéria seca da parte aérea ou raízes em gramas; X: proporção de solo contaminado; ND: não-determinado. **Significativo a 1% de probabilidade pelo teste de F.

impedimento na absorção em consequência da alteração da permeabilidade da membrana, mudança na capacidade de absorção, aumento da exsudação de substâncias quelantes e mecanismos bioquímicos – alteração nas formas de compartimentalização do metal pesado, alteração no metabolismo celular e na produção intercelular de compostos ligantes (Shaw, 1989; Schat & Kalff, 1992). Estudos sobre os mecanismos de resistência utilizados por *Pffafia* sp. na tolerância à contaminação com metais pesados são inexistentes e necessitam ser avaliados.

As concentrações de Cd e Zn na parte aérea das plantas aumentaram com a elevação na proporção de solo contaminado, atingindo o valor máximo, na maioria dos casos, com 15% de solo contaminado na mistura, com exceção daquelas que responderam linearmente à contaminação (Tabela 4). Nessa proporção de contaminação as espécies variaram muito quanto aos teores desses metais, ou seja, de 41 a 5.446 mg kg⁻¹ de Zn e de 7 a 94 mg kg⁻¹ de cádmio. As espécies com teores mais elevados de Zn na parte aérea foram *B. humidicola*, *S. sudanensis*, *S. sphacelata*, *T. repens*, *C. gayana* e *A. strigosa*. Espécies como *P. maximum* cv. Mombaça, *P. maximum* cv. Colônia

CMM e *P. americanum* apresentaram concentrações menores que 66 mg kg⁻¹ de zinco. Quanto ao Cd, as concentrações maiores foram verificadas em *B. ruziziensis*, *U. mosambicensis*, *S. sphacelata*, *Paspalum* sp., *C. gayana* e *A. strigosa*.

A. gyanus CMM atingiu em torno de 600 mg kg⁻¹ de Zn, enquanto a *Pffafia* sp. não ultrapassou 200 mg kg⁻¹ de Zn na maior contaminação, embora a resposta a esse elemento tenha sido linear (Figura 1). O *A. gyanus* CMM revelou baixas concentrações de Cd na MSPA, mas na *Pffafia* sp. as concentrações desse elemento aumentaram linearmente com a contaminação, atingindo valores superiores a 100 mg kg⁻¹ de Cd (Figura 1). Tais resultados indicam que esta planta é hiperacumuladora de Cd, fato ainda não relatado na literatura com relação a este gênero de planta. São raras as espécies hiperacumuladoras de Cd, com registro apenas de *Brassica* sp. (Salt et al., 1995) e *Thlaspi caerulescens* (Cunningham & Ow, 1996), ambas pertencentes à família Brassicaceae. É interessante o fato de *Pffafia* sp. ser hiperacumuladora de Cd, mas não de Zn, embora a hiperacumulação de Zn possa ocorrer em concentrações mais elevadas desse elemento no solo do que as concentrações estudadas no presente trabalho.

Tabela 4. Resposta das plantas em relação à concentração de zinco e cádmio na matéria seca da parte aérea e concentração máxima (mg kg⁻¹) desses elementos na mistura com 15% de solo contaminado (C₁₅).

Espécie	Zn			Cd		
	Equação ⁽¹⁾	R ²	C ₁₅	Equação	R ²	C ₁₅
<i>Brachiaria humidicola</i>	Y=-101,4+206,6x-5,3x ²	0,88**	1.805	Y=6,89+0,71x	0,72**	18
<i>Brachiaria decumbens</i>	Y=-183+128,1x-4,2x ²	0,58*	794	Y=0,17+2,1x-0,07x ²	0,74**	16
<i>Brachiaria brizantha</i>	Y=12,1+119,9x-2,6x ²	0,99**	1.224	Y=1,53+1,34x-0,04x ²	0,97**	13
<i>Brachiaria ruziziensis</i>	Y=67,9+25,2x-0,5x ²	0,99**	333	Y=-3,93+3,16x	0,94**	43
<i>Brachiaria decumbens</i> CMM	Y=62,2+50,02x	0,85**	813	Y=2,35+0,46x	0,94**	9
<i>Sorghum sudanensis</i>	Y=-0,4+180,4x-3,6x ²	0,99**	1.896	Y=2,16+3,04x-0,10x ²	0,92**	26
<i>Euchlaena mexicana</i>	Y=-84,9+83,19x	0,96**	1.163	Y=-5,68+1,62x	0,87**	19
<i>Urochloa mosambicensis</i>	Y=-0,7+70,4x	0,99**	1.055	Y=0,02+2,25x	0,99**	34
<i>Cynodon dactylon</i>	Y=4,35+10,9x	0,90**	168	Y=0,81+0,39x	0,98**	7
<i>Andropogon gyanus</i>	Y=113,0+78,6x-2,7x ²	0,99**	684	Y=3,3+1,20x-0,04x ²	0,99**	12
<i>Panicum maximum</i> cv. Tanzânia	Y=57,6+114,3x-2,2x ²	0,98**	1.277	Y=2,63+0,67x	0,95**	13
<i>Panicum maximum</i> cv. Mombaça	Y=14,4+1,74x	0,99**	41	Y=2,17+1,02x	0,98**	17
<i>Panicum maximum</i> cv. Colônia	Y=-1,2+114,0x-1,9x ²	0,98**	1.281	Y=4,33+0,8x	0,91**	16
<i>Panicum maximum</i> cv. Colônia CMM	Y=27,0+1,03x	0,95**	42	Y=1,12+1,75x-0,03x ²	0,98**	21
<i>Arachis pintoi</i>	Y=101,6+187,1x-6,4x ²	0,99**	1.468	Y=0,61+3,5x-0,12x ²	0,99**	26
<i>Setaria sphacelata</i>	Y=210,3+265,4x-8,8x ²	0,85**	2.211	Y=3,51+9,78x-0,33x ²	0,91**	76
<i>Paspalum</i> sp. CMM	Y=64,5+49,9x	0,96**	813	Y=0,83+3,06x-0,04x ²	0,99**	38
<i>Cenchrus ciliarens</i>	Y=88,3+48,2x	0,99**	811	Y=6,41+0,74x	0,77**	18
<i>Cyperus</i> sp.	Y=17,2+106,3x-3,5x ²	0,94**	824	Y=-1,33+2,34x-0,07x ²	0,83**	18
<i>Trifolium repens</i>	Y=-715,8+753,2x-24,0x ²	0,74**	5.182	Y=1,73+3,47x-0,12x ²	0,98**	27
<i>Chloris gayana</i>	Y=-159,4+739,7x-24,4x ²	0,97**	5.446	Y=-3,12+9,63x-0,32x ²	0,94**	69
<i>Avena strigosa</i>	Y=49,2+221,4x-7,4x ²	0,97**	1.705	Y=-2,28+12,55x-0,41x ²	0,94**	94
<i>Pennisetum americanum</i>	Y=34,3+2,1x+0,003x ²	0,97**	66	Y=4,5+2,73x	0,98**	45

⁽¹⁾Y: concentrações de Zn e Cd (mg kg⁻¹) na matéria seca da parte aérea; X: proporção de solo contaminado. * e **Significativo a 5% e a 1% de probabilidade, respectivamente, pelo teste F.

As concentrações de Cd e Zn na matéria seca das raízes apresentaram comportamento bastante semelhante ao verificado em relação a MSPA (Tabela 5). *B. humidicola*, *A. pintoi*, *M. minutiflora*, *C. gayana* e *A. strigosa* apresentaram baixa produção de matéria seca de raízes, o que impossibilitou a realização de análises dos teores desses elementos nos tecidos. Em geral, as concentrações de Zn e Cd nas raízes atingiram o máximo na proporção de 15% de solo contaminado na maioria das espécies estudadas, com exceção daquelas que apresentaram respostas lineares (Tabela 5). Nesse nível de contaminação, as espécies *C. dactylon*, *Paspalum* sp., *C. ciliares* e *Cyperus* sp. apresentaram menores concentrações de Zn, variando de 294 mg kg⁻¹ em *Paspalum* sp. a 992 mg kg⁻¹ em *C. dactylon*. As demais espécies apresentaram elevada concentração desse elemento, com valores superiores a 3.000 mg kg⁻¹ em *A. gayanus*, *S. sudanensis*, *S. sphacelata* e *T. repens*. As concentrações de Cd nas raízes variaram de 18 mg kg⁻¹ em *Cyperus* sp. até 348 mg kg⁻¹ em *T. repens*. Em relação a *Pffafia* sp., as concentrações de Zn foram crescentes com aumento da contaminação do solo com metais pesados, enquanto em

A. gayanus CMM a máxima concentração foi alcançada na proporção de 15% de solo contaminado, decrescendo com o aumento da contaminação (Figura 1). Quanto ao Cd nas raízes de *Pffafia* sp., o comportamento foi semelhante ao encontrado na MSPA, inclusive em termos de valores, indicando a elevada translocação desse elemento nesta espécie (Figura 1). A concentração de Zn nas raízes de *Pffafia* sp. foi elevada em relação à concentração na MSPA. Essa retenção de metais pesados nas raízes de *Pffafia* sp. pode estar relacionada a um mecanismo de tolerância ao excesso de Zn, como verificado em outras espécies tolerantes (Marchiol et al., 1996; Schat & Verkleij, 1998).

Para discriminar melhor o comportamento das espécies, estimou-se, por regressões, a proporção de solo contaminado necessário para reduzir em 50% (P₅₀) a matéria seca da parte aérea das plantas (Tabela 3). Esse índice mostra a influência que a contaminação exerce sobre as plantas (Soares, 1999) e sobre as atividades biológicas do solo (Speir et al., 1995; Moreno et al., 2001), sendo considerado indicativo de tolerância/sensibilidade. Nesse contexto, houve variação de apenas 6% para *A. gayanus*

Tabela 5. Resposta das plantas para concentração de zinco e cádmio na matéria seca das raízes e concentração máxima (mg kg⁻¹) desses elementos na mistura com 15% de solo contaminado (C₁₅).

Espécie	Zn			Cd		
	Equação ⁽¹⁾	R ²	C ₁₅	Equação	R ²	C ₁₅
<i>Brachiaria decumbens</i>	Y=-243,4+388,6x-12,6x ²	0,87**	2.751	Y=-3,38+13,0x-0,43x ²	0,95**	95
<i>Brachiaria brizantha</i>	Y=-37,9+234,8x-7,7x ²	0,84**	1.751	Y=-1,55+8,8x	0,97**	130
<i>Brachiaria ruziziensis</i>	Y=44,8+210,8x-7,1x ²	0,99**	1.609	Y=-7,0+13,3x-0,43x ²	0,91**	96
<i>Brachiaria decumbens</i> CMM	Y=-104,6+193,3x-6,3x ²	0,88**	1.377	Y=-2,9+6,2x-0,2x ²	0,92**	45
<i>Sorghum sudanensis</i>	Y=-98,8+491,5x-15,2x ²	0,95**	3.853	Y=-6,8+12,9x-0,42x ²	0,89**	92
<i>Euchlaena mexicana</i>	Y=132,2+242,2x-6,5x ²	0,99**	2.302	Y=5,2+5,8x-0,2x ²	0,87**	47
<i>Urochloa mosambicensis</i>	Y=-27,6+137,7x-0,79x ²	0,99**	1.860	Y=-1,44+3,24x	0,99**	47
<i>Cynodon dactylon</i>	Y=34,5+67,9x-0,27x ²	0,99**	992	Y=2,76+1,6x	0,97**	28
<i>Andropogon gayanus</i>	Y=-46,1+429,8x-14,2x ²	0,98**	3.205	Y=-12,4+17,4x-0,56x ²	0,86**	123
<i>Panicum maximum</i> cv. Tanzânia	Y=420,6+223,46x-3,53x ²	0,98**	2.979	Y=-6,45+8,58x	0,99**	122
<i>Panicum maximum</i> cv. Mombaça	Y=118,9+213,1x-2,8x ²	0,98**	2.685	Y=0,69+6,7x	0,99**	100
<i>Panicum maximum</i> cv. Colômbio	Y=47,3+203,8x-3,9x ²	0,99**	2.226	Y=4,24+8,9x-0,18x ²	0,88**	97
<i>Panicum maximum</i> cv. Colômbio CMM	Y=133,0+304,53x-10,3x ²	0,98**	2.383	Y=0,85+13,8x-0,46x ²	0,99**	104
<i>Setaria sphacelata</i>	Y=185,3+330,4x-6,7x ²	0,98**	3.633	Y=6,7+12,6x-0,21x ²	0,98**	148
<i>Paspalum</i> sp. CMM	Y=124,3+21,8x-0,7x ²	0,98**	294	Y=-7,6+20,4x-0,67x ²	0,92**	148
<i>Cenchrus ciliates</i>	Y=85,9+24,6x+1,6x ²	0,98**	815	Y=0,84+1,74x	0,97**	27
<i>Cyperus</i> sp.	Y=11,3+76,3x-0,86x ²	0,97**	962	Y=2,21+0,97x	0,94**	17
<i>Trifolium repens</i>	Y=362,1+439,2x-13,1x ²	0,94**	4.003	Y=17,7+44,8x-1,52x ²	0,87**	348
<i>Pennisetum americanum</i>	Y=159,0+315,6x-10,7x ²	0,99**	2.486	Y=0,03+4,49x-0,15x ²	0,99**	34
<i>Arachis pintoii</i>	Sem ajuste			Sem ajuste		
<i>Melinis minutiflora</i>	Sem ajuste			Sem ajuste		
<i>Chloris gayana</i>	Sem ajuste			Sem ajuste		
<i>Avena strigosa</i>	Sem ajuste			Sem ajuste		

⁽¹⁾Y: concentrações de Zn e Cd (mg kg⁻¹) na matéria seca das raízes; X: proporção de solo contaminado. **Significativo a 1% de probabilidade pelo teste F.

CMM e 58% para *Pffafia* sp. (Figura 2), indicando a elevada sensibilidade da primeira, a tolerância da última e posições intermediárias das demais espécies estudadas. As espécies *E. mexicana*, *C. dactylon*, *Cyperus* sp. e *T. repens* apresentaram P₅₀ na faixa de 15% a 20% de solo contaminado, ao passo que em *B. ruziziensis*, *A. gayanus* CMM, *A. pintoii* e *M. minutiflora* os valores de P₅₀ foram inferiores a 10%. No primeiro grupo de plantas (P₅₀ de 15% a 20%) as concentrações de Cd e Zn no solo capazes de reduzir 50% da MSPA foram estimadas, com base na regressão (Tabela 2), em 32 e 562 mg kg⁻¹, respectivamente; em relação ao segundo grupo (P₅₀<10%) foram de 16 mg kg⁻¹ de Cd e 328 mg kg⁻¹ de Zn (Figura 2).

Quanto a *Pffafia* sp., somente concentrações elevadas (90 mg kg⁻¹ de Cd e de 1.450 mg kg⁻¹ de Zn) inibiram a produção da matéria seca da parte aérea em 50%.

Considerando que o nível crítico de Cd e Zn no solo, no qual o crescimento da planta é reduzido, é de 8 mg kg⁻¹ de Cd e 450 mg kg⁻¹ de Zn (Kabata-Pendias & Pendias, 1984), observa-se que o nível crítico de Zn foi suficiente para promover redução de 50% na MSPA na maioria das espécies estudadas, com exceção da *Pffafia* sp., *T. repens*, *E. mexicana*, *C. dactylon* e do *Cyperus* sp. Apesar de estes autores trabalharem com níveis críticos com base na redução de 10% da MSPA, verificou-se nes-

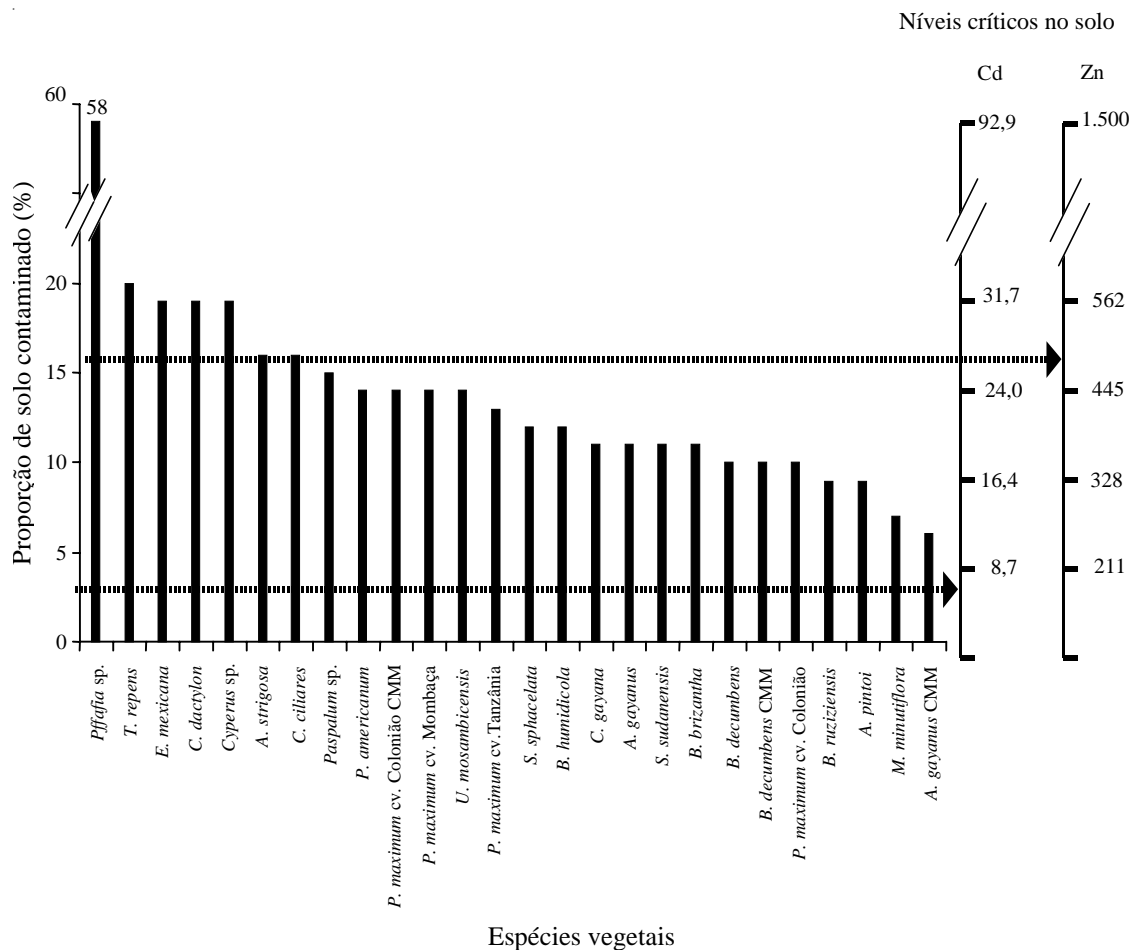


Figura 2. Proporção de solo contaminado com metais pesados necessária para reduzir 50% da matéria seca da parte aérea das espécies estudadas e níveis críticos (mg kg⁻¹) de Cd e Zn no solo (linhas tracejadas).

te estudo que o nível crítico proposto para Zn no solo está superestimado, o que sugere a necessidade de estudos mais aprofundados envolvendo solos e espécies tropicais.

Baseando-se nos resultados do presente trabalho, apenas *Pffafia* sp. seria promissora na revegetação de solos contaminados, pois, além de apresentar-se tolerante, é hiperacumuladora de cádmio. No entanto, esta planta apresenta baixa produção de biomassa, como pode ser observado pelo valor da interseção da equação de regressão (Figura 1), o que representa certa desvantagem para a fitorremediação. Tal característica é verificada em outras espécies consideradas acumuladoras de metais pesados (Raskin et al., 1994; Salt et al., 1998). Outras espécies, ainda que menos tolerantes que *Pffafia* sp., como *T. repens*, *E. mexicana*, *C. dactylon*, *Cyperus* sp., *A. strigosa* e *C. ciliares*, são promissoras para a revegetação de áreas contaminadas com metais pesados, quando se faz a diluição ou substituição do solo poluído, ou se emprega agentes amenizantes que reduzem a disponibilidade dos metais no solo, ou ainda o plantio consorciado utilizando estas espécies. Portanto, a escolha de espécies de plantas capazes de revegetar a área contaminada é o primeiro passo para o sucesso da recuperação desse tipo de solo.

Conclusões

1. As espécies comportam-se de modo diferenciado em relação à contaminação do solo por Cd e Zn, variando de espécies tolerantes a muito sensíveis a esses elementos.

2. *Pffafia* sp. apresenta elevada tolerância à contaminação do solo com Cd e Zn; cresce satisfatoriamente em solo contendo até 90 mg kg⁻¹ de Cd e de 1.450 mg kg⁻¹ de Zn e contém teores de Cd na matéria seca da parte aérea e das raízes superiores a 100 mg kg⁻¹, sendo, por isso, considerada hiperacumuladora de cádmio.

3. As espécies *Sida glaziovii*, *Bidens pilosa*, *Rhynchelytrum repens*, *Cenchrus echinatus* e *Nicandra physaloides* são extremamente sensíveis à contaminação do solo com Cd e zinco.

Referências

- ACCIOLY, A. M. A. **Amenizantes e estratégias para estabelecimento de vegetação em solos de áreas contaminadas por metais pesados**. 2001. 186 f. 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. In: NOVAES, R. F.; ALVAREZ, V. H. V.; SCHAEFER, C. E. G. R. (Ed.). **Tópicos em ciência do solo**. Viçosa, MG: UFV, 2000. p. 299-352.
- BAKER, A. J. M. Metal tolerance. **New Phytologist**, London, v. 106, p. 93-111, 1987.
- BAKER, A. J. M.; McGRATH, S. P.; SODOLI, C. M. D.; REEVES, R. D. The possibility of *in situ* heavy metal decontamination of polluted soils using crops of metal-accumulating plants. **Resources, Conservation and Recycling**, Amsterdam, v. 11, p. 41-49, 1994.
- CARNEIRO, M. A. C.; SIQUEIRA, J. O.; MOREIRA, F. M. S. Estabelecimento de plantas herbáceas em solo contaminado com metais pesados: efeito de misturas de espécies e inoculação com fungos micorrízicos. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 36, n. 12, p. 1443-1452, dez. 2001.
- CUNNINGHAM, S. D.; ANDERSON, T. A.; SCHWAB, A. P.; HSU, F. C. Phytoremediation of soils contaminated with organic pollutants. **Advance in Agronomy**, New York, v. 56, p. 55-114, 1996.
- CUNNINGHAM, S. D.; OW, D. W. Promises and prospects of phytoremediation. **Plant Physiology**, Rockville, v. 110, p. 715-719, 1996.
- EBBS, S. D.; KOCHIAN, L. V. Phytoextraction of zinc by Oat (*Avena sativa*), Barley (*Hordeum vulgare*), and Indian Mustard (*Brassica juncea*). **Environmental Science & Technology**, Washington, v. 32, p. 802-806, 1998.
- ELTROP, L.; BROWN, G.; JOACHIM, O.; BRINKMANN, K. Lead tolerance of betula and salix in the mining area of Mechernich/Germany. **Plant and Soil**, Dordrecht, v. 131, n. 2, p. 279-285, 1991.
- FORSTER, J. C. Heavy metals. In: ALEF, K.; NANNIPIERI, P. (Ed.). **Methods in applied soil microbiology and biochemistry**. London: Academic, 1995. p. 1010-1043.

- HUNTER, A. H. **Laboratory analysis of vegetal tissues samples**. Raleigh: North Carolina University, 1975. 5 p.
- KABATA-PENDIAS, A.; PENDIAS, H. **Trace elements in soils and plants**. Boca Raton: CRC Press, 1984. 315 p.
- MARCHIOL, L.; LEITA, L.; MARTIN, M.; PERESSOTTI, A.; ZERBI, G. Physiological responses of two soybean cultivars to cadmium. **Journal of Environmental Quality**, Madison, v. 25, p. 562-566, 1996.
- MORENO, J. L.; GARCIA, C.; LANDI, L.; FALCHINI, L.; PIETRAMELLARA, G.; NANNIPIERI, P. The ecological dose value (ED_{50}) for assessing toxicity on ATP content and dehydrogenase and urease activities of soil. **Soil Biology & Biochemistry**, Oxford, v. 33, p. 483-489, 2001.
- PUNZ, W. F.; SIEGHARDT, H. The response of roots of herbaceous plant species to heavy metals. **Environmental and Experimental Botany**, Elmsford, v. 44, n. 1, p. 85-98, 1993.
- RASKIN, I.; KUMAR, P. B. A. N.; DUSHENKOV, S.; SALT, D. E. Bioconcentration of heavy metals by plants. **Current Opinion Biotechnology**, London, v. 5, p. 285-290, 1994.
- SALT, D. E.; BLAYLOCK, M.; KUMAR, N. P. B. A.; DUSHENKOV, V.; ENSLEY, B. D.; CHET, I.; RASKIN, I. Phytoremediation: a novel strategy for the removal of toxic metals from the environment using plants. **Biotechnology**, Frankfurt, v. 13, p. 468-474, 1995.
- SALT, D. E.; SMITH, R. D.; RASKIN, I. Phytoremediation. **Annual Review of Plant Physiology**, Palo Alto, v. 49, p. 643-668, 1998.
- SCHAT, H.; KALFF, M. M. A. Are phytochelatin involved in differential metal tolerance or do they merely reflect metal-imposed strain? **Plant Physiology**, Rockville, v. 99, n. 4, p. 1475-1480, 1992.
- SCHAT, H.; VERKLEIJ, A. C. Biological interactions: the role for non-woody plant in phytoremediation: possibilities to exploit adaptive heavy metal tolerance. In: VANGRONSVELD, J.; CUNNINGHAM, S. D. (Ed.). **Metal-contaminated soils: *in situ* inactivation and phytoremediation**. Berlin: Springer, 1998. p. 51-63.
- SENGUPTA, M. **Environmental impacts of mining: monitoring, restoration, and control**. Boca Raton: Lewis, 1993. 494 p.
- SHAW, A. J. **Heavy metal tolerance in plants: evolutionary aspects**. New York: CRC Press, 1989. 355 p.
- SOARES, C. R. F. S. **Toxidez de zinco, cobre, cádmio e chumbo para o eucalipto em solução nutritiva**. 1999. 132 f. Dissertação (Mestrado em Solos e Nutrição de Plantas) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, 1999.
- SPEIR, T. W.; KETTLES, H. A.; PARSHOTAM, A.; SEARLE, P. L.; VLAAR, L. N. C. Simple kinetic approach to derive the ecological dose value, ED_{50} , for the assessment of Cr (VI) toxicity to soil biological properties. **Soil Biology & Biochemistry**, Oxford, v. 27, p. 801-810, 1995.
- VANGRONSVELD, J.; COLPAERT, J. V.; TICHELEN, K. K. van. Reclamation of a bare industrial area contaminated by non-ferrous metals: physicochemical and biological evaluation of the durability of soil treatment and revegetation. **Environmental Pollution**, Oxford, v. 94, p. 131-140, 1997.
- WATANABE, M. E. Phytoremediation on the brink of commercialization. **Environmental Science & Technology**, Washington, v. 31, p. 182-186, 1997.