

Fungos micorrízicos no crescimento e na extração de metais pesados pela braquiária em solo contaminado

Silvana da Silva⁽¹⁾, José Oswaldo Siqueira⁽¹⁾ e Cláudio Roberto Fonsêca Sousa Soares⁽¹⁾

⁽¹⁾Universidade Federal de Lavras, Dep. de Ciência do Solo, Caixa Postal 3037, CEP 37200-000 Lavras, MG. E-mail: silsilva@click21.com.br, siqueira@ufla.br, crfsoares@gmail.com

Resumo – Avaliou-se, em casa de vegetação, a influência de 14 isolados de fungos micorrízicos arbusculares (FMA) no crescimento e extração de Zn, Cd, Cu e Pb pela *Brachiaria decumbens* em solo contaminado. Foram utilizadas plantas com e sem FMA, em vasos com 0,92 kg de solo com (mg kg⁻¹): Zn, 3.300; Cu, 60; Cd, 29; Pb, 73. Os isolados fúngicos tiveram efeitos diferenciados no crescimento e aumentaram a produção de matéria seca em 84%. Os teores de metais na planta foram elevados e apresentaram relação inversa com a produção de matéria seca. Verificou-se que os FMA não afetaram os teores de Pb, mas reduziram em 20, 28 e 63% os teores de Zn, Cd e Cu na parte aérea, respectivamente, e aumentaram os teores de Cu nas raízes em mais de 1.000%. Os FMA aumentaram a quantidade de metais extraídos do solo em 845, 142, 68 e 54% para Cu, Pb, Zn e Cd, respectivamente. *Acaulospora spinosa*, *Acaulospora morrowiae*-UFLA e *Gigaspora gigantea* aumentaram a extração simultânea dos quatro metais contaminantes. Os FMA, de acordo com a espécie, aumentam a capacidade da *B. decumbens* de extrair metais pesados do solo.

Termos para indexação: *Brachiaria decumbens*, simbiose radicular, fitoextração, fungos do solo, poluição do solo.

Mycorrhizal fungi influence on brachiariagrass growth and heavy metal extraction in a contaminated soil

Abstract – The influence of 14 arbuscular mycorrhiza fungal isolates (AMF) on brachiariagrass growth and extraction of Zn, Cd, Cu and Pb from a contaminated soil was evaluated in a greenhouse experiment. Mycorrhizal and nonmycorrhizal *Brachiaria decumbens* plants were grown in pots with 0.92 kg of soil containing (mg kg⁻¹): Zn, 3,300; Cu, 60; Cd, 29; Pb, 73. The AMF increased dry matter yield in 84%. Plant heavy metal concentrations were high and were inversely related to dry matter yield. Isolates caused no effect on Pb, but reduced shoot Zn, Cd and Cu concentrations by 20, 28 and 63%, respectively. It was observed effect of mycorrhiza on Cu accumulation in roots (over 1,000%). Isolates enhanced the total amount of soil extracted metals by 845, 142, 68 and 54% for Cu, Pb, Zn and Cd, respectively. Only *Acaulospora spinosa*, *Acaulospora morrowiae*-UFLA and *Gigaspora gigantea* enhanced simultaneous soil extraction of all the four metals. The AMF increase the capacity of *B. decumbens* to extract contaminant heavy metals from soil, with differentiated effects amongst species.

Index terms: *Brachiaria decumbens*, root symbiosis, phytoextraction, soil fungi, soil pollution.

Introdução

A capacidade extratora e a tolerância das plantas a elevadas concentrações de metais pesados representam as bases de processos tecnológicos variados, conhecidos por fitorremediação, e se relacionam com diversas características, como: capacidade de acumular altas concentrações de metais nos tecidos; potencial para produção de biomassa; e sistema radicular bastante ramificado e eficiente na absorção do contaminante do

solo (Lasat, 2002; Nascimento & Xing, 2006). No caso dos metais, as espécies acumuladoras teriam maior potencial fitoextrator, mas geralmente apresentam tamanho reduzido e baixa taxa de crescimento, o que limita sua aplicação em larga escala (Raskin et al., 1997). Além da extração de metais biodisponíveis do solo, a introdução de plantas em área contaminada melhora o aporte de material orgânico, aumenta a quantidade de raízes que contribuem para melhorar a estrutura, atenua

processos erosivos e melhora o habitat para os microrganismos do solo (Khan et al., 2000).

As gramíneas geralmente apresentam elevada diversidade, facilidade de sementeira, rápido crescimento e estabelecimento, garantem a cobertura e proteção do solo e, por isso, destacam-se como potenciais para revegetação de áreas contaminadas por metais pesados. Além disto, as gramíneas associam-se a fungos micorrízicos arbusculares (FMA) que exercem grande influência sobre estas plantas, constituindo-se em importantes componentes bióticos do ecossistema (Smith & Read, 1997). Esta associação amplia o potencial de absorção pelo sistema radicular, facilitando a absorção de íons e de água do solo, o que pode aumentar a capacidade extratora das plantas (Klauber-Filho et al., 2005) e a ação filtrante e purificadora do solo (Safir et al., 1990). Plantas com fungos micorrízicos produzem maior quantidade de massa vegetal e absorvem e acumulam mais metais que plantas sem esses fungos (Chen et al., 2003). Nogueira et al. (2004) verificaram menores teores de Mn em grãos de soja com inoculação de FMA, porém maiores quantidades acumuladas deste metal nas plantas. Resultados semelhantes foram relatados sobre diversas gramíneas, em solo contaminado por metais pesados (Klauber-Filho et al., 2005). Este aspecto é ainda pouco explorado, em termos de tecnologias remediadoras de solos contaminados, em condições tropicais (Klauber-Filho et al., 2005).

Os FMA têm ocorrência abundante em solos contaminados (Gaur & Adholeya, 2004; Silva et al., 2005; Stürmer & Siqueira, 2006). Há evidências da contribuição destes fungos para a tolerância de espécies tropicais ao excesso de metais pesados, como observado por Siqueira et al. (1999a, 1999b) para milho e espécies arbóreas. Carneiro et al. (2001) mostraram que a co-semeadura de gramíneas e crucíferas, em solo contaminado e infestado com propágulos de FMA, aumentou a extração de metais biodisponíveis e facilitou o estabelecimento posterior da gramínea.

Plantas associadas com fungos micorrízicos podem, no entanto, reter estes metais nas raízes e reduzir a translocação para a parte aérea (Christie et al., 2004). Isto envolve vários mecanismos, como efeitos diferenciados no crescimento da planta hospedeira e a produção pelos FMA de glicoproteínas, denominadas glomalinas, que apresentam alta capacidade de reter metais. González-Chávez et al. (2002) verificaram que há um comportamento diferenciado da relação fungo-

metal, e isto pode explicar as variações dos efeitos dos FMA quanto aos benefícios para a planta, em solos com excesso de metais pesados (Orlowska et al., 2005).

Este trabalho teve como objetivo avaliar a influência de 14 isolados de FMA no crescimento e na capacidade da *Brachiaria decumbens* Stapf. em extrair Cd, Zn, Pb e Cd de um solo contaminado com estes metais.

Material e Métodos

O experimento foi realizado no período de 3/12/2003 a 30/4/2004, em casa de vegetação, tendo-se empregado solo contaminado por vários metais, coletado em área bastante alterada e sem distinção entre os horizontes originais, no qual eram depositados rejeitos da industrialização do zinco, da Companhia Mineira de Metais (CMM), localizada em Três Marias (MG) (Ribeiro-Filho et al., 1999).

A elevada contaminação impossibilitava o crescimento da *Brachiaria decumbens* e dos FMA, por isso, este solo foi diluído com material de um Latossolo Vermelho-Escuro sem contaminação com metais pesados. A mistura constituiu-se de 15% de solo contaminado, proporção definida com base em estudos de Klauber-Filho (1999). Foi adicionado ao solo não contaminado fosfato de potássio monobásico (KH_2PO_4 p.a.), de modo a fornecer 37 mg kg^{-1} de P. Depois da completa homogeneização, a mistura passou a denominar-se solo contaminado e apresentou os seguintes teores médios de metais (extração Mehlich-1), em mg dm^{-3} : Zn, 3.300; Cu, 60; Cd, 29; Pb, 73.

Para a eliminação de propágulos de fungos micorrízicos, o solo foi fumigado com brometo de metila 98% + cloropicrina 2% (Bromex), na dose de $196 \text{ cm}^3 \text{ m}^{-3}$. A mistura de solo contaminado foi colocada em vasos com capacidade de 920 g, para os testes de inoculação.

O experimento constituiu-se de um tratamento controle sem FMA e 14 tratamentos de inoculação, dispostos em delineamento inteiramente casualizado, com cinco repetições. Os isolados empregados, de diferentes origens e mantidos na coleção de FMA da UFLA, foram: *Scutellospora heterogama* (Nicol. & Gerdemann) Walker & Sanders (pastagem de braquiária); *Acaulospora spinosa* Walker & Trappe (gramíneas); *Acaulospora morrowiae*-UFLA Spain & Schenck (pimenteira); *Gigaspora gigantea* (Nicol. & Gerdemann) Gerdemann & Trappe (braquiária); *Glomus clarum*-CMM Nicol. & Schenck (gramíneas em áreas

contaminadas com metais pesados); *Glomus etunicatum* Becker & Gerdemann (cafeeiro); *Scutellospora gregaria* (Schenck & Nicol.) Walker & Sanders (algodoeiro); *Acaulospora morrowiae*-CMM Spain & Schenck (gramíneas em áreas contaminadas com metais pesados); *Gigaspora margarita* Becker & Hall (milho); *Scutellospora pellucida* (Nicol. & Schenck) Walker & Sanders (cerrado); *Acaulospora scrobiculata* Trappe (cafeeiro); *Gigaspora albida* Schenck & Smith (gramíneas em áreas contaminadas com metais pesados); *Glomus clarum*-UFLA Nicol. & Schenck (braquiária); *Paraglomus occultum* Morton & Redecker (gramíneas).

Os fungos obtidos dos vasos de cultivo foram utilizados como solo-inóculo. Foram aplicados, aproximadamente, 300 esporos por vaso no transplântio das plântulas. As sementes de *B. decumbens* foram tratadas com H₂SO₄ concentrado, por 1 min, e seguidamente lavadas em água corrente, para eliminar microrganismos contaminantes e facilitar a germinação, que foi realizada em bandejas de plástico com vermiculita.

O transplântio para os vasos foi realizado quando as plântulas atingiram aproximadamente 10 cm, tendo sido colocadas três plântulas por vaso. O tratamento testemunha recebeu 50 mL de um filtrado de solo-inóculo sem propágulos de FMA, para equilibrar a microbiota. As plantas de braquiária foram mantidas em casa de vegetação, irrigadas com água destilada e, durante a condução do experimento, receberam adubações com N (15 mg kg⁻¹), na forma de nitrato de amônio, no transplântio das mudas e após o primeiro corte.

Os cortes foram realizados aos 70 e 147 dias, e a parte aérea cortada foi lavada e colocada para secar em estufa de circulação forçada, a 60°C, para ser utilizada na determinação da massa de matéria seca. Ao final do experimento (147 dias), as raízes foram coletadas do solo, lavadas, e 1 g de raízes finas foi retirado e armazenado em FAA (formalina-álcool-ácido acético), para posterior clarificação e coloração com azul de tripano (Phillips & Hayman, 1970) e quantificação da taxa de colonização micorrízica (Giovannetti & Mosse, 1980). O restante das raízes foi destinado à determinação da massa de matéria seca. Após a determinação da massa de matéria seca da parte aérea e raízes, as amostras foram moídas em moinho tipo Wiley e submetidas à digestão nítrico-perclórica para análise das concentrações de Zn, Cu, Cd e Pb, nos tecidos, por espectrofotometria de absorção atômica.

A quantidade de metais acumulada na parte aérea e raízes das plantas foi calculada com base nas concen-

trações e produção de matéria seca, em cada corte, e a quantidade total extraída foi obtida pela soma do acúmulo na parte aérea, nos dois cortes, mais o acumulado nas raízes. A eficiência de extração dos metais foi calculada por meio da razão entre a quantidade total extraída pela *B. decumbens* e a quantidade de metais pesados presentes no solo, conforme proposto por Ebbs et al. (1997).

Os resultados foram submetidos à análise de variância e testes de médias (Tukey 5%), por meio do programa estatístico SISVAR (Ferreira, 2000). Correlações de Pearson entre os teores de metais na planta e a produção de matéria seca, para os dois cortes, foram realizadas pelo teste t, a 5% de probabilidade, por meio do programa estatístico SAEG.

Resultados e Discussão

Os efeitos dos tratamentos com FMA, na produção de matéria seca da parte aérea da braquiária, foram diferentes tanto no primeiro quanto no segundo corte (Tabela 1). No primeiro corte, os fungos *A. spinosa*, *A. morrowiae*-UFLA, *Glomus clarum*-CMM, *G. etunicatum*, *S. pellucida* e *G. clarum*-UFLA promoveram aumento na produção de matéria seca, que foi duas vezes maior nas plantas com inoculação de *G. clarum*, isolado de área com metais pesados.

A produção de matéria seca da parte aérea, das plantas sem FMA, sofreu grande redução no segundo corte, de 4,1 para 1,7 g, o que evidenciou o efeito negativo da exposição das plantas à contaminação do solo.

Tabela 1. Matéria seca da parte aérea e de raízes, e colonização micorrízica de *B. decumbens* com diferentes espécies de FMA, em vasos com solo contaminado com metais pesados⁽¹⁾.

Tratamento	Matéria seca (g vaso ⁻¹)			Colonização (%)
	1º corte	2º corte	Raiz	
1. Controle	4,09ef	1,70d	2,41c	0c
2. <i>Scutellospora heterogama</i>	4,73cdef	4,54abc	4,08abc	9bc
3. <i>Acaulospora spinosa</i>	6,67abcd	4,96ab	4,79ab	9bc
4. <i>Acaulospora morrowiae</i> -UFLA	6,87abc	4,68abc	4,95a	19ab
5. <i>Gigaspora gigantea</i>	5,84bcde	5,57a	4,46abc	12b
6. <i>Glomus clarum</i> -CMM	8,50a	3,02cd	3,25abc	17ab
7. <i>Glomus etunicatum</i>	6,57abcd	4,32abc	3,49abc	20ab
8. <i>Scutellospora gregaria</i>	4,40def	3,18bcd	3,57abc	16ab
9. <i>Acaulospora morrowiae</i> -CMM	3,61ef	3,39bcd	4,06abc	17ab
10. <i>Gigaspora margarita</i>	3,05f	3,00cd	3,59abc	11bc
11. <i>Scutellospora pellucida</i>	7,69ab	4,04abc	3,47abc	27a
12. <i>Acaulospora scrobiculata</i>	3,73ef	1,93d	2,70bc	18ab
13. <i>Gigaspora albida</i>	3,95ef	5,52a	4,64ab	20ab
14. <i>Glomus clarum</i> -UFLA	6,99abc	4,69abc	4,19abc	17ab
15. <i>Paraglomus occultum</i>	5,15cdef	4,92ab	4,57abc	13b

⁽¹⁾Médias seguidas por letras iguais na coluna, não diferem entre si pelo teste de Tukey, a 5% de probabilidade.

Entretanto, a queda acentuada na produção de matéria seca, do primeiro para o segundo corte (60%), foi menor com alguns FMA, o que evidencia o efeito destes à exposição da planta ao excesso de metais no solo. No caso de *G. albida*, houve um incremento de 40% no segundo corte. A produção de matéria seca da parte aérea da *B. decumbens*, no segundo corte, foi favorecida pela inoculação com *S. heterogama*, *A. spinosa*, *A. morrowiae*-UFLA, *Gigaspora gigantea*, *Glomus etunicatum*, *S. pellucida*, *Gigaspora albida*, *Glomus clarum*-UFLA e *P. occultum*. A produção média de matéria seca obtida com estes isolados foi de 4,8 g, que é 182% superior à produção obtida nas plantas-controle.

A matéria seca de raízes só foi avaliada após o segundo corte, quando também se observou efeito dos FMA *A. spinosa*, *A. morrowiae*-UFLA e *G. albida*. A maioria dos tratamentos com FMA teve efeito na matéria seca total nos dois cortes (Figura 1). Plantas com isolados eficientes (com efeito significativo) produziram, em média, 84% mais matéria seca que o controle, com os maiores efeitos observados em *A. morrowiae*-UFLA e *A. spinosa*. Este efeito pode influenciar o potencial de extração de metais do solo e compensar os baixos teores destes na planta (Ebbs et al., 1997). Apenas os fungos *S. gregaria*, *A. morrowiae*-CMM, *Gigaspora margarita* e *A. scrobiculata* não tiveram efeito na produção de matéria seca total.

Não foi encontrada colonização nas plantas-controle, enquanto nas que cresceram em presença de FMA a

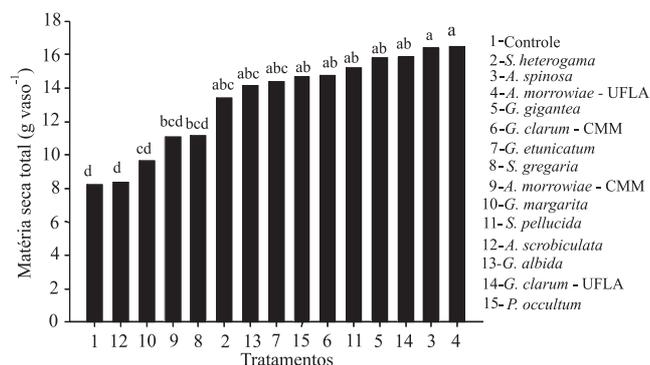


Figura 1. Matéria seca total (primeiro e segundo cortes) de *Brachiaria decumbens*, com diferentes FMA, em vasos com solo contaminado com metais pesados. Médias com letras iguais não diferem entre si pelo teste de Tukey, a 5% de probabilidade.

taxa de colonização micorrízica diferiu bastante entre os tratamentos (Tabela 1). A colonização foi 27% para *S. pellucida* e 9% para *S. heterogama* e *A. spinosa*. Algumas destas espécies apresentaram alta colonização radicular na *B. decumbens*, em condições de elevada contaminação com metais pesados Klauberg-Filho (1999). Em condições controladas, a colonização micorrízica da *B. decumbens*, em solo contaminado com (mg kg⁻¹, Mehlich 1): Zn, 1.275; Cu, 207; Pb, 53 e Cd, 14, foi de aproximadamente 20% (Soares, 2004).

Os teores de metais na planta variaram com o corte, o tratamento, o metal e com a parte da planta analisada (Tabela 2). As plantas com *A. spinosa*, *A. morrowiae*-UFLA, *Gigaspora gigantea*, *Glomus clarum*-CMM e *Glomus clarum*-UFLA apresentaram, no primeiro corte, teor de Zn na parte aérea de 1.200 mg kg⁻¹, que é 20% menor do que os teores encontrados nas plantas-controle. Entretanto, não houve efeito significativo dos tratamentos, nos teores deste elemento na parte aérea do segundo corte, e na matéria seca de raízes. Mesmo tendo havido aplicação de nutrientes, houve uma baixa produção de matéria seca no segundo corte. Isto é resultante da manutenção da elevada disponibilidade de Zn no solo, comprovada pelos elevados teores deste na planta (Tabela 2).

Para o Cd, observou-se que *Gigaspora gigantea*, *Glomus clarum*-CMM e *Glomus clarum*-UFLA reduziram em 28% os teores deste metal na parte aérea, no primeiro corte, com 39 mg kg⁻¹, contra 54 mg kg⁻¹ de Cd no controle. No segundo corte, alguns isolados foram capazes de reduzir a concentração desse metal na planta, como: *A. spinosa*, *A. morrowiae*-UFLA, *Glomus etunicatum*, *S. gregaria*, *Gigaspora albida* e *Glomus clarum*-UFLA. Do mesmo modo, os teores de Cd nas raízes foram reduzidos nos tratamentos com *Gigaspora gigantea*, *Glomus clarum*-CMM, *Gigaspora albida* e *P. occultum*.

As plantas sem FMA apresentaram teores médios na matéria seca da parte aérea de 1.511 e 53 mg kg⁻¹ de Zn e Cd, respectivamente, que se encontram muito acima do nível considerado tóxico para esses metais (Zn = 100 a 400 mg kg⁻¹; Cd = 5 a 30 mg kg⁻¹ na matéria seca) (Kabata-Pendias & Pendias, 2001). Apesar de alguns FMA terem reduzido os teores de Zn e Cd na parte aérea da *B. decumbens*, estes ainda encontravam-se muito elevados e acima da faixa considerada tóxica para as espécies vegetais em geral (Kabata-Pendias & Pendias, 2001). Os efeitos dos FMA na redução da concentração de Zn e Cd, na parte aérea das plantas, estão

relatados em diversos estudos (Schüepp et al., 1987; Weissenhorn & Leyval, 1995; Leyval et al., 1997), sendo estes efeitos resultantes de vários mecanismos como: efeito de diluição decorrente do favorecimento do crescimento da planta (Christie et al., 2004); exclusão da absorção, por meio da precipitação ou quelação dos metais na rizosfera (Kaldorf et al., 1999); redução da absorção, em consequência da retenção e imobilização dos metais nas estruturas fúngicas (Khan et al., 2000; Zhu et al., 2001; González-Chávez et al., 2004), com consequente redução da transferência dos metais das raízes para a parte aérea (Joner et al., 2000).

Os isolados causaram redução dos teores de Cu na parte aérea das plantas (Tabela 2). Houve efeito significativo, no primeiro corte, em plantas associadas com diversos isolados (*A. morrowiae*-UFLA, *Gigaspora gigantea*, *Glomus clarum*-CMM, *Glomus etunicatum*, *S. gregaria*, *Gigaspora margarita*, *Glomus clarum*-UFLA e *P. occultum*), com redução média de 63%, em relação ao controle. No segundo corte, isto ocorreu apenas para *Gigaspora albida* e *P. occultum*. Os teores de Cu nas raízes aumentaram substancialmente na maioria dos tratamentos, tendo-se elevado de 21 mg kg⁻¹, no tratamento sem inoculação, para um valor médio de 300 mg kg⁻¹ nos tratamentos com efeito significativo, correspondente a um aumento médio de 1.329%.

Concentrações elevadas de Cu nas raízes micorrizadas foram observadas em outro estudo, por González-Chávez et al. (2004), atribuídas à produção de glomalina nas hifas de FMA. Segundo estes autores, glomalinas possuem alta capacidade para reter este elemento, o que contribui para menor translocação para a parte aérea e, como consequência, menor efeito do excesso de Cu no solo.

Com relação ao Pb, sua concentração foi elevada no solo; na parte aérea da planta, no entanto, foi baixa e influenciada apenas por *S. heterogama* e *A. morrowiae*-UFLA, no primeiro corte, e por nenhum isolado no segundo corte e nas raízes. Em nenhum tratamento a concentração de Pb, na parte aérea, esteve próximo ao nível crítico de toxidez (30 a 300 mg kg⁻¹) proposto por Kabata-Pendias & Pendias (2001), o que confirma a baixa biodisponibilidade deste metal no solo estudado.

Apesar de ter havido decréscimo acentuado na produção de matéria seca, na parte aérea do primeiro para o segundo corte (Tabela 1), a concentração média de Zn, Cd e Pb, na planta, não diferiu muito entre estes cortes (primeiro corte: Zn, 1.375; Cd, 48; Pb, 5,6 mg kg⁻¹; segundo corte: Zn, 1.379; Cd, 39; Pb, 5,2 mg kg⁻¹). Entretanto, houve grande diminuição nos teores de Cu (de 14,6 para 6,2 mg kg⁻¹ do primeiro para o segundo corte), que corresponde a redução de 58%. Isto ocorreu em razão, principalmente, da elevada capacidade de retenção desse elemento nas raízes.

Verificou-se relação inversa entre os teores de Cd e Zn e a produção de matéria seca da planta. A matéria seca da parte aérea, no primeiro corte, foi linearmente reduzida com os teores de Cd na planta ($y = 15,86 - 0,2155x$; $r = -0,84$; $p \leq 0,01$) e de Zn ($y = 16,26 - 0,00785x$; $r = -0,72$; $p \leq 0,01$), em que x é a concentração de metal em mg kg⁻¹ matéria seca vegetal. Para o segundo corte comportamento semelhante foi observado de acordo com as equações: $y = 10,43 - 0,1652x$; $r = -0,70$; $p \leq 0,01$ (Cd) e $y = 16,77 - 0,00928x$; $r = -0,74$; $p \leq 0,01$ (Zn). Não foi verificada relação entre os teores de Cu e Pb da parte aérea e a matéria seca.

Tabela 2. Teores de Zn, Cd, Cu e Pb, na matéria seca da parte aérea e raízes de *Bracharia decumbens*, com diferentes FMA, em vasos com solo contaminado com metais pesados⁽¹⁾.

Tratamento	Teor de metais em <i>B. decumbens</i> (mg kg ⁻¹)											
	Zn			Cd			Cu			Pb		
	1º corte	2º corte	Raiz	1º corte	2º corte	Raiz	1º corte	2º corte	Raiz	1º corte	2º corte	Raiz
1. Controle	1.501abc	1.521a	1.585a	54abc	51a	63a	20,2bc	7,0abc	21bc	5,3cdef	5,0a	29abc
2. <i>Scutellospora heterogama</i>	1.315cdefg	1.336a	1.477a	50abcd	38ab	55abcde	24,0ab	7,0abc	292a	9,0ab	5,8a	38ab
3. <i>Acaulospora spinosa</i>	1.255defg	1.259a	1.323a	45cde	36b	51abcde	25,4ab	5,9abcd	235ab	8,6abc	5,8a	38ab
4. <i>Acaulospora morrowiae</i> -UFLA	1.207efg	1.331a	1.517a	45cdef	31b	51abcde	7,4d	5,7cd	258a	9,1a	4,8a	48a
5. <i>Gigaspora gigantea</i>	1.234defg	1.305a	1.416a	44def	41ab	43e	7,4d	6,0abcd	324a	5,7bcde	6,0a	39ab
6. <i>Glomus clarum</i> -CMM	1.164fg	1.541a	1.375a	36f	42ab	50bcde	7,5d	6,3abcd	280a	5,8abcde	5,4a	17c
7. <i>Glomus etunicatum</i>	1.412abcde	1.286a	1.475a	47bcd	35b	51abcde	7,8d	6,3abcd	258a	4,6def	5,3a	45a
8. <i>Scutellospora gregaria</i>	1.453abcd	1.363a	1.270a	55ab	37b	53abcde	7,1d	5,8bcd	195abc	3,4ef	5,5a	28abc
9. <i>Acaulospora morrowiae</i> -CMM	1.348bcdefg	1.369a	1.862a	54abc	44ab	59abc	22,0abc	5,8abcd	287a	5,7bcde	6,0a	45a
10. <i>Gigaspora margarita</i>	1.558ab	1.381a	1.846a	57a	41ab	56abcd	8,1d	6,0abcd	404a	3,3ef	5,0a	31abc
11. <i>Scutellospora pellucida</i>	1.364bcdef	1.492a	1.732a	45cde	43ab	56abcd	26,4a	6,1abcd	296a	5,3cdef	4,6a	41ab
12. <i>Acaulospora scrobiculata</i>	1.551ab	1.497a	1.491a	53abcd	42ab	61ab	23,4abc	7,2ab	23bc	4,9def	4,5a	29abc
13. <i>Glomus albida</i>	1.510abc	1.258a	1.219a	46bcde	32b	44de	17,5c	5,5d	18bc	3,8ef	4,0a	24bc
14. <i>Glomus clarum</i> -UFLA	1.140g	1.304a	1.543a	37ef	34b	52abcde	7,2d	7,4a	307a	7,6abcd	5,4a	41ab
15. <i>Paraglomus occultum</i>	1.619a	1.437a	1.441a	55ab	39ab	47cde	7,6d	5,5d	7c	2,1f	4,4a	39ab

⁽¹⁾Médias seguidas por letras iguais na coluna, não diferem entre si pelo teste de Tukey, a 5% de probabilidade.

Deve-se ressaltar, no entanto, que estes dois metais apresentam-se em baixa concentração no solo, em relação ao Zn e Cd. Estes resultados contêm evidências de que a sensibilidade da *B. decumbens* ao excesso de metais no solo é resultante da elevada concentração de Zn e Cd, na parte aérea da planta, atingindo concentrações tóxicas (Kabata-Pendias & Pendias, 2001).

A quantidade total de metais acumulada na planta e a respectiva distribuição nas raízes são apresentadas na Figura 2. Verificou-se que os FMA influenciaram a extração dos quatro metais estudados, porém este efeito foi diferenciado entre os isolados fúngicos e o metal. Entre os FMA estudados, apenas *A. spinosa*, *A. morrowiae*-UFLA

e *Gigaspora gigantea* aumentaram simultaneamente a extração dos quatro metais, o que indica adaptação destes isolados às concentrações elevadas destes metais no solo. De fato, *Gigaspora gigantea* foi encontrada em solos com elevada contaminação de vários metais na Índia (Sambandan et al., 1992; Raman et al., 1993). *A. morrowiae* também foi encontrada em alta frequência, em solos contaminados com metais pesados, em Minas Gerais (Klauber-Filho et al., 2002).

Neste trabalho, outros isolados apresentaram baixa capacidade de favorecer o acúmulo de metais na *B. decumbens*. Isto ocorre em razão do reduzido efeito na produção de matéria seca, como no caso da

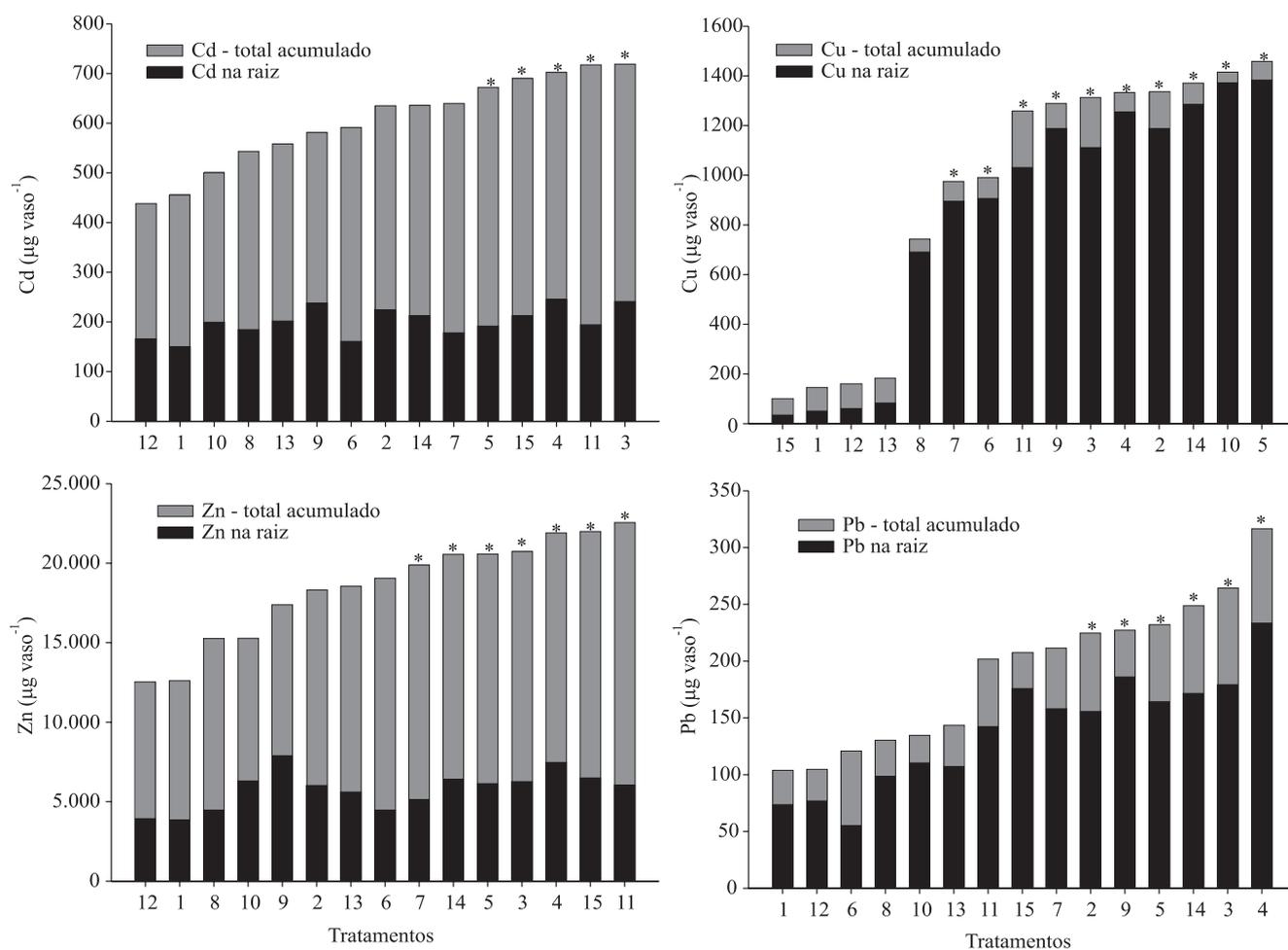


Figura 2. Acúmulo (total e nas raízes) de Cd, Zn, Cu e Pb, nas plantas de *Brachiaria decumbens*, cultivadas em vasos com solo contaminado com metais pesados, nos diferentes tratamentos: 1, Controle; 2, *Scutellospora heterogama*; 3, *Acaulospora spinosa*; 4, *Acaulospora morrowiae*-UFLA; 5, *Gigaspora gigantea*; 6, *Glomus clarum*-CMM; 7, *Glomus etunicatum*; 8, *Scutellospora gregaria*; 9, *Acaulospora morrowiae*-CMM; 10, *Gigaspora margarita*; 11, *Scutellospora pellucida*; 12, *Acaulospora scrobiculata*; 13, *Gigaspora albida*; 14, *Glomus clarum*-UFLA; 15, *Paraglomus occultum*. *Significativo em relação ao controle, pelo teste de Tukey, a 5% de probabilidade.

A. scrobiculata, ou da baixa concentração de metais na planta como observado em *Gigaspora albida* (Tabela 2).

A maior frequência de isolados com efeito significativo no acúmulo de metal foi observado para o Cu (dez isolados), com 1.380 µg por vaso, enquanto no controle o acúmulo foi de 146 µg por vaso, um acréscimo de 845%, sob a influência dos FMA, o que indica elevado potencial destes fungos para a extração de Cu do solo. Este resultado é coerente com a proposta de que a glomalina está envolvida na retenção do Cu (González-Chávez et al., 2002), e com fato de a elevada proporção de isolados eficazes, na absorção deste elemento, poder ter relação com a alta incidência de FMA, em solos contaminados com este metal (Silva et al., 2005).

As quantidades acumuladas dos outros metais (Cd, Zn e Pb) na planta também foram influenciadas pelos FMA, mas houve menor frequência e consistência dos resultados, em relação ao que foi verificado para o Cu. Apenas *Gigaspora gigantea*, *P. occultum*, *A. morrowiae*-UFLA, *S. pellucida* e *A. spinosa* apresentaram efeito significativo sobre a quantidade acumulada de Cd na planta, média de 700 µg por vaso, enquanto no controle esta foi de 456 µg por vaso, o que representa um aumento de 54%. Além desses fungos, *Glomus etunicatum* e *Glomus clarum*-UFLA também contribuíram para elevar a quantidade acumulada de Zn na planta, que aumentou de 12.616 µg por vaso (controle) para 21.173 µg por vaso, um aumento de 68%. Os fungos *S. heterogama*, *A. spinosa*, *A. morrowiae*-UFLA, *Gigaspora gigantea*, *A. morrowiae*-CMM e *Glomus clarum*-UFLA aumentaram a quantidade total de Pb acumulada na planta, com 252 µg por vaso, enquanto no controle esta foi de apenas 104 µg por vaso, um aumento de 142%.

A quantidade de metal acumulada na parte aérea, em relação às raízes, difere de modo acentuado para os diferentes metais e FMA. Na Figura 2, observa-se que as plantas com inoculação de FMA eficientes, com efeito significativo no acúmulo total, apresentaram 31, 30 e 72% de Cd, Zn e Pb acumulados nas raízes, respectivamente, proporções semelhantes às encontradas para as plantas sem FMA. A proporção de Cu nas raízes aumentou de 35%, nas plantas sem FMA para 91% nas plantas com FMAs eficientes. Isto, possivelmente, deve-se à maior produção de glomalinas por estes isolados (González-Chávez et al., 2002), o que resulta em maior capacidade da *B. decumbens*, com associação micorrízica, de reter esse metal nas raízes.

Baseando-se nas quantidades totais extraídas em relação à quantidade de metais pesados no solo, têm-se valores de eficiência de extração de: 2,5% para Cu e Cd, e inferior a 1% para Zn e Pb, para plantas com FMA, enquanto para as plantas sem FMA, esses valores foram inferiores a 0,3% para Cu, Zn e Pb, e de 1,7% para o Cd. Embora a eficiência de fitoextração pareça baixa, esta se encontra na faixa estimada por outros autores (Ebbs et al., 1997). Os benefícios dos FMA para a fitoextração de metais pesados e o potencial de crescimento e de hospedeira universal para os FMA, tornam *B. decumbens* uma planta promissora, para uso em programas de fitorremediação de áreas contaminadas com metais pesados.

Conclusões

1. A redução nos teores de metais na parte aérea de *Brachiaria decumbens*, causada pela micorriza, ameniza a toxidez dos metais, o que favorece o crescimento e, como consequência, a maior extração de metais do solo.

2. *Acaulospora spinosa*, *A. morrowiae*-UFLA e *Gigaspora gigantea* são capazes de aumentar a extração simultânea de Zn, Cd, Cu e Pb do solo pela *B. decumbens*; esses isolados são os mais promissores para fitoextração de metais pesados em solo contaminado.

3. A contribuição dos fungos micorrízicos arbusculares para o acúmulo de metais pesados na *Brachiaria decumbens* é maior para o Cu, cuja retenção nas raízes é favorecida pela micorriza.

Agradecimentos

Ao CNPq, pelo financiamento da pesquisa; à Fapemig, pela concessão de bolsa a Silvana da Silva; à Capes, pela concessão de bolsa a Cláudio Roberto Fonseca Sousa Soares.

Referências

- CARNEIRO, M.A.C.; SIQUEIRA, J.O.; MOREIRA, F.M.S. Estabelecimento de plantas herbáceas em solos com contaminação de metais pesados e inoculação de fungos micorrízicos arbusculares. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, v.36, p.1443-1452, 2001.
- CHEN, B.D.; LI, X.L.; TAO, H.Q.; CHRISTIE, P.; WONG, M.H. The role of arbuscular mycorrhiza in zinc uptake by red clover growing in a calcareous soil spiked with various quantities of zinc. *Chemosphere*, v.50, p.839-846, 2003.

- CHRISTIE, P.; LI, X.; CHEN, B. Arbuscular mycorrhiza can depress translocation of zinc to shoots of host plants in soils moderately polluted with zinc. **Plant and Soil**, v.261, p.209-217, 2004.
- EBBS, S.D.; LASAT, M.M.; BRADY, D.J.; CORNISH, J.; GORDON, R.; KOCHIAN, L.V. Phytoextraction of cadmium and zinc from a contaminated soil. **Journal of Environmental Quality**, v.26, p.1424-1430, 1997.
- FERREIRA, D.F. Análise estatística por meio do SISVAR para Windows versão 4.0. In: REUNIÃO ANUAL DA REGIÃO BRASILEIRA DA SOCIEDADE INTERNACIONAL DE BIOMETRIA, 45., 2000, São Carlos, SP. **Anais**. São Carlos: UFSCar, 2000. p.255-258.
- GAUR, A.; ADHOLEYA, A. Prospects of arbuscular mycorrhizal fungi in phytoremediation of heavy metal contaminated soils. **Current Science**, v.86, p.528-534, 2004.
- GIOVANNETTI, M.; MOSSE, B. An evaluation of techniques to measure vesicular-arbuscular infection in roots. **New Phytologist**, v.84, p.489-500, 1980.
- GONZÁLEZ-CHÁVEZ, C.; D'HAEN, J.; VANGRONSVELD, J.; DODD, J.C. Copper sorption and accumulation by the extraradical mycelium of different *Glomus* spp. (arbuscular mycorrhizal fungi) isolated from the same polluted soil. **Plant and Soil**, v.240, p.287-297, 2002.
- GONZÁLEZ-CHÁVEZ, M.C.; CARRILLO-GONZÁLEZ, R.; WRIGTH, S.F.; NICHOLS, K.A. The role of glomalin, a protein produced by arbuscular mycorrhizal fungi, in sequestering potentially toxic elements. **Environmental Pollution**, v.130, p.317-323, 2004.
- JONER, E.J.; BRIONES, R.; LEYVAL, C. Metal-binding capacity of arbuscular mycorrhizal mycelium. **Plant and Soil**, v.226, p.227-234, 2000.
- KABATA-PENDIAS, A.; PENDIAS, H. **Trace elements in soils and plants**. Boca Raton: CRC Press, 2001. 413p.
- KALDORF, M.; KUHN, A.J.; SCHRÖDER, W.R.; HILDEBRANDT, U.; BOTHE, H. Selective element deposits in maize colonized by a heavy metal tolerance conferring arbuscular mycorrhizal fungus. **Journal of Plant Physiology**, v.154, p.718-728, 1999.
- KHAN, A.G.; KUEK, C.; CHAUDHRY, T.M.; KHOO, C.S.; HAYES, W.J. Role of plants, mycorrhizae and phytochelators in heavy metal contaminated land remediation. **Chemosphere**, v.21, p.197-207, 2000.
- KLAUBERG-FILHO, O. **Ecologia e atividade de fungos micorrízicos arbusculares em solo poluído com metais pesados**. 1999. 161p. Tese (Doutorado) - Universidade Federal de Lavras, Lavras.
- KLAUBERG-FILHO, O.; SIQUEIRA, J.O.; MOREIRA, F.M.S. Fungos micorrízicos arbusculares em solos de área poluída com metais pesados. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.26, p.125-134, 2002.
- KLAUBERG-FILHO, O.; SIQUEIRA, J.O.; MOREIRA, F.M.S.; SOARES, C.R.F.S.; SILVA, S. Ecologia, função e potencial de aplicação de fungos micorrízicos arbusculares em condições de excesso de metais pesados. In: VIDAL-TORRADO, P.; ALLEONI, L.R.F.; COOPER, M.; SILVA, A.P.; CARDOSO, E.J. (Ed.). **Tópicos em ciência do solo**. Viçosa: UFV; Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2005. p.85-144.
- LASAT, M.M. Phytoextraction of toxic metals: a review of biological mechanisms. **Journal of Environmental Quality**, v.31, p.109-120, 2002.
- LEYVAL, C.; TURNAU, K.; HASELWANDTER, K. Effect of heavy metal pollution on mycorrhizal colonization and function: physiological, ecological and applied aspects. **Mycorrhiza**, v.7, p.139-153, 1997.
- NASCIMENTO, C.W.A.; XING, B. Phytoextraction: a review on enhanced metal availability and plant accumulation. **Scientia Agricola**, v.63, p.299-311, 2006.
- NOGUEIRA, M.A.; MAGALHÃES, G.C.; CARDOSO, E.J.B.N. Manganese toxicity in mycorrhizal and phosphorus-fertilized soybean plants. **Journal of Plant Nutrition**, v.27, p.141-156, 2004.
- ORLOWSKA, E.; RYSZKA, P.; JURKIEWICZ, A.; TURNAU, K. Effectiveness of arbuscular mycorrhizal fungal (AMF) strains in colonization of plants involved in phytostabilisation of zinc wastes. **Geoderma**, v.129, p.92-98, 2005.
- PHILLIPS, J.M.; HAYMAN, D.S. Improved procedures for cleaning roots and staining parasitic and vesicular-arbuscular mycorrhizal fungi for rapid assessment of infection. **Transactions of the British Mycological Society**, v.55, p.158-160, 1970.
- RAMAN, N.; NAGARAJAN, N.; GOPINATHAN, S.; SAMBANDAN, K. Mycorrhizal status of plant species colonizing a magnesite mine spoil in India. **Biology and Fertility of Soils**, v.16, p.76-78, 1993.
- RASKIN, I.; SMITH, R.D.; SALT, D.E. Phytoremediation of metals: using plants to remove pollutants from the environment. **Current Opinion in Biotechnology**, v.18, p.221-285, 1997.
- RIBEIRO-FILHO, M.R.; CURI, N.; SIQUEIRA, J.O.; MOTTA, P.E.F. Metais pesados em solos de área de rejeitos de indústria de processamento de zinco. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.23, p.453-464, 1999.
- SAFIR, G.R.; SIQUEIRA, J.O.; BURTON, T.M. Vesicular-arbuscular mycorrhizae in a wastewater-irrigated oldfield ecosystem in Michigan. **Plant and Soil**, v.121, p.187-196, 1990.
- SAMBANDAN, K.; KANNAN, K.; RAMAN, N. Distribution of vesicular-arbuscular mycorrhizal fungi in heavy metal polluted soils of Tamil Nadu, India. **Journal of Environmental Biology**, v.13, p.159-167, 1992.
- SCHÜEPP, H.; DEHN, B.; STICHER, H. Interaktionen zwischen VS-Mykorrhizen und Schwermetallbelastungen. **Angewandte Botanik**, v.61, p.85-95, 1987.
- SILVA, G.A.; TRUFEM, S.F.B.; SAGGIN JÚNIOR, O.; MAIA, L.C. Arbuscular mycorrhizal fungi in a semiarid copper mining area in Brazil. **Mycorrhiza**, v.15, p.46-53, 2005.
- SIQUEIRA, J.O.; PEREIRA, M.A.M.; SIMÃO, J.B.P.; MOREIRA, F.M.S. Efeito da formononetina (7 Hidroxi, 4' metoxi Isoflavona) na

colonização micorrízica e crescimento do milho em solo contendo excesso de metais pesados. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.23, p.561-567, 1999a.

SIQUEIRA, J.O.; POUYÚ ROJAS, E.; MOREIRA, F.M.S. Micorrizas arbusculares no crescimento pós-transplante de mudas de árvores em solo com excesso de metais pesados. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.23, p.569-580, 1999b.

SMITH, S.E.; READ, D.J. **Mycorrhizal symbiosis**. London: Academic Press, 1997. 589p.

SOARES, C.R.F.S. **Fosfato e micorriza arbuscular na toxicidade de metais pesados para a trema (*Trema micrantha* (L.) Blum.) e**

braquiária (*Brachiaria decumbens* Stapf.). 2004. 143p. Tese (Doutorado) - Universidade Federal de Lavras, Lavras.

STÜRMER, S.L.; SIQUEIRA, J.O. Diversity of arbuscular mycorrhizal fungi in Brazilian ecosystems. In: MOREIRA, F.M.S.; SIQUEIRA, J.O.; BRUSSAARD, L. (Ed.). **Soil biodiversity in Amazonian and other Brazilian ecosystems**. Wallingford: CABI-Pub., 2006. p.206-236.

WEISSEHORN, I.; LEYVAL, C. Root colonization of maize by a Cd-sensitive and a Cd-tolerant *Glomus mosseae* and cadmium uptake in sand culture. **Plant and Soil**, v.175, p.233-238, 1995.

ZHU, Y.G.; CHRISTIE, P.; LAIDLAW, A.S. Uptake of Zn by arbuscular mycorrhizal white clover from Zn-contaminated soil. **Chemosphere**, v.42, p.193-199, 2001.

Recebido em 20 de fevereiro de 2006 e aprovado em 20 de setembro de 2006