

UNIVERSIDADE FEDERAL DOS VALES DO
JEQUITINHONHA E MUCURI – UFVJM

FELIPE GALUPPO FONSECA

TOLERÂNCIA DE GRAMÍNEAS FORRAGEIRAS AO CÁDMIO E
BIODISPONIBILIDADE NO SOLO

DIAMANTINA - MG
2012

FELIPE GALUPPO FONSECA

TOLERÂNCIA DE GRAMÍNEAS FORRAGEIRAS AO CÁDMIO E
BIODISPONIBILIDADE NO SOLO

Dissertação apresentada à Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Produção Vegetal para a obtenção do título de “Mestre”.

Orientador
Prof. Dr. Enilson de Barros Silva

DIAMANTINA - MG
2012

FELIPE GALUPPO FONSECA

TOLERÂNCIA DE GRAMÍNEAS FORRAGEIRAS AO CÁDMIO E
BIODISPONIBILIDADE NO SOLO

Dissertação apresentada à Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Produção Vegetal, para a obtenção do título de “Mestre”.

APROVADA em 27 de novembro de 2012

Prof. Dr. Paulo Henrique Graziotti - UFVJM
Membro

Prof. Dr. José Lavres Júnior – CENA/USP
Membro

Prof. Dr. Enilson de Barros Silva - UFVJM
Presidente

DIAMANTINA - MG
2012

Ofereço

A minha querida mãe Mônica, pelo imenso esforço, apoio e confiança em mim depositados, e principalmente pelo amor incondicional.

Aos meus irmãos, Pedro Henrique e Júlia, pela torcida e cumplicidade.

E a Deus, por ter me acompanhado e cuidado em todos os momentos.

Dedico

Ao meu querido pai Carlos Roberto (In Memoriam), e minha avó materna Mariza (In Memoriam), que infelizmente não poderão estar presentes neste momento tão feliz da minha vida, em forma de gratidão por todo apoio, companheirismo e confiança.

Ao meu avô Luis Ottoni, exemplo de vida, que esta sempre me incentivando e torcendo por mim.

Aos meus tios, que sempre me trataram como filho.

E aos meus avós paternos Ziro e Consuelo (In Memoriam) pela certeza de sempre estarem juntos comigo.

AGRADECIMENTOS

À Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri (UFVJM) pela oportunidade para realização do curso e contribuição com a minha formação acadêmica.

À Coordenadoria de Aperfeiçoamento do Pessoal de Nível Superior (Capes) e Fundação de Amparo à Pesquisa (Fapemig) pela concessão de bolsa de estudo.

Ao professor e orientador Enilson de Barros Silva, pela amizade, orientação, apoio e paciência durante o mestrado e principalmente às contribuições para minha formação profissional e crescimento pessoal, também o bom convívio em todos esses anos, os quais foram fonte de muito aprendizado.

Aos professores Luís Reynaldo Ferracciú Alleoni e José Lavres Júnior pela orientação e contribuição para a conclusão deste trabalho.

Ao Departamento de Ciência do Solo da Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz (ESALQ/USP) pela disponibilização dos laboratórios para realização das análises de amostras de solo.

Aos funcionários não docentes dos setores de Química e Fertilidade do Solo e Mineralogia do Solo do Departamento de Ciência do Solo da ESALQ/USP pela assistência nas análises de solo.

À Marina Colzato e ao Luis Antonio Silva Junior, técnicos de nível superior do Departamento de Ciência do Solo da ESALQ/USP, pela assistência nas análises químicas de solo e companhia no dia-a-dia.

Aos amigos Sheila, Bárbara, Rachel, Heitor, Russo, Lari, Sandra, Sávio e Moises pela realização dos experimentos, companhia e principalmente incentivo para que tudo desse certo.

Aos amigos da ESALQ/USP, Ana Lo, Arlete, Luciano, Paulinho, Fabi, Gustavo, Alice, Adir, Poter, Yeis, Negão, Jairo, Alexis, Evandro, Carlinha e Beatriz pela força nos momentos difíceis, pela boa convivência e por tornaram os dias em Piracicaba muito mais divertidos.

Aos amigos de Sete Lagoas que sempre estiveram presentes, aos amigos de Diamantina, da Republica Carandiru, e aos irmãos de Republica Dionísio's que me deram força e tornaram os momentos mais felizes, descontraídos e que, de uma forma ou de outra, foram muito importantes na concretização deste trabalho.

A todos os familiares pelo incentivo e carinho.

RESUMO

FONSECA, Felipe Galuppo. **Tolerância de gramíneas forrageiras a cádmio e biodisponibilidade no solo**, 2012. 64p. (Dissertação - Mestrado em Produção Vegetal) - Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri, Diamantina, 2012.

Esse trabalho foi desenvolvido com os objetivos de avaliar a tolerância de gramíneas forrageiras e a absorção, acúmulo e disponibilidade no solo de cádmio (Cd). Os experimentos foram instalados em condições de casa de vegetação do Departamento de Agronomia da Faculdade de Ciências Agrárias da Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri, Diamantina (MG). As forrageiras estudadas foram: *Panicum maximum* cv. Aruana e cv. Tanzânia e *Brachiaria decumbens* cv. Basilisk, *Brachiaria brizantha* cv. Xaraés e cv. Marandu e as doses de Cd foram 0, 5, 10 e 20 mg L⁻¹ de solução nutritiva e 0, 2, 4 e 12 mg kg⁻¹ de solo. O delineamento experimental foi inteiramente casualizado, com quatro repetições, sendo o período experimental de 90 dias, em ambos os experimentos. Determinou-se a massa seca e os teores de Cd na parte aérea, colmo e raízes das forrageiras. Os conteúdos de Cd foram calculados com base nos teores e nas produções de massa seca em cada parte da planta. No caso do experimento em solo, para avaliação do teor de Cd foram utilizados os extratores Mehlich-1, DTPA pH 7,3, teor semitotal - USEPA 3051 e teor total - USEPA 3052. O crescimento relativo das forrageiras foi reduzido pelas doses de Cd, tanto na solução nutritiva quanto no solo, configurando a fitotoxicidade do Cd nessas plantas. Porém a sequência de suscetibilidade foi diferenciada para os experimentos, sendo a ordem decrescente de suscetibilidade na solução nutritiva a seguinte: Aruana > Tanzânia > Xaraés > Basilisk > Marandu, enquanto no solo a sequência foi: Marandu > Xaraés > Aruana > Tanzânia > Basilisk. Essa diferença de suscetibilidade é atribuída às diferentes interações das forrageiras com o solo. Em ambos os experimentos o teor de Cd nas forrageiras aumentou em função das doses Cd. Porém a presença de Cd na solução nutritiva fez com que o acúmulo e índice de translocação apresentassem resposta diferenciada para as forrageiras. Os extratores Mehlich-1 e DTPA foram eficientes para expressar o crescimento da planta. De toda forma, as forrageiras foram incapazes de limitar a absorção e translocação de Cd, acarretando em toxicidade e redução de crescimento e altos teores de Cd em todas as partes da planta, não proporcionando barreira à entrada do Cd na cadeia alimentar.

Palavras-chave: Fitorremediação, metais pesados, *Brachiaria*, *Panicum*, extratores.

ABSTRACT

FONSECA, Felipe Galuppo. **Forage grasses tolerance to cadmium and bioavailability on soil**, 2012. 64p. Dissertation (Masters in Vegetable Production) – Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri, Diamantina, 2012.

This work was carried out in order to evaluate the forage grasses tolerance and the absorption, accumulation and bioavailability of cadmium (Cd) on soil. The experiments were settled under conditions of greenhouse on the Department of Agronomy of the College of Agricultural Sciences of the *Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri*, Diamantina (MG), Brazil. The forages grasses evaluated were: *Panicum maximum* cv. Aruana and cv. Tanzânia and *Brachiaria decumbens* cv. Basilisk, *Brachiaria brizantha* cv. Xaraés and cv. Marandu and the four doses of Cd were: 0, 5, 10, and 20 mg l⁻¹ and the nutrients in solution 0, 2, 4 and 12 mg kg⁻¹ for soil, respectively. The experimental design was completely randomized with four replications, and the trial period of 90 days, in both experiments. The dry weight and concentration of Cd in shoots, stems and roots of forages were determined. The Cd content had been calculated based on the dry matter yield and content in each part of the plant. In the soil experiment, to measure the levels of Cd, there had been used the extractors Mehlich-1, DTPA pH 7.3, semi total content - USEPA 3051 and total content - USEPA 3052. The relative growth of the forage grasses was reduced with doses of Cd applied, both in the nutrient solution and on the soil, setting the phytotoxicity of Cd in these plants. However the sequence of susceptibility was different to the experiments, the decreasing order of susceptibility in the nutrient solution was: Aruana > Tanzania > Xaraés > Basilisk > Marandu, while in soil the sequence was: Marandu > Xaraés > Aruana > Tanzania > Basilisk. This difference in susceptibility is attributed to the different interactions of forage with soil. In both experiments (soil and nutrient solution) the Cd content in the forage increased due of increasing doses of Cd. Nevertheless the presence of Cd in the nutritive solution has made the accumulation and translocation index differently for the forages. Mehlich-1 and DTPA showed high positive correlation with relative growth of forages. The forages were unable to limit the absorption and translocation of Cd, resulting in toxicity and declining growth and high levels of Cd in all parts of the plant, providing no barrier to entry of Cd into the food chain.

Key words: Phytoremediation, heavy metals, *Brachiaria*, *Panicum*, extractors.

LISTA DE TABELAS

ARTIGO CIENTÍFICO I.		Pág.
Tabela 1	Dose crítica de toxidez (DCT) de Cd em solução nutritiva para reduzir 10% do crescimento relativo máximo da massa seca total dos cortes, do colmo e das raízes e nível crítico de toxidez (NCT) correspondente a DCT de cinco forrageiras num período de 90 dias de exposição após o corte de uniformização.....	20
ARTIGO CIENTÍFICO II.		
Tabela 1	Análise de química e de textura do solo antes da aplicação dos tratamentos.	41
Tabela 2	Equações de regressão ajustadas entre o teor de Cd nas diversas massas secas de cinco forrageiras, como variável dependente (y) das doses de Cd aplicadas (x) no solo, e nível crítico de toxidez (NCT) correspondente a DCT de cinco forrageiras num período de 90 dias após o corte de uniformização.....	46
Tabela 3	Equações de regressão ajustadas entre o acúmulo de Cd nas diversas massas secas de cinco forrageiras, como variável dependente (y) das doses de Cd aplicadas (x) no solo, e a dose de Cd (DCd_{Max}) correspondente ao acúmulo de Cd (ACd_{Max}) máximo num período de 90 dias após o corte de uniformização.....	49
Tabela 4	Equações de regressão ajustadas entre o teor de Cd no solo extraído Mehlich-1, DTPA pH 7,3, USEPA 3051 e USEPA 3052 como variável dependente (y) das doses de Cd aplicadas (x) no solo, e nível crítico de toxidez (NCT) no solo correspondente a DCT de cinco forrageiras num período de 90 dias após o corte de uniformização.....	52

LISTA DE FIGURAS

ARTIGO CIENTÍFICO I.		Pág.
Figura 1	Crescimento relativo do total dos cortes, do colmo e das raízes de cinco forrageiras em função de doses de Cd em solução nutritiva num período de 90 dias de exposição após o corte de uniformização.....	21
Figura 2	Teor de Cd na massa seca do total dos cortes, do colmo e da raiz de cinco forrageiras em função de doses de Cd em solução nutritiva num período de 90 dias de exposição após o corte de uniformização.....	23
Figura 3	Acúmulo de Cd na massa seca do total dos cortes, do colmo e das raízes de cinco forrageiras em função de doses de Cd em solução nutritiva num período de 90 dias de exposição após o corte de uniformização.....	25
Figura 4	Índice de translocação de Cd na massa seca do total dos cortes, do colmo e parte aérea das forrageiras em função de doses de Cd em solução nutritiva num período de 90 dias após o corte de uniformização.....	29
ARTIGO CIENTÍFICO II.		
Figura 1	Escore relativo da variável canônica da análise multivariada das forrageiras em função de doses de Cd aplicadas no solo e dose crítica de toxidez (DCT) num período de 90 dias após o corte de uniformização.....	44
Figura 2	Distribuição percentual de acúmulo de Cd na massa seca total dos cortes, do colmo e das raízes na dose de Cd (DCd_{Max}) para o máximo acúmulo de cinco forrageiras no solo num período de 90 dias após o corte de uniformização.....	51
Figura 3	Relação entre o crescimento relativo das forrageiras avaliada pela variável canônica e os extratores químicos do solo (Mehlich-1, DTPA pH 7,3, USEPA 3051 e USPEPA 3052) num período de 90 dias após o corte de uniformização.....	55
Figura 4	Coefficiente de transferência (ct) (relação entre Cd na parte aérea, $mg\ kg^{-1}$ /total Cd no solo, $mg\ kg^{-1}$) de cinco forrageiras em função de doses de Cd aplicadas no solo num período de 90 dias após o corte de uniformização.....	56

SUMÁRIO

	Pág.
RESUMO.....	
ABSTRACT.....	
LISTA DE TABELAS.....	
LISTA DE FIGURAS.....	
INTRODUÇÃO GERAL.....	10
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	123
ARTIGO CIENTIFICO I. CRESCIMENTO, ABSORÇÃO E TRANSLOCAÇÃO DE CÁDMIO EM GRAMÍNEAS FORRAGEIRAS.....	13
1 Resumo.....	13
2 Abstract.....	14
3 Introdução.....	15
4 Material e métodos.....	17
5 Resultados e discussão.....	19
6 Conclusões.....	33
7 Agradecimentos.....	33
8 Referências bibliográficas.....	33
ARTIGO CIENTIFICO II. BIODISPONIBILIDADE DE CÁDMIO EM SOLO CULTIVADO COM GRAMÍNEAS FORRAGEIRAS.....	37
1 Resumo.....	37
2 Abstract.....	38
3 Introdução.....	39
4 Material e métodos.....	41
5 Resultados e discussão.....	44
6 Conclusões.....	58
7 Agradecimentos.....	59
8 Referências bibliográficas.....	59
CONCLUSÃO GERAL.....	64

INTRODUÇÃO GERAL

O cádmio (Cd) é um elemento não essencial, que pode reduzir o desenvolvimento das plantas, interferindo principalmente em reações enzimáticas, promovendo diminuição da atividade metabólica e fotossíntese (BENAVIDES et al., 2005). Sua existência natural nos ambientes juntamente com as atividades antrópicas tem causado uma contaminação demasiada dos solos e das águas. Neste sentido torna-se cada vez mais importante a intensificação de estudos e pesquisas com intuito de eliminar ou amenizar os efeitos do Cd em áreas contaminadas.

Uma alternativa as tecnologias de remediação para essa contaminação, tanto “in situ” como “ex situ”, é a biorremediação, que engloba processos microbiológicos e emprego de plantas fitorremediadoras, sendo esta última de grande interesse pelo baixo custo, facilidade de desenvolvimento e aplicação. A fitorremediação é uma estratégia de biorremediação que consiste de procedimentos que envolvem o emprego de plantas e sua microbiota associada e de amenizantes do solo, além de práticas agronômicas que, se aplicadas em conjunto, removem, imobilizam ou tornam os contaminantes inofensivos ao ecossistema. Sua concepção funcional é baseada na fisiologia vegetal, na bioquímica do solo e na química dos contaminantes (ANDRADE et al., 2007). O processo de fitoextração ocorre, principalmente, através de plantas hiperacumuladoras. Essas plantas são capazes de se desenvolver em ambientes contaminados, acumulando altas concentrações de metais como: $> 10.000 \text{ mg kg}^{-1}$ de Mn e Zn; $> 1.000 \text{ mg kg}^{-1}$ de Cu, Ni e Pb; $> 100 \text{ mg kg}^{-1}$ de Cd, sem mostrar redução significativa no crescimento (ACCIOLY e SIQUEIRA, 2000; ZEITTOUNI et al., 2007).

Diversas espécies vegetais têm sido avaliadas e estudadas no intuito de serem promissoras para fitorremediação e recuperação de áreas degradadas. Por apresentarem características como rápido crescimento, exigência em fertilidade relativamente baixa, alta capacidade de perfilhamento e seu sistema radicular proporcionarem melhor suporte mecânico para o solo (PEREIRA, 2006), as gramíneas forrageiras podem ser consideradas promissoras para recuperação de áreas degradadas com metais pesados. Com intuito de estimular a recuperação de áreas degradadas, este trabalho foi realizado com gramíneas forrageiras (gênero *Brachiaria* e *Panicum maximum* Jacq) de boa aceitação no mercado, fácil manejo e baixa relação custo benefício. As gramíneas do gênero *Brachiaria* se destacam pela rusticidade e capacidade de adaptação aos diferentes ambientes, facilidade de manejo e interesse econômico. Enquanto as do gênero *Panicum maximum* apresentam boa produtividade e elevado valor nutritivo, porém o manejo é relativamente oneroso e necessitam

de solos com boa fertilidade (SOUZA et al., 1996). As gramíneas, podem ainda possibilitar a reutilização da área para produção animal. Vários autores têm mostrado que, em gramíneas, o Cd acumula-se mais nas raízes do que na parte aérea (BINGHAM et al., 1975; OLIVEIRA et al., 2005), reforçando a possibilidade de estratégias de recuperação de áreas degradadas por metais pesados com gramíneas forrageiras que posteriormente servirão de pasto para alimentação animal.

A qualidade do solo é determinada com base no teor de contaminantes, sendo estabelecidos padrões de acordo com as concentrações máximas permissíveis e as recomendadas para solos. A Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental (CETESB), por exemplo, normatiza alguns desses padrões (CETESB, 2005).

Devido à dificuldade e periculosidade dos métodos de extração total e semitotal, outros extratores químicos estão sendo estudadas no intuito de correlacionar eficientemente às quantidades extraídas do solo e as quantidades absorvidas pelas plantas. Não existe um procedimento definido, até o momento, para avaliar a disponibilidade de metais nos solos, sendo notória a grande dificuldade na definição de um extrato multielementar que abranja vários elementos simultaneamente e seja ao mesmo tempo eficiente em diagnosticar a correlação entre as disponibilidades no solo e para as diversas espécies vegetais. Estudos feitos com este propósito apontam que os extratores químicos que mais têm se destacado são as soluções de ácidos a exemplo do Mehlich 1, e substâncias quelantes e suas combinações, por exemplo, DTPA a pH 7,3 (DANG et al., 1990; KING e HAJJAR, 1990), sendo atribuída certa facilidade a esses extratores por serem utilizados na rotina laboratorial.

Objetivou-se então, com este trabalho, avaliar o crescimento, absorção, acúmulo e translocação de Cd em cinco gramíneas forrageiras cultivadas em solução nutritiva e solo contaminado, e desenvolver métodos de preparo de amostra explorando e comparando as potencialidades dos extratores Mehlich 1 e DTPA de amostras de solos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ACCIOLY, A.M.A.; SIQUEIRA, J.O. Contaminação química e biorremediação do solo. In: NOVAIS, R.F., ALVAREZ, V.H.V., SCHAEFER, C.E.G.R. **Tópicos em ciência do solo**. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo. v.1, 2000. p.299-352.
- ANDRADE, J.C.M.; TAVARES, R.S.L.; MAHLER, C.F. **Fitorremediação: o uso de plantas na melhoria da qualidade ambiental**. São Paulo: Oficina de Textos, 2007. 176p.
- BENAVIDES, P.M., GALLEGOS, S.M.; TOMARO, M.L. Cadmium toxicity in plants. **Brazilian Journal of Plant Physiology**, Londrina, v.17, n.1, p.21-34, 2005.
- BINGHAM, F.T.; PAGE, A.L.; MAHLER, R.J.; GANJE, T.J. Growth and cadmium accumulation of plants grown on a soil treated with a cadmium-enriched sewage sludge. **Journal of Environmental Quality**, Madison, v.4, n.2, p.207-211, 1975.
- CETESB. Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental. **Valores orientadores para solos e águas subterrâneas no estado de São Paulo**. Decisão de diretoria N° 195-2-005-E. (CETESB). 2005.
- DANG, Y.P.; CHHABRA, R.; VERMA, K.S. Effect of Cd, Ni, Pb and Zn on growth and chemical composition of onion and fenugreek. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, New York, v.21, n.9-10, p.717-735, 1990.
- KING, L.D.; HAJJAR, L.M. The residual effect of sewage sludge on heavy metal content of tobacco and peanut. **Journal of Environmental Quality**, Madison, v.19, n.4, p.738-748, 1990.
- OLIVEIRA, C.; SOBRINHO N.M.B.A.; MARQUES, V.S.; MAZUR, N. Efeitos da aplicação do lodo de esgoto enriquecidos com cádmio e zinco na cultura do arroz. **Revista Brasileira Ciência do Solo**, Viçosa, v.29, n.1, p.109-116, 2005.
- PEREIRA, A.R. **Como selecionar plantas para áreas degradadas e controle de erosão**. Belo Horizonte: FAPI, 2006. 150p.
- SOUZA, A.G.; SOARES FILHO, C.V.; MELLA, S.C. Espécies forrageiras recomendadas para o Paraná. In: MONTEIRO, A.L.G.; MORAES, A.; CORRÊA, E.A.S.; OLIVEIRA, J.C.; SÁ, J.P.G.; ALVES, S.J.; POSTIGLIONI, S.R.; CECATO, U. (Eds.). **Forragicultura no Paraná**. Londrina: CPAF. 1996. p.196-205.
- ZEITTOUNI, C.F.; BERTON, R.S.; ABREU, C.A. Fitoextração de cádmio e zinco de um latossolo vermelho-amarelo contaminado com metais pesados. **Bragantia**, Campinas, v.66, n.4, p.649-657, 2007.

ARTIGO CIENTÍFICO I

CRESCIMENTO, ABSORÇÃO E TRANSLOCAÇÃO DE CÁDMIO EM GRAMÍNEAS FORRAGEIRAS

RESUMO

Com o objetivo avaliar o crescimento, absorção, distribuição e acúmulo de Cd em forrageiras, instalou-se o experimento em condições de casa de vegetação do Departamento de Agronomia da Faculdade de Ciências Agrárias da Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri, Diamantina (MG). Sendo investigadas as forrageiras: *Panicum maximum* cv. Aruana e cv. Tanzânia e *Brachiaria decumbens* cv. Basilisk, *Brachiaria brizantha* cv. Xaraés e cv. Marandu e quatro doses de Cd (0, 5, 10, e 20 mg L⁻¹) em solução nutritiva. O delineamento experimental foi inteiramente casualizado, com quatro repetições. O período experimental foi de 90 dias. Determinou-se a massa seca e os teores de Cd na parte aérea, colmo e das raízes das forrageiras. Os conteúdos de Cd foram calculados com base nos teores e nas produções de massa seca em cada parte da planta. O crescimento de todas as forrageiras reduziu com o aumento das doses de Cd, sendo a Aruana a que apresentou maior sensibilidade e a Marandu a maior tendência à tolerância ao Cd. A redução do crescimento relativo foi de 42 e 85 % nas doses críticas de toxidez de Cd de 1,42 e 0,10 mg L⁻¹ para Marandu e Aruana. As demais forrageiras tiveram comportamento intermediário. A sequência de suscetibilidade ao Cd entre as forrageiras em ordem decrescente é Aruana > Tanzânia > Xaraés > Basilisk > Marandu. O índice de translocação (IT) foi diferentemente influenciado pelas doses de Cd nas forrageiras, sendo observados IT maiores que 60 % apenas na Basilisk em todas as doses de Cd e em Tanzânia na dose de 5 mg L⁻¹. Os menores teores de Cd foram verificados na parte aérea das forrageiras, sendo os menores teores verificados na Aruana variando entre 71,7 a 120,5 mg kg⁻¹ nas doses de 5 e 10 mg L⁻¹. Estes teores foram maiores que os considerados tóxicos para plantas e para dieta animal. Desta forma, as forrageiras foram incapazes de limitar a absorção de Cd, acarretando em toxicidade e redução de crescimento e altos teores de Cd em todas as partes da planta, não proporcionando barreira à entrada do Cd na cadeia alimentar.

Palavras-chave: Metal pesado, níveis críticos de toxidez, *Brachiaria*, *Panicum*.

ABSTRACT
GROWTH, ABSORPTION AND TRANSLOCATION OF CADMIUM IN FORAGE GRASSES

Aiming to evaluate the growth, absorption, distribution and accumulation of Cd in forage grasses, the experiment was settled under conditions of greenhouse at the Department of Agronomy of the College of Agricultural Sciences of the *Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri*, Diamantina (MG), Brazil. There had been investigated the forages *Panicum maximum* cv. Aruana and cv. Tanzânia and *Brachiaria decumbens* cv. Basilisk, *Brachiaria brizantha* cv. Xaraés and cv. Marandu and four doses of Cd (0, 5, 10, and 20 mg L⁻¹) in nutrient solution. The experimental design was completely randomized with four replications and the trial period lasted 90 days. The dry weight and the concentration of Cd in shoots, stems and roots of forages were determined. The contents of Cd were calculated based on the amounts and in the production of dry mass in each part of the plant. All the forages studied have the growth reduced with increasing doses of Cd, being the Aruana the one which presented the highest sensitivity while Marandu the one with a greater tolerance to Cd. Reduction of the relative growth were of 42 and 85% at critical doses of Cd toxicity of 1.42 and 0.10 mg L⁻¹ for Marandu and Aruana, respectively. The other forages had intermediate behavior. The sequence of susceptibility to Cd between forage in descending order is Aruana > Tanzania > Xaraés > Basilisk > Marandu. The rate of translocation (IT) was differently influenced by the levels of Cd in forages, being observed IT above than 60 % just in Basilisk at all doses of Cd and in Tanzania at a dose of 5 mg L⁻¹. The lower levels of Cd were found in shoots of the forages, with the lowest levels recorded in Aruana ranging from 71.7 to 120.5 mg kg⁻¹ at doses of 5 and 10 mg L⁻¹, respectively. These concentrations were higher than those considered toxic to plants and animal diet. Thus, the forages were unable to limit the absorption of Cd, resulting in toxicity and decline of growth and high levels of Cd accumulated in all parts of the plant, providing no barrier to the entry of Cd in the food chain.

Keywords: Heavy metal, critical toxicity levels, *Brachiaria*, *Panicum*.

INTRODUÇÃO

O cádmio (Cd) é um dos metais mais móveis na planta, sendo mais tóxico que o chumbo (Pb). Por ser facilmente acumulado na planta e a partir dela distribuir-se pelos vários níveis tróficos da cadeia alimentar, esse metal apresenta grande periculosidade, mesmo sob baixas concentrações (WONG et al., 1984). A toxidez pelo Cd pode ser notada desde a germinação da semente, em ambientes com altos teores de Cd com a redução da atividade das α e β amilases, comprometendo a respiração, e inibindo o crescimento do eixo embrionário e da radícula (CHUGH e SAWHNEY, 1996).

Como o Cd e o ferro (Fe) competem pelo mesmo sítio de absorção na membrana plasmática, um dos sintomas típicos de toxicidade deste metal pesado é a clorose, característica de deficiência de Fe (FOY et al., 1978). No entanto, as plantas podem apresentar diversos mecanismos de tolerância à ambientes com concentrações elevadas de metais pesados, sendo a complexação intracelular (quelação) um dos mecanismos mais importantes. Várias espécies de plantas apresentam essa quelação por meio da glutatona, fitoquelatinas, metalotioninas e histidinas sendo um mecanismo comum de desintoxicação de metais pesados, como o Cd (COBBETT e GOLDSBROUGH, 2002). Existem espécies vegetais tolerantes, capazes de acumular altas concentrações de metal tóxico (acima de 10.000 mg kg⁻¹ da massa seca) pela formação de fitoquelatinas, que irão sequestrar os íons metálicos, evitando concentrações críticas nas células (MOHR e SCHOPFER, 1995). A afinidade dos quelantes ao Cd proporciona formação dos complexos Cd-quelador, sendo o efeito deste metal anulado na célula (MAITANI et al., 1996; COBBETT, 2000; KUPPER et al., 2004; PAPOYAN e KOCHIAN, 2004). A compartimentalização do Cd, juntamente ao mecanismo de complexação, é outro importante mecanismo de tolerância. Os produtos da complexação são armazenados em estruturas celulares e/ou subcelulares, como vacúolos e tricomas, reduzindo assim sua concentração nas organelas e no citosol, evitando a desnaturação das enzimas (MA et al., 2005; KUPPER et al., 2007). As raízes também podem desencadear alguns mecanismos de tolerância a este metal. A riqueza de grupos carboxílicos com carga negativa nos polímeros da parede, junto à exudação de substâncias quelantes complexa o metal e diminuem temporalmente sua toxidez próxima às raízes (WANG e EVANGELOU, 1994; LOMBI et al., 2001), atuando como um filtro natural limitando a passagem do Cd para a parte aérea; além disso, a associação entre plantas e micorrizas pode contribuir com a tolerância das plantas pelos metais pesados, forçando a ligação do metal no meio extracelular e isolando-o no compartimento vacuolar (JENTSCHKE et al., 1999).

Estes mecanismos de tolerância das plantas a metais pesados podem atuar conjunta e, ou simultaneamente, promovendo a tolerância da planta ao stress causado por esses elementos (STEFFENS, 1990; WANG e EVANGELOU, 1994).

No intuito de estudar espécies vegetais para fins de recuperação de áreas degradadas por Cd é indispensável o conhecimento do crescimento, absorção, acúmulo e translocação do Cd na planta. Nesse sentido, é interessante entender a fitorremediação, que se fundamenta em algumas estratégias, utilizando plantas e microorganismos associados à rizosfera para remover e acumular os contaminantes em seus tecidos (fitoextração), promover transformação e degradação do contaminante por enzimas nos tecidos vegetais ou raízes (fitodegradação), proporcionar redução da biodisponibilidade de metais por meio da imobilização, seja por acumulação nas raízes ou precipitação na rizosfera (fitoimobilização), capacidade de volatilizar contaminantes (fitovolatilização) a fim de tornar os contaminantes inofensivos ao meio ambiente (ANDRADE et al., 2007). Desta forma estudo dos teores e acúmulos de Cd nas diferentes partes da planta são suma importância nesse contexto.

Os teores tóxicos de Cd em plantas, segundo Kabata-Pendias e Pendias (2001) variam de 5-30 mg kg⁻¹; enquanto Mengel e Kirkby (2001) citam que na dieta de animais teores acima de 0,5-1,0 mg kg⁻¹ são considerados tóxicos. Porém plantas classificadas como hiperacumuladoras são capazes de acumular em seus tecidos teores acima de 100 mg kg⁻¹ de Cd sem apresentar redução significativa de crescimento (ZEITTOUNI et al., 2007). As plantas podem acumular metais pesados em todos os tecidos, seja na parte aérea, colmos ou caule e raízes. Esse acúmulo nas diferentes partes da planta está intimamente relacionado ao índice de translocação, referente ao movimento ou a transferência do elemento das raízes para a parte aérea da planta, sendo representado pela porcentagem da quantidade total absorvida que foi transferida para a parte aérea; e que é característica particular para cada espécie.

Vários autores têm mostrado que, em gramíneas, o Cd acumula-se mais nas raízes do que na parte aérea (BINGHAM et al., 1975; OLIVEIRA et al., 2005), reforçando a possibilidade de estratégias de recuperação de áreas degradadas por metais pesados com gramíneas forrageiras que posteriormente servirão de pasto para alimentação animal.

Por apresentarem características como rápido crescimento, exigência em fertilidade relativamente baixa, alta capacidade de perfilhamento e seu sistema radicular proporcionarem melhor suporte mecânico para o solo (PEREIRA, 2006), as gramíneas forrageiras podem ser consideradas promissoras para recuperação de áreas degradadas com metais pesados. Com intuito de estimular a recuperação de áreas degradadas, este trabalho foi realizado com gramíneas forrageiras (gênero *Brachiaria* e *Panicum maximum*) de boa aceitabilidade no

mercado, fácil manejo e baixa relação custo benefício. As gramíneas do gênero *Brachiaria* se destacam pela rusticidade e capacidade de adaptação aos diferentes ambientes, facilidade de manejo e aceitabilidade econômica. Enquanto as do gênero *Panicum maximum* apresentam boa produtividade e elevado valor nutritivo, porém o manejo é relativamente oneroso e necessitam de solos com boa fertilidade (SOUZA et al., 1996). As gramíneas, podem ainda possibilitar a reutilização da área para produção animal.

O trabalho objetivou avaliar o crescimento, absorção, acúmulo e translocação de Cd em cinco gramíneas forrageiras em solução nutritiva contaminada.

MATERIAL E MÉTODOS

O experimento foi realizado em condições de casa de vegetação do Departamento de Agronomia da Faculdade de Ciências Agrárias da Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri (UFVJM), Diamantina (MG) (18° 14' S, 43° 36' W).

O delineamento experimental foi inteiramente casualizado, com quatro repetições. Foram estudadas as gramíneas forrageiras *Panicum maximum* cv. Aruana e *Panicum maximum* Jacq cv. Tanzânia, *Brachiaria brizantha* cv. Marandu e cv. Xaraés e, *Brachiaria decumbens* cv. Basilisk com aplicação de quatro doses de Cd (0, 5, 10 e 20 mg L⁻¹) na forma de cloreto de cádmio p.a. em solução nutritiva. As doses de Cd foram baseadas nas diretrizes de uso e ocupação do solo conforme indicado pela CETESB (2005). A solução nutritiva consistiu de reagentes puros, e a composição química da solução nutritiva de Hoagland e Arnon (1950) foram 210,1 mg de N, 31 mg de P, 234,6 mg de K, 200,4 mg de Ca, 48,6 mg de Mg, 64,2 mg de S, 500 µg de B, 20 µg de Cu, 648 µg de Cl, 5.022 µg de Fe, 502 µg de Mn, 11 µg de Mo e 50 µg de Zn por litro.

Foram utilizadas sementes adquiridas em casa especializada do município de Diamantina (MG). As sementes foram semeadas em bandejas contendo areia lavada em sala de germinação e a irrigação com água destilada até o transplante definitivo nos vasos (20 dias após a semeadura). Após o transplante das plântulas, forneceu-se, inicialmente, 2,0 L de solução nutritiva. Utilizaram-se soluções com forças iônicas de 25, 50, 75 e 100 % para adaptação das plântulas das forrageiras. As plântulas permaneceram por três dias em cada concentração, em sistema de aeração artificial contínuo, com uso de compressor de ar. As

plântulas foram mantidas nessa solução durante 30 dias após o período de adaptação até o corte de uniformização. A solução nutritiva foi renovada a cada 15 dias.

O período experimental foi de 90 dias, com início após o corte de uniformização das plantas. Com a finalidade de uniformizar o experimento, o corte de uniformização da massa seca da parte aérea foi efetuado a 0,03 m do colo da planta, deixando uma planta por vaso. Nesta época, foram aplicadas as doses crescentes de Cd na solução nutritiva. Durante todo o período experimental, o pH foi ajustado para $5,5 \pm 0,1$; por meio de correções diárias utilizando-se soluções diluídas de NaOH ou HCl, de acordo com a variação do pH da solução. O volume dos vasos foi completado, sempre que necessário, utilizando água deionizada. A renovação da solução nutritiva e das doses de Cd foi realizada a cada 15 dias.

As plantas para avaliação foram cultivadas em três períodos de crescimento. Aos 30 dias do corte de uniformização, foi efetuado o primeiro (1^a) corte de avaliação, a 0,03 m do colo das plantas, o segundo (2^o) corte ocorreu 30 dias após o primeiro, enquanto o terceiro (3^o) aos 30 dias após o segundo corte. Após efetuar o último corte, aos 90 dias do corte de uniformização, foi coletado o material entre o colo até onde recebeu os três cortes da parte aérea no tamanho de 0,03 m de altura, sendo considerado para fins de sistematização para apresentação dos resultados e na discussão com o nome de “colmo” da forrageira e as raízes. O corte realizado a 0,03 m acima do colo da planta foi para simular a profundidade do bocado dos animais.

O material vegetal coletado foi separado por tratamentos e repetições, lavadas em água de torneira e posteriormente em detergente diluído, água destilada novamente, solução de HCl $0,1 \text{ mol L}^{-1}$ e finalizando em água deionizada e, acondicionado em sacos de papel armazenados em estufa com circulação forçada de ar, à temperatura de $65 \text{ }^\circ\text{C}$, durante 72 horas. Após a secagem, o material foi pesado em balança analítica, obtendo a massa seca de três cortes, do colmo e das raízes. Os materiais foram moídos e submetidos à análise química para determinação dos teores de Cd na massa seca. O material moído foi submetido à digestão nitroperclórica (ácido nítrico - 65 % v/v e ácido perclórico - 70 % v/v, Merck) segundo metodologia descrita por Malavolta et al. (1997) e, o teor de Cd foi determinado por espectrometria de absorção atômica de forno de grafite (*Perkin-Elmer Analyst 800*). O controle de qualidade da análise de Cd foi verificado utilizando material de referência certificado (NIST SRM 1573a Folha de tomate).

Baseando-se no teor de Cd e massa seca produzida em cada parte das forrageiras, o acumulado de Cd foi calculado pela fórmula: $C = T \times MS$, onde C = acumulado de Cd ($\mu\text{g}/\text{vaso}$), T = teor de Cd (mg g^{-1}) e MS = massa seca (g). Com o acumulado de Cd na planta

foi calculado o índice de translocação =((quantidade acumulada do elemento no total dos cortes, no colmo e na parte aérea (cortes+colmo)/(quantidade acumulada do elemento na planta)) x 100 de acordo com Abichequer e Bohnen (1998).

Os resultados foram submetidos à análise de variância conjunta de experimentos que constaram do estudo de doses de Cd dentro de cada forrageira. As equações de regressão foram ajustadas para as variáveis em função das doses de Cd. As doses críticas de toxidez (DCT) de Cd na solução que proporcionou a redução de 10 % (DAVIS et al., 1978) na produção da massa seca total dos cortes (MSTC), do colmo (MSC) e das raízes (MSR) foram estimadas com base nas equações de regressão obtidas para cada forrageira. O nível crítico de toxidez (NCT) de Cd nas forrageiras, correspondente ao teor foliar de Cd requerido para inibir em 10 % a MSTC, MSC e MSR, foi estimado substituindo-se a DCT nas equações que relacionam as doses de Cd com essas variáveis.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

O crescimento relativo das forrageiras reduziu com aumento das doses de Cd na solução nutritiva ($P < 0,01$) durante 90 dias de exposição após o corte de uniformização (Figura 1). A forrageira Aruana teve a maior redução do crescimento com o aumento das doses de Cd, por outro lado, a Marandu foi à forrageira que apresentou menor redução com elevação da doses do metal, baseado nos coeficientes lineares das equações (Figura 1). Na dose mais baixa de Cd ($5,0 \text{ mg L}^{-1}$) houve um decréscimo médio no crescimento de 85, 65, 59, 54 e 39 % para Aruana, Tanzânia, Xaraés, Basilisik e Marandu, sendo um indicativo de sensibilidade das forrageiras ao Cd. O crescimento relativo das raízes foi menos afetado em relação às outras partes das forrageiras após 90 dias de exposição ao Cd, observado através dos coeficientes das equações ajustadas (Figura 1). A redução no crescimento das raízes, do colmo e dos cortes foi de 50, 52 e 80 %, respectivamente, na menor dose do metal em relação ao controle sem Cd, sendo o menor crescimento de raízes na Aruana e maior na Marandu.

De certa forma, a capacidade das plantas em se manter a exposição por tempo prolongado depende da capacidade das raízes de sintetizar fitoquelatinas, as quais têm sido identificadas em várias espécies de plantas, sendo que o indutor mais forte dessa acumulação é o Cd (COBBETT, 2000). A redução do crescimento das plantas deve-se a exposição de plantas a níveis tóxicos de Cd que resulta na diminuição generalizada nas taxas metabólicas

do vegetal (OLIVEIRA et al., 2001) com redução da fotossíntese, diminuição na absorção e no transporte de nutrientes (LARSSON et al., 1998), igualmente como distúrbios hormonais, danos às membranas e alteração na atividade de várias enzimas (BARCELÓ e POSCHENRIEDER, 1990), resultando em diminuição do crescimento e eventual morte das plantas, como no presente experimento, especialmente com Aruana.

As doses críticas de toxidez (DCT) de Cd em solução nutritiva necessárias para redução de 10 % do crescimento relativo máximo da massa seca dos cortes, do colmo e das raízes das forrageiras (Tabela 1) confirmam sequência de suscetibilidade ao Cd obtida por meio dos valores dos coeficientes das equações ajustadas entre o crescimento relativo e as doses de Cd aplicadas (Figura 1). Os valores da DCT foram menores para a produção de massa seca dos cortes seguida pela do colmo e das raízes, indicando que as raízes das forrageiras são a parte menos suscetível ao Cd, concordando com o crescimento relativo (Figura 1).

Tabela 1. Dose crítica de toxidez (DCT) de Cd em solução nutritiva para reduzir 10% do crescimento relativo máximo da massa seca total dos cortes, do colmo e das raízes e nível crítico de toxidez (NCT) correspondente a DCT de cinco forrageiras num período de 90 dias de exposição após o corte de uniformização.

Forrageira	DCT (mg L ⁻¹)			NCT (mg kg ⁻¹)		
	Cortes	Colmo	Raízes	Cortes	Colmo	Raízes
Aruana	0,03	0,12	0,16	1,73	27,61	9,36
Tanzânia	0,13	0,36	0,51	30,06	76,23	52,45
Marandu	0,24	2,78	1,23	43,65	707,35	386,02
Xaraés	0,13	0,46	0,79	15,51	122,70	50,98
Basilisk	0,22	0,69	0,65	71,46	280,66	73,85

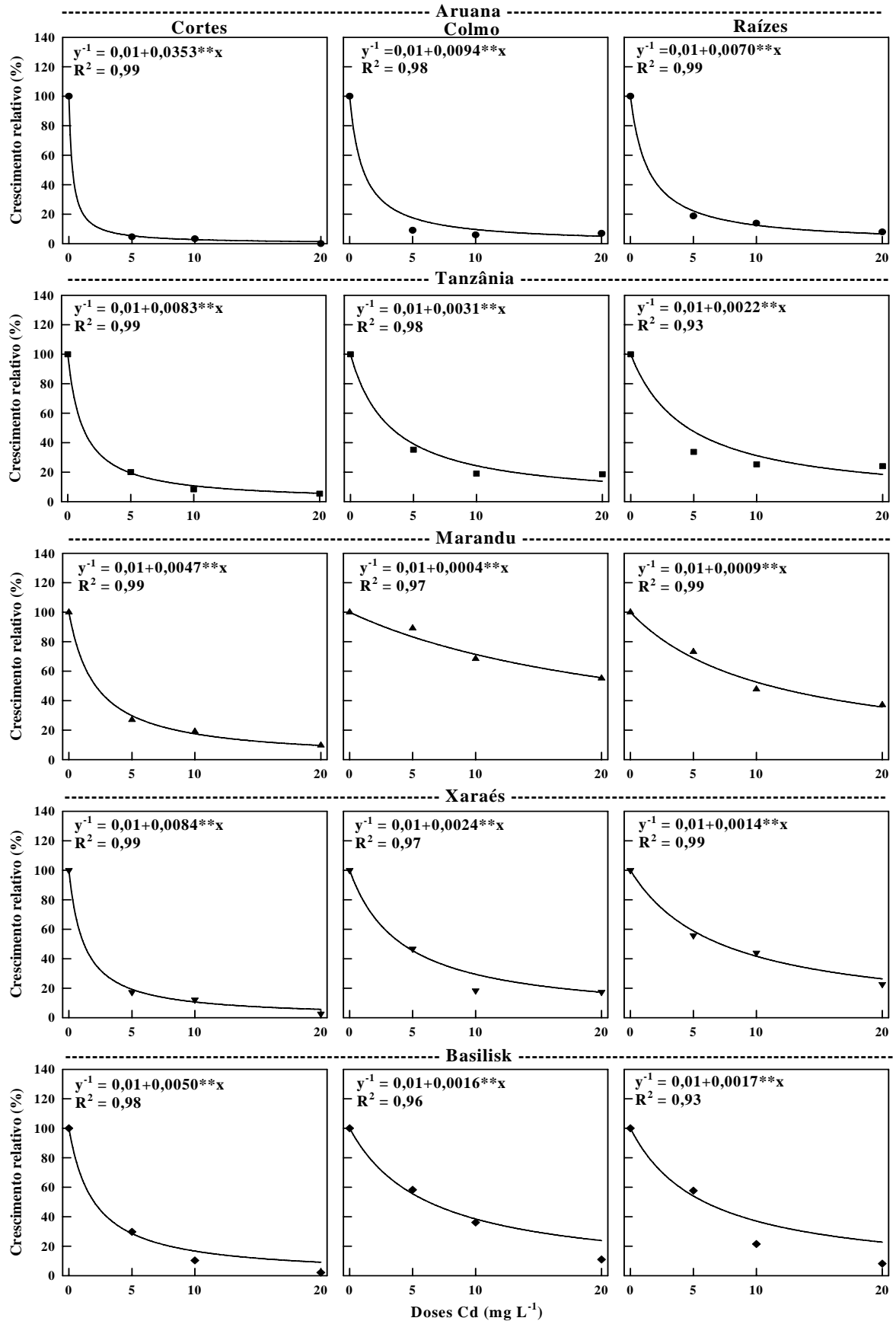


Figura 1. Crescimento relativo do total dos cortes, do colmo e das raízes de cinco forrageiras em função de doses de Cd em solução nutritiva num período de 90 dias de exposição após o corte de uniformização. (** significativo a 1% pelo teste de t)

Os teores de Cd elevaram-se nas partes da planta com o aumento das doses na solução de cultivo para as cinco forrageiras estudadas (Figura 2). Nas raízes das forrageiras, os teores de Cd foram superiores aos dos colmos e dos cortes, sendo os maiores teores nas raízes com 16.174,7 mg kg⁻¹, no colmo com 8.082,9 mg kg⁻¹ e nos cortes com 1.224,2 mg kg⁻¹, para Xaraés, Basilisk e Marandu, respectivamente, todos na dose de 20 mg L⁻¹ de Cd na solução de cultivo. Os maiores teores de Cd observados nas raízes das forrageiras podem ser devido ao maior tempo de contato direto dessa parte da planta com o Cd da solução nutritiva contaminada e pela formação fitoquelatinas e complexos com substâncias quelantes promovendo a compartimentalização do Cd em estruturas celulares como vacúolos nas células das raízes (MOHR e SCHOPFER, 1995; PAPOYAN e KOCHIAN, 2004; KÜPPER et al., 2007). Pode-se associar também a característica da raiz servir como filtro natural, podendo limitar a passagem do Cd para parte aérea (OLIVEIRA et al., 2005), sendo importante destacar que as doses de Cd foram renovadas a cada 15 dias na troca das soluções corroborando os altos teores de Cd encontrados nos tecidos das forrageiras.

Ao oposto do que observado em raízes de aguapé (OLIVEIRA et al., 2001), entre as forrageiras, possivelmente não ocorreu saturação dos sítios de ligação do Cd nos cortes, colmo e raízes das plantas, visto que o teor de Cd elevou-se proporcionalmente com o aumento das doses de Cd na solução de cultivo ao longo de todo o intervalo de concentração testado (Figura 2), sem uma tendência à estabilização até a dose máxima de Cd aplicada. A diferenciação dos teores de Cd nas partes da planta e entre as forrageiras indica não haver qualquer relação entre os teores de Cd nos tecidos vegetais e o nível tolerância ao metal, concordando com o observado por Kuboi et al. (1987) em diversas espécies vegetais e Nascimento e Pereira (1997) em cultivares de feijoeiro.

Na dose de 20 mg L⁻¹ de Cd (Figura 2), houve acréscimo acima de 80.000 % em relação ao controle na massa seca dos cortes, indicando o elevado potencial de absorção pelas raízes e translocação desse elemento pelas forrageiras, sendo a ordem decrescente de aumento do teor de Cd entre a dose máxima e o controle a seguinte: Basilisk > Xaraés > Marandu > Tanzânia > Aruana. Desta forma, a Aruana foi a que apresentou o menor teor médio de Cd, de acordo com o coeficiente das equações ajustadas, possivelmente pelo comprometimento do seu crescimento pela toxidez do metal (Figura 1). Exceto para o tratamento controle, onde não se aplicou Cd, os teores verificados nos cortes, colmo e raízes das forrageiras, em todas as doses, estão bem acima dos considerados tóxicos para plantas (5-10 mg kg⁻¹) e na dieta de animais (0,5-1,0 mg kg⁻¹) (MENGEL e KIRKBY, 2001).

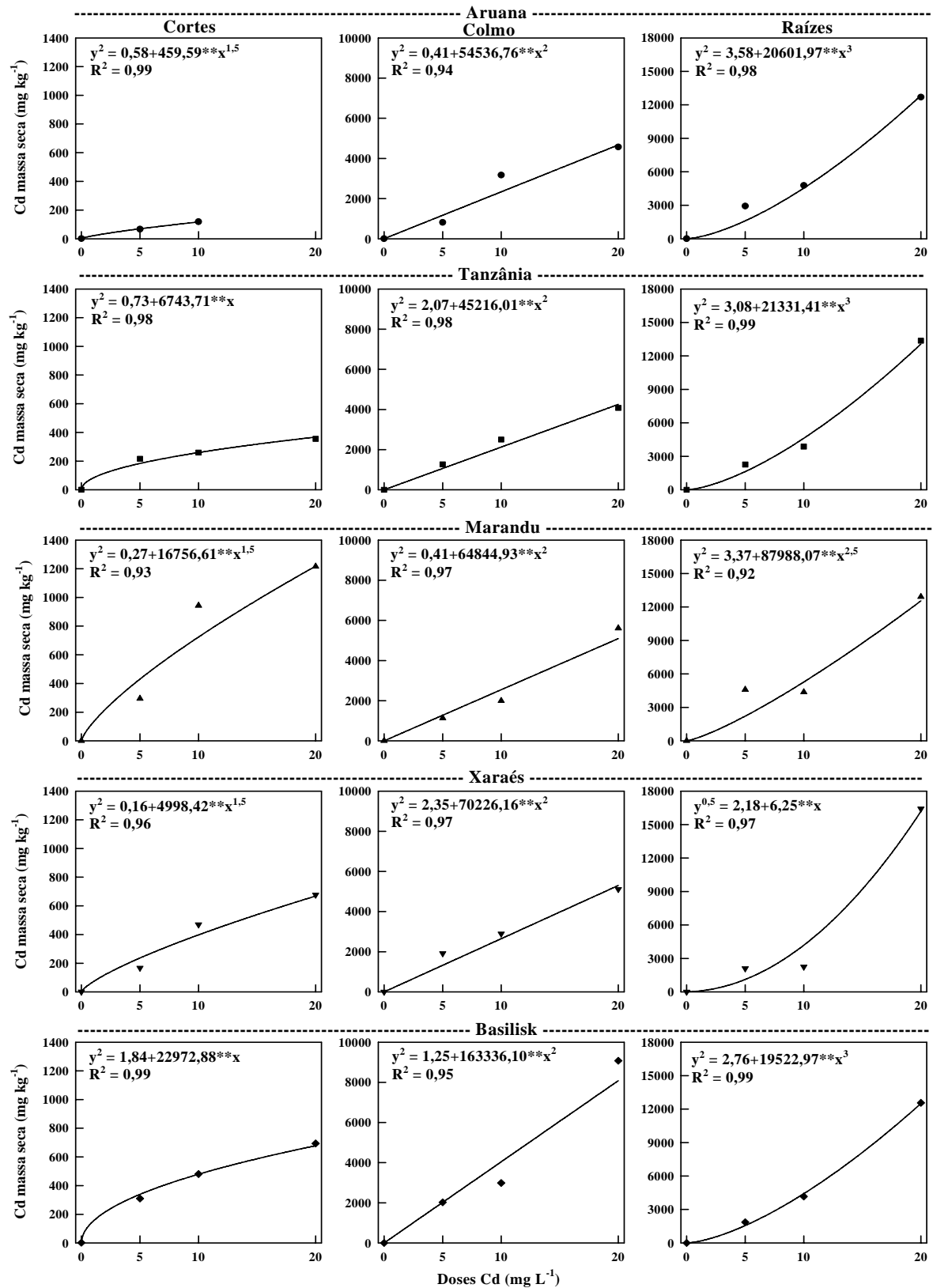


Figura 2. Teor de Cd na massa seca do total dos cortes, do colmo e da raiz de cinco forrageiras em função de doses de Cd em solução nutritiva num período de 90 dias de exposição após o corte de uniformização. (** significativo a 1% pelo teste de t).

O menor teor de Cd, verificado nos tecidos vegetais da forrageira Aruana, com 71,7 mg kg⁻¹ de Cd na massa seca dos cortes, na dose de 5 mg L⁻¹ de Cd, confirma o teor bem acima dos valores de referência. Por outro lado, os altos teores verificados em todas as partes das forrageiras indicam uma incapacidade destas plantas de controlar a absorção de Cd, inclusive na dose de maior concentração do metal, resultando em redução da taxa de crescimento (Figura 1), provavelmente pelo aumento na concentração e na toxicidade do Cd nos tecidos vegetais com diminuição da atividade metabólica da planta (OLIVEIRA et al., 2001).

Pela substituição da DCT para cada forrageira que corresponde à redução de 10 % do crescimento relativo máximo nas equações ajustadas entre os teores e as doses de Cd na solução nutritiva estimaram-se o nível crítico de toxidez (NCT) de Cd correspondentes ao nível de crescimento (Tabela 1). O NCT médio na massa seca dos cortes, do colmo e raízes, isto é na planta, são 379,0; 141,9; 63,0; 52,9 e 12,9 mg kg⁻¹ de Cd para as forrageiras Marandu, Basilisk, Xaraés, Tanzânia e Aruana. Os valores médios de NCT obtidos para cada forrageira encontram-se acima da faixa considerada tóxica (5-30 mg kg⁻¹) para plantas em geral (KABATA-PENDIAS e PENDIAS, 1985), exceto para Aruana. Nas espécies menos tolerantes como soja, alfafa, feijão ou cevada, o NCT varia de 5-10 mg kg⁻¹ de Cd, enquanto naquelas mais tolerantes como alface, tomate, nabo, milho e repolho esse valor situa-se entre 50-200 mg kg⁻¹ (MACNICOL e BECKETT, 1985).

As forrageiras estudadas apresentam baixa suscetibilidade ao Cd, exceto para Aruana. O NCT encontrado por Soares et al. (2005) para *E. maculata* e *E. urophylla* foi de 14,5 e 10,8 mg kg⁻¹, respectivamente, corroborando os resultados de DCT e a tendência de menor suscetibilidade das forrageiras em relação ao eucalipto. A ordem decrescente de tolerância, baseado no NCT na planta é a seguinte: Marandu > Basilisk > Xaraés > Tanzânia > Aruana, estando de acordo com a DCT média das produções de massa seca. Os resultados sugerem que a sensibilidade ao Cd entre as forrageiras está de certa forma associada à exigência nutricional que reflete na tolerância a fatores adversos para o seu crescimento.

O acúmulo de Cd na massa seca dos cortes, do colmo e das raízes das forrageiras aumentou com as doses crescentes de Cd na solução de cultivo (Figura 3), na seguinte ordem decrescente, nas partes da planta: raízes > colmo > cortes e entre as forrageiras: Marandu > Tanzânia > Xaraés > Basilisk > Aruana. Corroborando a tendência de maior tolerância ao Cd pela Marandu e menor pela Aruana verificadas no crescimento relativo (Figura 1) e DCT (Tabela 1).

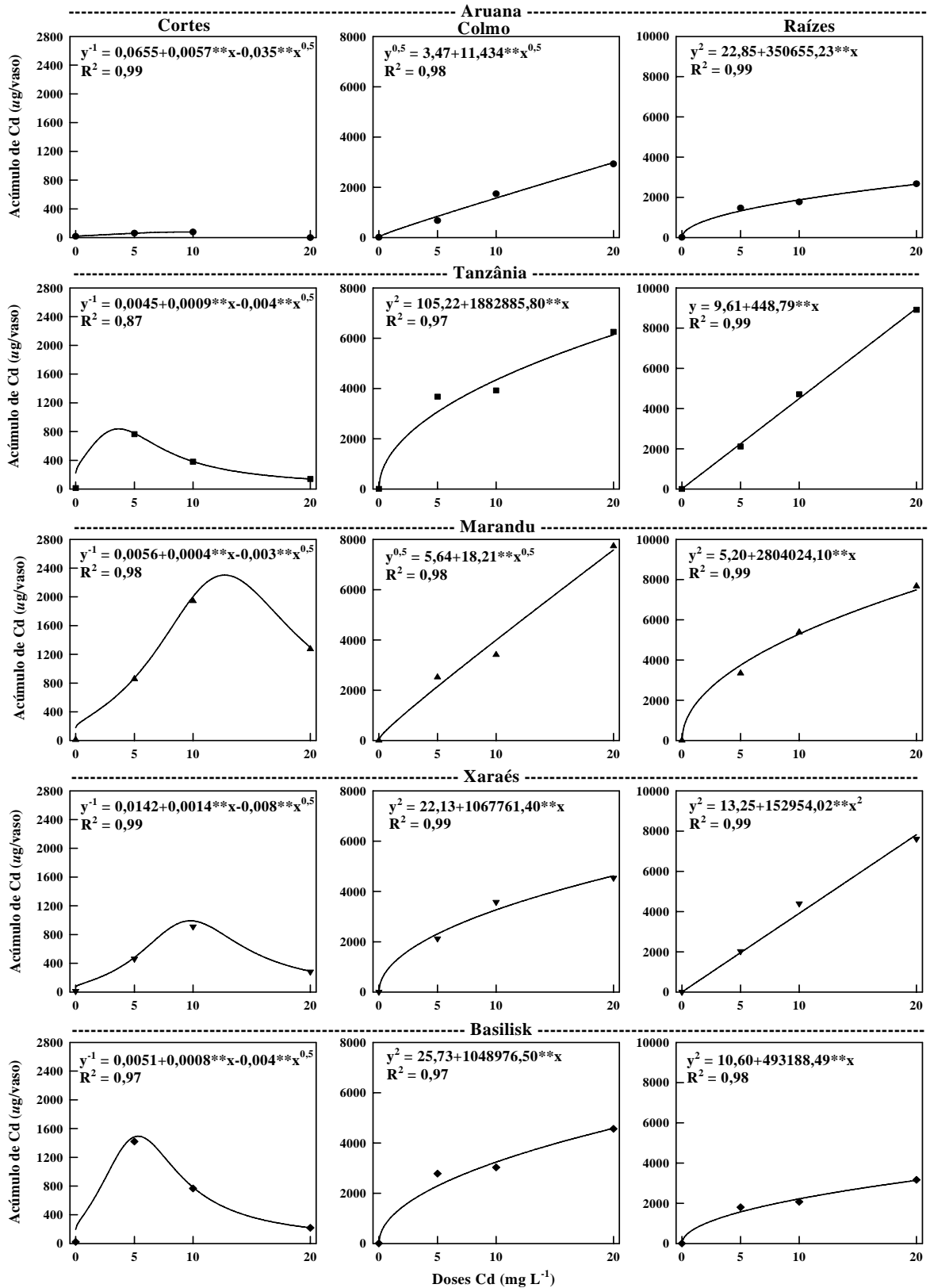


Figura 3. Acúmulo de Cd na massa seca do total dos cortes, do colmo e das raízes de cinco forrageiras em função de doses de Cd em solução nutritiva num período de 90 dias de exposição após o corte de uniformização. (** significativo a 1% pelo teste de t).

O maior acúmulo do metal observado no colmo e raízes das forrageiras é uma característica interessante do ponto de vista zootécnico, visto que o bocado dos animais não atinge onde estão concentradas as maiores quantidades de Cd na planta. No entanto, como constatado (Figura 2), os teores de Cd mesmo nos cortes das forrageiras (parte aérea) foram maiores do que os teores considerados tóxicos tanto para plantas quanto para a dieta animal. O menor acúmulo de Cd verificado nos cortes foi na cultivar Aruana, variando de 63,7 a 84,75 $\mu\text{g}/\text{vaso}$ nas doses de 5 e 10 mg L^{-1} , estando de acordo com os teores (Figura 2) e confirmando estarem acima dos valores de referência.

O acúmulo máximo, em ordem decrescente, de 2.226, 1.422, 908, 784 e 77 $\mu\text{g}/\text{vaso}$ de Cd, de acordo com a equação ajustada, na massa seca dos cortes foi atingido com a dose de 14,1; 6,3; 8,2; 4,9 e 9,4 mg L^{-1} de Cd na solução para Marandu, Basilisk, Xaraés, Tanzânia e Aruana, respectivamente, sendo interessante observar que, para a forrageira Aruana, não há acúmulo após a dose de Cd de 10 mg L^{-1} , pois, como constatado, o crescimento de massa seca (Figura 1) é cessado com doses de Cd acima dessa concentração. Sendo assim o menor acúmulo de Cd, entre as forrageiras, observado na maior dose, foi na forrageira Tanzânia com 217,4 $\mu\text{g}/\text{vaso}$ de Cd nos cortes. Ao passo que o maior acúmulo nos cortes, na maior dose, foi na Marandu com 2.226,1 $\mu\text{g Cd}/\text{vaso}$. Todas as forrageiras apresentaram redução no acúmulo de Cd nos cortes (Figura 3), essa curva decrescente de acúmulo de Cd nos cortes, na maior dose do metal, se deveu, possivelmente, a menor translocação do Cd para a parte aérea e menor crescimento de massa seca (Figura 1) após os cortes, ocasionada pela toxidez dessa dose do metal.

Para o colmo e raízes, como esperado, os maiores acúmulos foram na maior dose (20 mg L^{-1}) de Cd na solução para todas forrageiras. Os maiores acúmulos observados no colmo e raízes das forrageiras foi, possivelmente, devido ao maior tempo de exposição dessas partes a alta dose do metal, uma vez que eram feitos cortes a cada 30 dias da parte aérea enquanto o colmo e raízes permaneceram durante os 90 dias de condução do experimento expostos ao Cd. Vale lembrar também que além do tempo de exposição ao metal verificou-se perfilhamento do colmo, o que pode contribuir com maiores acúmulos de Cd nessa parte da planta em relação aos cortes, e ainda segundo Nascimento e Pereira (1997), as folhas (parte aérea da planta), geralmente, são a parte mais afetada em caso de estresse, possivelmente por terem a translocação de elementos limitada, ocasionando diminuição de crescimento como verificado na Figura 1; podendo explicar também menores teores de Cd (Figura 2) nos cortes em relação ao colmo e raízes.

No colmo observou-se o maior acúmulo de Cd para Marandu com 7.582,5 µg/vaso de Cd, enquanto para raízes o maior acúmulo observado foi na cultivar Tanzânia com 9.067,4 µg/vaso. A ordem decrescente de acúmulo de Cd para as forrageiras no colmo foi Marandu, Tanzânia, Xaraés, Basilisk e Aruana e nas raízes foi Tanzânia, Xaraés, Marandu, Basilisk e Aruana, de acordo com as equações ajustadas (Figura 3). Observando as raízes das forrageiras nota-se que apesar da forrageira Marandu apresentar maior crescimento relativo (Figura 1) na dose de Cd de 20 mg L⁻¹, as raízes das forrageiras Tanzânia e Xaraés apresentaram acúmulos superiores, com 8.985,4 e 7.821,9 µg/vaso, respectivamente, contra 7.488,7 µg/vaso da Marandu; sendo interessante observar, ainda na mesma dose de Cd, que a Marandu apresenta acúmulo superior de Cd no colmo e nos cortes em relação as outras forrageiras, este fato, pode estar associado a um maior transporte de Cd das raízes para parte aérea na forrageira Marandu, acarretando em menor acúmulo na raiz e conseqüentemente maiores acúmulos nos corte e no colmo na maior dose de Cd. Por outro lado, como observado nos cortes da Tanzânia, na maior dose de Cd, ela é a forrageira que apresenta menor acúmulo (Figura 3), seguida de maiores acúmulos nas raízes e no colmo (com exceção da Marandu para o colmo), em relação às outras forrageiras, isso implica, possivelmente, em uma menor translocação do Cd das raízes para a parte aérea, verificando maior acúmulo de Cd nas raízes e colmo em relação aos cortes; diferentemente do observado na cultivar Marandu.

Corroborando os resultados dos teores (Figura 2), a tendência de maior distribuição percentual de acúmulo de Cd nas raízes (Figura 3), pode ser explicada devido à raiz ser o órgão de principal acesso e conseqüentemente acumulação dos metais pesados (BARCELÓ e POSCHENRIEDER, 1992). Adicionalmente pode-se associar esse acúmulo à ligação do Cd às cargas negativas das paredes celulares do sistema radicular (GRANT et al., 1998), a complexação de parte do Cd absorvido na forma de fitoquelatinas e armazenamento nos vacúolos das células das raízes (ZENK, 1997).

Esse acúmulo preferencial do metal pesado nas raízes e colmo pode contribuir para a fixação do elemento nos tecidos vegetais, essa característica pode ser interessante para a fitoestabilização do metal, que consiste na estabilização do elemento na planta prevenindo e minimizando sua entrada na cadeia alimentar, sendo diferenciado da fitoextração por não promover a remoção do metal da área (ACCIOLY e SIQUEIRA, 2000).

Do ponto de vista da fitorremediação as forrageiras estudadas podem ser consideradas fitoextratoras e fitoestabilizadoras, uma vez que apresentam a capacidade de extrair o Cd da solução pelas raízes, não limitando a absorção com o aumento das doses de Cd, e sendo

constatados acúmulos crescentes nas raízes e no colmo em relação às doses crescentes do metal; assim, o Cd é eficientemente extraído da solução e, de certa forma, estabilizado e complexado nas estruturas vegetais, como definido para fitoextração e fitoestabilização em cada caso. Porém nota-se que nenhuma das forrageiras pode ser considerada como potencial para fitorremediação de Cd, pois não toleram o metal pesado, tendo crescimento comprometido (Figura 1) e acumulam teores tóxicos de Cd na parte aérea (Figura 2), esse fato impossibilita a utilização das forrageiras para alimentação animal.

O índice de translocação (IT) demonstrou para massa seca total dos cortes, colmo e parte aérea (total dos cortes + colmo) (MSPA) das forrageiras ser diferentemente influenciado pelo aumento das doses de Cd na solução nutritiva (Figura 4). No IT da MSPA, que se refere ao transporte do Cd da raiz para a parte aérea da planta (total dos cortes + colmo), observa-se nas forrageiras Tanzânia, Xaraés e Basilisk que a porcentagem de translocação do Cd foi tanto menor quanto maior as doses de Cd, sendo, para essas forrageiras, o menor IT observado na dose de Cd de 20 mg L^{-1} , sugerindo maior sensibilidade dessas gramíneas ao aumento das doses do metal. Já nas forrageiras Aruana e Marandu, observou-se comportamento distinto do IT em relação às doses de Cd, sendo os menores IT, de acordo com as equações ajustadas, verificados nas doses de Cd de $7,9$ e $9,7 \text{ mg L}^{-1}$, respectivamente; sendo que após as doses citadas observa-se um acréscimo do IT, inclusive na maior dose de Cd.

De acordo com as equações ajustadas da parte aérea (Figura 4), verificou-se semelhança no IT entre as forrageiras Aruana, Marandu e Basilisk e entre as forrageiras Tanzânia e Xaraés, sendo que as duas últimas se mostraram mais sensíveis ao aumento das doses do metal, imprimindo uma queda mais acentuada da curva da equação em relação às outras três forrageiras, sendo uma característica interessante do ponto de vista zootécnico, pois quanto menor a translocação do Cd para a parte aérea menor será a ingestão do elemento pelos animais.

Na massa seca total dos cortes, o IT foi tanto menor quanto maior as doses do metal pesado, estando de acordo com resultados do crescimento relativo (Figura 1) e evidenciando a sensibilidade das forrageiras ao aumento das doses de Cd. Analisando as equações da massa seca total dos cortes (Figura 4), verifica-se que a Basilisk foi a que apresentou o IT menos afetado pelo aumento das doses de Cd. Por outro lado, a Tanzânia foi a que apresentou menor IT, sendo a queda da curva da equação a mais acentuada em relação às outras forrageiras.

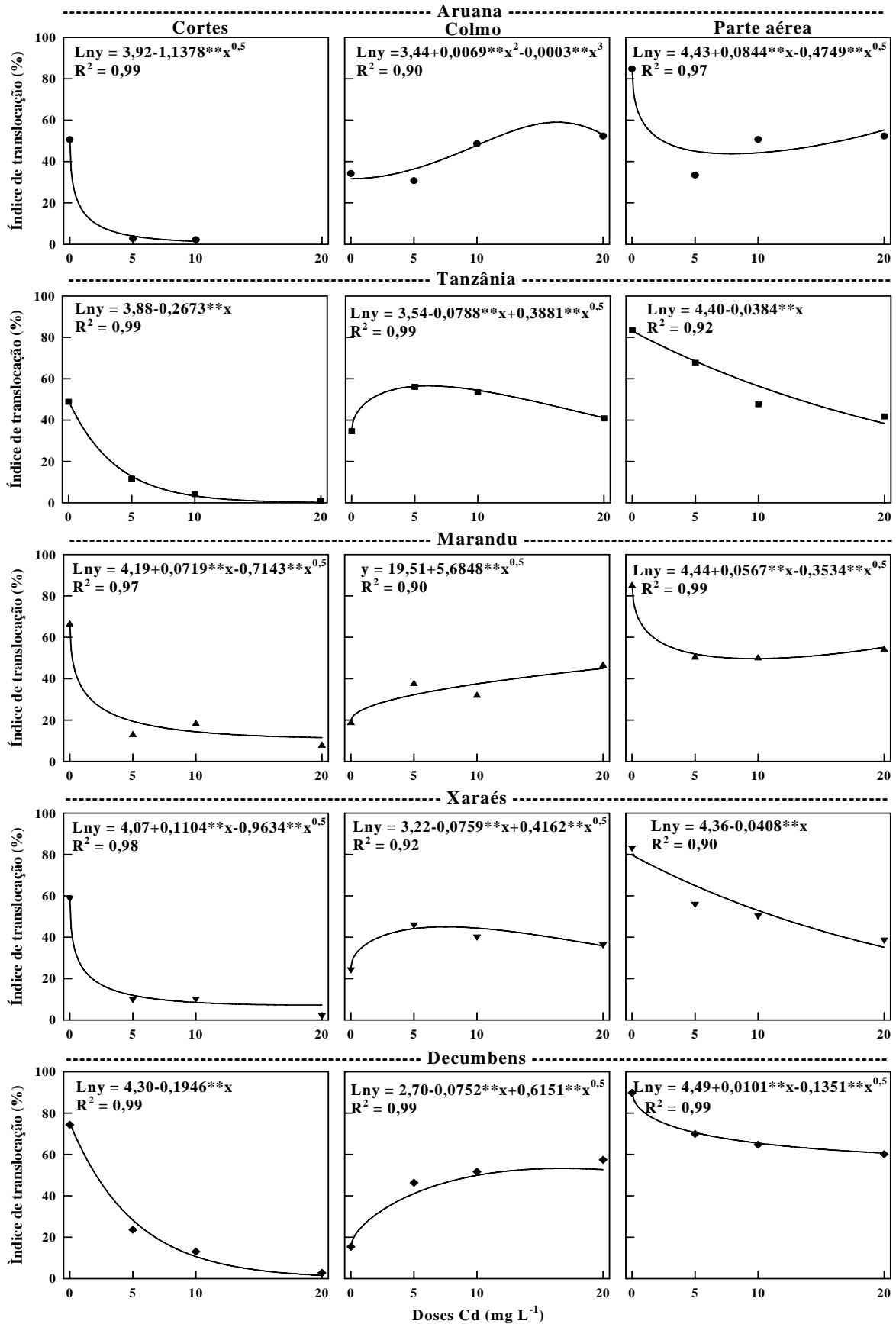


Figura 4. Índice de translocação de Cd na massa seca do total dos cortes, do colmo e parte aérea das forrageiras em função de doses de Cd em solução nutritiva num período de 90 dias após o corte de uniformização. (** significativo a 1% pelo teste de t).

Apesar de a Basilisk ter apresentado o maior IT de acordo com o coeficiente das equações, pode-se observar na Marandu certa tendência a tolerância ao Cd nas doses de 10 e 20 mg L⁻¹, onde nessas doses a forrageira ainda apresenta alguma translocação de Cd das raízes e colmo para os cortes, estando de acordo com que verificado anteriormente nas figuras de crescimento, teor e acúmulo de Cd (Figuras 1, 2 e 3 respectivamente). Nota-se Aruana que, a partir da dose de Cd de 10 mg L⁻¹ não houve IT, isto ocorreu, pois a Aruana foi sensível ao metal e teve o crescimento vegetativo cessado (Figura 1) nos cortes após essa dose de Cd. Essa tendência de diminuição do IT com o aumento das doses de Cd observada nos cortes pode ser justificada pela toxidez do Cd a essas forrageiras, imprimindo mecanismos capazes de diminuir a translocação do elemento das raízes e colmo para parte aérea, aliado a isso, essa toxidez afeta o crescimento vegetativo (Figura 1) da parte aérea (cortes) interferindo diretamente no acúmulo (Figura 3) e translocação (Figura 4) de Cd nessa parte da planta.

O IT de Cd no colmo apresentou comportamento distinto em relação às forrageiras e as doses, sendo verificado para Basilisk e Aruana aumento da porcentagem do IT com o aumento das doses de Cd, enquanto na Tanzânia e Xaraés notou-se queda na porcentagem do IT com o aumento das doses de Cd, sendo o maior IT observado para essas duas últimas espécies nas doses de 6,0 e 7,5 mg L⁻¹ de Cd, respectivamente.

Corroborando os resultados que apontam a Marandu com certa tendência a tolerância ao aumento de doses de Cd, observa-se no colmo dessa forrageira que o IT foi tanto maior quanto maior foram as doses de Cd demonstrando alguma capacidade dessa forrageira em perfilhar e continuar a translocar o Cd das raízes para o colmo mesmo sob altas doses do metal. Observa-se que a Aruana também apresentou um aumento no IT com o aumento das doses de Cd, porém, nesse caso pode-se atribuir esse aumento de translocação da raiz para o colmo devido a essa forrageira ser suscetível ao Cd e não produzir folhas (parte aérea) sendo o Cd translocado apenas para o colmo; nota-se que a partir da dose de Cd de 10 mg L⁻¹, onde já não havia mais produção de parte aérea que o IT foi maior que as doses anteriores. O maior IT observado em todas as gramíneas do colmo em relação aos cortes concorda com os resultados dos teores (Figura 2) e acúmulos (Figura 3) de Cd nas partes das plantas, a maior concentração do Cd permanece no colmo, podendo ser parcialmente limitada ao bocado dos animais. O IT maior no colmo das gramíneas em relação aos cortes pode ser explicado devido ao maior tempo de exposição dessa parte ao metal, uma vez que a exposição do colmo ao Cd era contínua enquanto os cortes eram feitos a cada 30 dias, e devido também ao perfilhamento, que pode induzir a translocação do elemento das raízes para o colmo.

Sob este contexto é interessante observar que o IT na MSPA foi mais intensamente influenciado pelos cortes do que pelo colmo, devido ao IT nesta parte ter reduzido drasticamente com o aumento das doses do metal, influenciando negativamente o IT na MSPA (Figura 4). Como verificado nas forrageiras Aruana e Marandu, a MSPA foi influenciada também, principalmente na maior dose de Cd, pelo IT do colmo, nessas duas forrageiras verifica-se um aumento no IT após as doses de Cd de 7,9 e 9,7 mg L⁻¹, respectivamente.

A queda na porcentagem do IT no total dos cortes, observada para todas as forrageiras estudadas, pode ser explicada pelo rápido declínio na capacidade das plantas de translocar este elemento, principalmente em função de uma redução generalizada nas taxas metabólicas do vegetal, devido à toxicidade do Cd (OLIVEIRA et al., 2001). Soares et al. (2001) estudando mudas de árvore em solo contaminado com Cd, verificou para *Acacia mangium*, *Piptadenia gonoacantha* e *Cedrella fissilis* um de IT abaixo de 20 % na parte aérea, enquanto para *Machaerium nictidans*, *Senna macranthera* e *Dendropanax cuneatum* os IT foram maiores que 60 % na parte aérea, sendo que *Dendropanax cuneatum* apresentou IT maior que 80 %. Nas forrageiras IT maiores que 60 % foram encontrados apenas na Basilisk em todas as doses de Cd e em Tanzânia na dose de 5 mg L⁻¹. Essa maior porcentagem de IT verificado para Basilisk e Tanzânia, pode indicar certa tendência de tolerância para essas forrageiras, em relação às outras estudadas, não limitando a translocação do Cd para parte aérea.

Os diferentes comportamentos de IT das forrageiras podem ser devido a diferenças genéticas, fisiológicas e diferentes tolerâncias entre elas, onde alguns mecanismos típicos dessa tolerância são a regulação da absorção desses metais pela raiz, acúmulo na rizosfera, e baixa translocação para a parte aérea, ambos proporcionados pelo sistema radicular (ARDUINI et al., 1996).

Como constatado, todas as gramíneas forrageiras foram influenciadas negativamente pelo metal pesado Cd, sendo a Aruana a que apresentou maior sensibilidade. Por outro lado, a Marandu foi a que mostrou maior tendência a tolerância a níveis elevados do metal na solução de cultivo, demonstrando maior capacidade de absorver o Cd da solução. As forrageiras estudadas não conseguiram limitar a absorção de Cd, elas apresentam crescimento vegetativo comprometido e acumulam altos teores de Cd em todas as partes da planta, desta forma não serve de barreira à entrada desse elemento tóxico na cadeia alimentar animal e até mesmo humana.

CONCLUSÕES

1. Todas as forrageiras estudadas reduziram o crescimento com aumento das doses de Cd. A forrageira Aruana é a mais sensível e a Marandu a que apresenta maior tendência a tolerância ao fornecimento constante do Cd.
2. As plantas mais sensíveis apresentam maiores valores de índice de translocação.
3. As forrageiras foram incapazes de limitar a absorção de Cd, acarretando em toxicidade e declínio de crescimento e altos teores e acumulados de Cd em todas as partes da planta, não podem ser utilizadas (ou indicadas) para a fitorremediação de Cd.

AGRADECIMENTOS

A Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior, Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico e Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais pela concessão de bolsa de mestrado. Ao Departamento de Ciência do Solo da Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz (ESALQ/USP) pela disponibilização dos laboratórios para realização das análises de amostras do material vegetal. A Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri, pela infraestrutura necessária para condução do experimento.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABICHEQUER, A.D.; BOHNEN, H. Eficiência de absorção, translocação e utilização de fósforo por variedades de trigo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**. Campinas, v.22 n.1 p.21-26, 1998.
- ACCIOLY, A.M.A.; SIQUEIRA, J.O. Contaminação química e biorremediação do solo. In: NOVAIS, RF; ALVAREZ V.; VH; SCHAEFER, CEGR **Tópicos em ciência do solo**. Viçosa: Sociedade Brasileira de ciência do solo. v.1, 2000, p.299-352.
- ANDRADE, J.C.M.; TAVARES, R.S.L.; MAHLER, C.F. **Fitorremediação: o uso de plantas na melhoria da qualidade ambiental**. São Paulo: Oficina de Textos, 2007. 176p.
- ARDUINI, I.; GODBOLD, D.L.; ONNIS, A. Cadmium and copper uptake and distribution in Mediterranean tree seedlings. **Physiologia Plantarum**, Copenhagen, v.97, n.1, p.111-117, 1996.
- BARCELÓ, J.; POSCHENRIEDER, C. Plant water relations as affected by heavy metal stress: a review. **Journal of Plant Nutrition**, New York, v.13, n.1, p.1-37, 1990.

BARCELÓ, J.; POSCHENRIEDER, C. Respuestas de las plantas a la contaminación por metales pesados. **Suelo y Planta**, Madrid, v.2, n.2, p.345-361, 1992.

BINGHAM, F.T.; PAGE, A.L.; MAHLER, R.J.; GANJE, T.J. Growth and cadmium accumulation of plants grown on a soil treated with a cadmium-enriched sewage sludge. **Journal of Environmental Quality**, Madison, v.4, n.2, p.207-211, 1975.

CHUGH, L.K.; SAWHNEY, S.K. Effect of cadmium on germination, amylases and rate of respiration of germinating pea seeds. **Environmental Pollution**, Hisar, v.92, n.1, p.1-5, 1996.

COBBETT, C.; GOLDSBROUGH, P. Phytochelatins and Metallothioneins: Roles in heavy metal detoxification and homeostasis. **Annual Review of Plant Biology**, Parkville, v.53, p.159-82, 2002.

COBBETT, C.S. Phytochelatins and their roles in heavy metal detoxification. **Plant Physiology**, Baltimore, v.123, n.3, p.825-832, 2000.

DAVIS, R.D.; BECKETT, P. H. T.; WOLLAN, E. Critical levels of twenty potentially toxic elements in young spring barley. **Plant and soil**, Dordrecht, v.49, p.394-408, 1978.

FOY, C.D.; CHANEY, R.L.; WHITE, M.C. The physiology of metal toxicity in plants. **Annual Review of Plant Physiology**, Palo Alto, v.29, p.511-566, 1978.

GRANT, C.A.; BUCKLEY, W.T.; BAILEY, L.D.; SELLES, F. Cadmium accumulation in crops. **Canadian Journal of Plant Science**, Ottawa, n.78, n.1, p.1-17, 1998.

HOAGLAND D.R; ARNON D.I. The waterculture method for growing plants without soil. Bulletin. **California Agricultural Experiment Station Publications**. 2.ed. Berkeley: University of California, 1950. 32p. (Circular 347)

JENTSCHKE, G.; WINTER, S.; GODBOLD, D.L. Ectomycorrhizas and cadmium toxicity in Norway spruce seedlings. **Tree Physiology**, Victoria, v.19, n.1, p.23-30, 1999.

KABATA-PENDIAS, A.; PENDIAS, H. **Trace elements in soils and plants**. Boca Raton: CRC Press, 1985. 315p.

KABATA-PENDIAS, A.; PENDIAS, H. **Trace elements in soils and plants**. 3.ed. Boca Raton: CRC Press, 2001. 413p.

KUBOI, T.; NOGUCUI, A.; YAZAKI, J. Relationship between tolerance and accumulation characteristics of cadmium in higher plants. **Plant and Soil**, Dordrecht, v.104, n.2, p.275-280, 1987.

KUPPER H.; MIJOVILOVICH, A.; MEYERKLAUCKE, W.; KRONECK, M.H. Tissue and age-dependent differences in the complexation of cadmium and zinc in the cadmium/zinc hyperaccumulator *Thlaspi caerulescens* (Ganges Ecotype) revealed by Xray absorption spectroscopy. **Plant Physiology**, Baltimore, v.134, n.2, p.748-757, 2004.

KUPPER, H.; PARAMESWARAN, A.; LEITENMAIER, B.; TRTILEK, M.; SETLIK, I. Cadmium-induced inhibition of photosynthesis and long-term acclimation to cadmium stress in the hyperaccumulator *Thlaspi caerulescens*. **New Phytologist**, New York, v.175, n.4, p.65-74, 2007.

- LARSSON, E.L.; BORNMAN, J.F.; ASP, H. Influence of UV-B radiation and Cd²⁺ on chlorophyll fluorescence, growth and nutrient content in *Brassica napus*. **Journal of Experimental Botany**, Madison, v.49, n.323, p.1031-1039, 1998.
- LOMBI, E.; ZHAO, F.J.; McGRATH, S.P.; YOUNG, S.D.; SACCHI, G.A. Physiological evidence for a high-affinity cadmium transporter highly expressed in a *Thlaspi caerulescens* ecotype. **New Phytologist**, New York, v.149, n.1, p.53-60, 2001.
- MA, J.F.; UENO, D.; ZHAO, F.J.; McGRATH, S.P. Subcellular localisation of cadmium and Zn in the leaves of a cadmium-hyperaccumulating ecotype of *Thlaspi caerulescens*. **Planta**, New York, v.220, n.5, p.731-736, 2005.
- MACNICOL, R.D.; BECKETT, P.H.T. Critical tissue concentrations of potentially toxic elements. **Plant and Soil**, Dordrecht, v.85, n.1, p.107-129, 1985.
- MAITANI, T.; KUBOTA, H.; SATO, K.; YAMADA, T. The composition of metals bound to class III thiothionein (phytochelatin and its desglycyl peptide) induced by various metals in root cultures of *Rubia tinctorum*. **Plant Physiology**, Baltimore, v.110, n.4, p.1145-1150, 1996.
- MALAVOLTA, E.; VITTI, G. C.; OLIVEIRA, S. A. **Avaliação do estado nutricional das plantas: princípios e aplicações**. 2.ed. Piracicaba: POTAFOS, 1997. 319 p.
- MARCHIOL, L.; LEITA L.; MARTIN L.; PETERSSOTTI A.; ZERBI G. Physiological responses of two soybean cultivars to cadmium. **Journal of Environmental Quality**, Madison, v.25, n.3, p.562-566, 1996.
- MENGEL, K.; KIRKBY, E.A. **Principles of plant nutrition**. 5th ed. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers., 2001. 849p.
- MOHR, H.; SCHOPFER, P. **Plant physiology**. Berlim: Springer-Verlag, 1995. 629 p.
- NASCIMENTO, C.W.A; PEREIRA I.B.M. Absorção e distribuição de cádmio e micronutrientes em cultivares de feijoeiro expostas a doses de cádmio. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.32, n.12, p 1303-1308, 1997.
- OLIVEIRA, C.; SOBRINHO N. M. B. A.; MARQUES, V. S.; MAZUR, N. Efeitos da aplicação do lodo de esgoto enriquecidos com cádmio e zinco na cultura do arroz. **Revista Brasileira Ciência do Solo**, Viçosa, v.29, n.1, p.109-116, 2005.
- OLIVEIRA, J.A.O; CAMBRAIA, J.; CANO, M.A.O.; JORDÃO, C.P. Absorção e acúmulo de cádmio e seus efeitos sobre o crescimento relativo de plantas de aguapé e de salvinia. **Revista Brasileira de Fisiologia Vegetal**, Campinas, v.13, n.3, p.329-341, 2001.
- PAIVA, H. N.; CARVALHO J.G.; SIQUEIRA J.O. Efeito de Cd, Ni, Pb e Zn sobre mudas de cedro (*Cedrela fissilis* Vell.) e de ipê-roxo (*Tabebuia impetiginosa* (Mart.) Stanley). **Revista Árvore**, Viçosa, v.24, n.4, p.369-378, 2000.
- PAPOYAN, A.; KOCHIAN, L.V. Identification of *Thlaspi caerulescens* genes that may be involved in heavy metal hyperaccumulation and tolerance: characterization of a novel heavy metal transporting ATPase. **Plant Physiology**, Baltimore, v.136, n.3, p.3814-3823, 2004.

PEREIRA, A.R. **Como selecionar plantas para áreas degradadas e controle de erosão.** Belo Horizonte: FAPI, 2006. 150p.

SOARES, C.R.F.S.; ACCIOLY, A.M.A.; AGUIAR A.M.; MARQUES, T.C.L.L.S.M.; SIQUEIRA O.S.; MOREIRA F.M.S. Acúmulo e distribuição de metais pesados nas raízes, caule e folhas de mudas de árvores em solos contaminados por rejeitos de indústria de zinco. **Revista Brasileira de Fisiologia Vegetal**, Campinas, v.13, n.3, p.302-315, 2001.

SOARES, C.R.F.S.; SIQUEIRA, J.O. CARVALHO, J.G.; MOREIRA, F.M.S. Fitotoxidez de cádmio para *eucalyptus maculata* e *e. urophylla* em solução nutritiva. **Revista Árvore**, Viçosa, v.29, n.2, p.175-183, 2005.

SOUZA, A.G.; SOARES FILHO, C.V.; MELLA, S.C. Espécies forrageiras recomendadas para o Paraná. In: MONTEIRO, A.L.G.; MORAES, A.; CORRÊA, E.A.S. et al. (Eds.). **Forragicultura no Paraná.** Londrina: CPAF. 1996. p.196-205.

STEFFENS, J.C. The heavy metal-binding peptides of plants. **Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology**, Palo Alto, v.41, p.553-75, 1990.

WANG, J.; EVANGELOU, V.P. **Metal tolerance aspects of plant cell wall and vacuole:** handbook of plant and crop physiology. Tucson: The University of Arizona, 1994. 325p.

WONG, M.K.; CHUAN, G.K.; KOH, L.L., ANG, K.P.; HEW, C.S. The uptake of cadmium by *Brassica chinensis* and its effect on plant zinc and iron distribution. **Environmental and Experimental Botany**, Oxford, v. 24, n.2, p. 189-195, 1984.

ZEITTOUNI, C.F.; BERTON, R.S.; ABREU, C.A. Fitoextração de cádmio e zinco de um latossolo vermelho-amarelo contaminado com metais pesados. **Bragantia**, Campinas, v.66, n.4, p.649-657, 2007.

ZENK, M.H. Heavy metal detoxification in higher plants – a review. **Gene**, Bethesda, n.179, n.1, p.21-30, 1997.

ARTIGO CIENTÍFICO II

BIODISPONIBILIDADE DE CÁDMIO EM SOLO CULTIVADO COM GRAMÍNEAS FORRAGEIRAS

RESUMO

O objetivo desse trabalho foi avaliar o crescimento, teor, acúmulo e disponibilidade de Cd para gramíneas forrageiras cultivadas em solo contaminado com Cd. Instalaram-se os experimentos em condições de casa de vegetação do Departamento de Agronomia da Faculdade de Ciências Agrárias da Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri, Diamantina (MG), sendo avaliadas as forrageiras: *Panicum maximum* cv. Aruana e cv. Tanzânia e *Brachiaria decumbens* cv. Basilisk, *Brachiaria brizantha* cv. Xaraés e cv. Marandu e as doses de Cd 0, 2, 4 e 12 mg kg⁻¹ de solo. O delineamento experimental foi inteiramente casualizado, com quatro repetições, sendo o período experimental de 90 dias. Determinou-se o peso seco e os teores de Cd na parte aérea, colmo e das raízes das forrageiras. Os conteúdos de Cd foram calculados com base nos teores e nas produções de massa seca em cada parte da planta. Aferiu-se o teor de Cd no solo utilizando os extratores Mehlich-1, DTPA pH 7,3, teor semitotal - USEPA 3051 e teor total - USEPA 3052. As forrageiras estudadas reduziram o crescimento relativo com aumento das doses de Cd aplicadas, na seguinte ordem decrescente de suscetibilidade: Marandu > Xaraés > Aruana > Tanzânia > Basilisk, configurando a fitotoxicidade do Cd nessas plantas. O teor de Cd nas forrageiras aumentou em função das doses crescentes de Cd, porém a presença de Cd no substrato de cultivo fez com que o acúmulo e índice de translocação nas diferentes partes da planta apresentassem resposta diferenciada para as forrageiras. Os extratores Mehlich-1 e DTPA apresentaram correlação alta e positiva com crescimento relativo das forrageiras, sendo eles eficientes para expressar o crescimento da planta. De toda forma, as forrageiras foram incapazes de limitar a absorção e translocação de Cd, acarretando em toxicidade e declínio de crescimento e altos teores de Cd em todas as partes da planta, não proporcionando barreira à entrada do Cd na cadeia alimentar.

Palavras-chave: *Brachiaria*, *Panicum*, áreas degradadas, metal pesado.

ABSTRACT

BIOAVAILABILITY OF CADMIUM IN SOIL CULTIVATED WITH FORAGE GRASSES

The aim of this work was to evaluate the growth, content, accumulation and availability of Cd in forage grasses cultivated in contaminated soil. The experiment was settled under conditions of greenhouse on the Department of Agronomy of the College of Agricultural Sciences of the Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri, Diamantina (MG), Brazil. The forages *Panicum maximum* cv. Aruana and cv. Tanzânia and *Brachiaria decumbens* cv. Basilisk, *Brachiaria brizantha* cv. Xaraés and cv. Marandu and four doses of Cd 0, 2, 4 and 12 mg kg⁻¹ in soil were investigated. The experimental design was completely randomized with four replications and the trial period lasted 90 days. The dry weight and the concentration of Cd in shoots, stems and roots of forages were determined. The contents of Cd were calculated based on the amounts and in the production of dry mass in each part of the plant. The concentration of Cd in soil were measured using Mehlich-1, DTPA pH 7.3, semi total content - USEPA 3051 and total content - USEPA 3052. The forages studied reduced the relative growth with increasing doses of Cd applied in the following decreasing order of susceptibility: Marandu > Xaraés > Aruana > Tanzania > Basilisk, setting the phytotoxicity of Cd in these plants. The Cd content in the forages increased in function of increasing doses of Cd, however the presence of Cd in the culture substrate has made the accumulation and translocation index in different parts of the plant present differential response among forages. Mehlich-1 and DTPA extractors showed high positive correlation with relative growth of forage, showing efficiency to express plant growth. Anyway, the forages were unable to limit the absorption and translocation of Cd, resulting in toxicity and declining growth and high levels of Cd in all parts of the plant, providing no barrier to entry of Cd into the food chain.

Keywords: *Brachiaria*, *Panicum*, degraded areas, heavy metal

INTRODUÇÃO

A contaminação causada por metais pesados em solos é cada vez mais frequente, e a determinação do teor desses elementos, geralmente é realizada pelo conteúdo total do elemento no solo, fração solúvel e trocável. O conteúdo total do elemento reflete a cognição da sua reserva no solo; a fração trocável e, ou solúvel representa o elemento que pode ser facilmente absorvido pelas plantas (na solução do solo - fitodisponibilidade) representando então uma aferição mais direta da probabilidade de eventuais efeitos nocivos ao ambiente.

Pelo conhecimento dessas concentrações fitodisponíveis pode-se analisar os efeitos dos metais sobre as plantas e a cadeia alimentar (LESCHBER et al., 1985). Diversos extratores químicos estão sendo estudadas no intuito de correlacionar eficientemente às quantidades extraídas do solo e as quantidades absorvidas pelas plantas. Não existe um procedimento definido, até o momento, para avaliar a disponibilidade de metais nos solos, sendo notória a grande dificuldade na definição de um extrato multielementar que abranja vários elementos simultaneamente e seja ao mesmo tempo eficiente em diagnosticar a correlação entre as disponibilidades no solo e para as diversas espécies vegetais.

Estudos feitos com este propósito apontam que os extratores químicos que mais têm se destacado são as soluções de ácidos a exemplo do Mehlich-1, e substâncias quelantes e suas combinações, por exemplo, DTPA a pH 7,3 (DANG et al., 1990; KING e HAJJAR, 1990).

Nos laboratórios de análise de solo do estado de São Paulo a solução com DTPA é adotada como método oficial, sendo, no caso dos metais pesados, utilizada para extrair predominantemente, as formas lábeis (ABREU et al., 2002). Por apresentar boas correlações dos teores dos elementos nos tecidos vegetais de diversas culturas e o teor disponível no solo, essa solução esta entre as mais eficientes para avaliar a disponibilidade dos micronutrientes Fe, Cu, Mn e Zn nos solos (CANTARELLA et al., 1997), além de estar sendo bastante usada também para determinar os teores disponíveis de Pb e Ni em solos (ABREU et al., 1995). Esse extrator foi desenvolvido para estimar teores disponíveis em solos alcalinos ou com pH próximo à neutralidade, mas tem se mostrado eficiente também em solos ácidos (NACHTIGALL et al., 2009).

O princípio de atuação do DTPA pH 7,3 é fundamentado na complexação dos metais. Os complexos solúveis são formados a partir da combinação dos íons livres de Fe, Cu, Mn, Cd, Zn, Cr, Pb e Ni na solução com o agente quelante, resultando na diminuição da atividade dos metais livres em solução. Em consequência, íons desses metais dissolvem da fase sólida ou desorvem da superfície do solo para reabastecer a solução do solo. Esses complexos

organometálicos apresentam uma constante de estabilidade no solo, que varia de um elemento para outro, de acordo com a seguinte seqüência: $Pb > Cu > Ni > Zn > Mn$ (KABATA-PENDIAS e PENDIAS, 2001). É esperado, de acordo com essa seqüência, que o DTPA extraia maiores teores de Pb e Cu em relação ao Zn e Mn, considerando o maior valor das constantes de estabilidade dos primeiros elementos com os agentes complexantes do DTPA.

Outro extrator bastante utilizado, porém de caráter ácido, é o Mehlich-1. Este extrator, também denominado de solução duplo-ácida ou de Carolina do Norte, apresenta também uma boa correlação entre os teores de elementos nos tecidos vegetais e os disponíveis no solo. A preferência pelo Mehlich-1, por alguns laboratórios, é devida, entre outros aspectos, à praticidade por já ser usado para o fósforo e potássio (FURTINI NETO et al., 2001).

A quantidade de metais solubilizados do solo pelas soluções de caráter ácido depende de vários fatores, como: relação solo-solução, concentração do ácido, tempo de extração, entre outros (ABREU et al., 2002). O método Mehlich-1 foi originalmente empregado na extração de P, mas sua utilização foi ampliada para avaliação de cátions trocáveis em solo. O princípio desse método baseia-se na solubilização dos elementos pelo efeito do pH, em torno de 2 e 3, sendo que essa mistura diluída de ácidos fortes promove a remoção dos metais trocáveis da fase sólida, da solução e parte dos complexados, tornando esse método proeminente na avaliação da disponibilidade de metais pesados em solo (KORCAK e FANNING, 1978; ABREU et al., 2002). A metodologia utilizada para extração de metais é feita com a solução extratora de Mehlich 1 ($HCl\ 0,05\ mol\ L^{-1} + H_2SO_4\ 0,0125\ mol\ L^{-1}$) na relação solo:extrator 1:5, e a determinação, por espectrofotometria de absorção atômica.

A escolha da espécie vegetal é ponto chave no sucesso dos processos de fitorremediação de áreas degradadas com metais pesados. Essas espécies devem ter habilidade de crescer, desenvolver, produzir biomassa e acumular metais sob as condições climáticas e de solo da área a ser remediada (NASCIMENTO et al., 2009). Buscando uma abrangência de áreas e climas, a escolha de gramíneas forrageiras foi estratégica, uma vez que apresentam fácil adaptação a diversos ambientes, manejo relativamente fácil, além de proporcionarem boa cobertura do solo, constituindo importantes componentes em sistemas agrícolas por melhorarem as condições físicas, químicas e biológicas do solo. As gramíneas forrageiras são, geralmente, pouco exigentes, com alta produção de biomassa e de crescimento rápido.

Com intuito de estimular a recuperação de áreas degradadas, este trabalho foi realizado com gramíneas forrageiras (gênero *Brachiaria* e *Panicum maximum*) de boa aceitabilidade no mercado, fácil manejo e baixa relação custo benefício. Desta forma, para a seleção de gramíneas forrageiras com potencial para hiperacumular Cd é fundamental um

melhor conhecimento do crescimento, absorção, translocação e de acumulação de Cd por elas em solos contaminados com Cd.

As gramíneas forrageiras do gênero *Brachiaria* e *Panicum maximum*, que são predominantes em áreas cultivadas no País, tendo se estabelecido pela boa aceitabilidade no mercado, alta produtividade, adaptação ao pastejo, fácil manejo e baixa relação custo benefício. As do gênero *Brachiaria* se destacam pela rusticidade, robustez e capacidade de adaptação aos diferentes ambientes, tendo baixa exigência em solos férteis, facilidade de manejo e aceitabilidade econômica. Alta produção de matéria seca, crescimento bem distribuído e boa capacidade de suporte sob carga de animais são também características desse gênero. Enquanto as do gênero *Panicum maximum* apresentam grande potencial de produção de matéria seca por unidade de área, ampla adaptabilidade, elevado valor nutritivo, porém o manejo é relativamente oneroso e necessitam de solos com boa fertilidade. Plantas pertencentes ao gênero *Panicum* possuem hábito cespitoso de crescimento e é mais comumente utilizada no pastejo rotacionado (SOUZA et al., 1996; KARAM et al., 2009). Essas gramíneas forrageiras, podem ainda possibilitar a reutilização da área para produção animal.

O trabalho realizado objetivou avaliar o crescimento, teor, acúmulo e disponibilidade de Cd para gramíneas forrageiras cultivadas em solo contaminado com Cd

MATERIAL E MÉTODOS

O experimento foi conduzido em condições de casa de vegetação da Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri (UFVJM), em Diamantina/MG. O solo utilizado foi um Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico (EMBRAPA, 2006), coletado na camada subsuperficial (0,20-0,40 m) no município de Diamantina (MG), que foi destorroado, secado ao ar e passado em peneira de 5 mm de abertura. Foi tomada uma subamostra e passada em peneira de 2 mm de abertura, constituindo-se, assim, terra fina seca ao ar para análises químicas (SILVA, 2009) e de textura do solo (EMBRAPA, 1997) (Tabela 1). O teor de Cd no solo foi determinado pelos extratores Mehlich-1 (MEHLICH, 1978) e DTPA pH 7,3 (ABREU et al., 2001). O teor semitotal de Cd no solo foi definido pelo método da USEPA 3051 com digestão em forno de microondas com HNO₃ (65 %) concentrado e de pureza analítica (USEPA, 1996) e teor total no solo pelo método da USEPA 3052, com digestão em forno de microondas com HNO₃ + HCl + HF (USEPA, 2007) (Tabela 1).

Tabela 1. Análise de química e de textura do solo antes da aplicação dos tratamentos.

pH _{água}	P	K	Ca	Mg	Al	T	m	V	Cd	MO	Areia	Silte	Argila
	mg dm ⁻³ -----			cmol _c dm ⁻³ -----			%-----		mg kg ⁻¹ -----		g kg ⁻¹ -----		
5,9	0,4	6	0,7	0,1	0,1	8,1	11	10	0,06 ⁽¹⁾ 0,03 ⁽²⁾ 0,09 ⁽³⁾ 0,47 ⁽⁴⁾	0,4	730	70	200

pH_{água} - Relação solo-água 1:2,5. P e K - Extrator Mehlich-1. Ca, Mg e Al - Extrator KCl 1 mol L⁻¹. T - Capacidade de troca de cátions a pH 7,0. m - Saturação de alumínio. V - Saturação por bases. MO - Matéria orgânica determinado através da multiplicação do resultado do carbono orgânico pelo método Walkey-Black por 1,724. Areia, silte e argila - Método da pipeta.⁽¹⁾ Mehlich-1. ⁽²⁾ DTPA pH 7,3. ⁽³⁾ USEPA 3051. ⁽⁴⁾ USEPA 3052.

A calagem foi para elevar a saturação por bases para 45 % pelo método de saturação por bases conforme recomendação de Alvarez e Ribeiro (1999) com calcário dolomítico. Permaneceu incubado por 30 dias, sob condição de umidade equivalente a 60 % do volume total de poros (VTP) (FREIRE et al., 1980), controlada por pesagem diária. A adubação básica de plantio foi conforme recomendação de Malavolta (1980) para experimento de vaso. Os nutrientes foram aplicados na forma de reagentes p.a. e misturados totalmente ao solo. As doses aplicadas consistiram de: 100 mg N (NH₄H₂PO₄, (NH₄)₂SO₄); 200 mg P (NH₄H₂PO₄); 150 mg K (KCl); 50 mg S ((NH₄)₂SO₄); 1 mg B (H₃BO₃), 1,5 mg Cu (CuCl₂), 5,0 mg Fe (FeSO₄.7H₂O-EDTA), 4,0 mg Mn (MnCl₂.H₂O) e 4 mg Zn (ZnCl₂) por kg de solo com incubação por 15 dias.

O delineamento experimental foi inteiramente casualizado, com quatro repetições. Foram avaliadas gramíneas forrageiras (*Panicum maximum* cv. Aruana; *Panicum maximum* Jacq cv. Tanzânia, *Brachiaria brizantha* cv. Xaraés e cv. Marandu e, *Brachiaria decumbens* cv. Basilisk) e quatro doses de Cd (0, 2, 4 e 12 mg kg⁻¹ de solo) na forma de cloreto de cádmio p.a. As doses de Cd foram baseadas nas diretrizes de uso e ocupação do solo conforme indicado pela CETESB (2005). O metal pesado foi aplicado após a calagem e a adubação básica de plantio com incubação do solo por 15 dias sob condição de umidade equivalente a 60 % do VTP (FREIRE et al., 1980), controlada por pesagem diária.

O plantio das forrageiras foi realizado com semeadura direta nos vasos contendo 4 kg do solo. A umidade do solo foi mantida em torno de 60 % do VTP, aferida diariamente através de pesagem, repondo a água ao solo de modo a torná-la constante.

As plantas para avaliação foram cultivadas em três períodos de crescimento. Aos 30 dias do corte de uniformização, foi efetuado o primeiro (1^a) corte de avaliação, a 0,03 m do colo das plantas, o segundo (2^o) corte ocorreu 30 dias após o primeiro, enquanto o terceiro (3^o) aos 30 dias após o segundo corte. Foram feitas quatro adubações de cobertura com 50 mg N (uréia) por kg de solo a cada 5 dias, após o corte de uniformização no primeiro período de crescimento e cinco adubações de N com 60 mg N (uréia) por kg de solo para os dois últimos períodos de crescimento das forrageiras. Após efetuar o último corte, aos 90 dias do corte de

uniformização, foi coletado o material entre o colo até onde recebeu os três cortes da parte aérea no tamanho de 0,03 m de altura, sendo considerado para fins de sistematização para apresentação dos resultados e na discussão com o nome de “colmo” da forrageira e as raízes. O corte realizado a 0,03 m acima do colo da planta foi para simular a profundidade do bocado dos animais.

O material vegetal coletado foi separado por tratamentos e repetições, lavadas em água de torneira e posteriormente em detergente diluído, água destilada novamente, solução de HCl 0,1 mol L⁻¹ e finalizando em água deionizada e, acondicionado em sacos de papel armazenados em estufa com circulação forçada de ar, à temperatura de 65 °C, durante 72 horas. Após a secagem, o material foi pesado em balança analítica, obtendo o peso de massa seca de três cortes (MSTC), do colmo (MSC) e das raízes (MSR). Os materiais foram moídos e submetidos à análise química para determinação dos teores de Cd na massa seca. O material moído foi submetido à digestão nitroperclórica (ácido nítrico - 65 % v/v e ácido perclórico - 70 % v/v, Merck) segundo metodologia descrita por Malavolta et al. (1997) e, o teor de Cd foi determinado por espectrometria de absorção atômica de forno de grafite (Perkin–Elmer Analyst 800). O controle de qualidade da análise de Cd foi verificado utilizando material de referência certificado (NIST SRM 1573a Folha de tomate).

Baseando-se no teor de Cd e massa seca produzida em cada parte das forrageiras, o acumulado de Cd foi calculado pela fórmula: $C = T \times MS$, onde C = acumulado de Cd ($\mu\text{g planta}^{-1}$), T = teor de Cd (mg g^{-1}) e MS = massa seca (g).

Após o último corte das forrageiras, foram coletadas amostras de solo para quantificação do teor de Cd extraídos com DTPA pH 7,3 (ABREU et al., 2001) e com Mehlich-1 (MEHLICH, 1978). Os teores totais foram definidos segundo o método da USEPA 3052, com digestão em forno de microondas com HNO₃ + HCl + HF (USEPA, 2007) e, semitotais pelo método da USEPA 3051 com digestão em forno de microondas com HNO₃ (65 %) concentrado e de pureza analítica (USEPA, 1996). O teor de Cd foi determinado por espectrometria de absorção atômica de forno de grafite (Perkin–Elmer Analyst 800). O controle de qualidade da análise de Cd no solo foi realizado com amostras certificadas de solo (NIST SRM 2709 San Joaquin soil).

Para a determinação da dose crítica de toxidez (DCT) de Cd que proporcionou a redução de 10 % (DAVIS et al., 1978) no crescimento das forrageiras estudadas, utilizou-se um procedimento multivariado por meio do processo da variável canônica (MORRISON, 1967) de análise de variância conjunta de experimentos que constaram do estudo de doses de Cd dentro de cada forrageira. Com a variável canônica de maior autovalor obtiveram-se os

escores a partir do vetor observação de cada unidade experimental das variáveis de crescimento das forrageiras estudadas, reduzindo-o para um único valor. Tais escores foram submetidos à análise de variância univariada conjunta e estudo de regressão das doses de Cd após transformação em escore relativo da variável canônica para cada forrageira. A partir das equações obtidas, estimaram-se as doses de Cd que provocou a redução de 10 % no valor da variável canônica. Na análise estatística foi utilizado o programa SAS for Windows pelos procedimentos PROG GLM e REG.

O teor de Cd na MSTC, MSC e MSR das forrageiras e de Cd extraídos pelos extratores químicos do solo (Mehlich-1 e DTPA pH 7,3) e métodos (USEPA 3051 e USPEPA 3052) foram estimados substituindo-se a DCT nas equações que relacionam as doses de Cd com essas variáveis. Para o acumulado de Cd foi feita a distribuição percentual na MSTC, MSC e MSR para as forrageiras na DCT. Para o acúmulo de Cd na MSTC, MSC e MSR foi estimado a dose de Cd (DCd_{Max}) correspondente ao acúmulo de Cd máximo (ACd_{Max}).

Estudos de correlação foram feitos para avaliar as relações entre as concentrações de Cd pelos extratores químicos do solo (Mehlich-1 e DTPA pH 7,3) e métodos (USEPA 3051 e USPEPA 3052) e o crescimento das forrageiras avaliada pelo escore relativo da variável canônica.

A transferência Cd do solo na MSTC e MSC para as forrageiras foi calculada utilizando o coeficiente de transferência (ct) por meio da fórmula (USEPA, 1996): $ct = TC/SC$; onde ct: coeficiente de transferência de Cd do solo para as plantas; TC: o teor de Cd na MSTC e MSC ($mg\ kg^{-1}$) e SC: concentração de Cd total no solo ($mg\ kg^{-1}$). Essas variáveis foram submetidas à análise de variância univariada e estudos de regressão em função das doses de Cd aplicadas no solo.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Crescimento relativo

O crescimento das forrageiras foi influenciado pelas doses crescentes de Cd aplicadas no solo ($P < 0,01$). Pelos escores relativos de crescimento das forrageiras da variável canônica ($VC = 0,2359 * MSTC + 0,8168 * MSC + 0,3359 * MSR$ com autovalor = 90 %) verifica-se que houve redução do crescimento para todas as forrageiras com aumento das doses de Cd em solo, observando, de acordo com o coeficiente das equações ajustadas a seguinte sequência de suscetibilidade: Marandu > Xaraés > Aruana > Tanzânia > Basilisk (Figura 1).

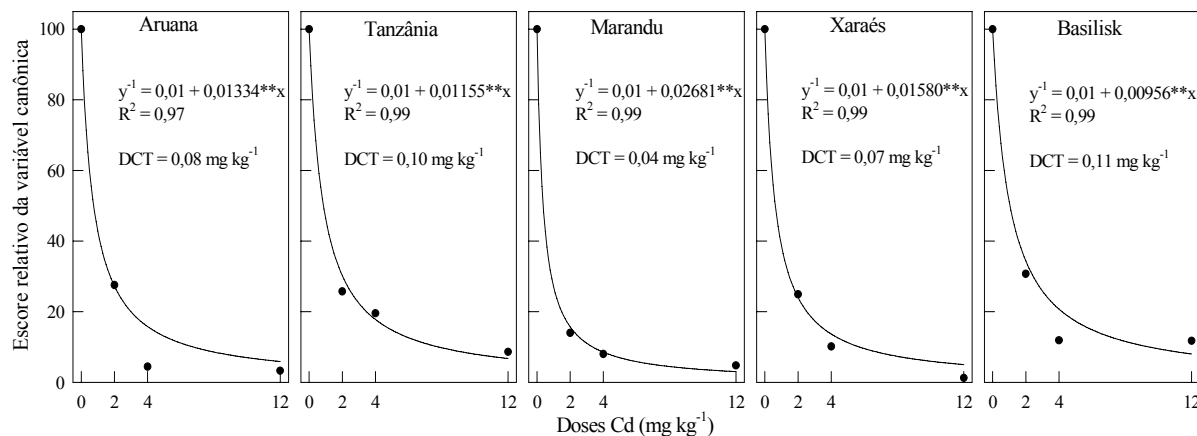


Figura 1. Escore relativo da variável canônica da análise multivariada das forrageiras em função de doses de Cd aplicadas no solo e dose crítica de toxidez (DCT) num período de 90 dias após o corte de uniformização. (** significativo a 1% pelo teste t)

A forrageira Marandu foi a que apresentou a queda mais acentuada verificado pela curva das equações da variável canônica, sendo, desta forma, a forrageira mais suscetível ao Cd em relação às outras, por outro lado a forrageira Basilisk foi a que se mostrou com maior tendência a tolerância ao Cd, observando-se o coeficiente das equações (Figura 1).

A diminuição do crescimento relativo demonstrada pelo escore da variável canônica (Figura 1) pode ser atribuída à fitotoxidez do Cd, como relatado por outros autores em trabalhos semelhantes (CORRÊA et al., 2006; LIU et al., 2007), ocasionando disfunções fisiológicas tais como diminuição na taxa fotossintética e respiratória da planta (VOLLENWEIDER et al., 2006). As diferentes sensibilidades entre as forrageiras podem estar associadas aos diferentes distúrbios nutricionais e fisiológicos e as diferentes bases genéticas e metabolismo das forrageiras (SOARES, 2001; PAIVA et al., 2000), que respondem de forma diferenciada ao estresse pelo Cd.

Corroborando os resultados obtidos, Cunha et al. (2008) verificou redução na produção de massa seca em milho de 30 % na dose de Cd de 10 mg kg⁻¹ de solo em relação ao controle, levando o autor a relatar o Cd como elemento não-essencial e de potencial fitotóxico elevado. O nabo forrageiro e a aveia preta também apresentaram crescimento comprometido, nas doses de 8 e 12 mg kg⁻¹ de Cd, com redução de 80 % da massa seca da parte aérea, em relação ao controle (LIMA et al., 2010). Por outro lado, Pereira (2006) não observou redução do rendimento da massa seca em alface cultivada em solo com alto teor de Cd, da mesma forma que em *Mentha arvensis* não foi observado comprometimento do crescimento sob doses crescentes de Cd (JEZLER, 2012), evidenciando uma diferenciada sensibilidade ao Cd pelas espécies vegetais.

As doses críticas tóxicas de Cd (DCT) para diminuir em 10 % o crescimento das forrageiras (Figura 1) variaram de 0,04 a 0,11 mg kg⁻¹ de Cd, sendo a menor dose para Marandu e a maior para Basilisk, que esta de acordo com a sequência de tolerância, que aponta a Marandu como mais sensível e a Basilisk sendo a que apresenta maior tendência à tolerância ao Cd. Os valores da DCT evidenciam a fitotoxicidade do Cd e a alta sensibilidade das gramíneas forrageiras estudadas a este metal, onde pequenas doses de Cd são suficientes para causar disfunções fisiológicas na planta culminando em diminuição do crescimento.

Teor e NCT de Cd nas forrageiras

Os teores de Cd aumentaram em todas as partes da planta em função das doses crescentes de Cd aplicadas no solo (Tabela 2). De acordo com a média do coeficiente das equações de regressão ajustadas, os teores na seguinte ordem decrescente: colmo > raízes > cortes. Resultados semelhantes foram observados por Li et al. (2009) e Pereira et al. (2011) em arroz, constatando maiores teores de Cd nas raízes em relação a parte aérea da planta.

Analisando as partes da planta, e de acordo com o coeficiente das equações de regressão ajustadas, na massa seca total dos cortes (MSTC), nota-se que a forrageira Basilisk foi a que apresentou maior teor de Cd no tecido vegetal, enquanto, na mesma parte da planta, o menor teor foi observado na forrageira Tanzânia. Para a massa seca do colmo (MSC), o maior e menor teor de Cd nos tecidos vegetais foi observado nas forrageiras Tanzânia e Marandu. Já na massa seca das raízes (MSR), o maior teor de Cd foi observado na forrageira Xaraés, enquanto o menor teor, assim como nos cortes, foi verificado na forrageira Tanzânia.

Para todas as forrageiras, e em todas as partes da planta o maior teor de Cd foi observado na maior dose de Cd aplicada ao solo (12 mg kg⁻¹), desta maneira o maior teor de Cd foi verificado no colmo da forrageira Tanzânia com 497,5 mg kg⁻¹ de Cd. Em contrapartida é interessante notar que o menor teor de Cd na mesma dose (12 mg kg⁻¹) foi verificado na mesma forrageira, porém na MSTC, com 91,5 mg kg⁻¹, esse comportamento pode estar associado a uma certa facilidade da Tanzânia em translocar o Cd das raízes para a parte aérea.

Tabela 2. Equações de regressão ajustadas entre o teor de Cd nas diversas massas secas de cinco forrageiras, como variável dependente (y) das doses de Cd aplicadas (x) no solo, e nível crítico de toxidez (NCT) correspondente a DCT de cinco forrageiras num período de 90 dias após o corte de uniformização.

Forrageira	Equação de regressão	R ²	NCT mg kg ⁻¹
Massa seca total dos cortes (MSTC)			
Aruana	$y = 3,33 + 53,84**x^{0,5}$	0,85	18,56
Tanzânia	$y^2 = 15,26 + 2414,64**x^{0,5}$	0,97	27,91
Marandu	$y = 7,42 + 19,04**x$	0,99	8,18
Xaraés	$y^2 = 8,83 + 1373,75**x$	0,99	10,25
Basilisk	$y = 8,66 + 66,88**x^{0,5}$	0,85	30,84
Massa seca do colmo (MSC)			
Aruana	$y = 12,52 + 102,87**x^{0,5}$	0,94	41,62
Tanzânia	$y = 16,34 + 40,10**x$	0,99	20,35
Marandu	$y = 17,20 + 49,59**x^{0,5}$	0,94	27,12
Xaraés	$y^2 = 5,24 + 9762,47**x$	0,96	26,24
Basilisk	$y^2 = 11,02 + 17771,09**x^{0,5}$	0,96	76,84
Massa seca de raízes (MSR)			
Aruana	$y = 19,00 + 16,49**x$	0,98	20,32
Tanzânia	$y = 11,51 + 0,76**x^2$	0,99	11,52
Marandu	$y = 17,81 + 1,36**x^2$	0,98	17,51
Xaraés	$y = 16,22 + 17,43**x$	0,94	17,44
Basilisk	$y = 20,37 + 13,99**x$	0,87	21,91

** Significativo a 1% pelo teste de t.

Em experimento com *Pennisetum purpureum* (capim elefante), Nascimento (2008) verificou teores de Cd de até 16,79 mg kg⁻¹, em cultivo com 4,35 mg kg⁻¹ de Cd, e valores maiores que 100,00 mg kg⁻¹ de Cd no tecido vegetal foram relatados por Pereira (2008), em alface cultivado a dose de Cd 6,0 mg kg⁻¹ de solo. Na dose de Cd de 8 mg kg⁻¹ de solo, Lima et al. (2010) observou teores de 1.139 e 349 mg kg⁻¹ de Cd nos tecidos da parte aérea em nabo forrageira e aveia preta, respectivamente, sendo os teores encontrados no nabo forrageiro superiores aos encontrados nas forrageiras.

Os diferentes teores de Cd encontrados nas espécies vegetais são associados às diferentes interações de Cd no solo, diferentes doses aplicadas de Cd e diferentes níveis de absorção desse metal pelas plantas. Já a diferença de teores notada entre as forrageiras estudadas pode ser devido à diferente fisiologia e base genética de cada espécie. Os teores de Cd no tecido vegetal das forrageiras verificados nesse trabalho e os relatados pelos autores acima ultrapassam os teores considerados normais por Alloway (1995), que relata valores entre 0,1 e 2,4 mg Cd kg⁻¹ nos tecidos vegetais. De acordo com os valores considerados tóxicos para as plantas, de 5-10 mg kg⁻¹, e na dieta de animais, de 0,5-1,0 mg kg⁻¹ (MENGEL e KIRKBY, 2001), nota-se que inclusive o menor teor observado no total dos cortes, da

forageira Tanzânia, na menor dose de Cd (2 mg kg^{-1}), foi superior aos valores de referência, com $58,56 \text{ mg kg}^{-1}$ de Cd no tecido vegetal. Isso implica na impossibilidade da utilização dessas forrageiras para a alimentação animal, uma vez que pode causar contaminação aos animais e podendo atingir os níveis tróficos da cadeia alimentar colocando em risco a saúde humana. Ainda, os menores teores observados neste trabalho são superiores a 30 mg kg^{-1} de Cd nos tecidos vegetais, considerados tóxicos por Kabata-Pendias e Pendias (2001), que aliada ao declínio do crescimento e a DCT (Figura 1), corrobora a sensibilidade das forrageiras ao Cd.

O nível crítico de toxidez (NCT) que corresponde à DCT e determina o teor de Cd nos tecidos vegetais das forrageiras foi diferentemente influenciado pelas doses crescentes de Cd no solo (Tabela 2). Verifica-se pelas médias dos NCT a seguinte ordem decrescente de tolerância: colmo > cortes > raízes, sendo os valores de Cd de $38,4$; $19,1$ e $17,7 \text{ mg kg}^{-1}$ nos tecidos vegetais, respectivamente, indicando que o colmo é, em geral, menos afetado pelo aumento das doses de Cd no solo do que os cortes e as raízes. Seguindo a ordem de tolerância, observa-se na MSC que a forrageira Aruana foi a menos afetada pelo Cd, sendo que na redução do seu crescimento em 10 % apresentou $41,6 \text{ mg kg}^{-1}$ de Cd nos tecidos vegetais, por outro lado, a que se mostrou mais sensível foi a forrageira Tanzânia, com $20,3 \text{ mg kg}^{-1}$ de Cd nos tecidos vegetais. Para o total dos cortes as forrageiras mais tolerantes e mais sensíveis em relação ao NCT foram a Basilisk e Marandu, com $30,8$ e $8,1 \text{ mg kg}^{-1}$ de Cd em seus tecidos vegetais. Já nas raízes, parte da planta mais afetada pelo Cd segundo o NCT, teve a forrageira Basilisk como mais tolerante e a Tanzânia como mais sensível, com $21,9$ e $11,5 \text{ mg kg}^{-1}$ de Cd nos tecidos vegetais. Essa diferenciada sensibilidade ao Cd pelas forrageiras é atribuída, a diferente interação de cada uma com o solo e absorção do metal, e principalmente às diferentes bases genéticas e respostas fisiológicas à toxidez do Cd. Em estudos de manipulação genética, Guimarães et al. (2008) demonstra que pode haver contribuição para uma maior tolerância das plantas a metais pesados alterando a expressão de alguns poucos genes na planta.

Pereira (2001) estudando diferentes cultivares de alface em solo cultivado com doses crescente de Cd, verificou 8 e 19 mg kg^{-1} de Cd para causar um redução de aproximadamente 20 % na produção de massa seca nas cultivares de alface ‘Mimosa’ e ‘Regina de Verão’, enquanto Macnicol e Beckett (1985), relataram NCT de 43 a 67 mg kg^{-1} de Cd na massa seca das folhas de alface após 56 dias de cultivo em solo contaminado. Estudando nabo forrageiro e aveia preta, Lima et al. (2010) também verificou fitotoxidez ao Cd pela diminuição em 10 % na altura dessas plantas quando o teor de Cd encontrava-se acima de 4 mg kg^{-1} . McNichol e

Beckett (1985), relatam que teores acima de 4 mg kg^{-1} de Cd no tecido vegetal das plantas, podem ocasionar toxicidade e diminuir em 10 % na produção, estando de acordo com o presente trabalho e demais autores citados.

A redução da produção de massa seca e crescimento causada pela fitotoxicidade do Cd pode ser atribuída a inibição do nitrato redutase das folhas, causando uma redução da absorção do nitrato e o transporte dele das raízes para partes superiores (HERNANDEZ et al., 1996), além de afetar o metabolismo dos nutrientes como Mn, Mg e Fe (KABATA-PENDIAS e PENDIAS, 2000). A abertura estomática também é afetada pelo Cd, segundo Perfus-Barbeoch et al. (2002), a abertura estomática foi reduzida em várias plantas quando submetidas a altas doses de Cd, podendo causar a redução da taxa fotossintética e diminuição do crescimento das plantas.

Acúmulo de Cd nas forrageiras

Observa-se um comportamento diferenciado das forrageiras de acordo com as equações ajustadas que expressam o acúmulo de Cd em função das doses do metal aplicadas ao solo (Tabela 3). Nota-se pela média do acúmulo máximo de Cd nos tecidos vegetais (ACd_{\max}) a seguinte ordem decrescente de acúmulos: cortes > colmo > raízes, sendo as raízes a parte da planta que apresentou os menores acúmulos de Cd. Verifica-se que nos cortes da forrageira Basilisk foi a que apresentou maior ACd_{\max} com $276,5 \text{ } \mu\text{g/vaso}$ de Cd na dose de Cd máxima (DCd_{\max}) de $6,8 \text{ mg kg}^{-1}$, enquanto o menor acúmulo foi observado na forrageira Marandu com $134,8 \text{ } \mu\text{g/vaso}$ de Cd na dose de $12,0 \text{ mg kg}^{-1}$. No colmo, o maior e menor acúmulo de Cd foram de $130,0$ e $15,7 \text{ } \mu\text{g/vaso}$ nas DCd_{\max} de $12,0$ e $4,2 \text{ mg kg}^{-1}$ para Tanzânia e Xaraés.

Já nas raízes observou-se na Aruana o maior acúmulo de Cd com $46,0 \text{ } \mu\text{g/vaso}$ na dose de $2,4 \text{ mg kg}^{-1}$, enquanto o menor acúmulo foi notado na forrageira Tanzânia com $22,1 \text{ } \mu\text{g/vaso}$ na dose de Cd de $12,0 \text{ mg kg}^{-1}$. Considerando a planta inteira (total dos cortes + colmo + raízes) verifica-se o maior acúmulo de Cd na forrageira Basilisk com $394,8 \text{ } \mu\text{g/vaso}$. Também se verifica que as maiores DCd_{\max} (12 mg kg^{-1}) foram observadas para Tanzânia nas raízes e colmo e para Marandu nos cortes, revelando não haver qualquer relação entre a DCd_{\max} e ACd_{\max} , sendo este acúmulo ditado pelo teor de Cd nos tecidos vegetais e produção de massa seca da planta. Outra observação importante é a relação do teor (Tabela 2) e acúmulo (Tabela 3), como relatado anteriormente, embora o maior teor de Cd tenha sido verificado na forrageira Tanzânia com $497,5 \text{ mg kg}^{-1}$ (Tabela 2), essa forrageira produziu

pouca massa seca em relação as outras implicando em acúmulo 52,9 % menor do que na forrageira Basilisk (Tabela 3), onde foi observado o maior acúmulo de Cd.

Tabela 3. Equações de regressão ajustadas entre o acúmulo de Cd nas diversas massas secas de cinco forrageiras, como variável dependente (y) das doses de Cd aplicadas (x) no solo, e a dose de Cd (DCd_{Max}) correspondente ao acúmulo de Cd (ACd_{Max}) máximo num período de 90 dias após o corte de uniformização.

Forrageira	Equação de regressão	R ²	DCd _{Max} mg kg ⁻¹	ACd _{Max} µg/vaso
Massa seca total dos cortes (MSTC)				
Aruana	$y = 49,32 + 126,02**x^{0,5} - 37,13**x$	0,80	2,88	156,25
Tanzânia	$y = 37,49 + 169,16**x^{0,5} - 47,53**x$	0,80	3,17	188,00
Marandu	$y = 43,61 + 26,33**x^{0,5}$	0,96	12,00	134,82
Xaraés	$y = 33,39 + 143,49**x^{0,5} - 43,72**x$	0,90	2,69	151,12
Basilisk	$y = 24,51 + 193,04**x^{0,5} - 36,97**x$	0,99	6,82	276,50
Massa seca do colmo (MSC)				
Aruana	$y = 12,86 + 56,56**x^{0,5} - 13,34**x$	0,84	4,49	72,81
Tanzânia	$y = 1,95 + 36,99**x^{0,5}$	0,94	12,00	130,09
Marandu	$y = 4,81 + 23,88**x^{0,5} - 5,82**x$	0,98	4,21	29,31
Xaraés	$y = 5,02 + 10,40**x^{0,5} - 2,52**x$	0,97	4,26	15,75
Basilisk	$y = 7,95 + 69,32**x^{0,5} - 15,94**x$	0,82	4,73	83,31
Massa seca de raízes (MSR)				
Aruana	$y = 28,40 + 22,49**x^{0,5} - 7,15**x$	0,85	2,47	46,09
Tanzânia	$y = 12,73 + 2,73**x^{0,5}$	0,95	12,00	22,19
Marandu	$y = 33,04 - 28,44**x^{0,5} + 7,01**x$	0,95	0,00	33,04
Xaraés	$y = 26,70 - 7,38**x^{0,5}$	0,95	0,00	26,70
Basilisk	$y = 35,07 - 17,58**x^{0,5} + 4,05**x$	0,97	0,00	35,07

** Significativo a 1% pelo teste de t.

Corroborando esses resultados, Sellami et al. (2003) estudando *Thlaspi caerulescens* e *Brassica napus* cultivadas em solo contaminado com 20 mg kg⁻¹ de Cd observou acúmulos de Cd de 160 e 1.880 µg/planta. Porém, apesar da *B. napus* apresentar maiores acúmulos de Cd que *T. caerulescens* o teor de Cd em seus tecidos eram menores, com 206 mg kg⁻¹ de Cd contra 1.120 mg kg⁻¹ na *T. caerulescens*, podendo ser explicado pela maior produção de massa seca da *Brassica*, que foi de 60 a 120 vezes maior do que a outra espécie. Em contrapartida, Lima et al. (2010) relatou que o nabo forrageiro apresentou maiores teores de Cd em seus tecidos que a aveia preta, bem como a maior quantidade total acumulada. Este autor observou acúmulos de Cd de 1.450 e 170 µg/planta nas doses de Cd de 4 e 8 mg kg⁻¹ para nabo forrageiro e aveia preta.

Um dos critérios a ser seguido nos programas de fitorremediação é a escolha de espécies hiperacumuladoras. As plantas são consideradas hiperacumuladoras quando apresentam capacidade de tolerar e acumular altos teores de metais pesados em seus tecidos

quando cultivadas em altos teores do metal, no caso do Cd, concentrações acima de 100 mg kg⁻¹ (ACCIOLY e SIQUEIRA, 2000). A maioria das forrageiras em questão apresentou teores de Cd em seus tecidos maiores que 100 mg kg⁻¹, entretanto deve-se ressaltar que elas não foram tolerantes ao Cd, tendo crescimento comprometido e pouca produção de massa seca, o que influi no acúmulo de Cd nos tecidos vegetais.

A diferente produção de massa seca observada nos diferentes vegetais, inclusive nas forrageiras é devido à fitotoxicidade do Cd, interferindo diretamente no crescimento e produção. Apesar de as forrageiras apresentarem teores de Cd relativamente altos em seus tecidos, o acúmulo por vaso é baixo, reforçando a característica de sensibilidade das forrageiras estudadas ao Cd e a impossibilidade de utilização delas como fitoestabilizadoras. Uma maior disponibilidade dos metais pesados na solução do solo resulta em aumento do teor e o acúmulo desses no tecido vegetal das plantas (GUSSARSSON et al., 1995). Porém quando ocorre a fitotoxicidade da planta ao metal, como verificado no presente trabalho, a relação torna-se inversa, observa-se então, a partir da dose fitotóxica (DCd_{max}) um declínio no crescimento e na produção de massa seca pelas plantas diminuindo o acúmulo total do metal na planta.

A distribuição percentual de acúmulo de Cd nas partes das forrageiras (Figura 2) corrobora os resultados de maior acúmulo de Cd nos cortes seguido do colmo e raízes (Tabela 3). Desta forma, a ordem decrescente de porcentagem de acúmulo é a seguinte: cortes > colmo > raízes, sugerindo uma facilidade de transporte do Cd das raízes para parte aérea da planta.

Nota-se que a forrageira Tanzânia, entre as demais estudadas, é a que apresenta menor porcentagem de Cd acumulado nas raízes e total dos cortes e maior porcentagem de Cd acumulado no colmo (Figura 2), podendo ser atribuído a uma maior facilidade dessa forrageira em translocar o Cd das raízes para o colmo e por sua vez acumular o metal nessa parte da planta sem translocá-lo para as folhas, estando de acordo com o observado nos teores de Cd na planta (Tabela 2). A menor translocação do Cd para as folhas seria uma característica interessante do ponto de vista zootécnico visando à alimentação animal, entretanto, os teores de Cd verificados nos cortes (Tabela 2) de todas as forrageiras descartam a possibilidade de utilização delas para esse fim. As forrageiras Xaraés e Basilisk são as que apresentam maiores porcentagens de acúmulo de Cd nos cortes com 78 e 70 %, respectivamente, indicando maior tendência a facilidade de translocação do Cd das raízes e colmo para as folhas.

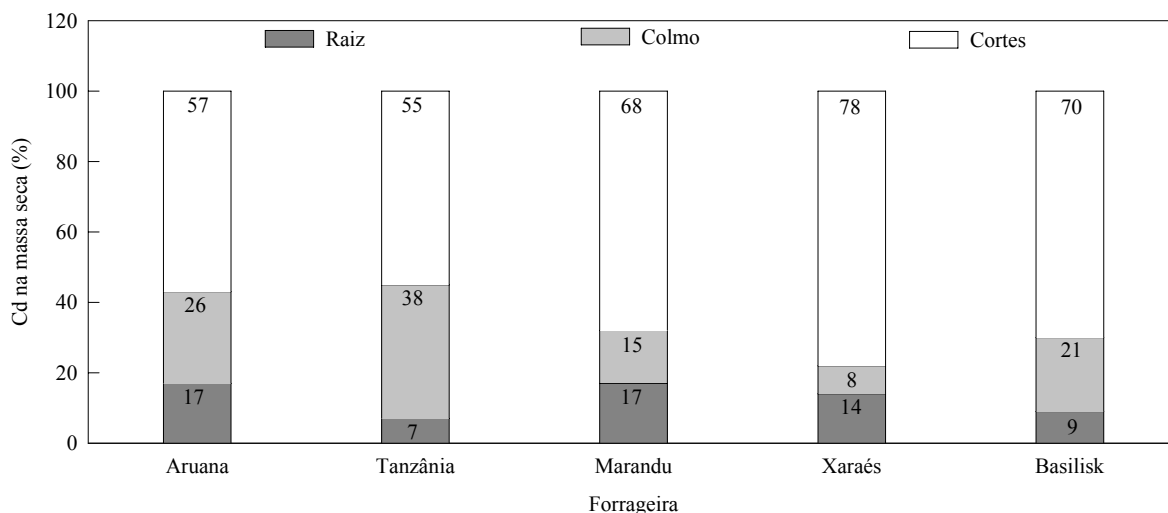


Figura 2. Distribuição percentual de acúmulo de Cd na massa seca total dos cortes, do colmo e das raízes na dose de Cd (DCd_{Max}) para o máximo acúmulo de cinco forrageiras no solo num período de 90 dias após o corte de uniformização.

Geralmente, em programas de fitorremediação o interesse é que os elementos que contaminam o solo, a serem absorvidos pelas plantas, sejam translocados para a parte aérea da planta, facilitando a remoção deles da área em questão. Porém como o intuito do presente trabalho seria a reutilização da parte aérea (cortes) para alimentação animal, nosso interesse é que o metal pesado Cd permaneça nas raízes ou no colmo das forrageiras, entretanto isso não foi verificado na distribuição percentual de acúmulo de Cd (Figura 2), o que torna desaconselhável o uso das forrageiras estudadas na reutilização para alimentação animal em solos contaminados com Cd.

Teores e NCT de Cd no solo

Os teores de Cd obtidos no solo pelos extratores Mehlich-1, DTPA pH 7,3, USEPA 3051 e USEPA 3052, de acordo com as equações de regressão ajustadas, apresentam crescimento linear com aumento das doses de Cd aplicadas ao solo (Tabela 4), sendo notado maiores teores de Cd no solo extraídos pelo método de extração total (USEPA 3052), seguido do Mehlich-1, DTPA pH 7,3 e USEPA 3051. Os valores de referência para metais pesados geralmente são atribuídos pelos métodos de extração total e semitotal (USEPA 3052 e 3051), como nas tabelas da CETESB (2005), por exemplo. Já o extrator quelante DTPA é utilizado como extrator oficial para micronutrientes no estado de São Paulo, enquanto Minas Gerais tem a utilizado o extrator Mehlich-1 nas rotinas de laboratório.

Tabela 4. Equações de regressão ajustadas entre o teor de Cd no solo extraído Mehlich-1, DTPA pH 7,3, USEPA 3051 e USEPA 3052 como variável dependente (y) das doses de Cd aplicadas (x) no solo, e nível crítico de toxidez (NCT) no solo correspondente a DCT de cinco forrageiras num período de 90 dias após o corte de uniformização.

Forrageira	Equação de regressão	R ²	NCT mg kg ⁻¹
Mehlich-1			
Aruana	$y^2 = 0,000006 + 1,3358**x^2$	0,99	0,09
Tanzânia	$y^2 = 0,000027 + 1,1084**x^2$	0,99	0,11
Marandu	$y^2 = 0,000033 + 1,1747**x^2$	0,99	0,04
Xaraés	$y^2 = 0,000019 + 1,0849**x^2$	0,99	0,08
Basilisk	$y^2 = 0,000040 + 0,9473**x^2$	0,99	0,11
DTPA pH 7,3			
Aruana	$y^2 = 0,000018 + 0,7929**x^2$	0,99	0,07
Tanzânia	$y^2 = 0,000153 + 0,6519**x^2$	0,99	0,08
Marandu	$y^2 = 0,000106 + 0,8089**x^2$	0,99	0,04
Xaraés	$y^2 = 0,000093 + 0,7496**x^2$	0,99	0,06
Basilisk	$y^2 = 0,000108 + 0,7648**x^2$	0,99	0,10
USEPA 3051			
Aruana	$y^2 = 0,0000004 + 0,5035**x^2$	0,99	0,06
Tanzânia	$y^2 = 0,0000021 + 0,3514**x^2$	0,92	0,06
Marandu	$y^2 = 0,0000016 + 0,6124**x^2$	0,98	0,03
Xaraés	$y^2 = 0,0000019 + 0,4143**x^2$	0,95	0,05
Basilisk	$y^2 = 0,0000015 + 0,3412**x^2$	0,98	0,06
USEPA 3052			
Aruana	$y^2 = 0,0000013 + 1,3878**x^2$	0,99	0,09
Tanzânia	$y^2 = 0,0000015 + 1,3691**x^2$	0,99	0,12
Marandu	$y^2 = 0,0000017 + 1,5225**x^2$	0,97	0,05
Xaraés	$y^2 = 0,0000013 + 1,3643**x^2$	0,99	0,08
Basilisk	$y^2 = 0,0000011 + 1,0025**x^2$	0,98	0,11

** Significativo a 1% pelo teste de t.

Os maiores teores extraídos pelos métodos USEPA 3052 e Mehlich-1 pode ser devido ao caráter ácido desses extratores, que promove a remoção dos metais trocáveis da fase sólida, da solução e ainda parte dos complexados. Diferentemente do extrator DTPA, um agente quelante que extrai o elemento da parte lábil do solo (PEREIRA, 2011). Embora o método USEPA 3051 também seja uma extração ácida, ele foi o menos eficiente na extração de Cd do solo em termos de quantidade, lembrando que a eficiência dos extratores deve ser obtida através da correlação entre o teor de Cd extraído do solo e os observados na planta (CANTARUTTI et al., 2007).

Os métodos USEPA 3052 e Mehlich-1 podem ter extraído mais Cd do solo em relação ao método USEPA 3051 por serem compostos de uma mistura de ácidos fortes, HNO₃ + HCl + HF e HCl + H₂SO₄ para USEPA 3052 e Mehlich-1, respectivamente, enquanto USEPA 3051 tem em sua composição apenas o HNO₃. Observando é claro, que para cada método os

ácidos têm suas concentrações moleculares devidas. Os maiores teores de Cd extraídos do solo por todos extratores foram na maior dose do metal aplicado ao solo (12 mg kg^{-1}), com 14,80; 13,87; 10,80 e $9,40 \text{ mg kg}^{-1}$ de Cd para USEPA 3052, Mehlich-1, DTPA pH 7,3 e USEPA 3051, respectivamente. Nota-se no controle (dose 0 de Cd) a extração de pequenas frações de Cd variando de $0,00063$ a $0,0123 \text{ mg kg}^{-1}$ de Cd, podendo ser devido a contaminações provindas dos adubos utilizados para a adubação básica dos vasos para o cultivo das forrageiras.

Segundo os padrões da United States Environmental Protections Agency (USEPA), dos EUA, que estabelece o teor tóxico de Cd de 20 mg kg^{-1} , o solo deste trabalho não encontra-se nos parâmetros de contaminação. Porém de acordo com a Diretriz da Comunidade Européia, que aponta concentrações de $3-8 \text{ mg kg}^{-1}$ (PEPIN e COLEMAN, 1984) e $1-3 \text{ mg kg}^{-1}$ (HALL, 1998) relatam estes teores como suficientes para toxicidade de Cd em solo contaminado. Desta forma, os teores por todos os métodos de extração estão entre $1,6$ e $14,8 \text{ mg kg}^{-1}$ de Cd no solo. De toda forma, os diversos fatores que interferem nos teores dos elementos no solo como mineralogia, pH, reações do solo, extratores químicos, tornam onerosa a comparação com a literatura.

Os resultados promissores para os extratores Mehlich-1 e DTPA, em experimento com solo contaminado por doses crescentes de Cd e diferentes extratores, demonstra que a correlação dos extratores é altamente significativa entre os teores de Cd no solo e nas plantas estudadas, além disso, observa na dose de Cd de 10 mg kg^{-1} concentrações de $8,6$ e $10,8$ para Mehlich-1 e DTPA, respectivamente (CUNHA et al., 2008). Sendo relatada uma maior recuperação do Cd pelos extratores ácidos em relação aos de caráter quelante, estando de acordo com o que constatado neste trabalho (Tabela 4).

O nível crítico de toxidez (NCT) que expressa o teor de Cd no solo quando a planta diminui em 10 % seu crescimento (Tabela 4) está bem abaixo dos teores considerados críticos para Cd por Kabata-Pendias e Pendias (2001) onde relatam que teores acima de 3 a 8 mg kg^{-1} de Cd nos solos podem causar toxidez para as plantas. Os NCT verificados variam de $0,03$ a $0,12 \text{ mg kg}^{-1}$ de Cd no solo, corroborando a alta fitotoxicidade do Cd às forrageiras. Os maiores NCT foram verificados na forrageira Tanzânia, podendo ser devido ao alto percentual de acúmulo de Cd no colmo dessa forrageira (Tabela 3) imprimindo certa tendência a tolerância ao Cd. Por outro lado, os menores NCT foram observados na forrageira Marandu, concordando com a maior sensibilidade dessa forrageira ao Cd observada pelo escore da variável canônica de crescimento (Figura 1). Valores de Cd variando de $8,7$ a $13,1 \text{ mg kg}^{-1}$ de

solo foram críticos causando a redução de aproximadamente 30% em plantas de milho (CUNHA et al., 2008), estes valores ratificam a sensibilidade das forrageiras ao Cd.

Extratores químicos e crescimento das forrageiras

Existe uma relação altamente significativa ($P < 0,01$) entre o crescimento relativo das forrageiras pela variável canônica e os extratores químicos do solo estudados (Figura 3), podendo considerar bons extratores para expressar a redução do crescimento da planta. Segundo Cantarutti et al. (2007), os extratores devem ser escolhidos baseando-se nas correlações entre o rendimento ou teor do elemento na planta e no solo determinado pelo extrator.

Os extratores apresentam também boa correlação entre as doses de Cd aplicadas ao solo e o teor de Cd recuperado. Além disso, Mehlich-1 e DTPA pH 7,3 se correlacionam bem com o crescimento das forrageiras da mesma forma que os extratores USEPA 3051 e USEPA 3042, utilizados mundialmente como referencia de qualidade em relação a teores de metais pesados no solo. A CETESB utiliza o método de extração total (USEPA 3052) na tabela de referencia da qualidade dos solos (CETESB, 2005). Vários autores concordam que o teor total é um bom indicativo do nível de contaminação do solo (CAMARGO et al., 2001, PIRES et al., 2007), estando de acordo com o verificado neste trabalho e reforçando a possibilidade de utilização dos extratores Mehlich-1 e DTPA pH 7,3 como potenciais na extração de Cd visto a alta correlação desses extratores com o crescimento das plantas e com os extratores utilizados usualmente (USEPA 3051 e USEPA 3052). Pereira et al. (2011) também relataram correlação positiva entre os extratores Mehlich-1 e DTPA e os teores nas plantas de alface e arroz cultivados em solo que recebeu doses crescentes de Cd, relataram ainda alta correlação entre os teores de Cd recuperado pelos extratores e as doses aplicadas, reforçando o que observado neste trabalho.

É de grande importância a possibilidade de utilização dos extratores Mehlich-1 e DTPA pH 7,3 como extratores potenciais para o Cd. Essa importância é devido à maior facilidade, menor periculosidade dos ácidos e do agente quelante em relação aos ácidos utilizados pelas extrações totais (USEPA 3052) e semitotal (USEPA 3051) e ainda por serem utilizados rotineiramente nos laboratórios para extração de micronutrientes no Brasil, os métodos USEPA 3051 e USEPA 3042, além de utilizarem ácidos extremamente perigosos, como é o caso do ácido fluorídrico, no USEPA 3052, esses métodos ainda dependem da utilização do micro-ondas para a digestão das amostras de solo, o que despande tempo e mão de obra especificamente qualificada.

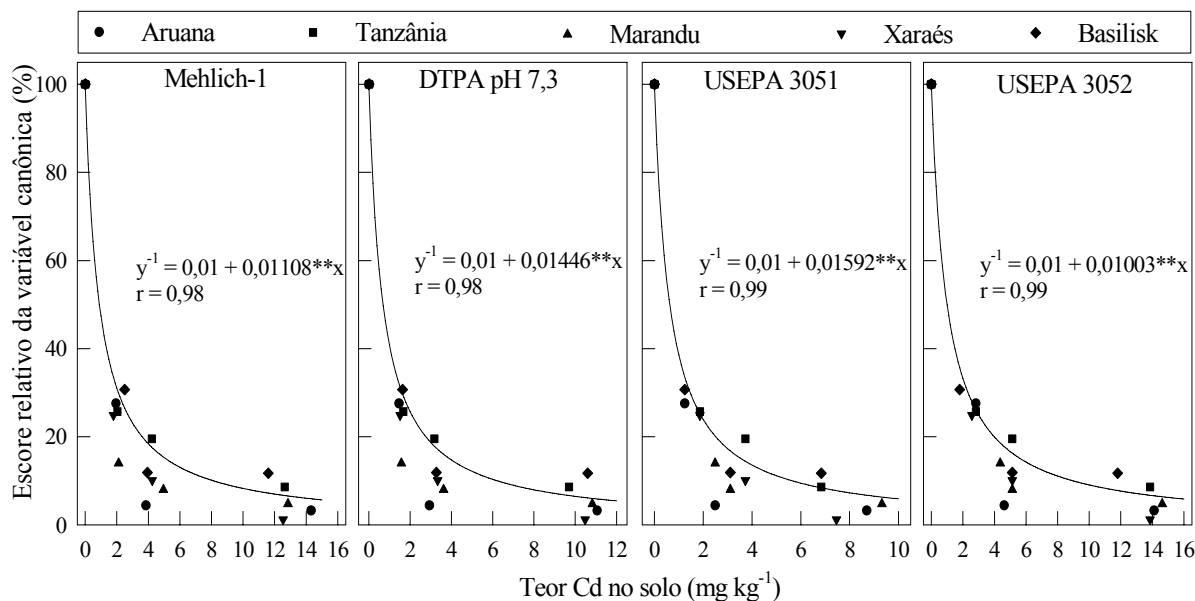


Figura 3. Relação entre o crescimento relativo das forrageiras avaliada pela variável canônica e os extratores químicos do solo (Mehlich-1, DTPA pH 7,3, USEPA 3051 e USPEPA 3052) num período de 90 dias após o corte de uniformização. (** significativo a 1% pelo teste t).

Alguns autores têm verificado ainda que os altos teores observados de alguns metais no solo têm levado os pesquisadores a acreditar que a biodisponibilidade do metal é um melhor indicativo do que o teor total do metal no solo (McLAUGHLIN et al., 2000; WANG et al., 2006). Além dos extratores Mehlich-1 e DTPA, resultados favoráveis tem sido obtidos por outros autores utilizando extrator ácido, HCl 0,1 mol L⁻¹ (ANJOS e MATTIAZZO, 2001) e solução nitroperclórica (JULIATTI et al., 2002), para predizer os teores de Cd do solo.

Coefficiente de transferência de Cd

O movimento ou transferência do metal pesado do local de absorção para as outras partes da planta pode ser obtido pelo coeficiente de transferência (*ct*), neste caso, avaliando a capacidade das plantas em absorver e transportar o Cd do solo para a parte aérea das forrageiras (Figura 3). Em estudos de fitorremediação é comum a utilização desse coeficiente no intuito de conhecer o potencial da planta em transportar o elemento em seus tecidos e indicar riscos de contaminação no caso de plantas utilizadas para alimentação, desta forma baixos valores de *ct* são desejáveis pela segurança alimentar. No presente trabalho são desejáveis baixos valores de *ct*, uma vez que as forrageiras são utilizadas na alimentação animal, podendo culminar em risco da entrada de Cd na cadeia alimentar.

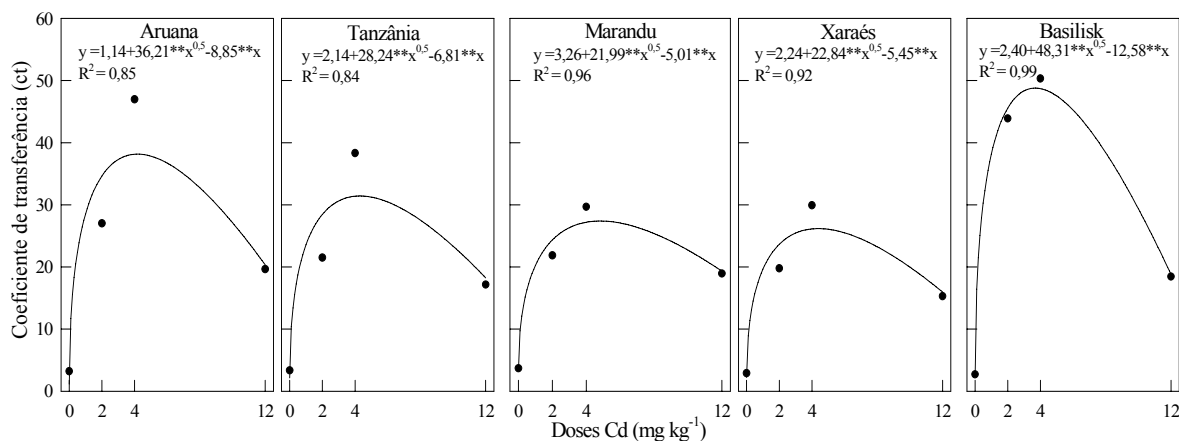


Figura 4. Coeficiente de transferência (ct) (relação entre Cd na parte aérea, mg kg^{-1} /total Cd no solo, mg kg^{-1}) de cinco forrageiras em função de doses de Cd aplicadas no solo num período de 90 dias após o corte de uniformização. (** significativo a 1% pelo teste t)

Pela correlação entre os teores de Cd no solo e o teor de Cd na parte aérea das forrageiras verificam-se os maiores valores de *ct* de 48,8; 38,1; 31,4; 27,3; 26,1 para as forrageiras Basilisk, Aruana, Tanzânia, Marandu e Xaraés, respectivamente (Figura 4). Observa-se que a Basilisk foi a que apresentou o maior *ct* entre as forrageiras, ao passo que a Xaraés foi a que menos translocou Cd das raízes para parte aérea, sugerindo a Basilisk com maior tendência a tolerância ao Cd sendo capaz de transportar altos teores de Cd das raízes para as folhas, estando de acordo com o que observado para os teores na parte aérea da planta (Tabela 2) e na variável canônica do crescimento relativo (Figura 1).

Verifica-se um decréscimo no *ct* nas forrageiras a partir de doses mais elevadas de Cd, os maiores valores de *ct* foram verificados nas doses de Cd variando de 3,69 a 4,81 mg kg^{-1} (Figura 4). Estes valores estão acima de 3 mg kg^{-1} de Cd, considerados valores de intervenção para áreas agrícolas estabelecido pela CETESB (2005). Esse declínio do *ct* pode ser explicado pela fitotoxicidade do Cd nas forrageiras, podendo ter acarretado, diminuição nas taxas de fotossíntese e respiração, redução das taxas metabólicas e do ganho e biomassa, e ainda, as altas concentrações do Cd na raiz impedindo ou limitando o transporte para as partes aéreas (PEREIRA et al., 2011). Estes mesmos autores relataram os maiores valores de *ct* de 43,8 e 8,9 nas doses de 3,3 e 3,4 mg kg^{-1} de Cd para alface e arroz. A alface, assim como as forrageiras possui potencial de translocação do Cd das raízes para a parte aérea consideravelmente maior do que o arroz. Percebe-se que as diferentes forrageiras expostas a uma concentração similar de Cd diferiram na absorção na translocação desse metal na planta. Isso pode resultar em diferenças na capacidade de retenção do Cd absorvido nas raízes podendo acarretar em variação na carga no xilema (LIMA et al., 2010).

Essa habilidade das forrageiras em transportar o Cd das raízes para a parte aérea não é uma característica desejável do ponto de vista zootécnico uma vez que o consumo da parte aérea pelos animais pode acarretar em entrada do Cd nos níveis tróficos da cadeia alimentar. Assim como Lima et al. (2010), verifica-se neste trabalho que o Cd transloca-se mais facilmente quando em menores teores de Cd no solo do que quando se aplicam doses mais elevadas. Silva et al. (2007) relataram que as plantas são capazes de restringir a absorção e translocação de grande parte dos metais pesados do solo, de maneira que a ameaça de contaminação aos humanos e animais pela presença desses contaminantes no solo seria, de forma geral, amenizada. As forrageiras, por sua vez não limitaram a absorção e translocação do Cd (Figura 4), porém foram sensíveis aos altos teores absorvidos. Chaney (1980) agrupando os metais pesados define o Cd como elemento tóxico ao arroz irrigado, estando de acordo a fitotoxicidade dele também para as forrageiras. A mobilidade do Cd nas plantas também foi verificada por Cardoso e Chasin (2001). Ainda, Korentajer (1991) avaliando a transferência de metais pesados do solo para algumas espécies de hortaliças, verificou que os metais Cd e Zn foram os que apresentaram as maiores taxas de transferência enquanto o Cr e o Pb as menores, de acordo como que constatado neste trabalho.

Apesar do constatado, que as forrageiras não foram tolerantes ao Cd, uma alternativa para aliviar esta translocação para a parte aérea seria a seleção de cultivares que tenham menor capacidade de transportar o metal pesado para a parte da planta consumida (YU et al., 2006), visto que entre elas diferentes *ct* foram observados.

CONCLUSÕES

1. O crescimento das forrageiras reduziu com aumento das doses de Cd no solo, sendo a ordem de tolerância a seguinte: Basilisk > Tanzânia > Aruana > Xaraés > Marandu.

2. Os teores de Cd aumentaram nas forrageiras em função das doses crescentes de Cd aplicadas no solo, seguindo a ordem decrescente: colmo > raízes > cortes. O maior e menor teor foram 497,54 e 58,56 mg kg⁻¹ ambos na forrageira Tanzânia, estando acima dos valores de referência de toxicidade para plantas e consumo animal.

3. Apesar dos altos teores, o Cd acumulado nas forrageiras foi reativamente baixo devido à produção de massa seca limitada pela fitotoxicidade ao Cd. Os maiores acúmulos médios foram no total dos cortes seguido do colmo e das raízes.

4. Os extratores estudados apresentaram correlação alta e negativa com crescimento relativo das forrageiras, sendo eles bons extratores para expressar o crescimento da planta. O extratores Mehlich-1 e DTPA pH 7,3 se correlacionam bem com crescimento das forrageiras

da mesma forma que os extratores USEPA 3051 e USEPA 3042, utilizados mundialmente como referência de qualidade do solo. Ainda, as doses de Cd aplicadas ao solo e o teor de Cd recuperado pelos extratores foram bem próximas.

5. As forrageiras foram incapazes de limitar a absorção e translocação de Cd, acarretando em toxicidade e declínio de crescimento e altos teores de Cd em todas as partes da planta, não proporcionando barreira à entrada do Cd na cadeia alimentar.

AGRADECIMENTOS

A Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior, pela bolsa de mestrado. Ao Departamento de Ciência do Solo da Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz (ESALQ/USP) pelas análises laboratoriais de amostras de solo. A Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri, pela infraestrutura necessária para condução do experimento.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABREU, C. A.; ABREU, M. F.; RAIJ, B. V.; SANTOS, W. R. Comparação de métodos para avaliar a disponibilidade de metais pesados. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v.19, n.3, p.463-465, 1995.
- ABREU, C.A.; ABREU, M.F.; ANDRADE, J.C. Determinação de cobre, ferro, manganês, zinco, cádmio, níquel e chumbo em solos usando a solução de DTPA em pH 7,3. In: RAIJ, B.van; ANDRADE, J.C.; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J.A. (eds.) **Análise química para avaliação da fertilidade de solos tropicais**. Campinas: Instituto Agrônomo, 2001. p.240-250.
- ABREU, C.A.; ABREU, M.F.; BERTON, R.S. Análise química de solo para metais pesados. ALVAREZ V., V.H; SCHAEFER, C.E.G.R; BARROS, N.F.; VARGAS DE MELLO, J.W.V.; COSTA, L.M. **Tópicos em Ciência do Solo**. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, v.2, 2002. p.645-692.
- ACCIOLY, A.M.A.; SIQUEIRA, J.O. Contaminação química e biorremediação do solo. In: NOVAIS, RF; ALVAREZ V.; VH; SCHAEFER, CEGR **Tópicos em ciência do solo**. Viçosa: Sociedade Brasileira de ciência do solo. v.1, 2000, p.299-352.
- ALLOWAY, B.J. **Heavy metals in soils**. 2nd ed. Glasgow: Blackie Academic, 1995. 364p.
- ALVAREZ V., V.H.; RIBEIRO, A.C. Calagem. In: RIBEIRO, A.C., GUIMARÃES, P.T.G.; ALVAREZ V., V.H. **Recomendações para o uso de corretivos e fertilizantes em Minas Gerais**. Viçosa: CFSEMG, 1999. p.43-60.
- ANJOS, A.R.M.; MATTIAZZO, M.E. Extratores para Cd, Cu, Cr, Mn, Ni, Pb e Zn em latossolos tratados com bio-sólido e cultivados com milho. **Scientia Agrícola**, Piracicaba, v.58, n.2, p.337-344, 2001.

- CAMARGO, O.A.; ALLEONI, L.R.F.; CASAGRANDE, J.C. Reações dos micronutrientes e elementos tóxicos no solo. In: FERREIRA, M.E.; CRUZ, M.C.P.; RAIJ, B. van; ABREU, C.A. (Ed.) **Micronutrientes e elementos tóxicos na agricultura**. Jaboticabal: CNPq/FAPESP/POTAFOS, 2001. p. 89-124.
- CANTARELLA, H.; RAIJ, B. van; CAMARGO, C.E.O. Cereais. In: RAIJ, B. van; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J.A.; FURLANI, A.M.C. **Recomendação de adubação e calagem para o Estado de São Paulo**. 2.ed. Campinas: Instituto Agrônômico, 1997. p.43-71. (IAC. Boletim técnico, 100).
- CANTARUTTI, R.B.; BARROS, N.F.; MARTINEZ, H.E.P.; NOVAIS, R.F. Avaliação da fertilidade do solo e recomendação de fertilizantes. In: NOVAIS, R.F.; ALVAREZ V., V.H.; BARROS, N.F.; FONTES, R.L.F.; CANTARUTTI, R.B.; NEVES, J.C.L. (Eds.). **Fertilidade do Solo**. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2007. p.769-850.
- CARDOSO, L.M.N.; CHASIN, A.A.M. **Ecotoxicologia do cádmio e seus compostos**. Salvador: CRA, 2001. 122p. (Cadernos de referência ambiental, 6).
- CETESB. Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental. **Valores orientadores para solos e águas subterrâneas no estado de São Paulo**. Decisão de diretoria No 195-2-005-E. (CETESB). 2005.
- CHANEY, R.L. Health risks associated with toxic metals in municipalsludge. In: BITTON, G.; DAMRON, B.L.; EDDS, G.T.; DAVIDSON, J.M. (Ed.). **Sludge health risks of land application**. Ann Arbor: Ann Arbor Science, 1980. p.59-83.
- CORRÊA, A.X.R.; RORIG, L.R.; VERDINELLI, M.A.; COTELLE, S.; FERARD, J.F.; RADETSKI, C.M. Cadmium phytotoxicity: Quantitative sensitivity relationships between classical endpoints and antioxidative enzyme biomarkers. **Science of The Total Environment**, Bethesda, v.357, n.1-3, p.120-127, 2006.
- CUNHA K.P.V.; NASCIMENTO C.W.A.; PIMENTEL R.M.M.; ACCIOLY A.M.A.; SILVA A.J. Disponibilidade, acúmulo e toxidez de cádmio e zinco em milho cultivado em solo contaminado. **Revista Brasileira de Ciências do Solo**, Viçosa, v.32. n.3, p.1319-1328, 2008.
- DANG, Y.P.; CHHABRA, R.; VERMA, K.S. Effect of Cd, Ni, Pb and Zn on growth and chemical composition of onion and fenugreek. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, New York, v.21, n.9-10, p.717-735, 1990.
- DAVIS, R.D.; BECKETT, P.H.T.; WOLLAN, E. Critical levels of twenty potentially toxic elements in young spring barley. **Plant and Soil**, Oxford, v.49, n.2, p.395-408, 1978.
- EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos (Rio de Janeiro, RJ). **Sistema brasileiro de classificação de solos**. Brasília: SPI, 2006. 306p.
- EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos (Rio de Janeiro, RJ). **Manual de métodos de análise do solo**. Brasília: Produção de Informação, 1997. 212p.
- FREIRE, J.C.; RIBEIRO, M.A.V.; BAHIA, G.V.; LOPES, A.S.; AQUINO, L.H. Resposta do milho cultivado em casa de vegetação a níveis de água em solo da região de Lavras, MG. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v.4, n.1, p.5-8, 1980.
- FURTINI NETO, A.E.F.; VALE, F.R.; RESENDE, A.V.; GUILHERME, L.R.G.; GUEDES, G.A.A. **Fertilidade do solo**. Lavras: Ufla/Faepe, 2001. 252p.
- GUIMARÃES, M.A.; SANTANA T.A.; SILVA E.V.; ZENZEN I.L.; LOUREIRO M.E. Toxicidade e tolerância ao cádmio em plantas. **Revista Tropica: Ciências Agrárias e Biológicas**, São Luís, v.1, n.3, p.58, 2008.

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**, Dordrecht, v.171, n.1, p.185-187, 1995.

HALL, J. Standardising and the management of biosolids the international experience. In: SEMINÁRIO SOBRE GERENCIAMENTO DE BIODISSÓLIDOS DO MERCOSUL, Curitiba, 1998. **Anais...** Curitiba: SANEPAR/ABEAS, 1998. p.113-122.

HERNANDEZ, L.E.; CARPENA-RUIZ, R.; GARATE, A. Alterations in the mineral nutrition of pea seedlings exposed to cadmium. **Journal of Plant Nutrition**, Madrid, v.19, n.12, p.1581-1598, 1996.

JEZLER, C.N. **Efeitos da contaminação do solo com chumbo e cádmio no crescimento, óleo essencial e ultraestrutura de *Mentha arvensis* L. (Lamiaceae)**. 2012. 45f. Dissertação (Mestrado em Produção Vegetal) Universidade Estadual de Santa Cruz, Ilhéus.

JULIATTI, M.A.; PRADO R.M.; BARRIQUELO M.F.; LENZI E. Cádmio em latossolo vermelho cultivado com milho em colunas: mobilidade e biodisponibilidade. **Revista Brasileira de Ciências do Solo**, Viçosa, v.26, n.4, p.1075-1081, 2002.

KABATA-PENDIAS, A.; PENDIAS, H. **Trace Elements in Soils and Plants**. 3.ed. London: CRC Press, 2000. p.123-167.

KABATA-PENDIAS, A.; PENDIAS, H. **Trace elements in soils and plants**. 3.ed. Boca Raton: CRC Press, 2001. 413p.

KARAM, D.; SILVA, J. A. A.; MAGALHÃES, P. C.; OLIVEIRA, M. F.; MOURÃO, S. A. **Manejo das forrageiras dos gêneros *Brachiaria* e *Panicum* consorciadas com o milho em sistemas de integração lavoura-pecuária**. Sete Lagoas: Embrapa Milho e Sorgo, 2009. 7 p. (Embrapa Milho e Sorgo. Circular Técnica, 130).

KING, L.D.; HAJJAR, L.M. The residual effect of sewage sludge on heavy metal content of tobacco and peanut. **Journal of Environmental Quality**, Madison, v.19, n.4, p.738-748, 1990.

KORCAK, R.F.; FANNING, D.S. Extractability of cadmium, copper, nickel, and zinc by double acid versus DTPA and plant content at excessive soil levels. **Journal of Environmental Quality**, Madison, v.7, n.4, p.506-512, 1978.

KORENTAJER, L. A review of the agricultural use of sewage sludge: benefits and potential hazards. **Water S.A.**, Pretoria, v.17, n.3, p.189-196, 1991.

LESCHBER, R., DAVIS, R.D.; HERMITE, P.L. **Chemical methods for assessing bioavailable metals in sludges and soils**. Amsterdam: Elsevier, 1985. 96p.

LI, P.; WANG, X.; ALLINSON, G.; LI, X.; XIONG, X. Risk assessment of heavy metals in soil previously irrigated with industrial wastewater in Shenyang. **Journal of Hazardous Materials**, China, v.161, n.1, p.516-52, 2009.

LIMA, C.V.S.; MEURER, E.J.; SCHMIDT, R.O.; SOUZA, E.D. Potencial de fitoextração do nabo forrageiro e da aveia preta em argissolo contaminado por cádmio. **Revista de Estudos Ambientais**, Blumenau, v.12, n.1, p.39-49, 2010.

LIU, J.; CAI, G.L.; QIAN, M.; WANG, D.K.; XU, J.K.; YANG, J.C.; ZHU, Q.S. Effect of Cd on the growth, dry matter accumulation and grain yield of different rice cultivars. **Journal of the Science of Food and Agriculture**, London, v.87, n.6, p.1088-1095, 2007.

MACNICOL, R.D.; BECKETT, P.H.T. Critical tissue concentrations of potentially toxic elements. **Plant and Soil**, Dordrecht, v.85, n.1, p.107-129, 1985.

- MALAVOLTA, E. **Elementos de nutrição mineral de plantas**. Piracicaba: Ceres, 1980. 251p.
- MALAVOLTA, E.; VITTI, G. C.; OLIVEIRA, S. A. **Avaliação do estado nutricional das plantas: princípios e aplicações**. 2. ed. Piracicaba: POTAFOS, 1997. 319 p.
- McLAUGHLIN, M.J.; ZARCINAS, B.A.; STEVENS, D.P.; COOK, N. Soil testing for heavy metals. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, New York, v.31, n.11-14, p.1661-1700, 2000.
- MEHLICH, A. New extractant for soil test evaluation of phosphorus, potassium, magnesium, calcium, sodium, manganese and zinc. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, New York, v.9, n.6, p.477-492, 1978.
- MENGEL, K.; KIRKBY, E.A. **Principles of plant nutrition**. 5th ed. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers., 2001. 849p.
- MORRISON, D.F. **Multivariate statical methods**. New York: Mc Graw-Hill Book CO., 1967. 415p.
- NACHTIGALL, G.R.; NOGUEIRO, L.R.C.; ALLEONI, L.R. F. Extração seqüencial de Mn e Zn em solos em função do pH e adição de cama-de-frango. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.13, n.3, p.240-249, 2009.
- NASCIMENTO, C.W.A.; ACCIOLY, A.M.A.; BIONDI, C.M. Fitoextração de metais pesados em solos contaminados: avanços e perspectivas. In: RIBEIRO, M.R.; NASCIMENTO, C.W.A.; FILHO RIBEIRO, M.R.; CANTALICE, J.R.B. **Tópicos em ciência do solo**. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2009. p.461-497.
- NASCIMENTO, V.S. **Avaliação de *Pennisetum purpureum* na fitorremediação de zinco e cádmio em solo enriquecido com resíduo**. 2008. 76f. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo) Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica.
- PAIVA, H. N.; CARVALHO J.G.; SIQUEIRA J.O. Efeito de Cd, Ni, Pb e Zn sobre mudas de cedro (*Cedrela fissilis Vell.*) e de ipê-roxo (*Tabebuia impetiginosa* (Mart.) Stanley). **Revista Árvore**, Viçosa, v.24, n.4, p.369-378, 2000.
- PEPIN, R.G.; COLEMAN, P. Paper mill sludge and ash as soil conditioner. **Biocycle**, Emmaus, v.25, n.4, p.52-54, 1984.
- PEREIRA, A.R. **Como selecionar plantas para áreas degradadas e controle de erosão**. Belo Horizonte: FAPI, 2006. 150p.
- PEREIRA, B.F.F.; ROZANE, D.E.; ARAÚJO, S.R.; BARTH, G.; QUIROZ, R.J.B; NOGUEIRA, T.A.R.; MORAES, M.F.; CABRAL, C.P; BOARETTO, A.E.; MALAVOLTA, E. Cadmium availability and accumulation by lettuce and rice. **Revista Brasileira de Ciências do Solo**, Viçosa, v.35, n.2, p.645-654, 2011.
- PEREIRA, J.M.N. **Absorção e distribuição de cádmio e zinco em plantas de alface e cenoura**, 2001. 71f. Dissertação (Mestrado em Solos e Nutrição de Plantas) Universidade Federal de Viçosa, Viçosa.
- PERFUS-BARBEOCH, L.; LEONHARDT, N.; VAVASSEUR, A.; FORESTIER, C. Heavy metal toxicity: cadmium permeates through calcium channels and disturbs the plant water status. **The Plant Journal**, Oxford, v.32, n.4, p.539-548, 2002.
- PIRES, A.M.M.; MARCHI, G.; MATTIAZZO, M.E.; GUILHERME, L.R.G. Organic acids in the rhizosphere and phytoavailability of sewage sludge-borne trace elements. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.42, n.7, p.917-924, 2007.

SELLAMI, R.; GHARBI, F.; REJEB, S.; REJEB, M.N.; SCHWARTZ, C.; MOREL, J.L. Short-term phytoextraction of soil Cd with *Thlapsi caerulescens* and rape. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON THE BIOGEOCHEMISTRY OF TRACE ELEMENTS, 7., 2003. **Annals...** Uppsala-Sweden: SLU Service, 2003. p.204-205.

SILVA, F. C. **Manual de análises químicas de solos, plantas e fertilizantes**. 2.ed. Brasília: Embrapa Informações Tecnológicas, 2009. 627p.

SILVA, M.L.S.; VITTI G.C.; TREVIZAM A.R. Concentração de metais pesados em grãos de plantas cultivadas em solo com diferentes níveis de contaminação. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.42, n.4, p.527-535, 2007.

SOARES, C.R.F.S.; ACCIOLY, A.M.A.; AGUIAR A.M.; MARQUES, T.C.L.L.S.M.; SIQUEIRA O.S.; MOREIRA F.M.S. Acúmulo e distribuição de metais pesados nas raízes, caule e folhas de mudas de árvores em solos contaminados por rejeitos de indústria de zinco. **Revista Brasileira de Fisiologia Vegetal**, Campinas, v.13, n.3, p.302-315, 2001.

SOUZA, A.G.; SOARES FILHO, C.V.; MELLA, S.C. Espécies forrageiras recomendadas para o Paraná. In: MONTEIRO, A.L.G.; MORAES, A.; CORRÊA, E.A.S. et al. (Eds.). **Forragicultura no Paraná**. Londrina: CPAF. 1996. p.196-205.

UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY – USEPA. **Microwave Assisted Acid digestion of Sediments, Sludges, Soils and Oils** – Method 3052 – SW – 846,1994. Disponível em: URL <http://www.epa.gov/epaosver/hazwaste/test/3052.pdf>>[2007].

USEPA. UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. **Soil screening guidance: technical background document**. Washington DC: EPA, Office of Solid Waste and Emergency Response, 1996. 168p.

VOLLENWEIDER P.; COSIO, C., GÜNTHARDT-GOERG, M.S.; KELLER, C. Localization and effects of cadmium in leaves of a cadmium-tolerant willow (*Salix viminalis* L.): Part II Microlocalization and cellular effects of cadmium. **Environmental and Experimental Botany**, Oxford, v.58, n.1-3, p.25-40, 2006.

WANG, G.; SU, M.Y.; CHEN, Y.H.; LIN, F.F.; LUO, D.; GAO, S.F. Transfer characteristics of cadmium and lead from soil to the edible parts of six vegetable species in southeastern China. **Environmental Pollution**, Barking, v.144, n.1, p.127-135, 2006.

YU, H.; WANG, J.L.; FANG, W.; YUAN, J.G.; YANG, Z.Y. Cadmium accumulation in different rice cultivars and screening for pollution-safe cultivars of rice. **Science of the Total Environment**, Amsterdam, v.370, p.302–309, 2006.

CONCLUSÃO GERAL

As forrageiras estudadas reduziram o crescimento relativo com aumento das doses de Cd aplicadas, tanto na solução nutritiva quanto no solo, configurando a fitotoxicidade do Cd nessas plantas. A suscetibilidade ao Cd foi diferenciada para os experimentos e essa diferença de suscetibilidade é atribuída às diferentes interações das forrageiras com o solo. Em ambos os experimentos (solução nutritiva e solo) o teor de Cd nas forrageiras aumentou em função das doses crescentes de Cd, mostrando-se acima dos valores de referência de toxicidade para plantas e consumo animal. Os extratores Mehlich-1 e DTPA foram bons extratores para expressar o crescimento da planta e o teor de Cd no solo. De toda forma, as forrageiras foram incapazes de limitar a absorção e translocação de Cd, acarretando em toxicidade e declínio de crescimento e altos teores de Cd em todas as partes da planta, não proporcionando barreira à entrada do Cd na cadeia alimentar.