



Revista Brasileira de Geografia Física

Homepage: www.ufpe.br/rbgfe



Potencial de Espécies de Leguminosas para Recuperação de Solo Contaminado por Arsênio

Roseli Freire de Melo.¹; Luis Eduardo Dias²; Igor Rodrigues de Assis³

¹Engenheira Agrônoma, D.Sc.Pesquisadora – EMBRAPA- Centro de Pesquisa Agropecuária do Trópico Semiárido (CPATSA), Caixa Postal 23, Cep. 56302-970- Petrolina-PE, Zona Rural, roseli.melo@embrapa.br Autor correspondente.

² Professores do Departamento de Solos, bolsista CNPq, Universidade Federal de Viçosa – UFV, CEP 36570-000, Viçosa-MG - ledias@ufv.br,

³ Professor do Departamento de Solos, Universidade Federal de Viçosa, CEP 36570-000 Viçosa-MG , igor.assis@ufv.br,

Artigo submetido em 17/09/2014 e aceite em 28/12/2015

RESUMO

O presente estudo objetivou avaliar o potencial de mucuna preta, feijão de porco e crotalaria atuarem como espécies fitorremediadoras de solos contaminados por arsênio. Amostras de um Latossolo Vermelho Amarelo foram incubadas com diferentes doses de arsenato (0; 50; 100 e 200 mg dm⁻³) e semeadas as três espécies. Aos 65 dias após a semeadura as plantas foram avaliadas quanto à altura, diâmetro e massa seca da parte aérea e de raízes. Teores e conteúdos de arsênio (As) foram determinados nas folhas jovens, intermediárias e basais, caule e raízes, estabelecendo-se o índice de translocação (IT) do elemento entre o sistema radicular e a parte aérea das plantas. Por meio de análises de regressão foram estimados os teores críticos (TC) de As disponível no solo que proporcionaram redução de 50% na produção de biomassa das plantas. As espécies avaliadas mostraram comportamento diferenciado quanto à tolerância ao As, com destaque para mucuna preta que não manifestou sintomas morfológicos visuais de toxidez, como lesões nas folhas, e apresentou valores de TC significativamente superiores aos observados para as demais espécies. A crotalaria apresentou maior capacidade de absorção e translocação de As para a parte aérea, mostrando maior potencial para programas de fitorremediação. Os elevados conteúdos de As nas raízes de feijão de porco e mucuna preta, e na parte aérea da crotalaria sugerem a atuação de mecanismos diferenciados de acumulação e de translocação do metaloide nos tecidos da parte aérea das espécies avaliadas.

Palavras-chave: Fitorremediação, Arsenato, *Canavalia ensiformes*, *Stizolobium aterrimum*, *Crotalaria spectabilis*

Legumes Species Potential for Contaminated Soil Recovery for Arsenic

ABSTRACT

This study aimed to evaluate the velvetbean (*Stizolobium aterrimum* Piper e Tracy), jack bean (*Canavalia ensiformis* L.) and crotalaria (*Crotalaria spectabilis* Roth.) potential to phytoremediation of arsenic-contaminated soils. Samples of Red Yellowish Latossol were incubated with different doses of sodium arsenate 0; 50; 100 and 200 mg dm⁻³, and 15 days later the species were seeded. Sixty five days after seeding, plants were evaluated to height, diameter and root and shoot biomass. Arsenic content in young, intermediated, and old leaves, stem and roots, and As-translocation index (IT) were determined. By regression analysis the values of critical soil available arsenic (TC) that reduced 50% of biomass production were determinate. The species showed different As-tolerance behavior, with emphasis to velvet bean that did not show As-toxic morphologic symptoms, as injuries in leaves, and showed high values of TC. Crotalaria plants presented more absorption and shoot translocation of arsenic, showing more potential to phytoremediation programs. The high As-contents in the roots of jack bean and velvet bean and shoot of crotalaria suggests the occurrence of different accumulation and translocation mechanisms to shoots tissues among the evaluated species.

Key-words: phytoremediation, arsenate, *Canavalia ensiformis*, *Stizolobium aterrimum*, *Crotalaria spectabilis*

¹Engenheira Agrônoma, D.Sc.Pesquisadora – EMBRAPA- Centro de Pesquisa Agropecuária do Trópico Semiárido (CPATSA), Caixa Postal 23, Cep. 56302-970- Petrolina-PE, Zona Rural, roseli.melo@embrapa.br

² Professores do Departamento de Solos, bolsista CNPq, Universidade Federal de Viçosa – UFV, CEP 36570-000, Viçosa-MG - ledias@ufv.br,

³ Professor do Departamento de Solos, Universidade Federal de Viçosa, CEP 36570-000 Viçosa-MG , igor.assis@ufv.br,

Introdução

O arsênio (As) é um metalóide tóxico encontrado em vários minérios e rejeitos processados na indústria mineral, especialmente na extração de ouro. Alterações de ordem físico-química em áreas de mineração podem desestabilizar o As contido nos minérios, permitindo seu transporte para os diferentes compartimentos ambientais, o que se constitui em risco potencial à saúde humana (Veado et al., 2000; Bundschuh et al., 2012).

O As é um elemento-traço altamente tóxico para os seres vivos. Em solos não contaminados, podem ser encontrados teores inferiores a 10 mg kg^{-1} (Adriano, 2001). Em áreas contaminadas, seu teor pode chegar a valores três mil vezes superiores a esse (Vaughan, 1993). A fitorremediação tem sido considerada uma técnica emergente e de baixo custo para a "limpeza" de áreas contaminadas por elementos tóxicos (Accioly e Siqueira, 2000). No entanto, ainda é restrito o número de espécies com capacidade para acumular As.

No Brasil existem áreas com sérios impactos devido à presença do As disponível no ambiente resultantes da mineração de ouro, a exemplo dos estados de Minas Gerais e Mato Grosso, que tem resultado na contaminação de crianças e adultos, bem como, contaminação de ovos e carnes, causando sérias preocupações a população (Deschamps et al., 2003, Borba et al., 2003). Pesquisa realizada por Borba (2002) revelou sinais de contaminação por As no solo e na água utilizada por moradores do Quadrilátero Ferrífero, que abrange as cidades de Ouro Preto, Santa Bárbara, Nova Lima e outras cidades históricas, em Minas Gerais.

No Brasil, a legislação ambiental exige que áreas degradadas devam ser recuperadas, mas apesar da exigência legal, a recuperação de substratos remanescentes de mineração pode ser uma tarefa difícil. A presença de As e metais em concentrações que comprometem o estabelecimento de plantas e colocam em risco corpos d'água mostra-se como um sério complicador do processo de recuperação ambiental. Existe crescente interesse em técnicas biológicas para a despoluição de solos e águas contaminadas (Accioly e Siqueira, 2000), particularmente naquelas que usam espécies

vegetais (Shimp et al., 1993; Melo et al., 2010), num processo que recebe o nome de fitorremediação.

Estudos básicos sobre a fitotoxicidade e tolerância de espécies vegetais aos estresses impostos pelo excesso de elementos tóxicos são essenciais para o desenvolvimento da tecnologia de fitorremediação de áreas contaminadas. Conhecer os padrões de absorção, translocação e acúmulo de íons metálicos, os limites de tolerância e os sintomas de fitotoxidez das espécies com potencial para introdução em áreas contaminadas, torna-se de grande importância acadêmica e tecnológica (Huang e Cunningham, 1996). Nesse âmbito, tecnologias de aplicação "in situ" com uso de plantas na imobilização e/ou estabilização possuem custo benefício mais atraente do que outras técnicas de remediação físico-química "ex situ" (Glass, 1997, Susarla et al., 2002).

Este trabalho teve como objetivos avaliar a produção de biomassa e a absorção e distribuição de As em raízes, caule e folhas de plantas de feijão de porco (*Canavalia ensiformis* L.), mucuna preta (*Stilozobium aterrimum* Piper e Tracy) e crotalária (*Crotalaria spectabilis* Roth.), bem como, o potencial dessas para uso em programas de fitorremediação de áreas contaminadas com arsênio.

Material e métodos

Amostras subsuperficiais (20-40 cm) de um Latossolo Vermelho-Amarelo (Tabela 1) coletada na região de João Pinheiro-MG, foram destorroadas, peneiradas (peneira com malha de 4 mm) e incubadas por 15 dias com 0; 50; 100 e 200 mg dm^{-3} de As (Na_2HAsO_4). Em um ensaio preliminar, com o mesmo solo e tempo de incubação, a aplicação dessas doses resultou em teores disponíveis (Mehlich-3) de As da ordem de 0,0; 12,9; 26,8 e 58,7 mg dm^{-3} , respectivamente. Da mesma forma, constatou-se que a condutividade elétrica no solo (relação solo-água de 1:1, Camargo et al., 1986) variou de 116 a 314 $\mu\text{S cm}^{-1}$.

Quanto ao uso do arsenato de sódio como fonte de As, a aplicação de sódio no sistema foi de 15,4; 30,8 e 61,6 mg dm^{-3} para as doses de 50; 100 e 200 mg dm^{-3} de As, respectivamente.

Tabela 1. Características químicas e físicas da amostra do Latossolo Vermelho-Amarelo da região de João Pinheiro-MG.

Característica Química									
pH H ₂ O	P-rem	As-rem	P ¹	K ^{1/}	Ca ^{2+4/}	Mg ^{2+4/}	Al ^{3+ 4/}	H+Al ^{5/}	M.O
..... mg L ⁻¹ mg dm ⁻³ cmol _c dm ⁻³		dag			
5,2	26,29	27,82	1,1	25	0,00	0,00	1,32	4,5	2,01
Característica Física									
Areia grossa ^{6/}	Areia fina ^{6/}	Silte ^{6/}	Argila ^{6/}	Dens. Aparent ^{7/}	Classe textural	Equiv. Umidad ^{7/}			
..... %.....									
kg									
40	17	2	41	1,29	Argilo-arenoso	0,13			

1/ Extrator Mehlich I; 4/ Extrator KCl mol/L; 5/ CTC a pH 7,0 extraída com acetato de cálcio 1 ml L⁻¹; 6/ Método da pipeta (EMBRAPA, 1997); 7/ EMBRAPA (1997); LVA - Latossolo Vermelho e Amarelo; P-rem – Fósforo remanescente e As-Rem- arsênio remanescente do solo, conforme Alvarez et al. (2000) e Ribeiro Jr (2002), respectivamente.

Após o período de incubação, amostras de 1,39 dm³ de solo (equivalente a 1,8 kg de solo) foram acondicionadas em vasos plásticos (capacidade para 2L) nos quais foram transplantadas sementes pré-germinadas das espécies *Canavalia ensiformis* L. (feijão de porco), *Stilozobium aterrimum* Piper e Tracy (mucuna preta) e *Crotalaria spectabilis* Roth. (crotalária), deixando três plântulas por vaso no oitavo dia após a emergência.

A adubação com macronutrientes foi realizada aos nove dias após a emergência, aplicando-se 60 mg dm⁻³ de N, 100 mg dm⁻³ de P e K e 50 mg dm⁻³ de Mg, na forma de soluções de fosfato de amônio, nitrato de amônio, fosfato de cálcio, fosfato de potássio e sulfato de magnésio, conforme recomendação da análise de solo. Nessa adubação a fonte de P utilizada foi o superfosfato triplo com 12% de Ca. Para todas as espécies, a adubação nitrogenada foi parcelada em duas aplicações; aos nove e aos 35 dias após emergência. As adubações com micronutrientes foram realizadas na forma de solução, as quais foram parceladas equitativamente em quatro aplicações (15, 30, 45 e 60 dias após a emergência), nas doses totais de 0,81; 3,66, 4,00; 1,33; 0,15 e 1,56 mg dm⁻³ de B, Mn, Zn, Cu, Mo e Fe, respectivamente (Alvarez, 1974).

O experimento foi conduzido em casa de vegetação, num delineamento em blocos casualizados com três repetições. Durante o período experimental a temperatura na casa de vegetação variou entre 20,4 a 31,3 °C, e a

umidade relativa do ar manteve-se entre 50 a 69%.

Aos 65 dias após a semeadura as plantas foram avaliadas quanto à altura e diâmetro do colo e a parte aérea cortada rente ao solo. Em seguida, foram divididas em folhas jovens (FJ), folhas intermediárias (FI), folhas basais (FB), caule (C), pecíolo (Pec), e raízes (R). As raízes foram lavadas com água de torneira até a retirada completa do solo e, após esse procedimento, imersas por aproximadamente 1 minuto em solução a 0,1 mol L⁻¹ de HCl, seguida de vários enxágües com água deionizada.

Para a separação dos diferentes tipos de folhas, consideraram-se folhas jovens as folhas tenras, não expandidas completamente e os brotos; já as folhas basais foram aquelas maduras e em estágio de senescência (amareladas); as demais folhas foram consideradas intermediárias. Para determinação da massa de matéria seca, as diferentes partes da planta foram secas em estufas de circulação forçada de ar, a 60-70 °C, até peso constante.

Para determinar a concentração de As nas diferentes partes das plantas, amostras de 1,00 g de material seco e triturado foram submetidas à digestão nítrico-perclórica (3:1) (Tedesco et al., 1995).

A dosagem dos teores de As nos extratos de plantas e As disponível no solo (extrator Mehlich-3) foram realizadas por espectrometria de emissão atômica, com plasma induzido em argônio (ICP/AES) no comprimento de ondas de 193 nm. Para fins de avaliação da exatidão do método de determinação de As em material

vegetal, um padrão de referência de As (GBW07603), composto por ramos e folhas de arbustos cultivadas em áreas de mineração de zinco e chumbo na China, adquirida do Institute of Geophysical and Geochemical Exploration-Langtang-China foi analisado com os mesmos procedimentos adotados nessa pesquisa. A taxa média de recuperação de As da amostra padrão foi da ordem de 94%.

Em função da quantidade acumulada de As nos diferentes compartimentos das plantas, as espécies foram classificadas quanto ao caráter de tolerância, em espécies com potenciais para fitoestabilização (tolerantes e acumuladoras de As nas raízes) e fitoextração (espécies tolerantes e acumuladoras de As na parte aérea). As espécies foram consideradas acumuladoras, quando as concentrações nas raízes e parte aérea foram

superiores à concentração do solo (Accioly e Siqueira, 2000).

Por meio de análise de regressão, considerando-se a massa seca da parte aérea em função das doses de As aplicadas, foram estipuladas as doses críticas (DC) de As que proporcionaram a redução de 50% de matéria seca produzida em relação às plantas controle (testemunha). Substituindo-se os valores de DC nas equações de regressão para teores de As disponíveis no solo, em função das doses de As aplicadas, permitiu estimar o teor crítico (TC) de As disponível no solo que proporcionou a redução de 50% da matéria seca produzida.

Por meio da quantidade de As acumulada, calculou-se o índice de translocação do As (IT), de acordo com Abichequer e Bohnen (1998), pela seguinte equação:

$$IT (\%) = \frac{\text{Quantidade de As acumulada na parte aérea (folhas + caule)} \times 100}{\text{Quantidade de As acumulada na planta}}$$

Resultado e discussão

Crescimento e Sintomas de toxidez nas plantas

Com duas semanas após a emergência, as plantas de feijão de porco e crotalária, submetidas às doses de 100 e 200 mg dm⁻³ começaram a apresentar sintomas visuais de toxidez, apresentando folhas basais com clorose internerval, seguida de necrose (Figura 1). As lesões foliares observadas nas plantas não foram suficientes para caracterizá-las como plantas sensíveis, pois não houve morte das plantas. Os sintomas característicos de toxicidade de As nas plantas em geral são: murchamento das folhas, crescimento lento das raízes e brotos, necroses e cor arroxeadada das folhas basais e finalmente morte

da planta (Woolson et al., 1971; O'Neil, 1990; Adriano, 2001; Melo et al., 2009).

A produção de matéria seca (Figura 2) foi significativamente afetada pelas doses de As, causando redução na parte aérea na ordem de 41%; 47% e 43%, das plantas de mucuna preta, feijão de porco e crotalária, respectivamente, para a dose de 200 mg dm⁻³, em relação à testemunha (Figura 2).

Quanto à produção matéria seca radicular, as plantas de mucuna preta apresentaram ligeira redução com valor de 9% na dose de 200 mg dm⁻³, em relação à planta controle. O feijão de porco e a crotalária que apresentaram redução na matéria seca de raízes na ordem de 50% e 29%, respectivamente, em relação às plantas da testemunha (Figura 2). Esse comportamento indica maior tolerância ao As pela mucuna em relação às outras duas espécies.

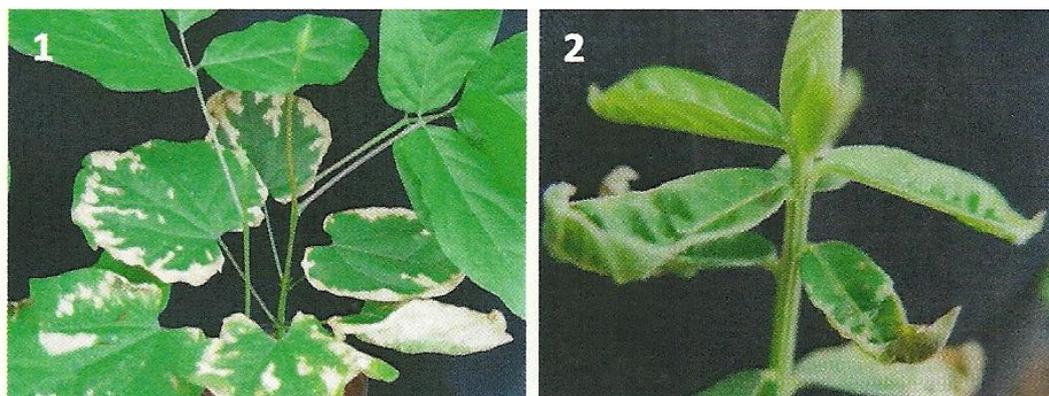


Figura 1. Sintomas visuais de toxidez por arsênio em folhas de feijão de porco (1) e crotalária (2) submetidas a doses crescentes de arsênio

As doses de As aplicadas ao solo causaram ligeiro decréscimo no diâmetro de caule das plantas, com exceção da mucuna preta quando submetida à dose 200 mg dm⁻³ que apresentou ganho no diâmetro de colo da ordem de 15% em relação à dose de 100 mg dm⁻³ (Figura 3).

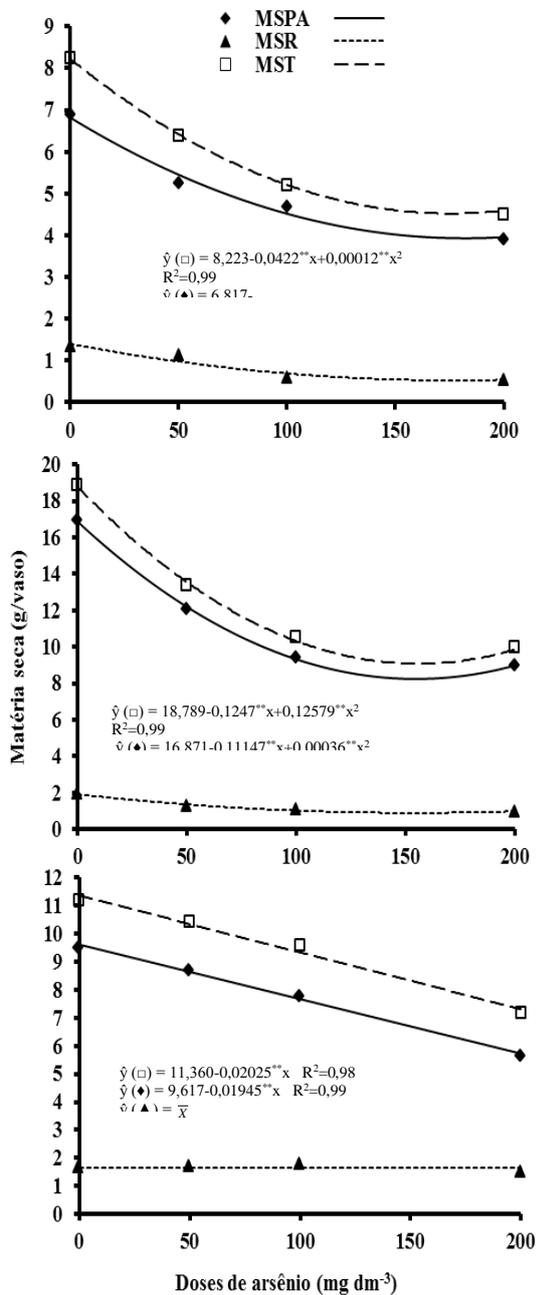


Figura 2. Matéria seca da parte aérea (MSPA), raízes (MSR) e total (MST) de plantas de crotalária (1), feijão de porco (2) e mucuna preta (3) submetidas a diferentes doses de arsênio. ** significativo a 1 % de probabilidade.

De modo geral, foi possível constatar que as plantas de mucuna preta tiveram seu desenvolvimento menos afetado, sendo que, as plantas de crotalária e feijão de porco mesmo apresentando significativa redução no crescimento e sintomas de toxidez por As, foram capazes de permanecer crescendo até o final do experimento, aos 65 dias. As plantas foram coletadas nesse período devido ser a fase de desenvolvimento que tem maior acumulação de biomassa.

A altura das plantas foi significativamente ($p \leq 0,01$) afetada pelas doses crescentes de As no solo, em todas as espécies estudadas. Houve resposta tipo raiz quadrada para feijão de porco, porém, linear para mucuna preta e crotalária (Figura 4). Os decréscimos foram de 40%, 38% e 22% para as plantas de crotalária, feijão de porco e mucuna preta, respectivamente. O menor efeito na altura das plantas de mucuna preta, provavelmente, se deve à menor translocação do As para a parte aérea, sugerindo a existência de um mecanismo efetivo de controle interno da translocação do metalóide.

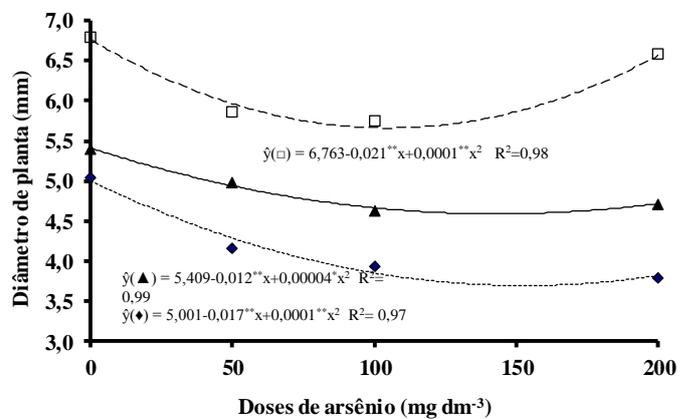


Figura 3. Diâmetro do caule de planta de mucuna preta (□), feijão de porco (△) e crotalária (◇) submetidas a diferentes doses de As. ** e * efeitos significativos a 1 % e 5% de probabilidade, respectivamente pelo teste F.

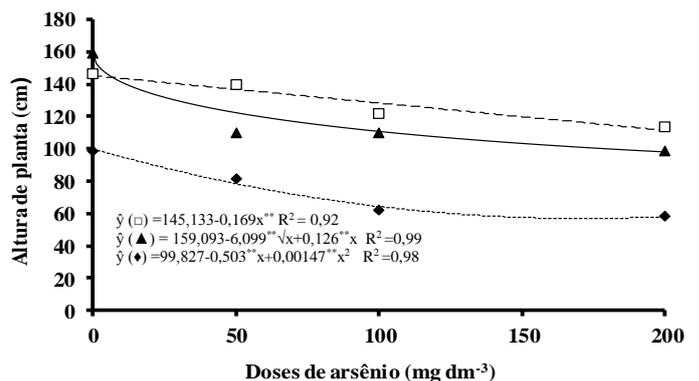


Figura 4. Altura de plantas de mucuna preta (□), feijão de porco (▲) e crotalária (◆) submetidas a diferentes doses de As. ** efeito significativo a 1 % de probabilidade, pelo teste F.

Teores e conteúdos de arsênio nos diferentes compartimentos das plantas

De acordo com a análise de variância houve influencia significativa para as doses

crescentes de As no solo nas diferentes partes das plantas, para todas as espécies estudadas (Tabela 2), porém de forma diferenciada entre as espécies, conforme se verifica nos modelos ajustados para os teores de As nos diferentes compartimentos das plantas em função das doses aplicadas ao solo (Tabela 3). A distribuição diferenciada de elementos tóxicos em compartimentos de plantas é, de certo modo, relacionada com a absorção e translocação do elemento e pode estar diretamente relacionada a mecanismos de tolerância (Accioly e Siqueira, 2000)

Tabela 2. Teores de arsênio em folhas jovens (FJ), folhas intermediárias (FI), folhas basais (FB), pecíolo (Pec), caule (C) e nas raízes (R) em plantas de feijão de porco, mucuna preta e crotalária em resposta a diferentes doses de arsênio

ESPÉCIES	DOSES	TEORES DE ARSÊNIO					
		Fj	FI	FB	Pec	C	R
	mg dm ⁻³	----- mg kg ⁻¹ -----					
Feijão de porco	0	AL	AL	AL	AL	AL	AL
	50	1,45	1,92	3,68	1,99	1,35	127,80
	100	2,39	3,13	5,01	2,16	1,58	158,15
	200	1,95	3,94	3,01	2,11	1,63	269,45
	CV (%)	5,30	5,52	4,28	5,73	5,89	2,60
Mucuna preta	0	AL	AL	AL	AL	AL	AL
	50	0,25	0,76	1,83	0,86	1,19	153,19
	100	0,80	1,03	1,43	2,43	2,47	190,61
	200	1,46	0,79	8,86	6,44	6,84	271,77
	CV(%)	11,97	5,99	6,71	3,77	3,80	3,31
Crotalária	0	AL	AL	AL	§	AL	AL
	50	3,70	18,60	39,93	§	5,10	149,19
	100	7,12	23,42	50,30	§	9,19	177,15
	200	5,93	35,36	79,30	§	5,72	282,18
	CV(%)	7,88	6,72	5,30	§	8,18	2,61

Valores não determinados devido à ausência de pecíolos

AL Concentrações abaixo do limite de detecção pelo método de dosagem (ICP/AES)

Os teores de As nas diferentes partes das plantas de feijão de porco apresentaram grande variabilidade, de modo que, os maiores valores encontrados na parte aérea (Tabela 2) foram nas doses de 100 mg dm⁻³ para FJ, FB e Pec e na de 200 mg dm⁻³ para FI. Sendo que no sistema radicular os teores de As chegaram a ser 53,9 vezes superior ao considerado normal para plantas (considerando o limite de 5 mg kg⁻¹) na dose de

200 mg dm⁻³ (Tabela 2). Alguns estudos mostram que teores de As solúvel variando de 1 a 10 mg kg⁻¹ já seriam fitotóxicos para algumas culturas como feijão, alfafa e arroz (Bishop e Chisholm, 1962), enquanto um teor disponível (Mehlich 3) de 26,9 mg dm⁻³ já seria suficiente para causar morte de plantas de sorgo (Ribeiro Jr. 2002).

Tabela 3. Equações de regressão dos teores de arsênio¹⁾ em folhas jovens (FJ), intermediárias (FI), basais (FB), caule (C), pecíolo (Pec) raízes (R), arsênio do solo no final do experimento (AsDisp), conteúdo de arsênio na parte aérea (CAsPA), conteúdo de arsênio nas raízes (CAsR), conteúdo de arsênio total na planta (CAsT) em mucuna preta, feijão de porco e crotalária, em função de diferentes doses de arsênio aplicadas no solo.

ESPÉCIES	COMPARTIMENTO S	EQUAÇÃO DE REGRESSÃO	R ²
Mucuna Preta	FJ ¹⁾	$\hat{y} = -0,033 + 0,0054^{**}x$	0,99
	FI ¹⁾	$\hat{y} = 0,018 + 0,0173^{**}x - 0,000067^{**}x^2$	0,99
	FB ¹⁾	$\hat{y} = 0,406 - 0,00486^{**}x + 0,0002^{**}x^2$	0,96
	C ¹⁾	$\hat{y} = 0,042 + 0,016275^{**}x - 0,000088^{**}x^2$	0,99
	Pec ¹⁾	$\hat{y} = -0,035 + 0,01547^{**}x + 0,000085^{**}x^2$	0,99
	R ¹⁾	$\hat{y} = 9,646 + 2,7105^{**}x - 0,00708^{**}x^2$	0,97
	AsDisp ²⁾	$\hat{y} = -3,691 + 0,02019^{**}x$	0,95
	CAsPA ³⁾	$\hat{y} = 0,002 + 0,00067^{**}x$	0,99
	CasR ³⁾	$\hat{y} = 0,014 + 0,00508^{**}x - 0,000016^{**}x^2$	0,98
	CasT ³⁾	$\hat{y} = 0,001 + 0,0462^{**}\sqrt{x} - 0,000528^{**}x$	0,99
	Feijão de porco	FJ	$\hat{y} = -0,022 + 0,03743^{**}x - 0,000138^{**}x^2$
FI		$\hat{y} = 0,014 + 0,04334^{**}x - 0,000119^{**}x^2$	0,99
FB		$\hat{y} = 0,065 + 0,08695^{**}x - 0,000362^{**}x^2$	0,99
C		$\hat{y} = 0,001 + 0,2644^{**}\sqrt{x} - 0,01058^{**}x$	0,99
Pec		$\hat{y} = 0,007 + 0,3998^{**}\sqrt{x} - 0,01784^{**}x$	0,99
R		$\hat{y} = 1,809 + 13,524^{**}\sqrt{x} + 0,360098^{**}x$	0,98
AsDisp		$\hat{y} = -0,082 + 0,0745^{**}x + 0,00046^{**}x^2$	0,99
CAsPA		$\hat{y} = 0,0001 + 0,02747^{**}\sqrt{x} - 0,00135^{**}x$	0,99
CAsR		$\hat{y} = 0,031 + 0,02224^{**}\sqrt{x} - 0,000314^{**}x$	0,97
CAsT		$\hat{y} = 0,003 + 0,04933^{**}\sqrt{x} - 0,00116^{**}x$	0,98
Crotalária		FJ	$\hat{y} = -0,196 + 0,1075^{**}x - 0,00038^{**}x^2$
	FI	$\hat{y} = 1,190 + 0,3234^{**}x - 0,00077^{**}x^2$	0,97
	FB	$\hat{y} = 0,408 + 4,8808^{**}\sqrt{x} + 0,0444^{**}x$	0,99
	C	$\hat{y} = -0,236 + 0,1489^{**}x - 0,00059^{**}x^2$	0,98
	R	$\hat{y} = 1,976 + 18,347^{**}\sqrt{x} + 0,0798^{**}x$	0,98
	AsDisp	$\hat{y} = -0,170 + 0,1249^{**}x + 0,00055^{**}x^2$	0,99
	CAsPA	$\hat{y} = 0,001 + 0,06256^{**}\sqrt{x} - 0,001975^{**}x$	0,99
	CAsR	$\hat{y} = 0,006 + 0,0249^{**}\sqrt{x} - 0,00104^{**}x$	0,78
	CAsT	$\hat{y} = 0,007 + 0,0867^{**}\sqrt{x} - 0,002977^{**}x$	0,97

** e * significativo a 1% e 5% de probabilidade pelo teste F, respectivamente.

1) Teores de arsênio (mg kg⁻¹)

2) As disponível Mehlich 3 após a coleta do experimento

3) Conteúdos de As (mg vaso⁻¹)

Os teores mais elevados de As nas plantas de mucuna preta foram observados na dose de 200 mg dm⁻³ em todos os compartimentos estudados, exceção das FI que apresentaram maior teor na dose de 100 mg dm⁻³. Quanto aos teores de As nas raízes, as plantas de feijão de porco e de mucuna preta apresentaram os maiores teores na dose de 200 mg dm⁻³. Os valores chegam a ser 4,6 vezes superior à concentração de As disponível no solo e 53,9 e 54,4 vezes maior que a concentração considerada normal plantas (folhas) no ambiente (5,0 mg kg⁻¹).

Conforme Wauchope, (1983), algumas plantas podem acumular níveis elevados de metais variando de 100 a 1000 vezes mais do que o nível normal acumulado pela maioria das espécies que é de 0,1-5,0 mg kg⁻¹, em solos não contaminados.

As plantas de crotalária apresentaram teores de As consideravelmente elevados quando comparados aos das plantas de feijão de porco e

mucuna preta, com maiores teores no sentido acrópeto na dose de 200 mg dm⁻¹ para FI e FB, respectivamente. Quanto aos teores de As em FJ e C os maiores valores foram encontrados na dose de 100 mg dm⁻³ (Tabela 2). O As apresenta nas plantas maiores teores preferencialmente em folhas basais, como observado em outros trabalhos (Zhang et al., 2002, Ma et al., 2001; Melo et al., 2010; Dias et al., 2011).

O conteúdo de As nas diferentes partes das plantas foram influenciados significativamente ($p \leq 0,01$) pelas diferentes doses de arsênio. De modo geral, os conteúdos de As em plantas de feijão de porco e crotalária em função das doses aplicadas, ajustaram-se ao modelo raiz quadrático (Tabela 3), com os maiores conteúdos no sistema radicular na dose de 200 mg dm⁻³ (0,26 mg vaso⁻¹) e na parte aérea (0,14 mg vaso⁻¹) na doses de 100 mg dm⁻³ (Tabela 4). Para as plantas de mucuna preta ajustaram-se nos modelos linear, quadrática e raiz quadrada para os conteúdos de As na parte aérea, raízes e

total, respectivamente, com maiores conteúdos no sistema radicular.

As plantas de feijão de porco e mucuna preta apresentaram maiores conteúdos de As nas raízes que na parte aérea. Contrariamente ao observado nas plantas de crotalária, que apresentou maior acúmulo de As na parte aérea (Tabela 4). O comportamento diferencial observado nas plantas de crotalária merece destaque, devido ao potencial de acumulação na parte aérea, comportamento típico de espécie com potencial para fitoextração.

O acúmulo de As, sobretudo nas raízes e não na parte aérea nas plantas de feijão de porco e mucuna preta (Tabela 4), indicam potencialidade para fitoestabilização de solos contaminados por As. Sendo assim, merece ressaltar que essas plantas são perenes, a matéria seca produzida no final de cada ciclo poderá ser utilizada como fonte de matéria orgânica do solo, reduzindo assim a biodisponibilidade do elemento no sistema.

O aumento do teor de matéria orgânica no solo contribuirá na redução do As disponível, podendo assim favorecer o estabelecimento de espécies arbóreas e arbustivas, utilizadas na seqüência do processo de revegetação de áreas contaminadas. No entanto, somente a realização de estudos específicos poderia conduzir à comprovação dessa hipótese.

O comportamento diferenciado entre as espécies pode estar relacionado à própria genética, sendo assim, a maior e/ou menor capacidade de absorção e acumulação de As, entre plantas acumuladoras e não acumuladoras parece não estar relacionado somente ao volume do sistema radicular produzido. Mas, a outros mecanismos relacionados à absorção de elementos químicos pelas raízes que envolvem o transporte de íons pela membrana plasmática e também a adsorção destes na parede celular das células do córtex (Marschner, 1995).

Tabela 4. Conteúdo de arsênio na parte aérea (PA), raízes (R), total (T) e arsênio disponível no solo (AsDisp) após a coleta das plantas de feijão de porco, mucuna preta e crotalária em função de doses de arsênio aplicadas ao solo.

ESPÉCIES	DOSES mg dm ⁻³	PA ----- mg vaso ⁻¹ -----	R ----- mg vaso ⁻¹ -----	T	AsDisp mg dm ⁻³
Feijão de porco	0	AL	AL	AL	AL
	50	0,13	0,17	0,29	4,97
	100	0,14	0,17	0,30	12,69
	200	0,11	0,26	0,38	59,91
	CV (%)	3,01	6,61	4,39	4,83
Mucuna preta	0	AL	AL	AL	AL
	50	0,04	0,26	0,31	4,42
	100	0,06	0,34	0,40	12,10
	200	0,14	0,40	0,55	39,40
	CV (%)	6,59	7,63	6,61	4,74
Crotalária	0	AL	AL	AL	AL
	50	0,36	0,17	0,52	6,65
	100	0,42	0,10	0,52	18,12
	200	0,50	0,16	0,66	46,58
	CV (%)	3,92	10,09	3,08	19,76

AL Concentrações abaixo do limite de detecção pelo método de dosagem (ICP/AES)

De acordo com a tabela 4 houve efeito significativo de doses ($p \leq 0,01$) para os teores de As disponível no solo para todas as espécies estudadas. Os teores encontram-se significativamente superiores ao valor de referência para solos do Estado de São Paulo, que é de 3,5 mg kg⁻¹ de As disponível determinado pelo método da USEPA 3051 ou 3151 (CETESB, 2005), e ao limite de As disponível no solo (12

mg kg⁻¹), no caso dos EUA, para que se iniciem ações de remediação (Chen et al., 2001; Davis et al., 2001).

A baixa capacidade de adsorção de As e P observada nesse solo, a julgar pelos elevados teores de As e P remanescentes (Tabela 1) contribuiu para a maior disponibilidade do As às plantas, esse comportamento pode favorecer a limpeza do solo por meio da absorção do As pela

planta com potencial para fitoremediação, em especial as acumuladoras. Estudos mostram que a adubação fosfatada pode resultar em aumento na disponibilidade de aproximadamente 77% do As (Peryea, 1998), em função do deslocamento do arsenato dos sítios de adsorção pelos ânions fosfato (Creger e Peryea, 1994).

De acordo com a tabela 4 houve efeito significativo de doses ($p \leq 0,01$) para os teores de As disponível no solo para todas as espécies estudadas. Os teores encontram-se significativamente superiores ao valor de referência para solos do Estado de São Paulo, que é de $3,5 \text{ mg kg}^{-1}$ de As disponível determinado pelo método da USEPA 3051 ou 3151 (CETESB, 2005), e ao limite de As disponível no solo (12 mg kg^{-1}), no caso dos EUA, para que se iniciem ações de remediação (Chen et al., 2001; Davis et al., 2001).

A baixa capacidade de adsorção de As e P observada nesse solo, a julgar pelos elevados teores de As e P remanescentes (Tabela 1) contribuiu para a maior disponibilidade do As às plantas, esse comportamento pode favorecer a limpeza do solo por meio da absorção do As pela planta com potencial para fitoremediação, em especial as acumuladoras. Estudos mostram que a adubação fosfatada pode resultar em aumento na disponibilidade de aproximadamente 77% do As (Peryea, 1998), em função do deslocamento do arsenato dos sítios de adsorção pelos ânions fosfato (Creger e Peryea, 1994).

Índice de translocação e teores críticos de arsênio no solo

As doses crescentes de As influenciaram significativamente ($p \leq 0,01$) a translocação deste elemento para a parte aérea nas plantas de crotalária, feijão de porco e mucuna preta (Figura 5), ajustando-se no modelo raiz quadrada a crotalária e feijão de porco e no modelo linear a mucuna preta. O IT de As foi maior nas plantas de crotalária chegando a 81 e 75% nas doses de 100 e 200 mg dm^{-3} , respectivamente.

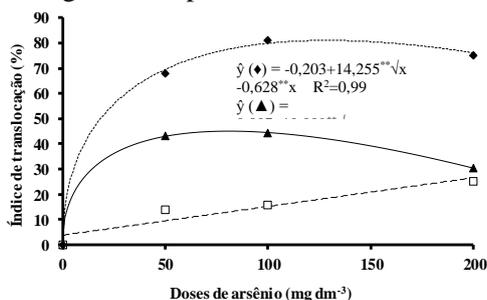


Figura 5. Índice de translocação de arsênio em plantas de mucuna preta (\square), feijão de porco (\blacktriangle) e crotalária (\blacklozenge) submetidas a diferentes

doses de arsênio aplicadas ao solo. * * efeito significativo a 1 % de probabilidade pelo teste F.

De modo geral, as plantas de mucuna preta e feijão de porco apresentaram índice de translocação relativamente baixos. Porém, concentrações desse elemento entre $0,1$ e $5,0 \text{ mg kg}^{-1}$ na matéria seca da parte aérea são consideradas tóxicas para plantas (Wauchope, 1983). As plantas de feijão de porco apresentaram maiores índices nas doses de 50 e 100 mg dm^{-3} com valores de 43% e 44%, respectivamente (Figura 5). Ao contrário das demais espécies. Os IT obtidos para a mucuna preta ajustaram-se ao modelo linear positivo, cujos valores foram significativamente inferiores, atingindo apenas 25% na dose de 200 mg dm^{-3} .

O maior acúmulo de As no sistema radicular em relação à parte aérea nas plantas de feijão de porco e mucuna preta pode indicar baixa capacidade de controle na absorção e/ou maior eficiência no controle da translocação deste metalóide, evitando que o As chegue aos tecidos metabolicamente mais ativos da parte aérea. Por outro lado, o maior acúmulo de As na parte aérea em relação ao sistema radicular em plantas de crotalária pode indicar uma eficiente absorção e/ou elevado potencial na translocação de As (Figura 5), fazendo com que esse chegue à parte aérea, sem resultar, no entanto, em sintomas graves de toxidez na dose de 200 mg dm^{-3} . Este comportamento pode estar relacionado aos mecanismos de síntese de fitoquelatinas que têm um papel fundamental na desintoxicação de As em plantas (Sneller et al., 1999; Pickeren et al., 2000; Schmöger et al., 2000; Meharg e Hartley-Whitaker, 2002).

O teor crítico de As disponível no solo (TC) necessário para reduzir em 50% a matéria seca da parte aérea e de raízes (Tabela 5), mostra a influência que a contaminação exerce sobre as plantas (Soares, 1999). O TC de As no solo para as plantas de mucuna preta foram superiores, tanto para matéria seca de raiz quanto para parte aérea, indicando que essa espécie tolera concentrações mais elevadas de As disponível no solo em relação às outras duas espécies. Entre crotalária e feijão de porco, a segunda mostrou-se menos tolerante. Esse comportamento diferencial entre espécies pode ter base genética ou fisiológica, como a possível existência de fitoquelatinas presentes nas raízes, capazes de complexar e transportar o As para o vacúolo evitando assim a toxidez das plantas (Ma et al., 2001; Cipriane et al., 2013).

De modo geral, foi possível constatar que as espécies estudadas foram tolerantes ao As, com

potencial de acumulação no sistema radicular para mucuna preta e feijão de porco, e na parte aérea nas plantas de crotalária o que caracteriza essas espécies com potencial para fitoestabilização de As, principalmente por se tratar de espécies de rápido crescimento e elevada produção de matéria seca. Para crotalária vale ressaltar que essa espécie pode apresentar potencial para fitorremediação, mesmo não sendo considerada uma espécie hiperacumuladora. Deve-se levar em consideração o plantio sequencial e a produção com a retirada das plantas do local contaminado, e Tabela 5. Teores críticos de arsênio disponível (Mehlich 3) no solo necessário para reduzir em 50% a matéria seca de raízes e parte aérea de mucuna preta, feijão de porco e crotalária cultivadas em amostras de um LVA de João Pinheiro, MG.

TEOR CRÍTICO NO SOLO	MUCUNA PRETA	FEIJÃO DE PORCO	CROTALÁRIA
	----- mg dm ⁻³ -----		
TC _{50%} raiz	93,00	32,25	50,93
TC _{50%} parte aérea	72,88	37,39	52,85

que no campo as plantas têm comportamento diferenciado em relação ao cultivo em vaso. Nesse sentido, serão necessários, estudos em condições de campo para melhor expressar o potencial dessa espécie como planta fitorremediadora de solo contaminado com As.

Conclusões

As plantas de mucuna e feijão de porco apresentam potencial para fitorremediação de áreas contaminadas por As, principalmente para fitoestabilização.

As plantas de mucuna e feijão de porco mostraram bom potencial para programas de recuperação de áreas degradadas pela contaminadas por As.

A maior sensibilidade da crotalaria a elevados teores de As disponível no solo sugere que essa espécie possa ser utilizada como planta bioindicadora do contaminante no ambiente.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao CNPq (CT-Mineral), Rio Paracatu Mineração e a Embrapa Semiárido.

Referências

Abichequer, A.D., Bohnen, H., 1998. Eficiência de absorção, translocação e utilização de fósforo por variedades de trigo. *Revista Brasileira de Ciência do Solo* 22, 21-26.

Accioly, A.M.A., Siqueira, J.O., 2000. Contaminação química e biorremediação do solo. In: Novais, R.F.; Alvarez V.; V.H.; Schaefer, C.E.G.R. *Tópicos em ciência do*

solo. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, pp. 299-352.

Adriano, D.C., 2001. *Trace Elements in the Terrestrial Environment*. New York: Springer.

Alvarez V., H.V., 1974. Equilíbrio de formas disponíveis de fósforo e enxofre em dois latossolos de Minas Gerais. Viçosa, MG. *Dissertação (Mestrado)*. Viçosa, UFV.

Alvarez, V., V.H., Novais, R.F., Dias, L.E., Oliveira, J.A., 2000. Determinação e uso do fósforo remanescente. *B. Inf. SBCS*. Viçosa.

Bishop, R.F., Chisholm, D., 1962. Arsenic accumulation in Annapolis Valley orchard soil. *Canadian Journal of Soil Science* 42, 77-80.

Borba, R.P., 2002. *Arsênio em ambiente superficial: processos geoquímicos naturais e antropogênicos em uma área de mineração aurífera*. Tese (Doutorado). Campinas, UNICAMP.

Borba R.P., Figueiredo B.F., Zambello F., 2003. Método quantitativo de análise do As_{Total}, especiação do As em amostras de água: aplicação no monitoramento ambiental de As em água. In: SBGq, IX Congresso Brasileiro de Geografia, Anais, 313-315.

Bundschuh, J., Litter, M.I., Parvez, F., Román-Ross, G., Nicolli, H.B., Jean, J.S., Liu, C.W., López, D., Armienta, M.A., Guilherme, L.R.G., Cuevas, A.G., Cornejo, L., Cumbal, L., Toujaquez, R., 2012. One century of arsenic

- exposure in Latin America: A review of history and occurrence from 14 countries. *Science of the Total Environment* 429, 2-35.
- Camargo, O.A., Moniz, A.C., Jorge, J. A., Valadares, J. M.A.S., 1986. Métodos de análise química, mineralógica e física de solos do Instituto Agrônomo de Campinas. Campinas: IAC, SDTC, (Boletim Técnico, 106).
- CETESB. Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental, 2005. Valores Orientadores para Solos e Águas Subterrâneas no Estado de São Paulo. Disponível: http://www.cetesb.sp.gov.br/Solo/relatorios/tab_ela_valores_2005.pdf. Acesso:15 de mai. 2013.
- Cipriani, H.N., Dias, L.E., Costa, M.D., Campos, N.V., Azevedo, A.A., Gomes, R.J., Fialho, I.F., Amezquita, S.P.M., 2013. Arsenic toxicity in *Acacia mangium* willd. and *mimosa Caesalpiniaefolia* benth. seedlings. *Revista Brasileira de Ciência do Solo* 37, 1423-1430.
- Chen, M., Ma, L.Q., Hoogeweg, C.G., Harris, W.G., 2001. Arsenic background concentrations in Florida, U.S.A. surface soils: Determination and interpretation. *Environmental Forensics* 2, 117-126.
- Creger, T.L., Peryea, F.J., 1994. Phosphate fertilizer enhances arsenic uptake by apricot liners grown in lead-arsenate enriched soil. *Horticultural Science* 29, 88-92.
- Davis, A., Sherwin, D., Ditmars, R., Hoenke, K.A., 2001. An analysis of soil arsenic records of decision. *Environmental Science & Technology* 35, 2401-2406.
- Dias, L.E., Melo, R.F., Mello, J.W.V., Oliveira, J.A., Daniels, W.L., 2010. Growth of seedlings of pigeon pea (*Cajanus cajan* (L.) Millsp), wand river hemp (*Sesbania virgata* (Cav.) Pers.), and lead tree (*Leucaena leucocephala* (Lam.) de Wit) in an arsenic-contaminated soil. *Revista Brasileira de Ciência do Solo* 34, 975-983.
- Deschamps, F.C., Noldin, J.A., Eberhardt, D.S., Hermes, L.C., Knoblauch, R., 2003. Resíduos de agroquímicos em água nas áreas de arroz irrigado, em Santa Catarina. In: Congresso Brasileiro de Arroz Irrigado, 3./Reunião da Cultura do Arroz Irrigado, 25, Balneário Camboriú, SC. Anais..., pp. 683-685.
- EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos, 1997. Manual de métodos de análise de solos. Rio de Janeiro.
- Glass, D.J., 1997. Evaluating Phytoremediation's Potential Share of the Hazardous Site Remediation Market, in: *Phytoremediation (Proceedings of the Second International Phytoremediation Conference)*, IBC Library Service, Westborough, MA, pp. 7-39.
- Huang, J.W., Cunningham, S.D., 1996. Lead phytoextraction: species variation in lead uptake and translocation. *New Phytologist* [online] 134. Disponível: <http://dx.doi.org/10.1111/j.1469-8137.1996.tb01143.x>. Acesso: 12 jun. 2013.
- Ma, L.Q., Komar, K.M., Tu, C., Zhang, W., Cai, Y., Kennelley, E.D., 2001. Fern that hyperaccumulates arsenic. *Nature*, 409-579.
- Marschner, H., 1995. Mineral nutrition of higher plants. 2.ed. Academic Press, San Diego.
- Meharg, A.A., Hartley-Whitaker, J., 2002. Arsenic uptake and metabolism in arsenic resistant and non-resistant plant species: *Tansley Review*. *New Phytologist* 154, 29-43.
- Melo R.F, Dias L.E, Mello, J.W.V, Oliveira, J.A., 2009. Potencial de quatro espécies herbáceas forrageiras para fitorremediação de solo contaminado por arsênio. *Revista Brasileira de Ciência do Solo* 33, 455-465.
- Melo, R.F., Dias, L.E., Mello, J.W.V., Oliveira, J.A., 2010. Behavior of *Eucalyptus grandis* and *E. cloeziana* seedlings grown in arsenic-contaminated soil. *Revista Brasileira de Ciência do Solo* 34, 985-992.
- O'Neill, P., 1990. Arsenic. In *Heavy Metals in Soils*. John Wiley and Sons, New York.
- Peryea, F.J., 1998. Phosphate starter fertilizer temporarily enhances soil arsenic uptake by apple trees grown under field conditions. *Horticultural Science* 33, 826-829.
- Pickering, I.J., Prince, R.C., George, M.J., Smith, R.D., George, G.N., Salt, D.E., 2000. Reduction and coordination of arsenic in Indian mustard. *Plant Physiology* 122, 1171-1177.
- Ribeiro JR, E.S. 2002. Adsorção e dessorção de arsênio em solos e substratos de mineração de ouro e práticas de mitigação de drenagem ácida em colunas de lixiviação. Tese (Doutorado). Viçosa, UFV.
- Schmöger, M.E.V., Oven, M, Grill, E., 2000. Detoxification of arsenic by phytochelatins in plants. *Plant Physiology* 122, 793-801.

- Shimp, J.F., Tracy, J.C., Davis, L.C., Lee, E., Huang, W., Erickson, L.E., Shnoor, J.L., 1993. Beneficial effects of plants in the remediation of soil and groundwater contaminated with organic materials. *Environmental Science & Technology* [online] 23. Disponível: <http://dx.doi.org/10.1080/10643389309388441>. Acesso: 15 jul. 2013.
- Sneller, F.E.C., Van Heerwaarden, L.M., Kraaijeveld-Smit, F.J.L., Ten Bookum, W.M., Koevoets, P.L.M., Schat, H., Verkleij, J.A.C., 1999. Toxicity of arsenate in *Silene vulgaris*, accumulation and degradation of arsenate-induced phytochelatins. *New Phytologist* 144, 223-232.
- Soares, C.R.F.S. Toxidez de zinco cobre cádmio e chumbo para o eucalipto em solução nutritiva. 1999. Dissertação (Mestrado). Lavras, UFLA.
- Susarla, S., Medina, V.F., McCutcheon, S.C., 2002. Phytoremediation: an ecological solution to organic chemical contamination. *Ecological Engineering* 18, 647-658.
- Tedesco, M.J., Gianello, C., Bissani, C.A., Bohnen, H., Volkweiss, S.J., 1995. Análise de solo, plantas e outros materiais. Porto Alegre, UFRGS.
- Veado, M.A.R.V., Oliveira, A.H., Veado, J.C.C., Revel, G., Pinte, G., 2000. Analysis of water quality and sediment composition in the Paraopeba and Das Velhas Rivers, Brazil. *Water SA*, Pretória 26, 249-254.
- Wauchope. R.D., 1983. Uptake, translocation and phytotoxicity of arsenic in plants, in: Lederer, W.H., Fensterheim, R.J. (eds.), *Arsenic: Industrial, Biomedical, Environmental Perspectives*. New York: Van Nostrand Reinhold Co. (I), pp. 348-375.
- Woolson, E.A., Axley, J.H., Kearney, P.C., 1971. Correlation between available soil arsenic, estimated by six methods, and response of corn (*Zea mays* L.). *Soil Science Society of America* 35, 101-105.
- Zhang, W.H., Cai, Y., Tu, C., Ma, L.Q., 2002. Arsenic speciation and distribution in an arsenic hyperaccumulating plant. *Science of the Total Environment* 300, 167-177.