

Avaliação dos efeitos tóxicos de Cd e Pb na cultura da mostarda (*Brassica juncea*)

Evaluation of the toxic effects of Cd and Pb in the crop of mustard (Brassica juncea)

Amanda dos Santos Augusto¹, Alexandre Carvalho Bertoli^{1,2},
Marcele Gabriel Cannata¹, Ruy Carvalho¹, Ana Rosa Ribeiro Bastos¹

RESUMO

Com o objetivo de avaliar o efeito da aplicação de cádmio (Cd) e chumbo (Pb) na cultura da mostarda (*Brassica juncea*) e sua relação com o desenvolvimento das plantas, os teores, o acúmulo e a translocação nas raízes e na parte aérea, plantas de mostarda em solução nutritiva de Clark foram cultivadas e submetidas a doses crescentes de Cd (0,00; 0,25; 1,00; 5,00 e 10,00 mg.L⁻¹) e de Pb (0,00; 2,50; 10,00; 50,00 e 100,00 mg.L⁻¹). O Cd mostrou significativa translocação na planta, o que se deve à formação de um complexo entre essa espécie química e a fitoquelatina; a baixa translocação de Pb e o efeito deletério se devem a depósitos radiculares de quelatos estáveis de Pb.

Palavras-chave: metais pesados; mostarda; *Brassica juncea*; toxicidade.

ABSTRACT

With the objective of evaluating the effect of cadmium (Cd) and lead (Pb) in the culture of mustard (*Brassica juncea*) and its relationship with plant development, levels, accumulation and translocation in roots and shoots, mustard plants were grown in Clark nutrient solution and subjected to increasing doses of Cd (0.00; 0.25; 1.00; 5.00 and 10.00 mg.L⁻¹) and Pb (0.00; 2.50; 10.00; 50.00 and 100.00 mg.L⁻¹). Cd showed a significant translocation into the plant, which is due to the formation of a complex between the chemical species and phytochelatin; the low translocation of Pb and deleterious effects are due to root deposits of Pb stable chelates.

Keywords: heavy metals; mustard; *Brassica juncea*; toxicity.

INTRODUÇÃO

A intensa utilização de fertilizantes e pesticidas de forma inadequada juntamente com o aumento das atividades industriais e de mineração são as principais fontes causadoras da contaminação dos solos e dos corpos d'água por metais pesados (MALAVOLTA, 1994; AGUIAR *et al.*, 2002). A preocupação com o nível de contaminação por metais pesados vem principalmente da capacidade de retenção e movimentação desses metais no solo, da possibilidade de atingirem o lençol freático e, sobretudo, da sua absorção pelas plantas, podendo atingir, assim, a cadeia alimentar (COSTA, 1991).

Dentre esses contaminantes encontram-se metais como o cádmio (Cd) e o chumbo (Pb), que não apresentam quaisquer benefícios ao organismo humano e, atualmente, a contaminação do solo e das águas por esses elementos é um grave problema ambiental, devido à

persistência e elevado poder de toxicidade. Bertoli *et al.* (2012) observaram em tomates (*Lycopersicon esculentum*) a redução na absorção de nutrientes essenciais como potássio (K), cálcio (Ca), manganês (Mn) e zinco (Zn) devido ao estresse causado pela presença de Cd. A cultura do feijão (*Phaseolus vulgaris* L.) submetida à contaminação por Pb também foi prejudicada em relação à absorção de nutrientes, conforme relatado por Cannata *et al.* (2013).

O Pb, em sua forma catiônica Pb²⁺, é absorvido pelas plantas devido à sua semelhança com os metais de transição essenciais, como por exemplo cobre (Cu²⁺), ferro (Fe²⁺), Mn²⁺ e Zn²⁺, que desempenham funções importantes no crescimento das plantas. No entanto, o Pb²⁺ difere no que se refere à translocação nas plantas devido à sua facilidade para formar complexos com elevado impedimento estérico (SILVA *et al.*, 2007a, 2007b). As altas concentrações de Pb interferem na divisão celular e

¹Universidade Federal de Lavras (UFLA) - Lavras (MG), Brasil.

²Universidade Federal de Alfenas (UNIFAL) - Alfenas (MG), Brasil.

Endereço para correspondência: Alexandre Carvalho Bertoli - Instituto de Química - Laboratório de Análises e Caracterizações de Fármacos (LACFAR) - Rua Gabriel Monteiro da Silva, 700 - Centro - 37130-000 - Alfenas (MG), Brasil - E-mail: bertolialexandre@yahoo.com.br

Recebido: 03/08/12 - **Aceito:** 11/04/14 - **Reg. ABES:** 266

inibem a extensão do sistema radicular, enquanto que concentrações abaixo do nível considerado tóxico podem estimular o crescimento radicular (BALIGAR *et al.*, 1998). A diminuição do processo respiratório, causada pela redução na assimilação de dióxido de carbono (CO₂), provoca redução do crescimento das plantas. A interrupção do metabolismo do Ca e a inativação enzimática também são provocadas pela toxicidade de Pb nas plantas (BERGMAN, 1992).

Entre os metais pesados, o Cd se destaca por apresentar maior risco ambiental em razão do seu uso intenso, toxicidade e ampla distribuição. O Cd é um elemento não essencial que afeta negativamente o crescimento e o desenvolvimento das plantas, sendo vastamente utilizado na fabricação de plásticos coloridos, pigmentos de tintas, fabricação de baterias de automóveis, entre outros (BAIRD, 2002). A contaminação dos alimentos é a mais importante via de exposição de Cd para o ser humano (SILVA *et al.*, 2005), sendo que sua presença pode causar mudanças morfológicas, fisiológicas, bioquímicas e estruturais nos vegetais. O Cd pode diminuir o crescimento, reduzir a taxa de fotossíntese e provocar alterações tanto enzimáticas quanto metabólicas. No entanto, os efeitos do Cd variam em função do tempo de exposição da planta ao metal, ou seja, quanto maior o tempo de exposição, maior é a interferência do mesmo sobre os sistemas metabólicos da planta (OLIVEIRA, 2001).

Assim, devido ao avanço da degradação ambiental e à ampla toxicidade dos metais pesados para as plantas, animais e saúde humana — e pelo fato das plantas serem o principal ponto de ligação entre os metais pesados e o homem via cadeia alimentar — é que se torna necessária a realização de estudos que possibilitem a determinação do efeito desses elementos nas plantas.

Salt *et al.* (1995) relatam que a mostarda (*Brassica juncea*) é capaz de acumular Pb por meio da produção de quelantes nas suas raízes; e o acúmulo de Cd está relacionado à taxa de transpiração e de absorção pelas raízes. Esses resultados mostram que além de ser uma hortaliça de interesse econômico para a agricultura, a mostarda é muito estudada com relação às suas características de acumulação de metais. Portanto, este trabalho teve como objetivo avaliar os efeitos de Cd e de Pb na cultura de mostarda submetida a diferentes concentrações dos metais de interesse, bem como discutir os limites de tolerância da planta a Cd²⁺ e Pb²⁺, capazes de influenciar a sua produção.

METODOLOGIA

Os experimentos foram realizados em casa de vegetação na Universidade Federal de Lavras, Minas Gerais, mantida em uma estufa com temperatura média de 28°C, 11,5 h/13 h (inverno/verão) fotoperíodo e 250–350 mmol.m⁻².s⁻¹ irradiância PAR (radiação natural reduzida com uma malha de reflexão), no período de 03/11/2010 a 21/12/2010, correspondente ao ciclo vegetativo das plantas de mostarda.

As sementes de mostarda utilizadas foram colocadas em bandeja de isopor com um substrato comercial (Plantmax), sendo irrigadas com água desmineralizada de forma a mantê-las úmidas durante 16 dias. Quando estavam com uma altura aproximada de 6 cm, as mudas foram transplantadas para uma bandeja contendo 25 L de solução de Clark e com as seguintes dimensões: 13 cm de altura, 40 cm de largura e 60 cm de comprimento. As mudas permaneceram em adaptação durante 12 dias, sendo 5 dias com 25% da concentração máxima da solução, 4 dias com 50% da concentração e 3 dias com 75% da concentração. Decorrido esse período, o experimento foi montado em potes individuais de 2 L, com uma planta por pote e solução de Clark a 75%, incluindo a adição dos metais Cd e Pb. Uma vez por semana era feita a troca de solução nutritiva a 75% de concentração máxima e a adição dos metais. Foram aplicadas as concentrações de 0,00; 0,25; 1,00; 5,00 e 10,00 mg.L⁻¹ de Cd, e 0,00; 2,50; 10,00; 50,00 e 100,00 mg.L⁻¹ de Pb, utilizando soluções preparadas a partir dos sais p.a., da marca Vetec (Rio de Janeiro), Cd(NO₃)₂.4H₂O e Pb(NO₃)₂.4H₂O. Essas concentrações foram escolhidas levando em conta os valores que intoxicam sem eliminar as plantas durante o cultivo (MALAVOLTA, 1994) e para obter material vegetal suficiente para análise laboratorial, conforme relatado em trabalhos envolvendo outras hortícolas (BERTOLI *et al.*, 2011; CANNATA *et al.*, 2013).

Foram utilizados frascos plásticos opacos com capacidade de aproximadamente 2 L, onde as plantas escolhidas de mostarda se desenvolveram. Para a aeração constante das soluções nos frascos foram utilizadas tubulações de borracha com diâmetro externo de 12,7 mm, ligadas a um moto-compressor. A essas tubulações foram conectadas mangueiras de silicone com diâmetro de 6,35 mm, através de agulhas acopladas à extremidade. Ao final do ciclo vegetativo, as plantas foram colhidas, separadas em amostras referentes à parte aérea e ao sistema radicular e lavadas com água deionizada. As raízes e a parte aérea foram secas em estufa em temperatura entre 65 e 70°C até peso constante. Em seguida, o material foi pesado e posteriormente triturado em moinho tipo Willey, equipado com peneira de 20 cm² e abertura de 20 mesh.

A determinação do teor dos elementos foi realizada através de digestão nitroperclórica na proporção de 2:1 (v/v) dos ácidos concentrados (p.a.) HNO₃ e HClO₄. Para a digestão foram utilizados 0,50 g de matéria seca e 6,00 mL de solução nitroperclórica. Os teores de Cd e Pb da matéria seca da parte aérea (MSPA) e do sistema radicular (MSR) foram dosados utilizando um espectrofotômetro de absorção atômica Varian com chama de gás acetileno e lâmpadas de cátodo oco (MALAVOLTA *et al.*, 1997).

Avaliação experimental

O acúmulo de Cd e Pb nas duas partes das plantas de mostarda foram calculados multiplicando seus teores pela produção de matéria seca de cada compartimento da planta.

O potencial das plantas em extrair os metais Pb e Cd da solução nutritiva foi avaliado pelo coeficiente de fitoextração, ou fator de transferência (t) por meio da Equação 1 (LUBBEN e SAUERBECK, 1991):

$$t = \frac{\text{metal total na planta}}{\text{metal na solução}} \quad (1)$$

O cálculo de metal total na planta foi feito considerando o conteúdo de Cd e Pb na parte aérea somado ao das raízes (MSR + MSPA), em todas as concentrações aplicadas. O metal total na solução foi calculado levando-se em conta as trocas de soluções. Quanto maior o fator t , maior a absorção do contaminante (HENRY, 2000).

O índice de produção relativa (PR), que traduz a influência do metal na variação de produção de matéria seca da planta (MSR + MSPA), foi calculado pela Equação 2 (PAIVA *et al.*, 2002):

$$PR (\%) = \frac{\text{matéria seca produzida sob a dose de metal}}{\text{matéria seca produzida na ausência do metal}} \times 100 \quad (2)$$

Através do índice de translocação (IT) é possível avaliar a capacidade das espécies em translocar o Pb e o Cd da raiz para a parte aérea. O IT é calculado pela Equação 3 (PAIVA *et al.*, 2002):

$$IT \text{ parte aérea } (\%) = \frac{\text{teor MSPA}}{\text{teor (MSR + MSPA)}} \times 100 \quad (3)$$

O delineamento estatístico adotado foi inteiramente casualizado, com 5 tratamentos e 4 repetições, sendo cada repetição representada por um vaso com uma planta, perfazendo, assim, um total de 40 plantas (parcelas experimentais). Os dados foram submetidos à análise de variância, sendo ajustadas equações de regressão para o teor e o IT dos diferentes elementos analisados, utilizando o programa Sisvar - UFPA (FERREIRA, 2000).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

As doses de Cd e Pb aplicadas em solução nutritiva influenciaram significativamente a produção de matéria seca, o PR, o teor, o IT e o t da mostarda. As estatísticas e as discussões dos resultados estão apresentadas a seguir.

Influência de cádmio na produção relativa e produção de matéria seca

Para as raízes, observa-se uma redução na produção de MSR. A dose mais alta do metal, 10,00 mg.L⁻¹, reduziu em cerca de 50% a produção de MSR em relação ao tratamento controle (Figura 1a). As plantas cresceram de maneira inversamente proporcional às doses aplicadas, ou seja, quanto maior a dose, menor o crescimento. Merece destaque o efeito deletério mais acentuado nas doses de 5 e 10 mg.L⁻¹ (Figura 1a), sugerindo um maior acúmulo do metal nas plantas.

A queda de produção tanto de MSR quanto MSPA pode ser confirmada pela análise dos dados da Figura 1b. O prejuízo ocorrido nas plantas com o aumento das doses de metal destaca-se com a redução de quase 40% da MSR e da MSPA das plantas cultivadas em solução contendo 10 mg.L⁻¹.

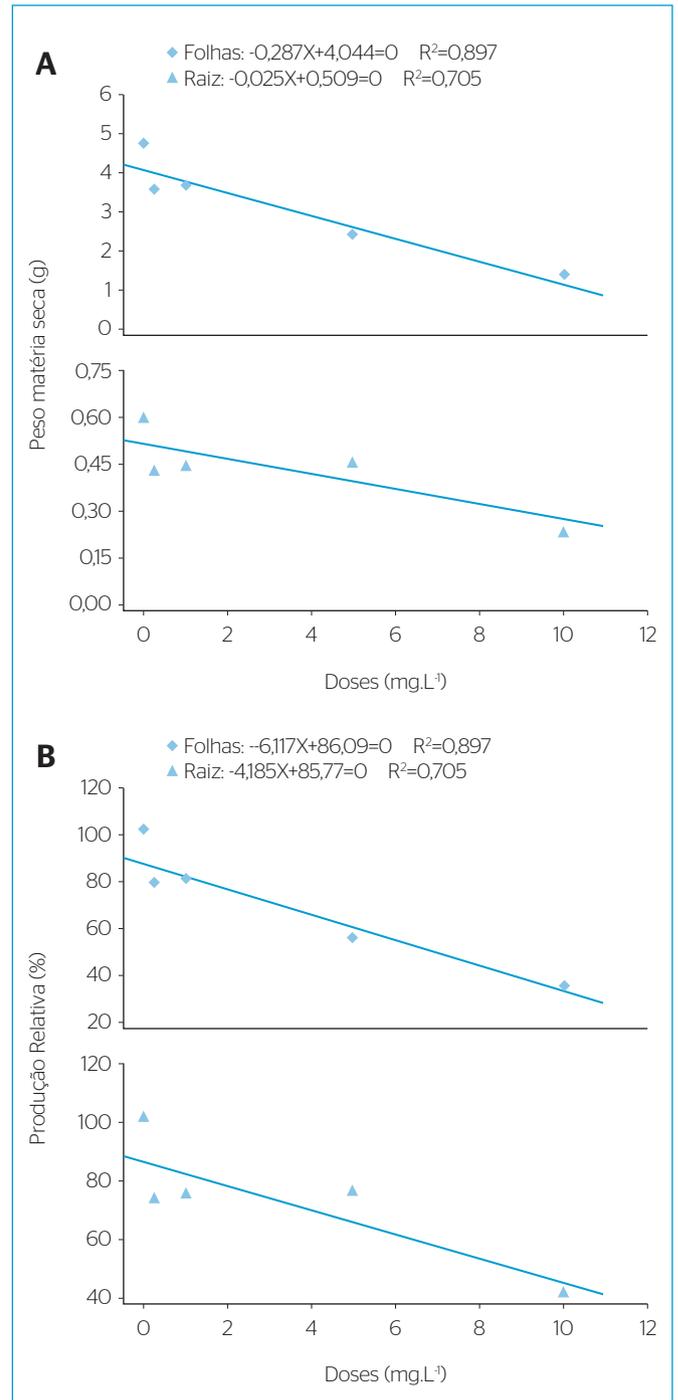


Figura 1 - Influência de cádmio: (a) produção de matéria seca da raiz (▲ MSR) e da parte aérea (◆ MSPA); (b) índice de produção relativa da raiz (▲) e da parte aérea (◆) da mostarda submetida a diferentes doses de cádmio (médias submetidas à regressão polinomial a 5% de probabilidade pelo teste de F).

Teor, acúmulo, translocação e transferência do cádmio na planta

Pode-se observar que, tanto na parte aérea como na raiz, os teores encontrados foram diretamente proporcionais à quantidade de metal oferecido à planta, ou seja, quanto maior a concentração de metal, maior a absorção. Por outro lado, comparando-se a raiz com a parte aérea, observou-se que há uma grande diferença nas concentrações absorvidas por cada uma (Figura 2a). Por meio desses dados pode-se deduzir que o metal se transloca de maneira significativa na planta, dada a diferença expressiva de contaminante encontrada nos dois

compartimentos, conforme os dados apresentados na Figura 2d. Observa-se um IT com valores constantes em cerca de 70% para todas as doses, ou seja, esses valores altos de IT comprovam o efeito deletério do Cd^{2+} na produção de MSPA.

O acúmulo de Cd é calculado levando-se em conta o peso de matéria seca (Figura 2b). Dessa forma, o maior acúmulo de cádmio ocorreu nas folhas na dose de 5 mg.L^{-1} . Para a referida dose, o acúmulo de Cd na MSPA foi de aproximadamente $2818,5 \mu\text{g.kg}^{-1}$, enquanto que nas raízes, foi de $221,5 \mu\text{g.kg}^{-1}$. Esses dados são coerentes quando considerada a produção de matéria seca pelos dois compartimentos da

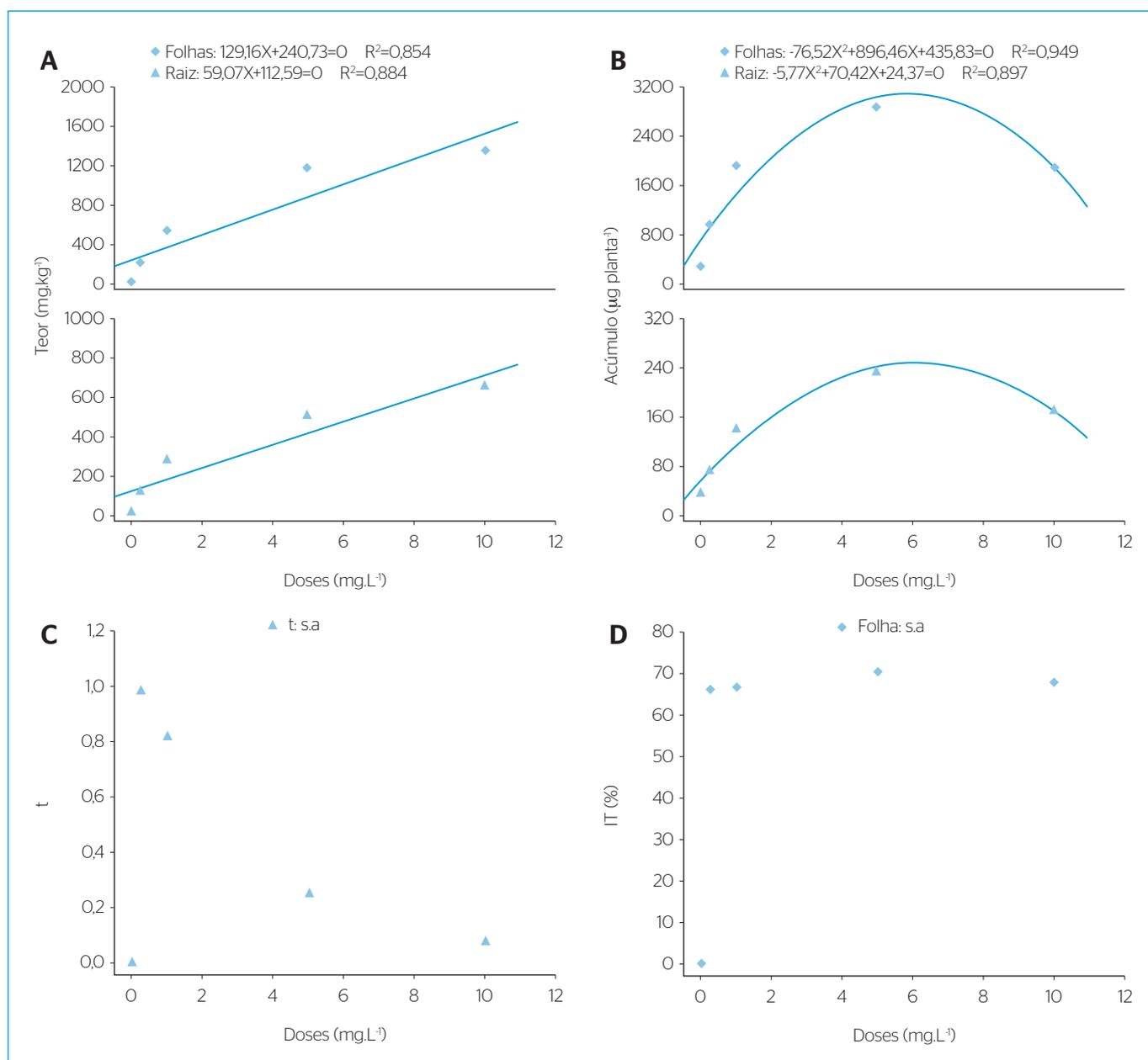


Figura 2 - Teor de cádmio: (a) na parte aérea e no sistema radicular das plantas de mostarda; (b) acúmulo; (c) fator de transferência; (d) índice de translocação (médias submetidas à regressão polinomial a 5% de probabilidade pelo teste de F).

planta (Figura 1a). Percebe-se que as produções máximas de matéria seca foram de 3,610 g e 0,445 g, respectivamente. Esses altos valores de IT e de acúmulo indicam uma remobilização do Cd na planta.

De acordo com Grill *et al.* (1985) essa remobilização está associada às fitoquelatinas (PCs), ou seja, o complexo Cd-fitoquelatina pode representar uma forma móvel de Cd da raiz para a parte aérea da planta. Essa ideia é sustentada por Wolterbeek *et al.* (1998), que observaram aumento no transporte de Cd para a parte aérea de tomate, crescendo em solução com presença de EDTA como agente quelante.

A transferência dos metais do solo ou de solução nutritiva para as plantas pode ser avaliada pelo *t* (Figura 2c). A Figura 2c é coerente ao que foi apontado por Accioly e Siqueira (2000), pois a capacidade de transferência de metais do solo ou solução nutritiva para a planta é alta quando se tem baixas concentrações de metais e baixa quando se tem altas concentrações de metais.

Na Figura 2d percebe-se que o IT foi pouco influenciado pela concentração de Cd da solução. Ou seja, apesar de ocorrer uma queda na transferência de metal da solução para a planta, o IT da raiz para parte aérea se manteve estável, o que indica que as concentrações das doses de Cd não interferiram no IT de metal na planta de mostarda.

Influência de chumbo na produção relativa e produção de matéria seca

As doses mais altas de Pb, 50 e 100 mg.L⁻¹ (Figura 3a), como esperado, foram as mais prejudiciais tanto para matéria seca da parte aérea quanto das raízes. Observa-se um incremento da MSR até a dose de 10 mg.L⁻¹ de Pb, sendo esse mais significativo na dose de 2,5 mg.L⁻¹. A partir da dose de 10 mg.L⁻¹ os prejuízos começaram a se fazer sentir nos parâmetros de crescimento vegetal, i.e., houve um incremento de 15% na produção de raízes e em relação ao controle no tratamento com essas doses. Entretanto, Malavolta (2006) comenta que em qualquer dose o metal é deletério às plantas.

A dose de 50 mg.L⁻¹ (Figura 3a) provocou produção de 27 e 15%, respectivamente, para raízes e parte aérea, em relação à produção da planta controle. Já a dose de 100 mg.L⁻¹ obteve uma produção de 36 e 15%, respectivamente, para raízes e parte aérea, quando se utilizou o PR como parâmetro comparativo (Figura 3b).

Vários estudos descrevem o efeito tóxico do Pb sobre processos tais como fotossíntese, mitose e absorção de água; e sintomas físicos como folhas verdes e escuras, murchamento das folhas mais velhas e parte aérea e raízes pouco desenvolvidas e pardas. Entretanto, os sintomas tóxicos nas plantas não são específicos (Malavolta, 1994). Alguns desses efeitos macroscópicos citados anteriormente foram constatados neste trabalho, porém, sem ser de forma exaustiva. Os efeitos subcelulares podem ser descritos como: inibição da respiração e fotossíntese devido a distúrbios nas reações de transferência de elétrons (KABATA-PENDIAS & PENDIAS, 2001).

A clorose em folhas jovens de plantas de mostarda tratadas com Pb sugere que esse elemento interfere na síntese de clorofila e que, com o reduzido transporte de Fe e formação dos grupos heme, para as folhas aparece o sintoma de deficiência provocando danos em plantas estressadas (FODOR *et al.*, 1998; KUPPER & SPILLER, 1996).

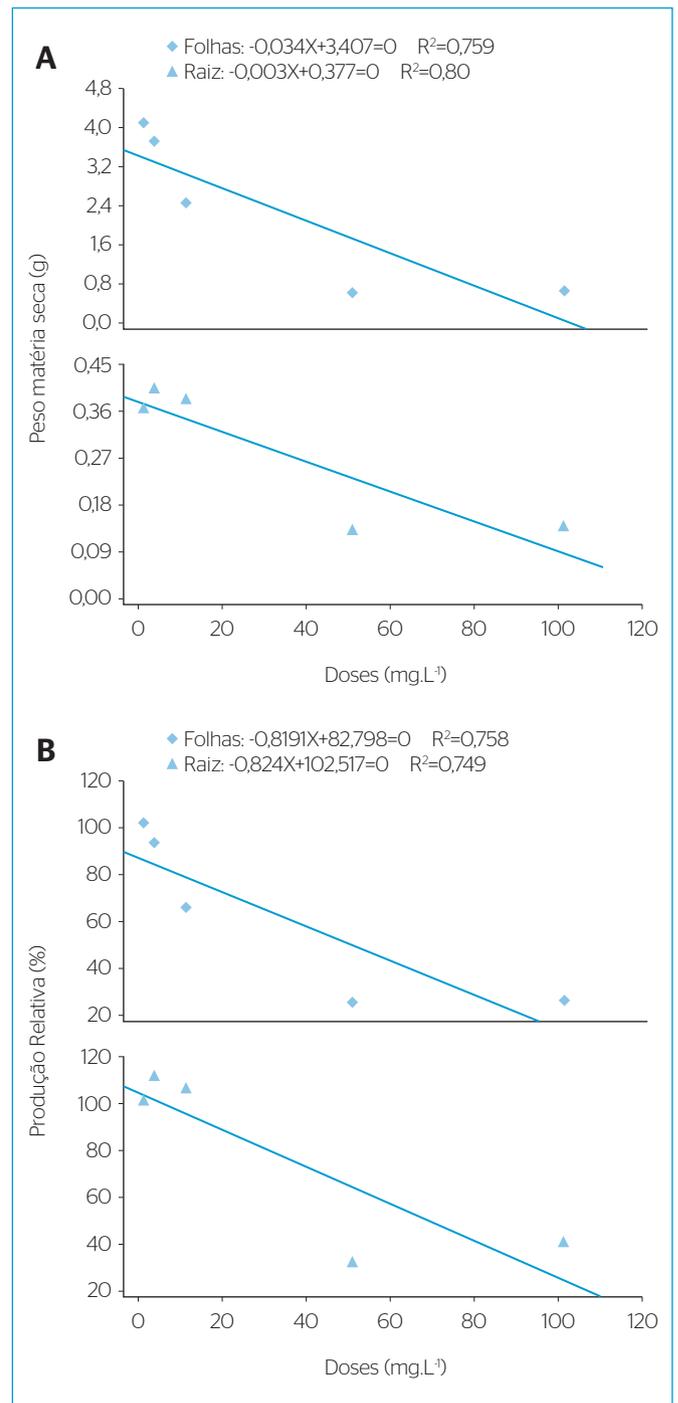


Figura 3 - (a) Produção de matéria seca da raiz e da parte aérea; **(b)** índice de produção relativa da raiz e da parte aérea de mostarda submetidas a diferentes doses de Pb (médias submetidas à regressão polinomial a 5% de probabilidade pelo teste de F).

Teor, acúmulo, translocação e transferência do chumbo na planta

As plantas que receberam Pb tiveram uma absorção radicular diretamente proporcional à quantidade de metal oferecido à planta (Figura 4a). Quando comparadas a raiz e a parte aérea (Figura 4a) pode-se observar uma grande diferença nas concentrações absorvidas por cada compartimento. Percebe-se, também com o Pb, que o mesmo se transloca muito pouco das raízes para a parte aérea. Essas

informações convergem com os trabalhos de Silva *et al.* (2007a, 2007b) sobre a síntese e caracterização de quelatos de Pb, Cd, Zn e Cu com DTPA. Ambos, segundo os autores, são estruturas de elevado impedimento estérico, notadamente o quelato de Pb. Isso parece justificar a dificuldade de ascensão do metal na planta, já que permanece, em grande parte, quelatizado a aminoácidos livres, proteínas ou secreções diversas das raízes, ricos em grupamentos doadores de elétrons como o DTPA. Carvalho *et al.* (2008) confirmaram a baixa translocação de Pb

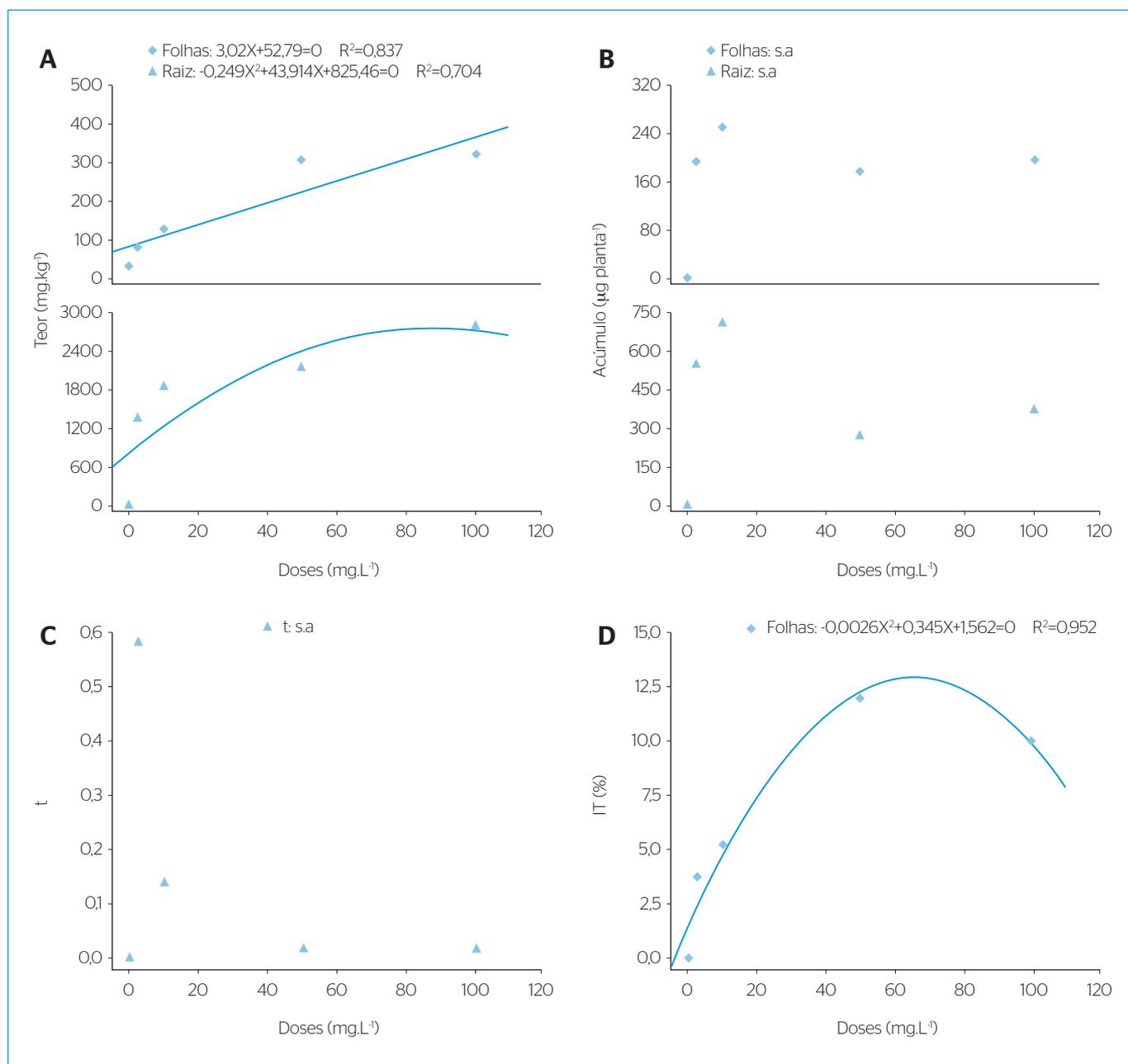


Figura 4 - (a) Teor de chumbo na parte aérea e no sistema radicular das plantas de mostarda; (b) acúmulo; (c) fator de transferência; (d) índice de translocação (médias submetidas à regressão polinomial a 5% de probabilidade pelo teste de F).

em solos cultivados com feijão, que foi atribuída ao impedimento estérico dos quelatos de Pb com aminoácidos ou substâncias afins da raiz.

O acúmulo de Pb forneceu resultados diferentes do teor (Figura 4b). Assim, o maior acúmulo de Pb ocorreu nas raízes e também na parte aérea na dose de 10 mg.L⁻¹. Esses dados estão coerentes com a produção de matéria seca na dose de 10 mg.L⁻¹ pela raiz da planta (Figura 3a). Kabata-Pendias e Pendias (2001) postularam que o mecanismo de exclusão do Pb é realmente a deposição radicular. O fenômeno, segundo os autores, ocorre por ligação do metal a polímeros orgânicos insolúveis, alguns dos quais contendo fosfatos como doadores de elétrons, formando precipitados amorfos.

Os dados referentes ao IT e ao t mostram que o IT foi muito influenciado pela concentração de Pb da solução e que a mostarda, em altas concentrações de Pb, aumenta a transferência do metal, ou seja, a mostarda tem alta capacidade de retirar Pb e acumulá-lo (Figura 4d), porém, esse IT ainda é muito pequeno se comparado ao de Cd.

A maior mobilidade do Cd²⁺ na planta, comparado ao Pb²⁺, pode ser explicada pela facilidade de combinação com grupos sulfidrilas das fitoquelatinas. A afinidade do Cd²⁺ pelo enxofre é resultante do fato do Cd²⁺ ser um ácido de Lewis mole, e o enxofre, uma base de Lewis também mole. Ácidos e bases moles, por serem polarizáveis, combinam-se facilmente originando estruturas muito estáveis (SHRIVER & ATKINS, 2008).

Outro argumento para explicar a diferença de translocação entre Cd e Pb, demonstrada na Figura 4d pelo IT, refere-se às

propriedades periódicas dos dois metais, principalmente o raio iônico (0,97 e 1,32 Å para Cd²⁺ e Pb²⁺, respectivamente), e à densidade (8,6 g.cm⁻³ para Cd e 11,3 g.cm⁻³ para Pb). São fatores que dificultam a mobilidade e, portanto, a atividade do Pb, muito mais que a do Cd. Antoniadis *et al.* (2007) e Oliveira *et al.* (2009) atribuem também a baixa mobilidade do Pb à eletronegatividade e, assim, o Cd (1,7 eV) seria mais móvel que o Pb (2,3 eV).

CONCLUSÕES

O Cd, com IT de 70%, mobilizou-se na mostarda e apresentou acúmulo na parte aérea de 2.818,5 µg.kg⁻¹. A dosagem crítica de Cd para o cultivo da mostarda é de 10,00 mg.L⁻¹ e a deterioração das plantas é observada nessa concentração. O Pb transloca-se pouco na mostarda e seus efeitos deletérios são devidos à deposição de quelatos estáveis nas raízes. As doses de 50,00 e 100,00 mg.L⁻¹ de Pb apresentaram toxicidade crítica e as plantas não se desenvolveram bem nessas concentrações. As doses de Cd inferiores a 5 mg.L⁻¹ e de Pb inferiores a 50 mg.L⁻¹ não prejudicaram o desenvolvimento das plantas indicando que esses foram os limites de tolerância da mostarda ao Cd e ao Pb.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG) pelo financiamento das pesquisas.

REFERÊNCIAS

- ACCIOLY, A.M.A. & SIQUEIRA, J.O. (2000) Contaminação química e biorremediação do solo. In: NOVAES, R.F.; ALVAREZ, V.H.V.; SCHAEFER, C.E.G.R. (Eds.) *Tópicos em Ciência do Solo*. Viçosa, mg: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, p. 299-352.
- AGUIAR, M.R.M.P.; NOVAES, A.C.; GUARINO, A.W.S. (2002) Remoção de metais pesados de efluentes industriais por aluminossilicatos. *Química Nova*, v. 25, n. 6, p.1145-1154.
- ANTONIADIS, V.; MCKINLEY, J.D.; ZUHAIRI, Y.W. (2007) Single-element and competitive mobility measured with column infiltration and batch tests. *Journal of Environmental Quality*, v. 36, n. 1, p. 53-60.
- BAIRD, C. (2002) *Química ambiental*. Porto Alegre: Bookman. 57 p.
- BALIGAR, V.C.; FAGERIA, N.K.; ELRASHIDI, M.A. (1998) Toxicology and nutrient constraints on root growth. *Hortscience*, v. 33, n. 6, p. 960-965.
- BERGMANN, W. (1992) *Nutritional disorders of plants: development, visual and analytical diagnosis*. New York, EUA: G. Fischer. 741 p.
- BERTOLI, A.C.; CARVALHO, R.; CANNATA, M.G.; BASTOS, A.R.R.; AUGUSTO, A.S. (2011) Toxidez do chumbo no teor e translocação de nutrientes em tomateiro. *Biotemas*, v. 24, n. 4, p. 7-15.
- BERTOLI, A.C.; CANNATA, M.G.; CARVALHO, R.; BASTOS, A.R.R.; FREITAS, M.P.; AUGUSTO, A.S. (2012) Lycopersicon esculentum submitted to Cd-stressful conditions in nutrition solution: nutrient contents and translocation. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, v. 86, p. 176-181.
- CANNATA, M.G.; CARVALHO, R.; BERTOLI, A.C.; BASTOS, A.R.R.; CARVALHO, J.G.; FREITAS, M.P.; AUGUSTO, A.S. (2013) Effects of lead on the content, accumulation, and translocation of nutrients in bean plant cultivated in nutritive solution. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, v. 44, p. 939-951.
- CANNATA, M.G.; CARVALHO, R.; BERTOLI, A.C.; AUGUSTO, A.S.; BASTOS, A.R.R.; CARVALHO, J.G.; FREITAS, M.P. (2013) Effects of cadmium and lead on plant growth and content of heavy metals in arugula cultivated in nutritive solution. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, v. 44, p. 952-961.

- CARVALHO, A.V.S.; CARVALHO, R.; ABREU, C.M.P.; NETO, A.E.F. (2008) Produção de matéria seca e de grãos por plantas de feijoeiro (*Phaseolus vulgaris* L.) cultivadas em solos tratados com metais pesados. *Química Nova*, v. 31, n. 5, p. 949-955.
- COSTA, E.D. (1991) *Adsorção e competição de alguns metais por ácidos húmicos extraídos de latossolo húmico da Região Araçuaia, Minas Gerais*. Dissertação (Mestrado em Agroquímica). Viçosa: Departamento de Química, Universidade Federal de Viçosa. 71 p.
- FERREIRA, D.F. (2000). Análises estatísticas por meio do Sisvar para Windows versão 4.0. In: *Reunião Anual da Região Brasileira da Sociedade Internacional de Biometria, Anais...* São Carlos: Universidade Federal de São Carlos. p. 255-258.
- FODOR, F.; CSEH, E.; VARGA, A.; ZÁRAY, G. (1998) Lead uptake, distribution, and remobilization in cucumber. *Journal of Plant Nutrition*, v. 21, n. 7, p. 1363-1373.
- GRILL, E.; WINNACKER, E.L.; ZENK, M.H. (1985) Phytochelatins: the principal heavy-metal complexing peptides of higher plants. *Science*, v. 230, n. 4726, p. 674-676.
- HENRY, J.R. (2000) *An overview of the phytoremediation of lead and mercury*. Washington, EUA: EPA. 51 p.
- KABATA-PENDIAS, A. & PENDIAS, H. (2001) *Trace Elements in Soils and Plants*. 3 ed. Flórida, EUA: CRC Press. 315 p.
- KUPPER, H.; KUPPER, F.; SPILLER, M. (1996) Environmental relevance of heavy metal-substituted chlorophylls using the example of water plants. *Journal of Experimental Botany*, v. 47, n. 295, p. 259-266.
- LUBBEN, S. & SAUERBECK, D. (1991) The uptake and distribution of heavy-metals by spring wheat. *Water, Air, and Soil Pollution*, v. 57-58, p. 239-247.
- MALAVOLTA, E. (1994) *Fertilizantes e seu impacto ambiental: micronutrientes e metais pesados, mitos, mistificação e fatos*. São Paulo: Produquímica. 153 p.
- MALAVOLTA, E. (2006) *Manual de nutrição mineral de plantas*. São Paulo: Agronômica Ceres. 638 p.
- MALAVOLTA, E.; VITTI, C.C.; OLIVEIRA, S.A. (1997) *Avaliação do estado nutricional das plantas*. 2 ed. Piracicaba: Esalq-USP. 319 p.
- OLIVEIRA, J.A. (2001) Absorção e acúmulo de cádmio e seus efeitos sobre o crescimento relativo de plantas de Aguapé e de Salvinia. *Revista de Fisiologia Vegetal*, v. 13, n. 3, p. 329-341.
- OLIVEIRA, R.C.; ARAÚJO, A.R.; CARVALHO, R.; GUILHERME, L.R.G.; PASSOS, L.P.; MARQUES, J.J. (2009) Movimento de zinco em colunas de solo tratados com resíduo de calcário oriundo de mineração. *Revista Ceres*, v. 56, n. 5, p. 679-684.
- PAIVA, H.N.; CARVALHO, J.G.; SIQUEIRA, J.O. (2002) Índice de translocação de nutrientes em mudas de cedro (*Cedrela fissilis* Vell.) e ipê-roxo (*Tabebuia impetiginosa* (Mart.) Standl.) submetidas a doses crescentes de cádmio, níquel e chumbo. *Sociedade de Investigações Florestais*, v. 26, p. 467-473.
- SALT, D.E.; PRINCE, R.C.; PICKERING, I.J.; RASKIN, I. (1995) Mechanisms of cadmium mobility and accumulation in Indian mustard. *Plant Physiology*, v. 109, n. 4, p. 1427-1433.
- SHRIVER, D.F. & ATKINS, P.W. (2008) *Química inorgânica*. 4 ed. Porto Alegre: Bookman. 816 p.
- SILVA, A.; VITTI, G.; BARROCAS, P.; SILVANA, J.; MOREIRA, J. (2005) Dietary intake and health effects of selected toxic elements. *Brazilian Journal of Plant Physiology*, v. 17, n. 1, p. 79-93.
- SILVA, V.L.; CARVALHO, R.; FREITAS, M.P.; TORMENA, C.F.; MELO, W.C. 2007a Spectrometric and theoretical investigation of the structures of Cu and Pb/DTPA complexes. *Structural Chemistry*, v. 18, n. 5, p. 605-609.
- SILVA, V.L.; CARVALHO, R.; FREITAS, M.P.; TORMENA, C.F.; MELO, W.C. 2007b Structural determination of Zn and Cd-DTPA complexes: MS, infrared, ¹³C NMR and theoretical investigation. *Spectrochimica Acta*, v. 68, n. 5, p. 1197-1200.
- WOLTERBEEK, H.T.; van der MEER, A.; de BRUIN, M. (1988) The uptake and distribution of cadmium in tomato plants as affected by ethylenediaminetetra-acetic acid and 2,4 dinitrophenol. *Environmental Pollution*, v. 55, n. 4, p. 301-315.