

Artigo

Bioacumulação de Metais Pesados em *Brassica juncea*: Relação de Toxicidade com Elementos Essenciais**Augusto, A. S.; Bertoli, A. C.;*** Cannata, M. G.; Carvalho, R.; Bastos, A. R. R.*Rev. Virtual Quim.*, 2014, 6 (5), 1221-1236. Data de publicação na Web: 7 de julho de 2014<http://www.uff.br/rvq>**Bioaccumulation of Heavy Metals in *Brassica juncea*: Relationship of Toxicity with Essential Elements**

Abstract: With the objective of evaluating the effect of cadmium and lead in the culture of mustard (*Brassica juncea*) and its relationship with the plant macro- and micronutrients, mustard plants were grown in Clark nutrient solution and exposed to increasing doses of Cd and Pb. P contents were determined by colorimetry, S by turbidimetry and K, Ca, Mg, Fe, Cu, Mn and Zn of the dry matter (MSPA) and root (MSR) were determined using flame atomic absorption spectrophotometry. Cd negatively influenced the levels of nutrients in mustard plants, except for Cu in leaves and roots, Fe in the leaves and Mn in the root. Contamination by Pb decreased the levels of all the plant nutrients, except Ca in roots and leaves with the highest dose of Pb, and Mg, P, Cu, Fe and Zn in the root. The influence of contamination of Cd and Pb in nutrients caused severe reduction in dry matter production of mustard plant.

Keywords: Toxicity; mustard (*Brassica juncea*); macronutrients; micronutrients.

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 os macronutrientes e micronutrientes da planta, foram cultivadas plantas de mostarda em solução nutritiva de Clark e submetidas a doses crescentes de Cd e Pb. Os teores de P foram determinados por colorimetria, S por turbidimetria e os de K, Ca, Mg, Fe, Cu, Mn e Zn da matéria seca da parte aérea (MSPA) e do sistema radicular (MSR) foram determinados utilizando-se um espectrofotômetro de absorção atômica com chama. O Cd influenciou negativamente os teores dos nutrientes nas plantas de mostarda, com exceção do Cu nas folhas e raiz, Fe nas folhas e Mn na raiz. A contaminação por Pb diminuiu os teores de todos os nutrientes da planta, exceto do Ca na raiz e folhas na dose mais alta de Pb, e Mg, P, Cu, Fe e Zn na raiz. A influência da contaminação de Cd e Pb sobre os nutrientes causou severa diminuição na produção de matéria seca da planta de mostarda.

Palavras-chave: Toxicidade; mostarda (*Brassica juncea*); macronutrientes; micronutrientes.

* Universidade Federal de Lavras, Departamento de Química, CEP 37200-000, Lavras-MG, Brasil.

✉ bertolialexandre@yahoo.com.br

DOI: [10.5935/1984-6835.20140080](https://doi.org/10.5935/1984-6835.20140080)

Bioacumulação de Metais Pesados em *Brassica juncea*: Relação de Toxicidade com Elementos Essenciais

Amanda S. Augusto,^a Alexandre C. Bertoli,^{b,*} Marcele Gabriel Cannata,^b
Ruy Carvalho,^b Ana Rosa R. Bastos^c

^a Universidade Federal de São Carlos, Centro de Ciências Exatas e de Tecnologia,
Departamento de Química, CEP 13565-905, São Carlos-SP, Brasil.

^b Universidade Federal de Lavras, Departamento de Química, CEP 37200-000, Lavras-MG,
Brasil.

^c Universidade Federal de Lavras, Departamento de Ciência do Solo, CEP 37200-000, Lavras-
MG, Brasil.

* bertolialexandre@yahoo.com.br

Recebido em 30 de janeiro de 2014. Aceito para publicação em 6 de julho de 2014

1. Introdução
2. Material e métodos
 - 2.1. Delineamento estatístico
3. Resultados e discussão
4. Conclusão

1. Introdução

Um dos grandes problemas ambientais que afligem a sociedade moderna são as enormes quantidades de efluentes contaminados liberados pelas indústrias. Entre os diversos tipos de poluentes lançados nos ecossistemas encontram-se os metais tóxicos (ou elementos traços). Dentre esses metais, estão o Cádmio (Cd) e o Chumbo (Pb) que não apresentam quaisquer benefícios ao organismo humano, pelo contrário, possuem elevado poder de toxicidade. A preocupação com o nível de metais tóxicos advém da capacidade de permanecerem retidos no solo, solubilizarem-se na água, da sua

movimentação, da possibilidade de atingirem o lençol freático e, sobretudo, da sua absorção pelas plantas, podendo atingir, assim, a cadeia alimentar.¹ O Pb, em sua forma catiônica Pb^{2+} , é absorvido pelas plantas devido à sua semelhança com os metais de transição essenciais, diferindo no que se refere à translocação nas plantas, devido à sua facilidade de formar complexos com elevado impedimento estérico.^{2,3} As altas concentrações de Pb interferem na divisão celular e inibem a extensão do sistema radicular.⁴ A toxicidade do Pb causa redução no crescimento da planta, pois ocorre diminuição do processo respiratório causado pela redução na assimilação de CO_2 . A interrupção do metabolismo do Ca e a

inativação enzimática também são provocadas pela toxicidade de Pb nas plantas.⁵

O Cd destaca-se entre os metais tóxicos por apresentar maior risco ambiental em razão do seu uso intenso, toxicidade e ampla distribuição. A presença desse elemento nas plantas pode causar mudanças morfológicas, fisiológicas, bioquímicas e estruturais. 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.⁶

As consequências da contaminação dos solos por metais tóxicos como o cádmio, e o chumbo são mais bem entendidas nos dias atuais, porém, esforços têm sido feitos no sentido de desenvolver técnicas de descontaminação fundamentadas em processos naturais, com custo mais baixo. Uma das maneiras de contornar esses problemas de contaminação do solo é o uso de sistemas hidropônicos de cultivo, em que os nutrientes do solo são fornecidos por meio de uma solução aquosa contendo apenas os elementos químicos essenciais aos vegetais.⁷

Os cultivos em solução nutritiva oferecem um ambiente propício para a disponibilidade de minerais, favorecendo o transporte destes para as culturas, permitindo estudos mais criteriosos de translocação, cinética de absorção e redistribuições de minerais em plantas, além de evitarem a contaminação dos alimentos por substâncias tóxicas como os metais pesados.^{8,9}

Devido ao avanço da degradação ambiental e a alta toxicidade dos metais pesados para as plantas e o fato destas serem o principal ponto de ligação entre estes metais e o homem via cadeia alimentar, torna-se necessária à realização de estudos que possibilitem a determinação do efeito destes elementos nas mesmas. As plantas podem ser classificadas de acordo com seu mecanismo de tolerância, podendo ser:

exclusoras, quando a concentração do metal absorvido é mantida constante até que seja atingido o nível crítico no substrato; indicadoras, quando ocorre absorção passiva e as concentrações internas refletem os teores externos; e acumuladoras, que são capazes de manter níveis internos mais elevados que do substrato de cultivo.¹⁰

Salt *et al.* (1995) mostraram 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.¹¹ Esse acúmulo indica que a planta pode suportar as doses de metal por mais tempo o que colabora para estudos mais criteriosos do efeito destes sob a planta.

Este trabalho objetiva avaliar os efeitos de Cd e Pb na cultura de mostarda (*Brassica juncea*) submetidas a diferentes concentrações destes metais indicando e discutindo os efeitos destes sob os nutrientes presentes na planta.

2. Material e métodos

A pesquisa foi conduzida em casa de vegetação do Departamento de Ciência do Solo da Universidade Federal de Lavras (UFLA), Lavras – MG, durante 50 dias, período correspondente ao ciclo vegetativo das plantas de mostarda. As plantas foram mantidas 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 de irradiância PAR (radiação natural reduzida com uma malha de reflexão).

As sementes de mostarda (*Brassica juncea*), adquiridas em um supermercado da cidade de Lavras (MG), foram colocadas em bandeja de isopor com substrato comercial (Plantmax), sendo irrigadas com água desmineralizada de forma a manter o substrato úmido durante um período de 16 dias. Quando estavam com uma altura aproximada de 6 cm, as mudas foram fixadas a uma fina folha de isopor que apoiada a uma bandeja, com capacidade aproximada de 40

L, com solução de Clark (Tabela 1).¹² Dessa forma, permitiu-se que apenas as raízes permanecessem em contato com a solução.

A adaptação se manteve por 12 dias, durante 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, cada planta de mostarda foi transferida para potes individuais, totalizando 40 plantas (uma em cada pote), com solução de Clark a 75%, da mesma forma que anteriormente as plantas foram fixadas, em uma folha de isopor e somente as raízes mantiveram contato com a solução. Os potes utilizados eram frascos plásticos, opacos, com capacidade de aproximadamente 2 L e devidamente identificados, onde as plantas de mostarda escolhidas se desenvolveram. A solução foi arejada constantemente por tubulações de plástico ligadas a um moto-compressor. Uma vez por semana era feita a troca de solução nutritiva a 75% de concentração máxima e a

adição de nitrato de cádmio $\text{Cd}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ p.a nas concentrações 0; 0,25; 1; 5; 10 mg L^{-1} e nitrato de chumbo $\text{Pb}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ P.A nas concentrações, 0; 2,5; 10; 50; 100 mg L^{-1} , as doses zero se referem a testemunha. Estes sais foram utilizados como fonte do elemento contaminador, Cd e Pb, respectivamente. Todos os padrões utilizados foram fornecidos pela empresa Vetec (Rio de Janeiro, Brasil).

Ao final do ciclo vegetativo, as plantas foram colhidas e separadas em parte aérea e sistema radicular. Após serem lavadas com água deionizada estas foram separadas em sacos de papel devidamente identificados de acordo com: metal contaminador, concentração de metal adicionada na planta e parte aérea ou sistema radicular. As raízes e a parte aérea foram secas em estufa com temperatura entre 65 e 70°C até massa constante. Em seguida, foi medida a massa do material e posteriormente triturado em moinho tipo Willey, equipado com peneira de 20 cm^2 .

Tabela 1 Solução nutritiva de Clark

Solução Estoque	Concentração das soluções estoque		Solução de Trabalho Diluições (ml L^{-1})
	mol L^{-1}	mmol L^{-1}	
$\text{Ca}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$	1	-	2,53
KNO_3	1	-	1,3
KCl	1	-	0,5
NH_4NO_3	1	-	0,9
$\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$	1	-	0,6
$\text{MnCl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$	-	7	1
H_3BO_3	-	19	1
$\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$	-	2	1
$(\text{NH}_4)_6\text{Mo}_7\text{O}_{24} \cdot 4\text{H}_2\text{O}$	-	0,086	1
$\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$	-	0,5	1
KH_2PO_4	-	69,04	1
Fe-EDTA	-	-	1

Para determinação do teor dos elementos, fez-se a digestão nitroperclórica na proporção de 2:1 (v/v) de HNO_3 e HClO_4 .

Foi utilizado 0,5 g de matéria seca e um volume de 6 mL da solução nitroperclórica.

Os teores de P foram determinados por

colorimetria, os de S por turbidimetria sendo os comprimentos de ondas de 420 nm e 462 nm, respectivamente, e os teores de K, Ca, Mg, Fe, Cu, Mn e Zn da matéria seca da parte aérea (MSPA) e do sistema radicular (MSR) foram determinados utilizando-se um

espectrofotômetro de absorção atômica com chama (Varian) utilizando combinação dos gases ar/acetileno e lâmpadas de cátodo oco.¹³ Os parâmetros utilizados na determinação dos teores dos elementos estão apresentados na Tabela 2.

Tabela 2. Parâmetros espectroscópicos utilizados na determinação dos teores dos elementos

Elementos	Comprimento de onda (nm)	Fenda
Ca	422,7	0,5
Mg	285,2	0,5
Fe	248,3	0,2
Cu	324,7	0,2
Mn	279,5	0,2
Zn	213,9	0,2
Cd	228,8	0,5
Pb	217,0	1,0
K	766,5	0,2

2.1. Delineamento estatístico

O delineamento estatístico adotado foi inteiramente casualizado, com cinco tratamentos (0; 0,25; 1; 5 e 10 mg L⁻¹ de Cd) e (0; 2,5; 10; 50 e 100 mg L⁻¹ de Pb) quatro 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 dos diferentes elementos (macronutrientes e micronutrientes) analisados na parte aérea e na raiz utilizando-se o programa SISVAR versão 5.3.¹⁴ As figuras de respostas, com base nas regressões, foram produzidas no aplicativo Origin versão 7.0.

3. Resultados e discussão

As equações de regressão ajustadas para os teores dos macronutrientes e micronutrientes na raiz e parte aérea da mostarda, em função das doses de cádmio e chumbo aplicadas em soluções nutritivas, mostram que os metais afetam esses parâmetros de forma diferenciada para cada parte da planta e para cada nutriente.

Na Figura 1a, a equação de regressão mostra que se pode esperar um decréscimo no teor de Ca para as folhas, em relação às plantas contaminadas com Cd. Para o sistema radicular, houve uma resposta quadrática negativa no teor do referido macronutriente.

Os resultados obtidos confirmam as observações de Gussarson (1994)¹⁵ e Gussarson *et al.* (1996),¹⁶ que trabalharam com *Betula pendula*, e observaram que o teor radicular de Ca diminuiu com a aplicação de Cd. Essa redução no teor de Ca, tanto na parte aérea quanto radicular, pode ser

explicada pelo efeito de competição entre este elemento, como cátion divalente, e o Cd^{2+} presente em altas concentrações durante o processo de absorção,¹⁷ muitas vezes caracterizado como antagonismo.¹⁸ O cálcio está envolvido na mediação de respostas de vários estímulos ambientais e na regulação de muitos processos de desenvolvimento das plantas,¹⁹ sua desordem é caracterizada pelo surgimento de necrose, especialmente nas extremidades das folhas em desenvolvimento.

Na Figura 1b estão os teores de K analisados nas plantas de mostarda onde se observa uma diminuição linear tanto nas raízes quanto parte aérea. A presença de efeito significativo do Cd, sobre o teor de K na raiz e nas folhas está de acordo com os resultados obtidos na raiz e na parte aérea de trigo,²⁰ onde houve redução no teor de K com a aplicação de Cd. Entretanto, os resultados não correspondem ao observado para o feijão, que mostrou maior concentração, de K nas raízes e na parte aérea de plantas tratadas com Cd.²¹ Esses dados mostram que a resposta das plantas à aplicação de Cd é muito variável, dependendo da espécie. O potássio atua na ativação enzimática e também no processo de absorção iônica. A deficiência de potássio pode gerar, por exemplo, o acúmulo de putrescina que causa necrose e clorose nas bordas e pontas de folhas mais velhas,²² fato este observado no presente estudo.

Nas raízes e nas folhas das plantas de mostarda houve efeito significativo quanto ao teor de S sob a aplicação de Cd (Figura 1c). Observou-se que na raiz a resposta foi quadrática negativa, sendo que o menor teor ocorreu na dose de 10 mg L⁻¹. Na folha ocorreu uma diminuição linear na qual o menor teor também foi à dose mais alta. Malavolta, Vitti e Oliveira, (1997)¹³ postularam que o teor aceitável para a parte aérea seria de 5 a 10 g kg⁻¹, valores que se enquadram aos encontrados. Kabata-Pendias

e Pendias relataram que a presença de Cd não afeta a taxa de absorção de S em diferentes espécies vegetais.¹⁸ A síntese de fitoquelatinas é induzida pela presença de Cd,²³ sendo este um possível mecanismo de tolerância das plantas a esse metal pesado. O enxofre tem grande importância em alguns processos metabólicos como regulação da atividade das proteínas, defesa antioxidante, fotossíntese e respiração²⁴ e sua carência causa clorose nas folhas da planta.²²

O teor de P na matéria seca de raiz (Figura 1d) apresentou uma resposta quadrática negativa, semelhante ao observado nas folhas, que apresentaram um teor máximo na mesma dose 5 mg L⁻¹. Na maior dose aplicada (10 mg L⁻¹ de Cd) ocorreu grau de deficiência, pois de acordo com Malavolta, Vitti e Oliveira,¹³ o teor de P entre 2 a 3 g kg⁻¹ é requerido para o ótimo crescimento das plantas. Estes resultados confirmam a afirmação de Kabata-Pendias e Pendias¹⁸ de que a presença de metais pesados, como o Cd, provoca antagonismo na absorção de P. O fósforo é de extrema importância nos processos metabólicos das plantas, na síntese e degradação de macromoléculas. Seu baixo teor ocasiona um menor crescimento da planta, pois provoca uma redução da taxa fotossintética. Isto pode ser devido às etapas intermediárias durante a fixação do carbono envolvendo os fosfatos de açúcar,²⁵ o que foi notório no presente experimento.

O teor de Mg nas folhas e na raiz, como mostra o Figura 1e, apresentou uma diminuição linear, nas quais o teor encontra-se abaixo do recomendável, 4 a 7 g kg⁻¹.¹³ Além da possível competição com o Cd^{2+} por ser divalente,¹⁷ muitas vezes caracterizado como antagonismo¹⁸ ocorre também uma competição com K^+ , Ca^{2+} e NH_4^+ . O magnésio além de participar de atividades enzimáticas é componente da molécula de clorofila, logo sua deficiência causa clorose internerval nas plantas.²²

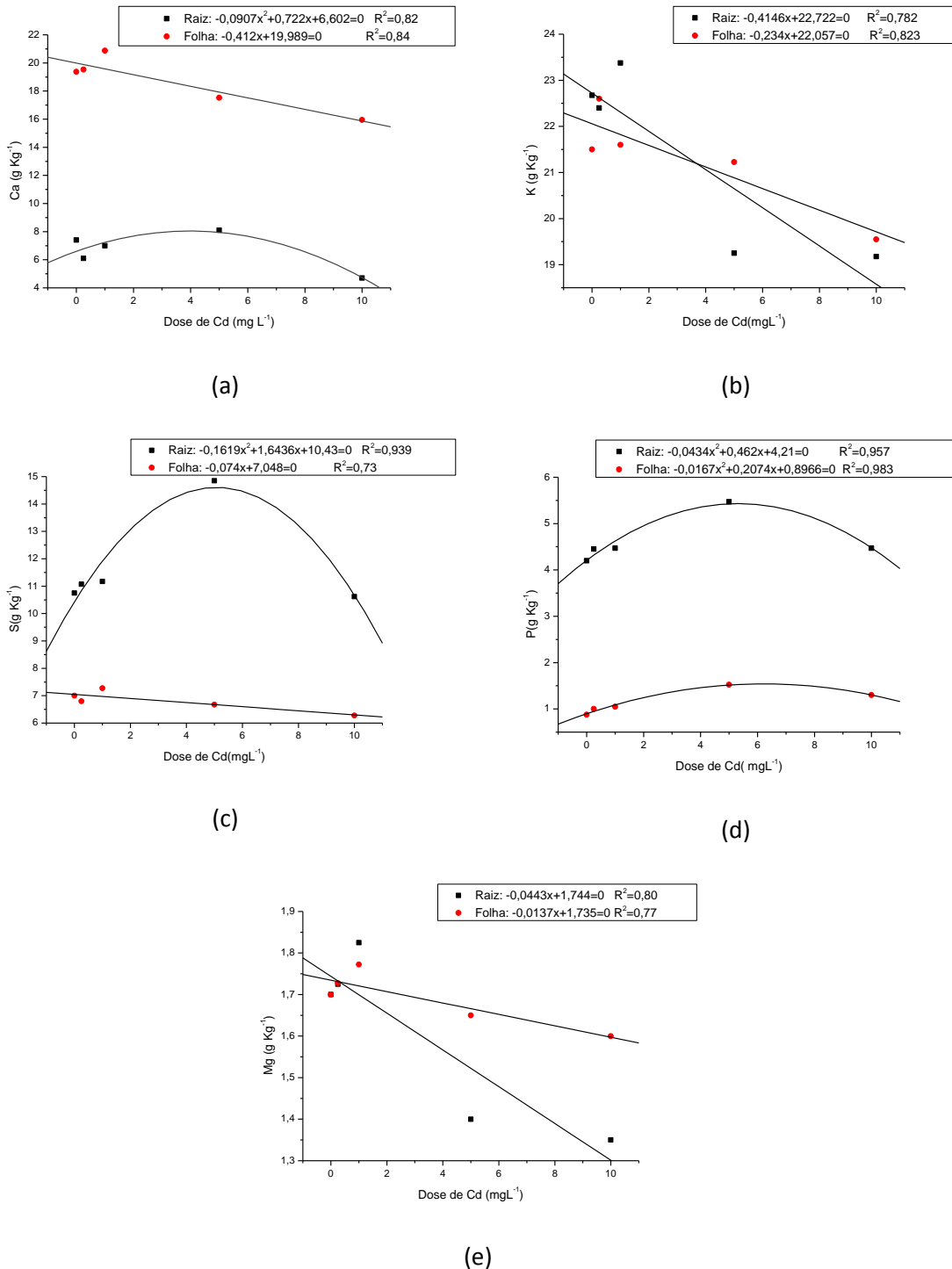


Figura 1. Teores de macronutrientes Ca (a), K (b), S (c), P (d) e Mg (e) encontrados na parte aérea e raiz de plantas de mostarda, em função de doses de Cd (médias submetidas à regressão polinomial a 5% de probabilidade pelo teste de F)

Nas raízes, o teor de Cu (Figura 2a) teve uma resposta quadrática positiva, confirmando a afirmação de Obata e Umebayashi²⁶ de que o Cd induz o aumento no teor radicular de Cu em diferentes

espécies. Resultados semelhantes foram obtidos por Paiva, Carvalho e Siqueira,²⁷ trabalhando com mudas de Cedro (*Cedrela fissilis*), e por Gussarson *et al.*¹⁶ Kabata-Pendias e Pendias¹⁸ afirmam que a presença

de Cd provoca interação com a absorção de Cu, podendo em algumas espécies, ser antagônica e, em outras, ser sinérgica, tendo, no presente caso, uma interação sinérgica.

Nas folhas, a resposta também foi quadrática positiva. Obata e Umebayashi²⁶ preconizam que o Cd estimula a absorção de Cu, porém, restringe seu transporte para a parte aérea. Este estímulo não deve ser considerado um efeito positivo, já que altas concentrações de Cu na planta pode afetar seu desenvolvimento, pois ele se acumula na raiz levando a inibição de seu crescimento ou sua morte.²⁸ Segundo Malavolta, Vitti e Oliveira,¹³ o teor aceitável de Cu nas folhas seria de 10 a 20 mg kg⁻¹, valores que estão acima dos encontrados. O cobre participa de diversos processos fisiológicos redox e está presente em várias proteínas que desempenham papel fundamental em processos como fotossíntese e respiração. Quando a planta apresenta uma carência de Cu, as atividades de todas essas enzimas ficam reduzidas. Essa redução pode ocasionar uma redução de matéria seca das plantas que apresentam deficiência de Cu.²⁹ Neste estudo, o que afetou o desenvolvimento da planta foram as altas concentrações de Cu na raiz, ele age de forma maléfica ao inibir o crescimento da raiz ou ocasionar sua morte.

Na Figura 2b observou-se que o teor radicular de Fe apresentou resposta quadrática negativa, demonstrando que, até certa dose, a presença de Cd exerce efeito sinérgico sobre a absorção de Fe e que a partir daí passa a apresentar efeito antagônico, conforme mencionado por Kabata-Pendias e Pendias.¹⁸

Nas folhas observou-se um efeito contrário ao das raízes, obtendo-se um aumento linear. De acordo com Yang *et al.*,³⁰ a aplicação de metais pesados pode restringir o transporte de Fe em várias espécies de plantas.

Um dos sintomas típicos visíveis da toxicidade do Cd a planta é a clorose foliar. Esta é maior em folhas novas quando

comparadas com as mais velhas, indicando que folhas jovens absorvem mais Cd, ou que elas são mais vulneráveis a toxidez causada por este metal pesado.³¹ A clorose pode ser devida a uma competição do Cd com o ferro por sítios de absorção na membrana plasmática¹⁸ ou com magnésio,³¹ podendo, neste caso, afetar potencialmente a estabilidade das clorofilas.

O Fe é necessário em três estágios da biossíntese da clorofila, ele constitui grupos que são responsáveis pela cadeia de transporte de elétrons durante a fotossíntese nas membranas tilacóides dos cloroplastos. Assim a deficiência de Fe afeta a produção de clorofila e de pigmentos que captam a luz, isso faz com que as plantas apresentem clorose em suas folhas.³²

No caso das plantas de mostarda, foi observada uma leve clorose nas folhas. Comparando-se os teores aceitáveis de Fe que, segundo Malavolta, Vitti e Oliveira,¹³ encontram-se entre 100 e 450 mg kg⁻¹, conclui-se que não houve deficiência deste micronutriente nas plantas estudadas. Neste caso, a clorose pode ser devido, em grande parte à competição, do Cd com o Mg, fato observado na Figura 1e.

A Figura 2c mostra que o teor de Mn nas folhas das plantas de mostarda apresentou uma resposta quadrática negativa quanto à aplicação de Cd. Os teores encontrados estão dentro da faixa aceitável que é de 30 a 300 mg kg⁻¹.¹³ Na raiz, obteve-se uma resposta quadrática positiva em relação ao teor de Mn. De acordo com Kabata-Pendias e Pendias,¹⁸ a resposta das plantas ao Cd, em relação ao Mn, pode ser antagônica ou sinérgica, tendo, no presente caso, apresentado uma resposta antagônica.

A redução na absorção de Mn foi observada em diferentes espécies, com a aplicação de Cd.^{16,33,34} O Mn é de extrema importância em processos enzimáticos e no processo de fotossíntese, dessa forma, sua deficiência pode causar manchas nas folhas das plantas,²² fato não observado neste trabalho.

Tanto nas folhas quanto na raiz das plantas de mostarda (Figura 2d), ocorreu diminuição quanto aos teores de Zn. Na parte aérea, o limite deste micronutriente varia de 20 a 100 mg kg⁻¹,¹³ sendo que neste estudo se encontra dentro do esperado.

Em várias espécies de plantas a absorção de Zn foi reduzida pela presença de Cd,³³⁻³⁵ fato confirmado pelos dois compartimentos da planta que apresentaram diminuição no teor de Zn, mostrando o antagonismo entre esses metais em termos de absorção,

conforme preconizado por Kabata-Pendias e Pendias.¹⁸

O zinco é um constituinte de muitas metaloenzimas, além de vários fatores transcricionais importantes na regulação da expressão gênica. O Cd por sua semelhança com o Zn, pode substituí-lo nestas enzimas, resultando em alteração da atividade enzimática.³⁶ Os sintomas visuais mais característicos causados por sua deficiência são a diminuição da expansão foliar (em dicotiledôneas) e necrose das folhas (em monocotiledôneas).²⁹

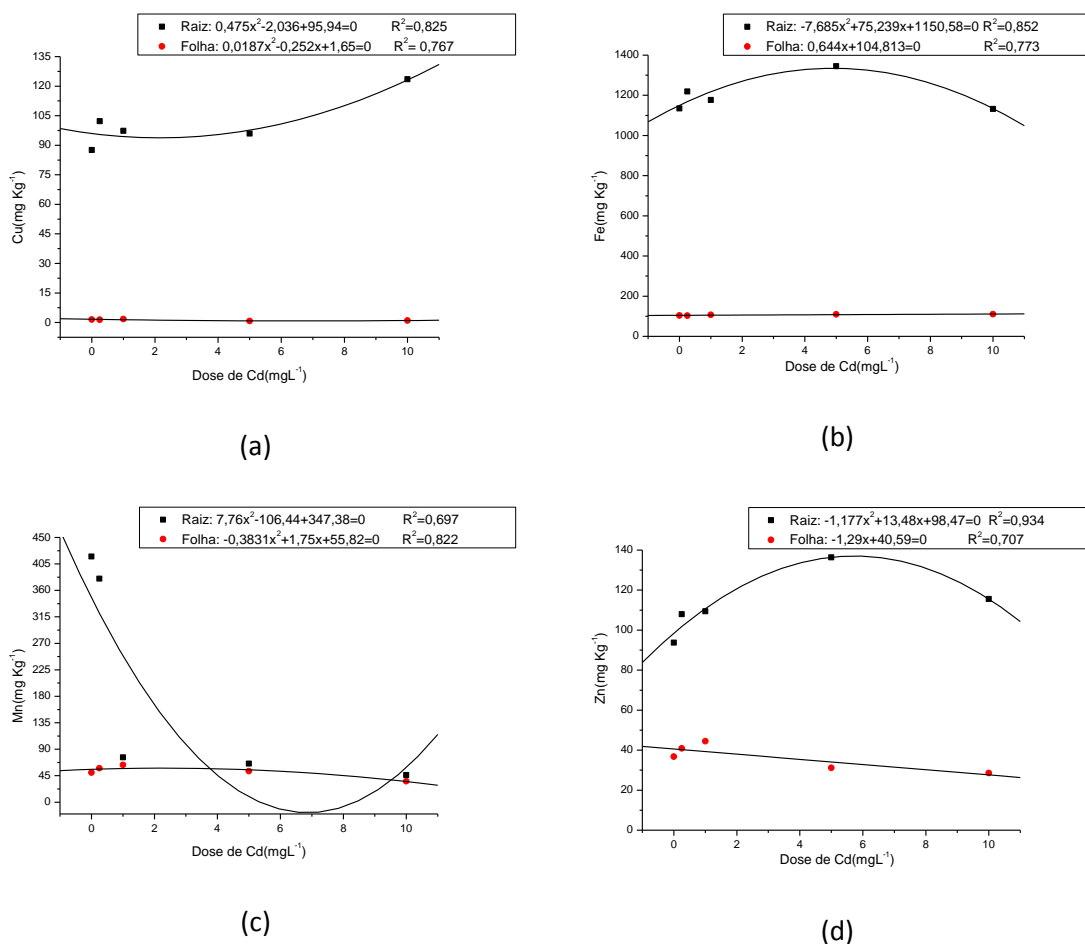


Figura 2. Teores de micronutrientes Cu (a), Fe (b), Mn (c) e Zn (d) encontrados na parte aérea e raiz de plantas de mostarda, em função de doses crescentes de Cd (médias submetidas à regressão polinomial a 5% de probabilidade pelo teste de F

Na Figura 3a, observa-se que o teor de K na raiz apresentou uma resposta quadrática negativa enquanto a parte aérea da mostarda teve uma diminuição linear, mas segundo

Malavolta, Vitti e Oliveira,¹³ o teor nas folhas estava normal, ou seja, entre 20 e 25 g kg⁻¹.

Esta redução no teor de K pode ser explicada pela inibição competitiva entre o K e os cátions divalentes presentes em altas concentrações.³⁷ Analogamente, de acordo com Faquin²² e Malavolta, Vitti e Oliveira,¹³ a presença de Mg^{+2} e Ca^{+2} , em altas concentrações, inibem a absorção de K^+ .

O teor de Ca, nutriente imóvel na planta, foi afetado significativamente na raiz e nas folhas das plantas de mostarda (Figura 3b) havendo uma resposta quadrática positiva com a aplicação das doses de chumbo, ocorreu uma queda no teor exceto para a dose mais alta de Pb. Segundo Malavolta, Vitti e Oliveira,¹³ o teor aceitável de Ca nas folhas para um desenvolvimento ideal destas seria de 15 a 20 g kg^{-1} , valores que estão acima dos encontrados. De acordo com Marschner, Godbold e Jentschke,¹⁷ cátions divalentes como Pb^{+2} competem com outros cátions, como o Ca^{+2} . O Pb por se apresentar em altas concentrações e por se parecer quimicamente com o cálcio pode substituir este durante o processo de absorção de nutrientes pela planta. Preconizam que a ocorrência de raízes curtas e grossas, bem como alterações na coloração das raízes podem estar relacionadas com a deficiência induzida de Ca pelo Pb. Fato observado neste estudo.

Quanto ao teor de Mg, observa-se, na Figura 3c, que na raiz houve uma resposta quadrática positiva e na parte aérea uma diminuição linear quando alcançou o teor mínimo de 1,4 g kg^{-1} de Mg, o que está abaixo dos limites normais em plantas, que são de 4 a 7 g kg^{-1} .¹³

Metais pesados como o Pb, reduzem o conteúdo de Ca e de Mg em diferentes espécies de plantas,^{38,33} mostrando haver antagonismo entre estes elementos.¹⁸ A presença de chumbo em solução nutritiva induziu ao aumento linear do teor radicular de P (Figura 3d). Esse aumento pode ser explicado pela precipitação do fósforo na forma de fosfato de chumbo, o que, segundo Kabata-Pendias e Pendias,¹⁸ são esperados pela facilidade com a combinação do Pb^{2+} com ânions $H_2PO_4^-$, forma predominante em que o P é absorvido.

O teor de P nas folhas (Figura 3d) sofreu diminuição linear atingindo grau de deficiência, pois de acordo com Malavolta, Vitti e Oliveira (1997),¹³ teores de P entre 2 a 3 g kg^{-1} nas folhas são requeridos para o desenvolvimento das plantas. Plantas deficientes em fósforo têm seu crescimento retardado. Esse parâmetro depende da função estrutural do nutriente e processo de transferência e armazenamento de energia.¹³ A consequência refere-se a prejuízos de vários processos metabólicos, como a síntese de proteínas e ácido nucléico.²⁵

Na Figura 3e, observa-se que o teor de S nos dois compartimentos da mostarda decresceu de forma linear. Essas respostas não condizem com a pesquisa de Kabata-Pendias e Pendias,¹⁸ pois, de acordo com eles, a presença de metais pesados, como o Pb, não exerce qualquer efeito sobre a absorção de S, mas segundo Malavolta, Vitti e Oliveira,¹³ o teor aceitável para a parte aérea é de 5 a 10 g kg^{-1} . Os valores encontrados estão nessa faixa.

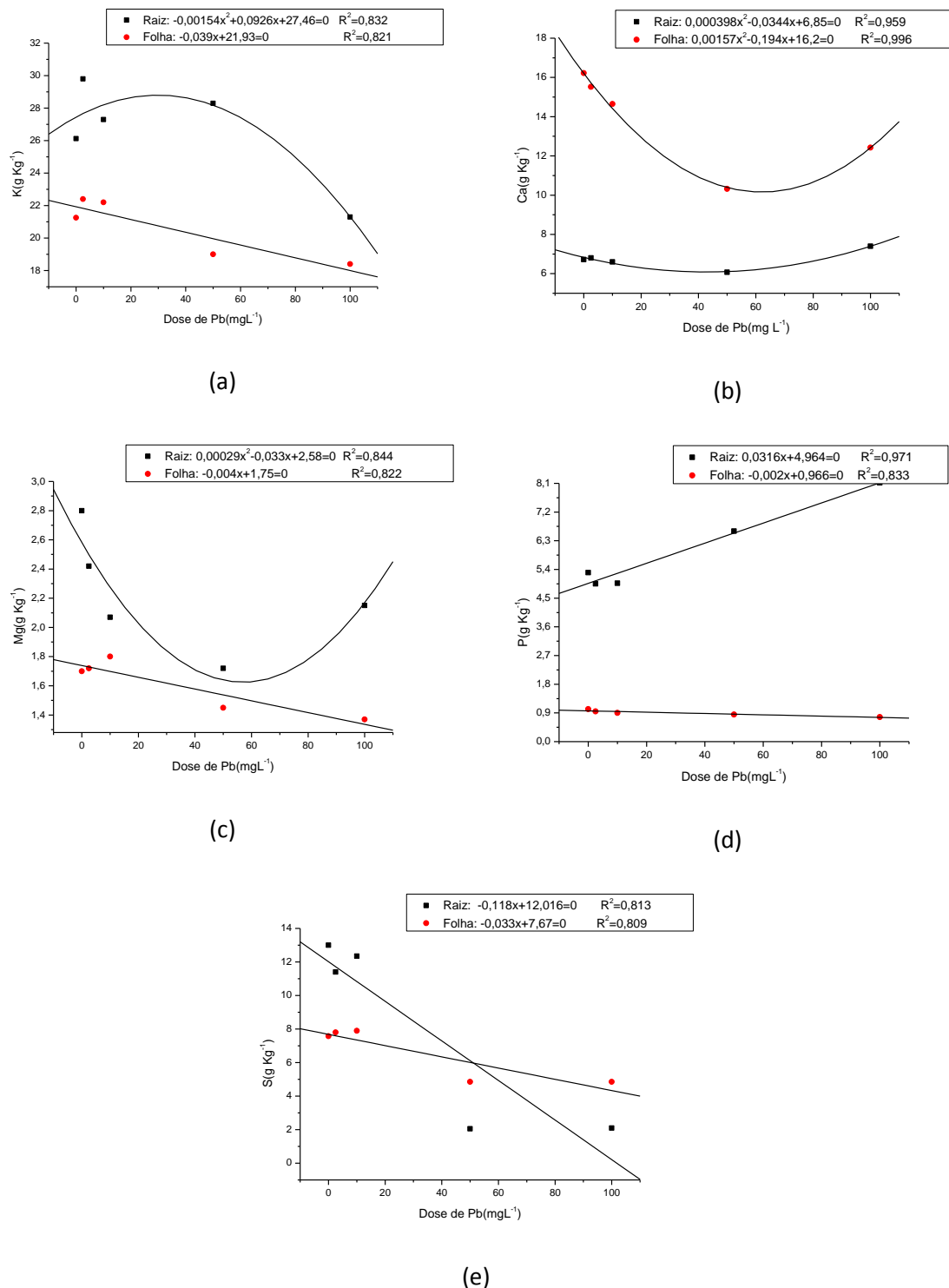


Figura 3. Teores de macronutrientes K (a), Ca (b), Mg (c), P (d) e S (e) encontrados na parte aérea e raiz de plantas de mostarda, em função de doses de Pb (médias submetidas à regressão polinomial a 5% de probabilidade pelo teste de F)

Na raiz, a aplicação de Pb apresentou uma resposta quadrática positiva sobre o teor de Cu. O Pb é considerado um elemento que não interfere na absorção de Cu (Kabata-

Pendia e Pendias),¹⁸ o que não corresponde ao observado no Figura 4a. Nas folhas, a presença de Pb fez com que as plantas não se desenvolvessem perfeitamente, por isso

observa-se uma redução do teor de Cu conforme o aumento das doses (efeito de diluição). Segundo Malavolta, Vitti e Oliveira,¹³ o teor aceitável de Cu nas folhas é de 10 a 20 mg kg⁻¹, valores que estão acima dos encontrados.

O teor de Fe na raiz teve uma resposta quadrática positiva, enquanto nas folhas a resposta foi negativa (Figura 4b). Os teores de Fe indicam que, até certa dose de Pb, há restrição do transporte de Fe da raiz para a parte aérea, conforme observado em várias espécies por Yang et al.³⁰ Foi observada uma leve clorose nas folhas da mostarda. Comparando-se os teores aceitáveis de Fe que, segundo Malavolta, Vitti e Oliveira,¹³ encontram-se entre 100 e 450 mg kg⁻¹, conclui-se que não houve deficiência deste micronutriente nas plantas estudadas.

Nas folhas da mostarda, o teor de Mn apresentou resposta decrescente linear (Figura 4c), estando os teores encontrados dentro da faixa aceitável que é de 30 a 300 mg kg⁻¹ para esta parte.¹³ Na raiz, a aplicação de doses crescentes de Pb não teve uma resposta significativa. O coeficiente de correlação não foi satisfatório, mas alcançou um teor mínimo na dose de 10 mg L⁻¹, o que, de acordo com Kabata-Pendias e Pendias,¹⁸ pode indicar antagonismo entre Mn e Pb.

Na Figura 4d observou-se que nas folhas não houve uma resposta significativa quanto ao teor de Zn, coeficiente de correlação insatisfatório. Já na parte radicular houve uma resposta quadrática positiva. Este

micronutriente pode variar de 20 a 100 mg kg⁻¹, valores encontrados no presente trabalho.

O comportamento apresentado pelos teores de micro e macronutrientes nas plantas de mostarda cultivadas em ambiente contaminado por Pb reflete bem a dificuldade de identificar espécies tolerantes a metais pesados, pois os teores são distintos nas diferentes partes da planta. Deve-se ainda considerar o fato de que a resposta também parece ser diferenciada com as espécies.

A aplicação de cádmio e de chumbo durante todo o processo de cultivo das plantas de mostarda causou deficiência em relação aos teores de micro e macronutrientes em ambas as partes analisadas das plantas. Como visto, esses macros e micronutrientes estão fortemente ligados a processos enzimáticos, processos fisiológicos redox, a produção de clorofila e a fotossíntese das plantas.

Qualquer alteração a esses processos podem causar danos às plantas como, por exemplo, a clorose das folhas e até a redução da produção de matéria seca (Figuras 5 e 6). No presente trabalho, o efeito da redução dos teores dos nutrientes na planta de mostarda afetou a produção de matéria seca tanto da raiz como da parte aérea, apresentado um decréscimo linear na massa seca versus aumento das doses do metal contaminador (Figura 7).

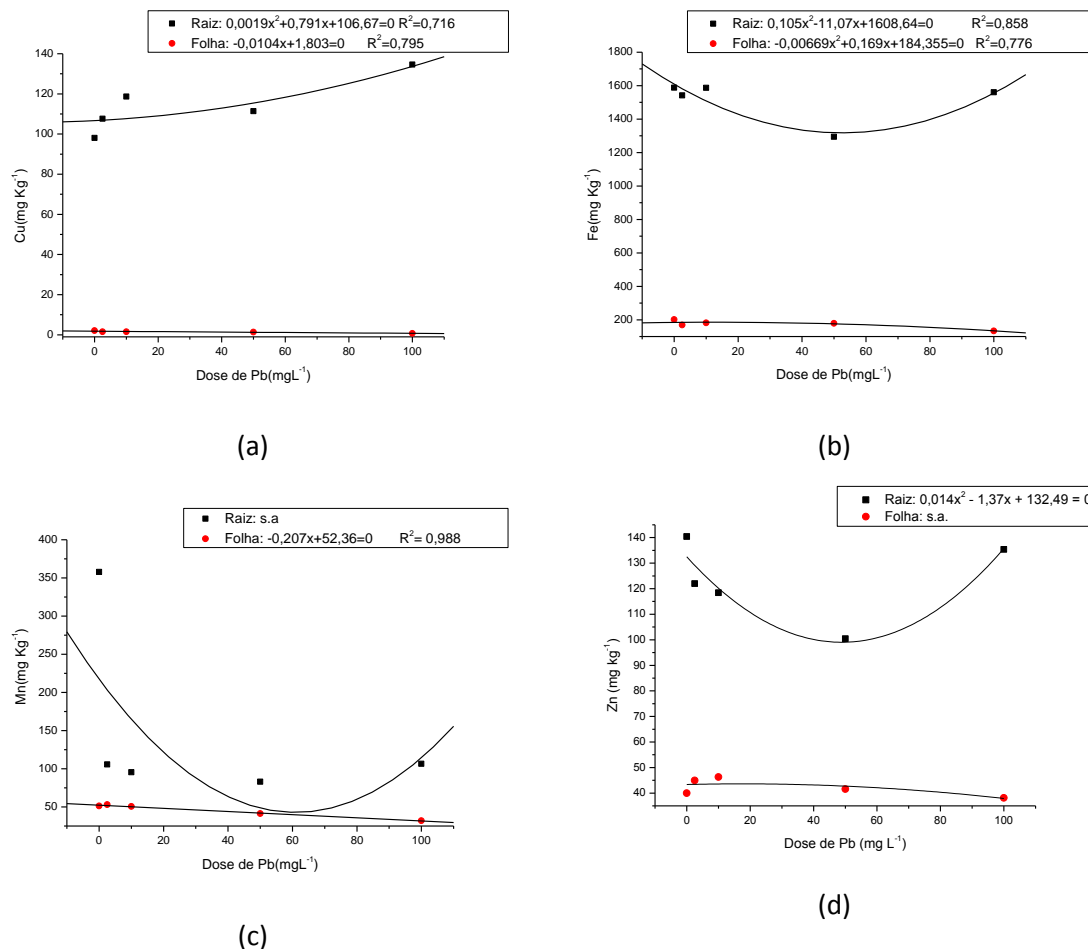


Figura 4. Teores de micronutrientes Cu (a), Fe (b), Mn (c) e Zn (d) encontrados na parte aérea e raiz de plantas de mostarda, em função de doses crescentes de Pb (médias submetidas à regressão polinomial a 5% de probabilidade pelo teste de F)

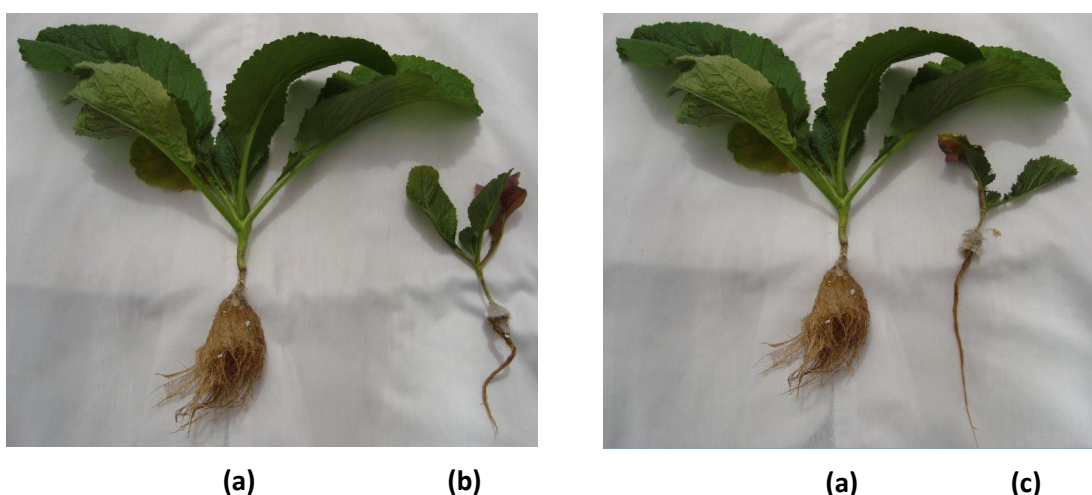


Figura 5. *Brassica juncea* submetidas as doses de Cd: (a) Tratamento controle, (b) 5 mg L⁻¹ e (c) 10 mg L⁻¹

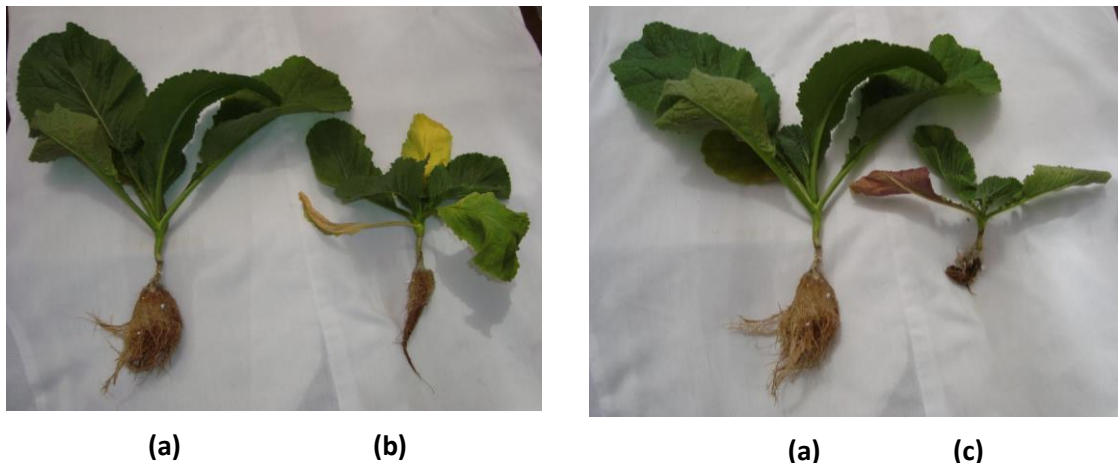


Figura 6. *Brassica juncea* submetidas as doses de Pb: (a) Tratamento controle, (b) 50 mg L⁻¹ e (c) 100 mg L⁻¹

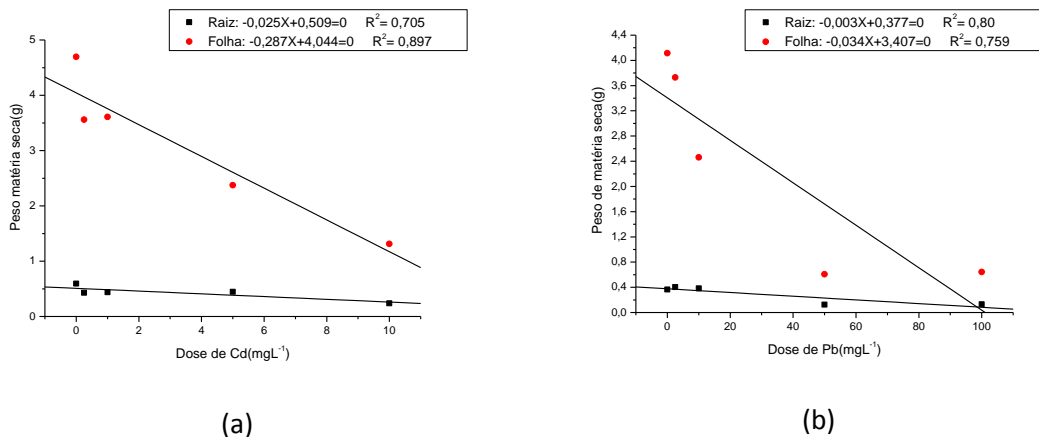


Figura 7. (a) produção de matéria seca da raiz (MSR) e da parte aérea (MSPA) da mostarda submetida a diferentes doses de Cd e (b) produção de matéria seca da raiz (MSR) e da parte aérea (MSPA) da mostarda submetida a diferentes doses de Pb (médias submetidas à regressão polinomial a 5% de probabilidade pelo teste de F)

4. Conclusão

A adição de Cd na solução nutritiva diminuiu os teores dos nutrientes nas plantas de mostarda, com exceção do Cu nas folhas e raiz, Fe nas folhas e Mn na raiz. Em relação à aplicação de Pb, ocorreu a diminuição nos teores dos nutrientes exceto do Ca na raiz e folhas, na dose mais alta de Pb, e Mg, P, Cu, Fe e Zn na raiz. A carência desses macro e micronutrientes, ou até o excesso de alguns deles como o Cu, causa diversas respostas

fisiológicas a planta, entre essas respostas estão a presença de clorose, necrose e conseqüentemente diminuição de matéria seca da planta. Todas essas deficiências causadas à planta foram observadas no presente trabalho o que demonstra o forte efeito negativo que esses metais apresentam sobre elas.

Agradecimentos

Ao Laboratório de Análise Foliar do Departamento de Química da Universidade Federal de Lavras (UFLA), por possibilitar a análise espectroscópica, bem como ao Departamento de Ciência do Solo da UFLA pela assistência com os experimentos e a FAPEMIG.

Referências Bibliográficas

- ¹ Costa, E. D.; *Dissertação de Mestrado*, Universidade Federal de Viçosa, 1991. [[Link](#)]
- ² Silva, V. L.; Carvalho, R.; Freitas, M. P.; Tormena, C. F.; Melo, W. C. Spectrometric and theoretical investigation of the structures of Cu and Pb/DTPA complexes. *Structural Chemistry* **2007**, *18*, 605. [[CrossRef](#)]
- ³ Silva, V. L.; Carvalho, R.; Freitas, M. P.; Tormena, C. F.; Melo, W. C. Structural determination of Zn and Cd-DTPA complexes: MS, infrared, (13)C NMR and theoretical investigation. *Spectrochimica Acta* **2007**, *68*, 1197. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
- ⁴ Baligar, V. C.; Fageria, N. K.; Elrashidi, M. A. Toxicity and Nutrient Constraints on Root Growth. *HortScience* **1998**, *33*, 960. [[Link](#)]
- ⁵ Bergmann, W. *Nutritional disorders of plants: development, visual and analytical diagnosis*, Gustav Fischer: New York, 1992. [[Link](#)]
- ⁶ Oliveira, J. A.; 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 de Fisiologia Vegetal* **2001**, *13*, 329. [[Link](#)]
- ⁷ Alvarenga, M. A. R.; *Tomate: produção em campo, em casa-de-vegetação e em hidroponia*, 2a. ed., UFLA: Lavras, 2013. [[Link](#)]
- ⁸ Bell, P. F.; James, B. R.; Chaney, R. L. Heavy metal extractability in long-term sewage sludge and metal salt-amended soils. *Journal of Environmental Quality* **1991**, *20*, 481. [[CrossRef](#)]
- ⁹ Qu, R. L.; Li, D.; Du, R.; Qu, R. Lead uptake by roots of four turfgrass species in hydroponic cultures. *HortScience* **2003**, *38*, 623. [[Link](#)]
- ¹⁰ Baker, A. J. M. Accumulators and excluders - strategies in the response of plants to heavy metals. *Journal of Plant Nutrition* **1981**, *3*, 643. [[CrossRef](#)]
- ¹¹ Salt, D. E.; Prince, R. C.; Pickering, I. J.; Raskin, I. Mechanisms of cadmium mobility and accumulation in Indian mustard. *Plant Physiology* **1995**, *109*, 1427. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
- ¹² Clark, J. Characterization of phosphatase of intact maize roots. *Journal of Agricultural and Food Chemistry* **1975**, *23*, 458. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
- ¹³ Malavolta, E.; Vitti, C. C.; Oliveira, S. A. *Avaliação do estado nutricional das plantas: princípios e aplicações*. 2a. ed., Esalq-USP: Piracicaba, 1997. [[Link](#)]
- ¹⁴ Ferreira, D. F.; *Resumos da 45ª Reunião Anual da Região Brasileira da Sociedade Internacional de Biometria*, São Carlos, Brasil, 2000. [[Link](#)]
- ¹⁵ Gussarson, M. Cadmium-induced alterations in nutrient composition and growth of *betula pendula* seedlings: The significance of fine roots as a primary target for cadmium toxicity. *Journal of Plant Nutrition* **1994**, *17*, 2151. [[CrossRef](#)]
- ¹⁶ Gussarson, M.; Asp, H.; Adalsteinsson, S.; Jensén, P. Enhancement of cadmium effects on growth and nutrient composition of birch (*Betula pendula*) by bethionine sulphoximine (BSO). *Journal of Experimental Botany* **1996**, *47*, 211. [[CrossRef](#)]
- ¹⁷ Marschner, P.; Godbold, D. L.; Jentschke, G. Dynamics of lead accumulation and non-mycorrhizal Norway spruce (*Picea abies* (L.) Karst.). *Plant and Soil* **1996**, *178*, 239. [[CrossRef](#)]
- ¹⁸ Kabata-Pendias, A.; Pendias, H.; *Trace elements in soils and plants*, 3a. ed., CRC Press: Boca Raton, 2000. [[Link](#)]
- ¹⁹ Hashimoto, K; Kudla, J. Calcium decoding mechanisms in plants. *Biochimie* **2011**, *93*, 2054. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
- ²⁰ Jalil, A.; Selles, F.; Clarke, J. M. Effect of cadmium on growth and the uptake of cadmium and other elements by durum wheat. *Journal of Plant Nutrition* **1994**, *17*, 1839. [[CrossRef](#)]
- ²¹ Vásquez, M. D.; Poschenrieder, C.; Barceló, J. Pulvinus structure and leaf abscission in cadmium-treated bean plants

- (*Phaseolus vulgaris*). *Canadian Journal of Botany* **1989**, *67*, 2756. [[CrossRef](#)]
- ²² Faquin, V.; *Nutrição mineral de plantas*, Ufla/Faep: Lavras, 2005. [[Link](#)]
- ²³ Brune, A.; Urbach, W.; Dietz, K. J. Differential toxicity of heavy metals is partly related to a loss of preferential extraplasmic compartmentation: a comparison of Cd, Mo, Ni and Zn stress. *The New Phytologist* **1995**, *129*, 403. [[CrossRef](#)]
- ²⁴ Juszczuk, I. M.; Ostaszewska, M. Respiratory activity, energy and redox status in sulphur-deficient bean plants. *Environmental and Experimental Botany* **2011**, *74*, 245. [[CrossRef](#)]
- ²⁵ Maathuis, F. J. M. Physiological functions of mineral macronutrients. *Current Opinion in Plant Biology* **2009**, *12*, 250. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
- ²⁶ Obata, H.; Umebayashi, M. Effects of cadmium on mineral nutrient concentrations in plants differing in tolerance for cadmium. *Journal of Plant Nutrition* **1997**, *20*, 97. [[CrossRef](#)]
- ²⁷ Paiva, H. N.; Carvalho, J. G.; Siqueira, J. O. Efeito da aplicação de cádmio sobre o teor de nutrientes em mudas de cedro (*Cedrela fissilis* Vell.). *Revista Ciência Florestal* **2001**, *11*, 153. [[Link](#)]
- ²⁸ Shan, Q.; Liu, X.; Zhang, J.; Chen, G.; Liu, S.; Zhang, P.; Wang, Y. Analysis on the tolerance of four ecotype plants against copper stress in soil. *Procedia Environmental Sciences* **2011**, *10*, 1802. [[CrossRef](#)]
- ²⁹ Kirkby, E. A.; Römheld, V. Micronutrientes na fisiologia de plantas: funções, absorção e mobilidade. *Encarte Técnico, Informações agrônômicas* **2007**, *118*. [[Link](#)]
- ³⁰ Yang, X.; Baligar, V. C.; Martens, D. C.; Clark, R. B. Plant tolerance to nickel toxicity: II nickel effects on influx and transport of mineral nutrients in four plant species. *Journal of Plant Nutrition* **1996**, *19*, 265. [[CrossRef](#)]
- ³¹ Kurdziel, B. M.; Prasad, M. N. V.; Strzalka, K.; *Photosynthesis in heavy metal stressed plants*, 2a. ed., G. Fischer: New York, 2004. [[Link](#)]
- ³² Jeong, J.; Connolly, E. L. Iron uptake mechanisms in plants: Functions of the FRO family of ferric reductases. *Plant Science* **2009**, *176*, 709. [[CrossRef](#)]
- ³³ Soares, C. R. F. S.; *Dissertação de Mestrado*, Universidade Federal de Lavras, 1999. [[Link](#)]
- ³⁴ Yang, X.; Baligar, V. C.; Martens, D. C.; Clark, R. B. Cadmium effects on influx and transport of mineral nutrients in plants species. *Journal of Plant Nutrition* **1996**, *19*, 643. [[CrossRef](#)]
- ³⁵ Bertoli, A. C.; Cannata, M. G.; Carvalho, R.; Bastos, A. R. R.; Freitas, M. P.; Augusto, A. S. *Lycopersicon esculentum* submitted to Cd-stressful conditions in nutrition solution: Nutrient contents and translocation. *Ecotoxicology Environmental Safety* **2012**, *86*, 176. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
- ³⁶ Cherif, J.; Mediouni, C.; Ammar, W. B.; Jemal, F. Interactions of zinc and cadmium toxicity in their effects on growth and in antioxidative systems in tomato plants (*Solanum lycopersicum*). *Journal of Environmental Sciences* **2011**, *23*, 837. [[CrossRef](#)]
- ³⁷ Walker, W. M.; Miller, J. E.; Hassett, J. J. Effect of lead and cadmium upon the calcium, magnesium, potassium, and phosphorus concentration in young corn plants. *Soil Science* **1977**, *124*, 145. [[Link](#)]
- ³⁸ Huang, J. W.; Cunningham, S. D. Lead phytoextraction: species variation in lead uptake and translocation. *The New Phytologist* **1996**, *134*, 75. [[CrossRef](#)]