

# METAIS PESADOS EM SOLOS DE UMA TOPOLITOSSEQUÊNCIA DO TRIÂNGULO MINEIRO<sup>(1)</sup>

T. S. OLIVEIRA<sup>(2)</sup> & L. M. COSTA<sup>(3)</sup>

## RESUMO

O presente estudo teve por objetivo determinar os teores de metais pesados em solos de uma topolitossequência localizada no Triângulo Mineiro, Minas Gerais, para avaliar a contribuição potencial na disponibilidade destes metais em ambientes com solos de diferentes origens. Amostras de solo foram coletadas, secas ao ar (< 2 mm), determinando-se os elementos Cd, Cu, Pb e Zn, na forma total e solúvel, utilizando-se HNO<sub>3</sub>/HClO<sub>4</sub> (4:1, volume), concentrados e em concentrações crescentes: 0; 0,2; 0,4; 0,6 e 0,8 mol L<sup>-1</sup> de H<sup>+</sup>, respectivamente. Na dosagem, utilizou-se espectrofotometria de absorção atômica. Ajustaram-se modelos de regressão pela técnica de polinômios ortogonais, sendo testados até o terceiro grau. Os resultados permitiram estabelecer que os solos desenvolvidos de basalto apresentaram maior potencial de disponibilidade de Cu e Zn. Já os solos desenvolvidos de gnaiss apresentaram maior potencial de associação ao Pb. O Cd revelou baixo potencial de disponibilidade nos solos estudados, certamente pela sua pequena abundância natural. Não se devem antecipar aumentos na disponibilidade de Cd, mesmo com abaixamento do pH.

**Termos de indexação:** material de origem, extração ácida, metais pesados solúveis, basalto, gnaiss.

---

<sup>(1)</sup> Parte da Tese de Doutorado do primeiro autor, apresentada ao Curso de Pós-Graduação em Fitotecnia, Universidade Federal de Viçosa – UFV. Recebido para publicação em setembro de 2002 e aprovado em maio de 2004.

<sup>(2)</sup> Professor Adjunto do Departamento de Ciências do Solo, Universidade Federal do Ceará – UFC. Campus do PICI, Bloco 807, CEP 60455-760 Fortaleza (CE). Bolsista do CNPq. E-mail: teo@ufc.br

<sup>(3)</sup> Professor Titular do Departamento de Solos, Universidade Federal de Viçosa – UFV. CEP 36571-000, Viçosa (MG). Bolsista do CNPq. E-mail: liovando@solos.ufv.br

**SUMMARY:** *HEAVY METAL IN SOILS OF A TOPOLITHOSE-QUENCE IN THE TRIÂNGULO MINEIRO, STATE OF MINAS GERAIS (BRAZIL)*

*The objective of this research was to determine the heavy metal concentration in soils of a topolithosequence in western Minas Gerais State, in order to evaluate their potential availability in soils originated from distinct parent materials. Seven soil samples were collected, air dried, and sieved through a 2 mm sieve and then had their Cd, Cu, Pb, and Zn contents determined. The total concentration of the chemical elements was assessed using  $\text{HNO}_3/\text{HClO}_4$  extractant (4:1 by volume). The soluble forms were analyzed with the same double acid mixture in increasing  $\text{H}^+$  concentrations: 0.0; 0.2; 0.4; 0.6, and 0.8 mol  $\text{L}^{-1}$ . The metals were analyzed by atomic absorption spectrometry. Regression models were fitted up to the third degree orthogonal polynomials. In the studied topolithosequence, the soils formed from basalt presented higher Cu and Zn availability, whereas those formed from gneiss presented higher Pb availability. Cadmium availability was low in the studied soils due to the low natural concentration of the element in both parent materials. Thus, an increased native Cd availability would not be expected, even if there is a decrease in soil pH.*

*Index terms: parent rock, acid extraction, soluble heavy metals, basalt, gneiss.*

## INTRODUÇÃO

O termo metais pesados refere-se aos elementos e suas formas iônicas que pertencem ao grupo de transição e não-transição da tabela periódica com densidade maior que 6 kg  $\text{dm}^{-3}$ . Englobam-se, desta forma, metais, semimetais e até não-metais, como o Se, normalmente associados à poluição, à contaminação e à toxidez a seres vivos, incluindo alguns elementos essenciais aos seres vivos, quando em pequenas concentrações (Alloway, 1990). Nos últimos anos, o estudo dos metais pesados tem abordado a avaliação dos efeitos da acumulação desses elementos nos organismos nos diferentes ecossistemas, a transferência na cadeia alimentar e os meios alternativos de convivência com os problemas gerados pelos excessos ocorridos.

Os metais pesados no solo podem estar presentes em minerais primários e secundários, precipitados ou co-precipitados, adsorvidos, na solução do solo ou em microrganismos, plantas e animais (Schmitt & Sticher, 1991). Apresentam interações com a fase sólida bastante complexas, envolvendo reações de adsorção e dessorção, precipitação e dissolução, complexação e oxirredução, tanto com a fase inorgânica, quanto com a orgânica. Os graus de mobilidade, atividade e biodisponibilidade dos metais pesados dependem de vários fatores, tais como: pH, temperatura, potencial redox, CTC, competição com outros metais, ligação com ânions e composição e força iônica da solução do solo. Vários autores consideram ainda que a mobilidade dos metais pesados no solo é influenciada pela superfície específica, textura, densidade aparente, teor de matéria orgânica, tipo e concentração de minerais de argila, além do tipo e do teor de metais. Não obstante, deve-se fazer referência às variações das

diferentes propriedades do solo em curtas distâncias, o que implica a variabilidade espacial dos teores naturais de metais pesados nele presentes (Tragmar et al., 1985; Wopereis et al., 1988; Zanini & Bonifácio, 1991).

No geral, estudos de mobilidade têm demonstrado que os metais pesados Pb, Cr e Cu apresentam baixa mobilidade, acumulando-se nas camadas superficiais do solo, enquanto Zn, Mn, Ni e Cd são, relativamente, mais móveis (Zabowski & Zasoski, 1987; Fontes et al., 1993; Matos et al. 1994). Vários mecanismos que envolvem as propriedades do solo de influência direta poderão levar, como consequência, à manutenção de um equilíbrio, quanto aos teores de metais pesados no solo, refletindo não somente os teores característicos das diferentes situações de material de origem e pedogênese, mas também o resultado de interações, tanto quantitativas quanto qualitativas.

É consenso geral na literatura o fato de que os teores destes elementos no solo refletem, em maior ou menor grau, os teores no material de origem, logicamente com exceção dos casos de intensa deposição destes por uma fonte antrópica qualquer, podendo ser indicativo dos diferentes tipos de materiais de origem e, até, em alguns casos, utilizados em estudos sistemáticos e pedogenéticos (Curi & Franzmeier, 1987; Busacca & Singer, 1989; Esser et al., 1991; Jeng & Bergseth, 1992; Piccolo & Celano, 1992; Angelone et al., 1993; Pettry & Switzer, 1993; Xing & Dudas, 1993; Jing-Sheng et al., 1993). Solos originados de rochas básicas, em razão de sua maior riqueza em metais pesados, apresentariam teores maiores destes elementos que aqueles provenientes de outros materiais: granitos, gnaisses, calcários, arenitos e sedimentos diversos (Tiller, 1980; Resende et al., 1986; Jing-Sheng et al., 1993).

Vários autores atribuem ao material de origem o componente principal na distribuição dos metais pesados no solo (Mitchell, 1964; Nalovic, 1969; Ferreira et al., 1994), devendo-se esperar que, mesmo em condições severas de intemperismo (pedogênese), como a dos trópicos, o material de origem ainda possa exercer papel importante no conteúdo de grande parte dos metais pesados nos solos, definindo níveis característicos e representativos dos materiais que deram origem ao solo.

Ross (1994) apresenta uma síntese das observações de vários autores a respeito da afinidade de metais pesados em relação a alguns constituintes do solo. Pelos dados apresentados, pode-se inferir que o produto de todas as interações possíveis deve levar à expressão de teores característicos dos materiais de origem, visto que, conforme a constituição predominante do solo, pode-se esperar a presença de um ou outro elemento em maior ou menor intensidade, intimamente associado ao material de origem e aos processos de formação do solo.

Esta condição permite separar e delimitar a área de influência dos materiais de origem pela análise dos teores destes elementos. Oliveira et al. (1999), em estudo com esse propósito, em uma topolitossequência no Triângulo Mineiro e utilizando técnicas de análise multivariada, observaram a aplicabilidade dos teores de metais pesados na separação de solos oriundos de gnaisse, basalto e arenito + sedimentos do Terciário. Dentre os elementos testados, o Cu é o elemento que mais contribui relativamente a Ni, Fe, Mn e Zn (Oliveira et al., 1998).

O presente estudo teve por objetivo determinar os teores de metais pesados, obtidos com extração ácida a concentrações crescentes, em solos de uma topolitossequência localizada no Triângulo Mineiro, Minas Gerais, para avaliar a hipótese da contribuição potencial diferenciada na disponibilidade destes para o ambiente em solos formados a partir de diferentes materiais de origem.

## MATERIAL E MÉTODOS

### Área de estudo, seleção e coleta de solos

A área de estudo da topolitossequência situa-se na zona fisiográfica denominada Triângulo Mineiro, estado de Minas Gerais, pertencendo à Bacia do Rio Paranaíba, componente da grande Bacia Hidrográfica do Rio Paraná. Nesta região, foram coletadas amostras de solos em pontos ao longo da rodovia BR-050, entre os municípios de Uberlândia e Araguari, no trecho compreendido entre o Rio Araguari e a sede do primeiro município.

Na seleção dos pontos de amostragem na topolitossequência, foram consideradas as variações na paisagem que refletissem os diferentes materiais

de origem típicos (gnaisse-basalto-arenito + sedimentos) da área em estudo, principalmente no que se refere às mudanças no relevo, altitude, afloramentos de rochas, cor dos solos, etc. Foram coletadas amostras de solos nas profundidades de 0-10 cm (1) e 50-60 cm (2), correspondentes aos horizontes A e B, aproveitando-se cortes ao longo do leito da estrada ou com a abertura de uma pequena trincheira, considerando uma distância de 50 m do leito da estrada. Mesmo para amostras coletadas nos cortes ao longo da estrada, respeitou-se esta distância.

Foi feita a descrição dos perfis nas profundidades de coleta, de acordo com Lemos & Santos (1996), o posicionamento geográfico foi determinado com a utilização de equipamento de posicionamento geográfico global (GPS) e a altitude obtida com altímetro de mão.

Objetivando avaliar contribuições antrópicas de metais pesados, coletaram-se, também, amostras em transecto, situado a uma distância de 4.700 m do ponto inicial de coleta e a uma altitude de 790 m, em posição intermediária entre os pontos de coleta dos solos 11 e 12, nas mesmas condições descritas anteriormente. O primeiro ponto situou-se a 35 m do leito da estrada e os demais de 50 em 50 m, num total de quatro.

### Características e propriedades físicas e químicas dos solos coletados

Na análise granulométrica, foi utilizado o método da pipeta para a determinação do teor de argila e silte, com dispersão química (NaOH, 0,1 mol L<sup>-1</sup>) e mecânica (agitação rápida), sendo a areia grossa e a fina quantificadas por tamisação. Na classificação textural, foram usados o triângulo textural e os valores obtidos da análise granulométrica (Embrapa, 1997). As cores de solos foram determinadas por comparação com padrões contidos na Carta de Cores de Munsell (Munsell Color, 1975) em amostras de TFSA secas e ligeiramente umedecidas.

Os valores de pH em água e em KCl 1 mol L<sup>-1</sup> foram obtidos potenciométricamente em suspensão, empregando-se a relação 1:2,5 de solo:água e solo:KCl, após 1 h, no mínimo, de repouso e agitação da suspensão antes da leitura, conforme Embrapa (1997). Alumínio, Ca<sup>2+</sup> e Mg<sup>2+</sup> trocáveis foram extraídos com KCl 1 mol L<sup>-1</sup>, na proporção 1:20, sendo Al<sup>3+</sup> determinado por titulação com NaOH 0,25 mol L<sup>-1</sup> e o Ca<sup>2+</sup> e Mg<sup>2+</sup> por espectrofotometria de absorção atômica, segundo Embrapa (1997). O K<sup>+</sup> trocável e P disponível foram extraídos com solução HCl 0,05 mol L<sup>-1</sup> e H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 0,0125 mol L<sup>-1</sup> (Mehlich-1), na proporção 1:10. O K foi dosado por fotometria de chama e o P determinado por colorimetria na presença de ácido ascórbico, conforme Embrapa (1997). A acidez potencial (H + Al) foi determinada com Ca(OAc)<sub>2</sub> 0,5 mol L<sup>-1</sup>, ajustado para pH 7,0, na proporção 1:15 e titulação com NaOH 0,0606 mol L<sup>-1</sup>, segundo Embrapa (1997).

A determinação de  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{TiO}_2$  e  $\text{P}_2\text{O}_5$  foi feita na fração argila com a extração de Fe, Al, Ti e Si, após contato com  $\text{H}_2\text{SO}_4$  1:1 (volume), aquecendo até à fervura, sob refluxo, com posterior resfriamento, diluição e filtração. No resíduo, determinou-se o  $\text{SiO}_2$  e, no filtrado, foram obtidos o  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{TiO}_2$  e  $\text{P}_2\text{O}_5$ , conforme Embrapa (1997). As relações moleculares Ki, Kr e  $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Fe}_2\text{O}_3$  foram calculadas com base em resultados de determinações analíticas já descritas.

As características e as propriedades dos solos coletados encontram-se no quadro 1.

### Determinação dos teores de metais pesados

Na determinação dos elementos na forma solúvel em ácido, utilizaram-se 10 g de TFSA, triturados em almofariz de ágata, e 100 mL de solução ácida em frasco de 150 mL, agitados durante 2 h, utilizando cinco repetições. Concentrações crescentes de ácidos nítrico ( $\text{HNO}_3$ ) e perclórico ( $\text{HClO}_4$ ), na proporção 4:1 (volume), foram utilizadas para esta análise, sendo: 0; 0,2; 0,4; 0,6 e 0,8 mol  $\text{L}^{-1}$  de  $\text{H}^+$ , uma modificação da proposição original de Amaral Sobrinho et al. (1992). Ao término do período de agitação, procedeu-se à filtragem, utilizando-se papel-filtro quantitativo lento, sendo a determinação dos elementos efetuada por espectrofotometria de absorção atômica.

Os teores totais destes mesmos elementos foram também determinados. Para tanto, foram utilizados 25 mL de uma solução concentrada de  $\text{HNO}_3$  e  $\text{HClO}_4$ , na proporção de 4:1 (volume), em erlemeyers de 125 mL e chapa quente, com aumento gradual da temperatura. Foram usados 2 g de TFSA, triturados em almofariz de ágata e tempo de contato prévio de 12 h. Após a secagem, foram adicionados 3 mL de ácido clorídrico ( $\text{HCl}$ ) concentrado, transferindo-se para balão de 25 mL com água destilada e filtragem, utilizando papel-filtro quantitativo lento. Os elementos foram determinados

por espectrofotometria de absorção atômica, sendo realizadas dez repetições.

### Análises estatísticas

Para execução dos procedimentos estatísticos, foi utilizado o programa Sistema de Análises Estatísticas e Genéticas (SAEG), desenvolvido na Universidade Federal de Viçosa. A análise de regressão foi efetuada, após análise de variância, de acordo com a técnica de polinômios ortogonais, na avaliação dos teores de Cd, Cu, Pb e Zn, solúveis, extraídos com  $\text{HNO}_3/\text{HClO}_4$  (4:1), de acordo com as concentrações de 0; 0,2; 0,4; 0,6 e 0,8 mol  $\text{L}^{-1}$  de  $\text{H}^+$ , nos diferentes solos e profundidades estudados. Na seleção da equação, consideraram-se o teste F para regressão, a significância dos coeficientes de regressão, testados pelo teste t, e os coeficientes de determinação  $R^2$  ajustado, adotando-se um nível de até 5 %.

A comparação de médias foi feita para os teores totais de Cd, Cu, Pb e Zn, extraídos com  $\text{HNO}_3/\text{HClO}_4$  (4:1), concentrados e determinados nos solos nas profundidades de 0-10 e 50-60 cm, entre os quatro pontos coletados do transecto situado entre as classes de solo 11 e 12. Procedeu-se à análise de variância (ANOVA) e utilizou-se o teste Student-Newman-Keuls (SNK) a 5 %.

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na área da toplotossequência, coletada no Triângulo Mineiro, houve possibilidade de interferência nos resultados obtidos por metais pesados oriundos de resíduos produzidos por veículos automotores, já que a coleta foi feita relativamente próxima ao leito de estrada. A maior concentração de metais pesados, provenientes da queima de resíduos de culturas e, até mesmo, inorgânicos (pneus, lixo etc.) pode ser outro fator a ser considerado. Ao

**Quadro 1. Identificação, propriedades químicas, físicas e morfológicas dos solos coletados, na profundidade de 50-60 cm**

Solo Nº Classe	pH (1:2,5)	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Al <sup>3+</sup>	H + Al	K <sup>+</sup> disp.	P disp.	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Ki	Kr	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> / Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Granulometria				Cor do solo	
														Areia grossa	Areia fina	Silte	Argila		
	Água	— cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> —				— mg dm <sup>-3</sup> —		— g kg <sup>-1</sup> —			— g kg <sup>-1</sup> —								
2	PVA	5,4	1,1	0,5	0,0	2,7	62	0,8	273	262	104	1,77	1,41	3,95	280	210	70	440	2,5YR 4/6
3	PVA	4,9	0,6	0,8	0,4	3,9	80	1,5	313	246	91	2,16	1,75	4,24	220	220	150	410	5YR 3/4
11	RL	5,3	1,2	0,7	0,9	9,6	37	0,8	237	202	224	1,99	1,17	1,41	40	40	320	600	2,5YR 3/4
12	LVd	5,3	1,2	0,2	0,0	7,8	13	0,2	123	234	258	0,89	0,52	1,42	140	120	290	450	10R 3/2
13	LVd	5,6	1,3	0,2	0,0	7,2	10	0,2	92	245	258	0,64	0,38	1,49	140	100	290	470	10R 3/2
22	LVdf	4,7	0,1	0,0	0,0	1,8	9	0,2	165	279	142	1,00	0,76	3,08	330	220	50	400	2,5YR 3/6
23	LVdf	4,9	0,4	0,1	0,0	2,7	11	0,2	202	283	136	1,21	0,93	3,27	320	160	50	470	2,5YR 4/6



avaliar os dados apresentados no quadro 2, verifica-se que, na profundidade de 50-60 cm, praticamente não houve variação, estatisticamente significativa, dos teores dos elementos estudados ao longo dos pontos de coleta do transecto. Porém, quando se avaliam estes mesmos elementos na profundidade de 0-10 cm, os teores de Cu e Zn mostraram-se significativamente maiores que os encontrados nos últimos pontos de coleta do transecto.

Quando se avaliam as diferenças relativas, máximas e mínimas, entre as duas profundidades estudadas em um mesmo ponto, verifica-se que, para todos os elementos estudados, estas variações encontram-se entre os valores dos coeficientes de variação calculados com base nas dez repetições utilizadas para este estudo. Como exemplo: as variações relativas de Cu e Zn, os mesmos com diferenças significativas ao longo do transecto, entre as profundidades 1 e 2 nos pontos 1 e 4, situaram-se entre 1 e 10 %, para um coeficiente de variação entre 5,90 e 15,14 %, ou seja, os dados obtidos encontram-se dentro da faixa de variação obtida para as condições deste estudo. Tal fato leva a crer que, mesmo no caso dos elementos citados, a maior concentração em superfície não compromete a discussão dos dados, pelo efeito que podem ter como alteradores dos teores naturais das diferentes classes de solo nos materiais de gnaiss, basalto e arenito + sedimentos do Terciário estudados.

Além destes resultados, deve ser considerada também a rotina adotada para a escolha dos locais de coleta do solo para o estudo em questão. Foram avaliados a distância de 50 m do leito da estrada, o sentido e a direção dos ventos na região e áreas predominantemente sem evidências de queima recente ou de cultivo. Todos estes procedimentos certamente amenizam os efeitos abordados e as discussões feitas a seguir.

O método de extração ácida a concentrações crescentes, utilizado no presente estudo, teve como referência o trabalho desenvolvido por Amaral Sobrinho et al. (1992), porém modificado ao se fazer o uso de concentrações crescentes com o uso de HNO<sub>3</sub> e HClO<sub>4</sub>. Nesta condição, há maior capacidade extrativa, comparativamente a outros tipos de extratores, como o EDTA e o HCl diluído (Angelone et al., 1993; Gatti et al., 1991). Objetivava-se não só avaliar a fração solúvel destes elementos, como também aquelas ligadas a outros constituintes do solo e que, de certa forma, seriam fornecedores potenciais para a fração prontamente absorvida pelas plantas, constituindo, assim, a reserva mineral destes elementos.

Este tipo de estudo potencializa as diferenças entre solos de áreas formadas a partir de materiais de origem do tipo estudado e os efeitos discutidos, certamente maximizando a transferência dos elementos estudados e os efeitos cumulativos. Ross (1994) considera a possibilidade de concentrações tóxicas de metais pesados no solo, tendo como fonte o material de origem, dando, como exemplo, áreas formadas a partir de rochas ultramáficas.

Procedendo desta forma, foi possível avaliar quantitativamente e com perspectivas de modelagem a contribuição dos diferentes constituintes do solo como fonte destes elementos ao sistema solo-planta, à semelhança do estudo realizado por Melo et al. (1995). Estes autores avaliaram qualitativamente a reserva mineral de alguns solos do Rio Grande do Sul quanto a macronutrientes como o K, Mg e Ca.

Avaliando os modelos ajustados para os teores de Cd de acordo com as concentrações de H<sup>+</sup> (Figura 1), observa-se que a abundância deste elemento na natureza deve ter sido o fator limitante para a falta de ajuste em alguns solos e mesmo os tipos de modelos ajustados, a magnitude dos

**Quadro 2. Médias dos teores de cádmio, cobre, chumbo e zinco extraídos com HNO<sub>3</sub>/HClO<sub>4</sub> (4:1), de amostras coletadas em transecto situado entre os locais de coleta dos solos 11 e 12, em quatro pontos nas profundidades de 0-10 (1) e 50-60 cm (2)**

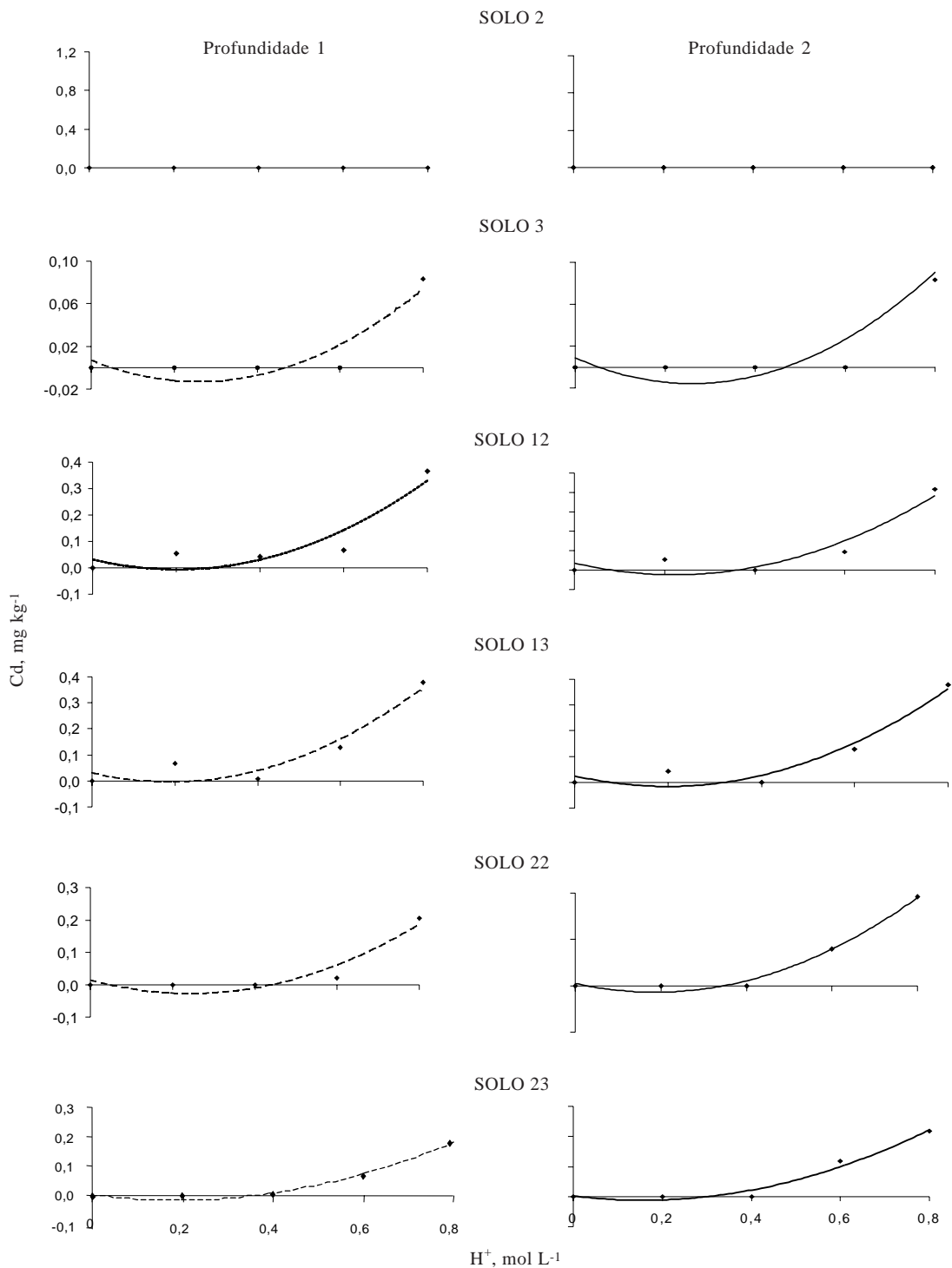
Profundidade	Ponto de coleta <sup>(1)</sup>	Cd	Cu	Pb	Zn
1	1	1,37 a (12,04) <sup>(2)</sup>	178,11 a (8,34)	16,89 a (7,24)	120,90 a (9,36)
	2	1,30 a (13,37)	144,37 b (11,69)	15,54 a (5,39)	106,94 b (9,35)
	3	1,34 a (12,94)	139,67 b (11,09)	16,97 a (8,58)	103,43 b (7,96)
	4	1,28 a (14,03)	152,85 b (15,64)	17,24 a (8,27)	95,84 b (14,14)
2	1	1,35 a (8,97)	168,05 a (6,04)	15,20 b (6,31)	110,13 a (7,48)
	2	1,34 a (8,23)	157,28 a (8,42)	15,01 b (5,27)	108,15 a (10,18)
	3	1,35 a (15,14)	164,77 a (7,03)	17,31 a (13,33)	101,74 a (7,08)
	4	1,18 a (13,49)	170,13 a (7,38)	16,58 ab (6,43)	106,75 a (5,90)

<sup>(1)</sup> Pontos de coleta situados a 35, 85, 135 e 185 m de distância do leito da estrada em transecto perpendicular.

<sup>(2)</sup> Coeficientes de variação das 10 repetições utilizadas, em %. Em cada profundidade, as médias seguidas de pelo menos uma mesma letra, na coluna, não diferem a 5 % pelo teste SNK.

coeficientes e os valores de  $R^2$ , para aqueles em que isso ocorreu. Contudo, os modelos ajustados indicam que, nas concentrações iniciais de até  $0,4 \text{ mol L}^{-1}$  de  $\text{H}^+$ , a condição ácida do meio não levou à solubilização expressiva deste elemento, mesmo no caso dos solos originários de basalto (11,12 e 13).

Tal comportamento torna evidente a baixa disponibilidade deste elemento nos solos estudados e respectivas origens, pois, além do comportamento inicial, verifica-se que as maiores concentrações obtidas estão ainda muito abaixo dos teores totais deste elemento (Quadro 3).



**Figura 1. Teores médios de cádmio considerando as concentrações 0,0; 0,2; 0,4; 0,6 e 0,8 mol L<sup>-1</sup> de HNO<sub>3</sub>/HClO<sub>4</sub> (4:1), em alguns solos da topolitossequência do Triângulo Mineiro, nas profundidades de 0-10 cm (1) e 50-60 cm (2)**

A afinidade do Cd por alguns constituintes do solo é discutida por Ross (1994), citando vários autores. Na sua revisão, o autor verificou que grande parte das referências utilizadas associa aos óxidos de Fe e Mn a afinidade de alguns elementos, colocando o Cd como de menor afinidade dentre os citados. Sendo assim, pode-se estabelecer que a disponibilidade deste elemento seja maior para os solos que tenham sua origem associada às rochas máficas (solos 12, 12 e 13), e restrita para os solos originados de gnaiss (2 e 3) e arenito + sedimentos do Terciário (22 e 23).

O modelo linear simples foi o que mais se ajustou nas avaliações feitas para os teores de Cu (Figura 2), predominando naqueles solos de maior conteúdo, como são os casos dos solos 11, 12 e 13. Deve-se destacar, inclusive, que estes solos apresentam alta disponibilidade, considerando os demais solos estudados, como pode ser visto pelos coeficientes da equação que retratam a proporção com que isso acontece. Mesmo a concentrações baixas de  $H^+$ , os teores de Cu já são relativamente altos em relação aos dos solos de origem gnáissica e arenítica-sedimentar. Este é um dos elementos de maior afinidade com os constituintes do solo, destacando-se a matéria orgânica e os óxidos de Fe e Al, de acordo com Ross (1994).

No caso do Pb, os teores apresentaram comportamento no qual predominou o modelo linear simples seguido do quadrático (Figura 3). Os solos originários de gnaiss (2 e 3), no entanto, destacaram-se quanto à maior disponibilidade frente a acidez crescente, inclusive quanto à profundidade, visto que

foram observados maiores teores em superfície. Contudo, não chega a haver uma nítida diferenciação deste grupo de solos em relação aos demais, como observado para Cd e Cu, uma vez que o intervalo de variação dos teores não é tão grande assim. Com relação à ocorrência, o Pb foge um pouco à regra até aqui observada, ou seja, teores mais elevados nos solos formados a partir de basalto, sendo associados ao gnaiss, os maiores teores de Pb. Tal fato é confirmado por Jing-Sheng et al. (1993), ao avaliar as tendências geográficas do Pb e outros elementos em solos desenvolvidos de granito, basalto e siltitos no leste da China.

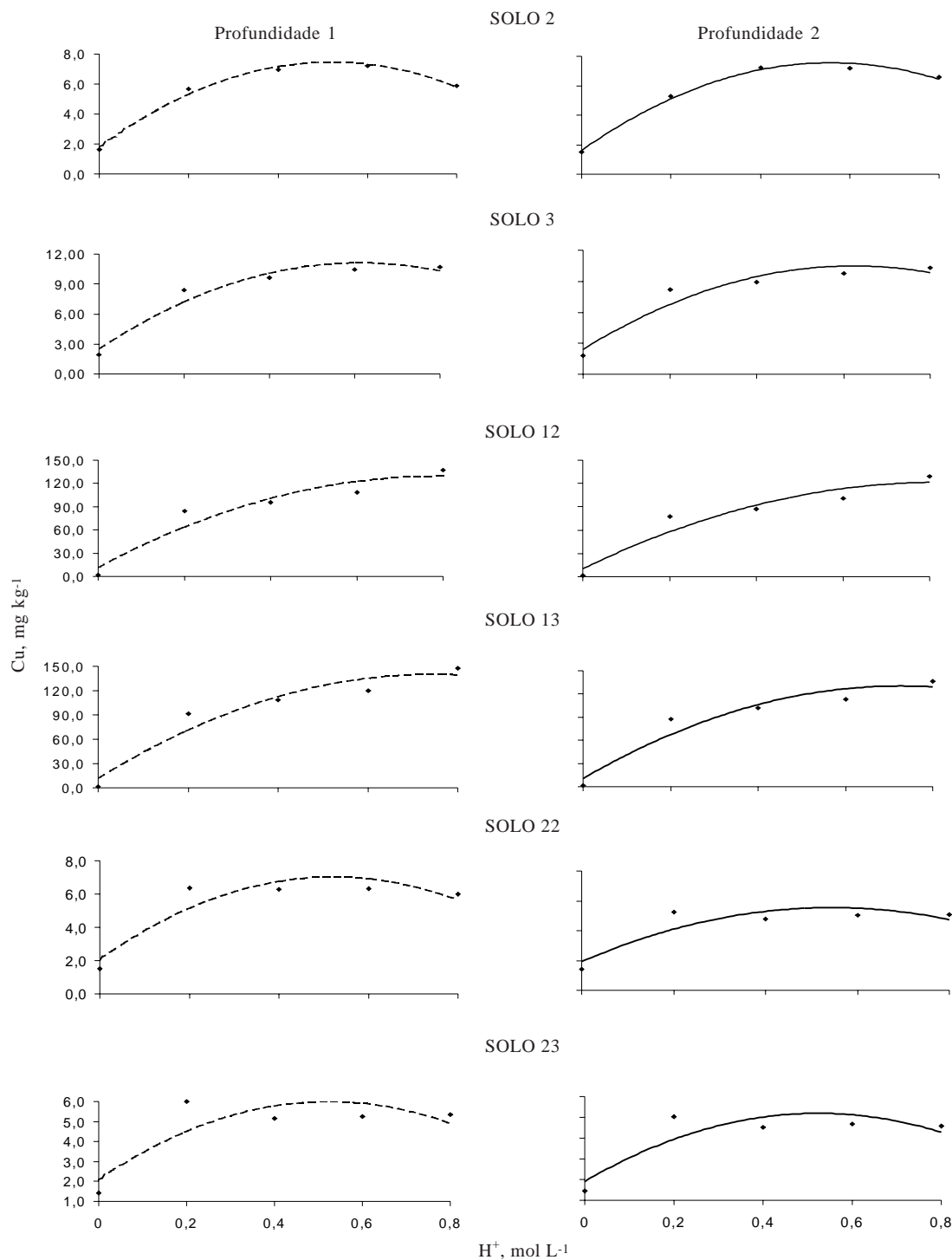
O modelo linear simples foi a tendência dos modelos ajustados para os teores de Zn em relação à acidez crescente em quase todos os solos e profundidades estudados (Figura 4), destacando-se os solos originários de basalto. Todavia, não se constata para este elemento um comportamento comum de alguns solos como o ocorrido para o Cd e Cu. Os teores de Zn nas primeiras concentrações de  $H^+$  são baixos ou quase nulos, aumentando linearmente em proporções diferenciadas para um e outro solo. Estes modelos e seus coeficientes acabam refletindo o potencial de disponibilização deste elemento ao ambiente. Alguns modelos quadráticos e cúbicos foram encontrados para aqueles solos formados a partir do arenito + sedimentos do Terciário (22 e 23), indicando, mais uma vez, a existência de um máximo a partir do qual adições de ácido não levam a teores crescentes de Zn, o que pode estar relacionado com a abundância ou mesmo a fração predominante no solo.

**Quadro 3. Teores médios totais de cádmio, cobre, chumbo e zinco, extraídos com  $HNO_3/HClO_4$  (4:1) da TFSA de solos coletados em uma toplotossequência do Triângulo Mineiro, nas profundidades de 0-10 cm (1) e 50-60 cm (2)**

Solo	Profundidade	Cd	Cu	Pb	Zn
		mg kg <sup>-1</sup>			
cm					
2	0-10	0,21	11,05	15,05	27,97
	50-60	0,48	21,32	23,23	41,76
3	0-10	0,31	15,21	19,86	39,35
	50-60	0,40	16,14	20,01	41,01
11	0-10	0,86	183,95	15,77	151,96
	50-60	0,60	186,95	12,10	139,42
12	0-10	0,49	250,35	13,76	123,91
	50-60	0,57	254,20	14,79	125,91
13	0-10	1,14	254,20	12,40	97,61
	50-60	1,13	287,26	13,88	107,35
22	0-10	0,53	17,76	9,47	13,57
	50-60	0,36	18,07	14,85	11,49
23	0-10	0,54	20,78	7,98	15,79
	50-60	0,52	18,36	14,32	13,45

No geral, portanto, observou-se o predomínio do modelo linear simples com coeficiente angular positivo, indicando aumento contínuo dos teores à medida que a concentração dos ácidos eleva-se. É de se esperar este comportamento para todos os elementos, pois, à

medida que aumenta a acidez do meio, maior deve ser o teor de elementos no extrato obtido, uma vez que o equilíbrio químico, nas condições deste estudo, favorece as formas solúveis, conforme comentado por Lindsay (1979), Alloway (1990) e Jeng (1992).



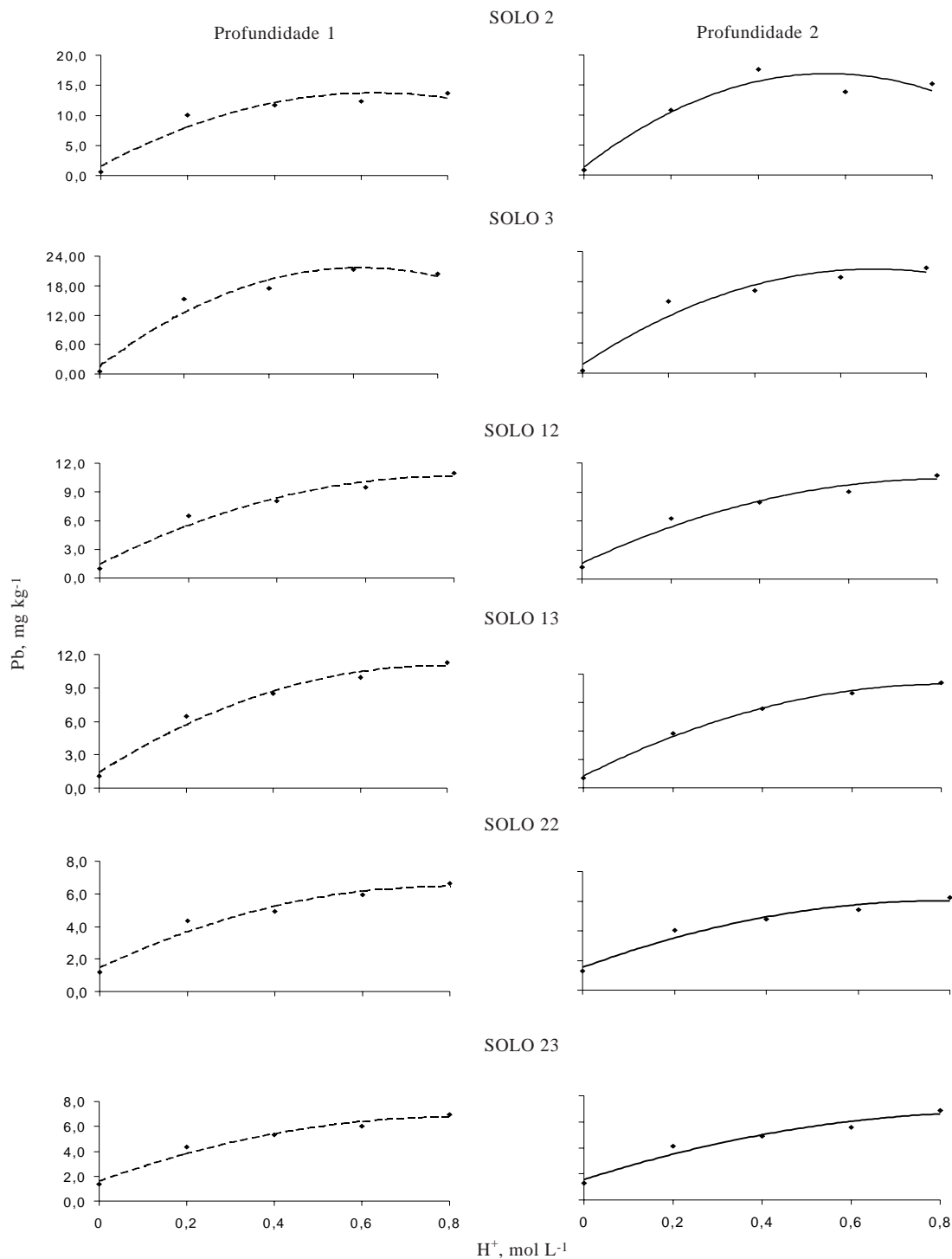
**Figura 2.** Teores médios de cobre considerando as concentrações 0,0; 0,2; 0,4; 0,6 e 0,8 mol L<sup>-1</sup> de HNO<sub>3</sub>/HClO<sub>4</sub> (4:1), em alguns solos da toplotossequência do Triângulo Mineiro, nas profundidades de 0-10 cm (1) e 50-60 cm (2).



Este comportamento é comum, principalmente para os elementos e materiais de origem com teores no solo naturalmente elevados, como Cu e Zn e os solos originários do basalto: 11, 12 e 13, respectivamente. Porém, para os demais elementos, Cd e Pb,

esta regra geral não se repete, o que deve estar relacionado com as características e propriedades dos diferentes solos e materiais de origem.

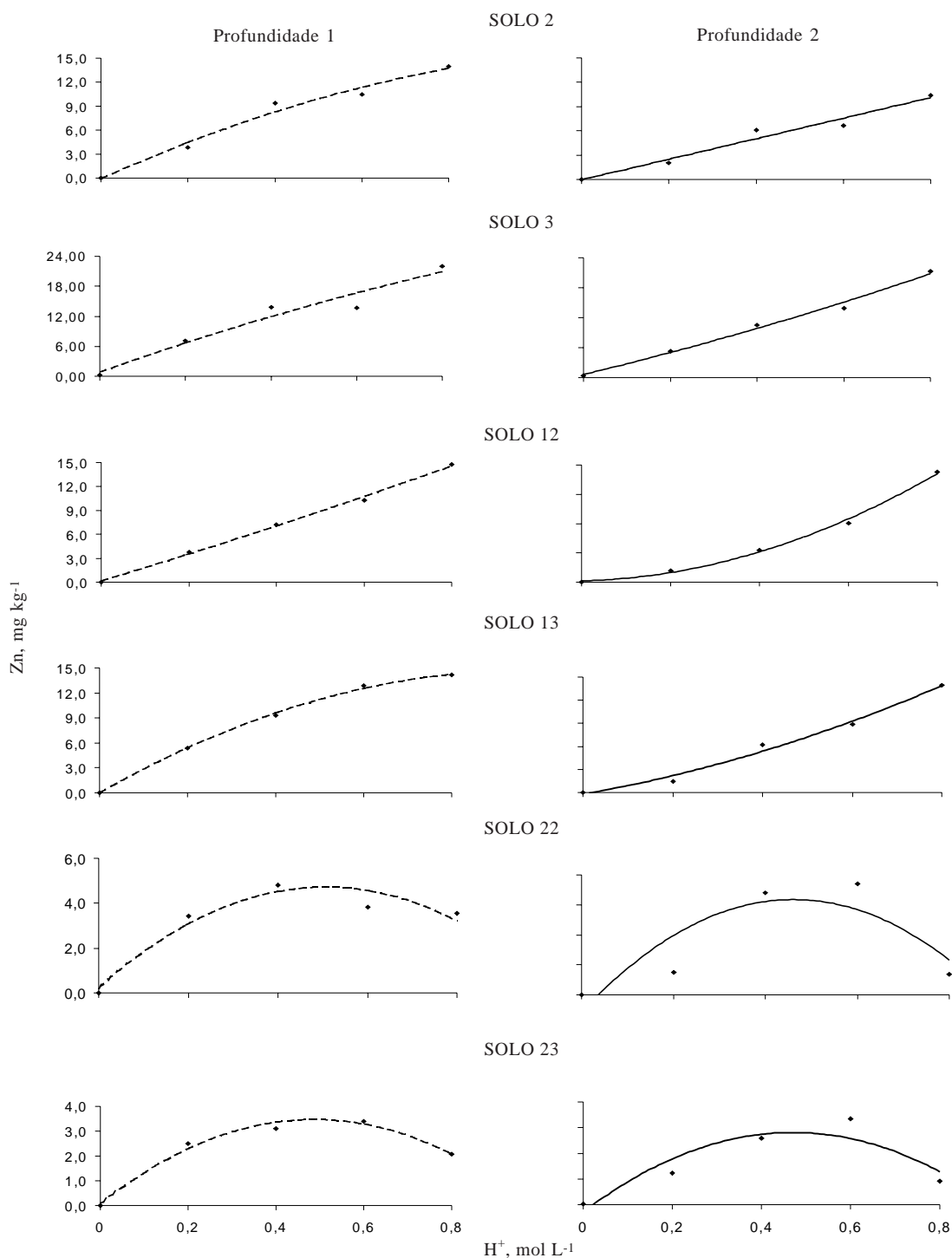
Os resultados obtidos refletem a observação de que os materiais de origem, como fonte de formação



**Figura 3.** Teores médios de chumbo, considerando as concentrações 0,0; 0,2; 0,4; 0,6 e 0,8 mol L<sup>-1</sup> de HNO<sub>3</sub>/HClO<sub>4</sub> (4:1), em alguns solos da topolitossequência do Triângulo Mineiro, nas profundidades de 0-10 cm (1) e 50-60 cm (2).

dos diferentes solos pelos processos pedogenéticos, podem imprimir características bastante diferenciadoras quanto aos metais pesados. Constatou-se, no geral, uma diferença evidente nos solos formados a partir do gnaiss, basalto e arenito + sedimentos do Terciário, destacando principalmente o basalto por

sua abundância e o arenito + sedimentos do Terciário pelo seu conteúdo relativamente baixo, com exceção do Pb. O gnaiss pode ser situado em posição intermediária. Mesmo entre solos de um mesmo material de origem, verificaram-se comportamentos distintos.



**Figura 4.** Teores médios de zinco considerando as concentrações 0,0; 0,2; 0,4; 0,6 e 0,8 mol L<sup>-1</sup> de HNO<sub>3</sub>/HClO<sub>4</sub> (4:1), em alguns solos da toplotossequência do Triângulo Mineiro, nas profundidades de 0-10 cm (1) e 50-60 cm (2).

Contudo, tal quadro pode ser ainda mais intensificado, pois os teores totais dos elementos estudados, especialmente o Cu e o Zn nos solos originários de basalto (11, 12 e 13), encontram-se acima das faixas ou valores mais comuns em solos agrícolas, conforme Alloway (1990). Os teores totais destes elementos estão aproximadamente nove e duas vezes maiores nos solos originários deste material, em torno de 20 a 30 mg kg<sup>-1</sup> e 50 mg kg<sup>-1</sup>, respectivamente (Quadro 2). Este mesmo quadro não se repete para os demais solos e materiais de origem, encontrando-se todos na faixa normal descrita por Alloway (1990) (Quadro 3).

Mudanças de pH do solo com o tempo em mais de duas unidades podem envolver maior ou menor solubilidade no solo de alguns dos elementos estudados e, conseqüentemente, maior absorção destes pelas plantas, conforme estudos de Riley & Barber (1971), Sakar & Wyn Jones (1982), Grinsted et al. (1982) e Römheld (1984), citado por Marschner (1991). É de se esperar, entre os elementos estudados, que os solos desenvolvidos de basalto apresentem, de modo geral, teores de Cu e Zn solubilizados maiores que gnaïsse e arenito + sedimentos do Terciário, na seqüência. Com relação ao Cd, certamente pela baixa abundância, não há indicações de grandes mudanças nos seus teores em todos os solos estudados. O Pb apresentou, no entanto, comportamento diferente do observado, uma vez que nos solos originários de gnaïsse, os teores deste elemento foram maiores que no basalto e arenito + sedimentos do Terciário, em concordância com os resultados de Jing-Sheng et al. (1993).

Os estudos de Riley & Barber (1971), Sakar & Wyn Jones (1982), Grinsted et al. (1982), os comentários de Marschner (1991) e os resultados obtidos levam a crer que as plantas desenvolvidas em solos originários de basalto, comparativamente às desenvolvidas de gnaïsse e arenito + sedimentos do Terciário, estão muito mais sujeitas a uma disponibilidade maior dos elementos e, conseqüentemente, a um "status" nutricional destes elementos muito mais elevado, principalmente aqueles de maior ocorrência, como Cu e Zn, relativamente.

## CONCLUSÕES

1. Os solos desenvolvidos de basalto apresentaram maior potencial de disponibilidade de Cu e Zn. Já os solos desenvolvidos de gnaïsse apresentaram maior potencial de associação ao Pb.

2. O Cd mostrou baixo potencial de disponibilidade nos solos estudados, certamente pela sua pequena abundância natural. Não se devem antecipar aumentos na disponibilidade natural de Cd, mesmo com abaixamento do pH.

## LITERATURA CITADA

- ALLOWAY, B.J. Heavy metals in soils. New York. John Wiley & Sons, 1990. 339p.
- AMARAL SOBRINHO, N.M.B.; COSTA, L.M.; OLIVEIRA, C. & VELLOSO, A.C. X. Metais pesados em alguns fertilizantes e corretivos. R. Bras. Ci. Solo, 16:271-276, 1992.
- ANGELONE, M.; VASELLI, O.; BINI, C. & CORADOSSI, N. Pedogeochemical evolution and trace elements availability to plants in ophiolitic soils. Sci. Total Envir., 129:291-309, 1993.
- BUSACCA, A.J. & SINGER, M.J. Pedogenesis of a chronosequence in the Sacramento Valley, California, USA, II. Elemental chemistry of silt fractions. Geoderma, 44:43-75, 1989.
- CURI, N. & FRANZMEIER, D.P. Effect of parent rocks on chemical and mineralogical properties of some Oxisols in Brazil. Soil Sci. Soc. Am. J., 51:153-158, 1987.
- EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. Manual de métodos de análise de solo. 2.ed. Rio de Janeiro, 1997. 212p.
- ESSER, K.B.; BOCKHEIM, J.G. & HELMKE, P.A. Trace element distribution in soils formed in the Indiana dunes, USA. Soil Sci., 152:340-350, 1991.
- FERREIRA, S.A.D.; SANTANA, D.P.; FABRIS, J.D.; CURI, C.; NUNES FILHO, E. & COEY, J.M.D. Relações entre magnetização, elementos traços e litologia de duas seqüências de solos do estado de Minas Gerais. R. Bras. Ci. Solo, 18:167-174, 1994.
- FONTES, M.P.F.; MATOS, A.T. & JORDÃO, C.P. Mobilidade de metais no perfil de um Latossolo Vermelho-Amarelo. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO, 24., Goiânia, 1993. Anais. Goiânia, Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 1993. v.3. p.297.
- GATTI, M.; ANGUISSOLA SCOTTI, I.; LUCCHI, M. & SILVA, S. Influence of soil properties on the distribution and availability of Zn, Cu, Mn and Fe. Agric. Med., 121:272-281, 1991.
- GRINSTED, M.J.; HEDLEY, M.J.; WHITE, R.E. & NYE, P.H. Plant-induced changes in the rhizosphere of rape (*Brassica napus* var. Emerald) seedlings. I. pH change and increase in P concentration in the soils solution. New Phytol., 19:19-29, 1982.
- JENG, A.S. & BERGSETH, H. Chemical and mineralogical properties of Norwegian alum shale soils, with special emphasis on heavy metal content and availability. Act. Agric. Scand., Sect. B, Soil Plant Sci., 42:88-93, 1992.
- JENG, A.S. Weathering of some Norwegian alum shales. II - Laboratory simulations to study the influence of aging, acidification and liming on heavy metal release. Acta Agric. Scand., Sect. B, Soil Plant Sci., 42:76-87, 1992.
- JING-SHENG, C.; BAO-SHAN, D.; MAO, P.; XUE-JUN, W.; SHUI-QUAN, Z. & QUN, HE. Geographical tendencies of trace element contents in soils derived from granite, basalt and limestone of Eastern China. Pedosphere, 3:45-55, 1993.

- LEMOS, R.C. & SANTOS, R.D. Manual de descrição e coleta de solo no campo. Rio de Janeiro, Embrapa Solos, 1996. 84p.
- LINDSAY, W.L. Chemical equilibria in soils. New York, John Wiley & Sons, 1979. 449p.
- MARSCHNER, H. Root-induced changes in the availability of micronutrients in the rhizosphere. In: WAISEL, Y.; ESHEL, A. & KAFKAFI, U., eds. Plant roots: the hidden half. New York, Marcel Dekker, 1991. p.503-528.
- MATOS, A.T.; FONTES, M.P.F. & JORDÃO, C.P. Mobility and retention of Cd, Zn, Cu and Pb in a Brazilian Oxisol profile. In: WORLD CONGRESS OF SOIL SCIENCE, 15., Acapulco, 1994. Anais. Acapulco, International of Soil Science Society, 1994. p.193.
- MELO, V.F.; COSTA, L.M.; BARROS, N.F.; FONTES, M.P.F. & NOVAIS, R.F. Reserva mineral e caracterização mineralógica de alguns solos do Rio Grande do Sul. R. Bras. Ci. Solo, 19:159-164, 1995.
- MITCHELL, R.L. Trace elements in soils. In: BEAR, F.E., ed. Chemistry of the soil. New York, Reinhold, 1964. p.320-368.
- MUNSELL COLOR. Munsell soil color charts. Baltimore, Macbeth Division of Kollmorgen Corporation, 1975. Não paginado.
- NALOVIC, L. Étude spectrographique des éléments traces et leur distribution dans quelques types de sols de Madagascar. Cah. ORSTOM, Sér. Pédol., II, 16-31:11-17, 1969.
- OLIVEIRA, T.S.; COSTA, L.M. & CRUZ, C.D. Importância relativa dos metais pesados do solo na identificação e separação de materiais de origem. R. Ceres, 45: 359-371, 1998.
- OLIVEIRA, T.S.; COSTA, L.M.; CRUZ, C.D. & HORN, H.A. Metais pesados como indicadores de materiais de origem em uma topolitoseqüência do Triângulo Mineiro, estado de Minas Gerais. Pesq. Agropec. Bras., 34:1451-1465, 1999.
- PETTRY, D.E. & SWITZER, R.E. Heavy metal concentration in selected soils and parent materials in Mississippi. M.S.U., 1993. 33p. (Bulletin, 998)
- PICCOLO, A. & CELANO, G. Distribution of heavy metals in profiles of a hydromorphic soil system. Fresenius Envir. Bull., 1:16-21, 1992.
- RESENDE, M.; ALLAN, J. & COEY, J.M.D. The magnetic soils of Brazil. Earth Planet. Sci. Lett., 78:322-326, 1986.
- RILEY, D. & BARBER, S.A. Effect of ammonium and nitrate fertilization on phosphorus uptake as related to root-induced pH changes at the root-soil interface. Soil Sci. Soc. Am. Proc., 35:301-306, 1971.
- ROSS, S.M. Retention, transformation and mobility of toxic metals in soils. In: ROSS, S.M., ed. Toxic metals in soil-plant systems. New York, John Wiley & Sons, 1994, p.63-151.
- SAKAR, A.N. & WYN JONES, R.G. Effect of rhizosphere pH on availability and uptake of Fe, Mn and Zn. Plant Soil, 66:361-372, 1982.
- SCHMITT, H.W. & STICHER, H. Heavy metal compounds in the soil. In: MERIAN, E., ed. Metals and their compounds in the environment. New York, VCH Verlagsgesellschaft mbH, 1991. p.311-331.
- TILLER, K.G. Micronutrients. In: Soils, an Australian viewpoint. London, Academic Press, 1980. p.365-388.
- TRANGMAR, B.B.; YOST, R.S. & UEHARA, G. Application of geostatistics to spatial studies of soil properties. Adv. Agron., 38:45-94, 1985.
- WOPEREIS, M.C.; ASCUEL-ODOUX, C.; BOURRIE, G. & SOIGNET, G. Spatial variability of heavy metals in soil on an one-hectare scale. Soil Sci., 146:113-118, 1988.
- XING, B. & DUDAS, M.J. Trace and rare earth element content of white clay soils of the Three River Plain, Heilongjiang Province, P.R. China. Geoderma, 58:181-199, 1993.
- ZABOWSKI, D. & ZASOSKI, R.J. Cadmium, copper and zinc. Adsorption by a forest soil in the presence of sludge leachate. Water, Air, Soil Poll., 36:103-130, 1987.
- ZANINI, E. & BONIFACIO, E. Variabilità spaziale di microelementi assimilabili nei suoli alluvionali della pianura a sud di Torino. Riv. Agron., 25:416-421, 1991.