



# Transporte de crômio trivalente influenciado pelo pH, horizonte do solo e fontes do crômio



Marco A. K. de Alcântara<sup>1</sup> & Otávio A. de Camargo<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Instituto Agronômico de Campinas, IAC/CSRA, Av. Barão de Itapura 1481. CP 28, CEP 13001-970. Campinas, SP. Fone: (19) 3231-5422, Fax (19) 3231-4943. E-mail: epska@uol.com.br (Foto)

<sup>2</sup> IAC/CSRA. E-mail: ocamargo@barao.iac.br

Protocolo 015 - 7/2/2001

**Resumo:** Neste trabalho estudou-se qualitativamente a eluição de Cr(III) em colunas, influenciada: (i) pelo pH, (ii) pelo horizonte e (iii) por fontes de crômio. Utilizaram-se amostras dos horizontes A e B de dois solos, com diferentes teores de matéria orgânica, do Estado de São Paulo: Latossolo Vermelho Eutroférico, textura argilosa (LVe) e Latossolo Vermelho Amarelo Distrófico, textura média (LVd) em que as amostras do horizonte superficial receberam adição de carbonato de cálcio. Realizaram-se experimentos de lixiviação em colunas, para obtenção das curvas de eluição de três fontes de crômio: a) em solução salina (Cr-SAL); b) complexado (Cr-EDTA) e c) associado a um resíduo de curtume (Cr-RESÍDUO). A eluição de crômio foi maior no LVd de textura média que no LVe argiloso; já a calagem teve pouca ou nenhuma influência na diminuição da eluição. No solo LVe, a movimentação de crômio foi maior no horizonte superficial em relação ao subsuperficial, possivelmente em decorrência da formação de compostos solúveis entre o crômio e o ácido fúlvico presente na matéria orgânica. A eluição foi influenciada pela fonte de crômio, cujos maiores valores foram observados com a aplicação de Cr-EDTA, e os menores com Cr-RESÍDUO.

**Palavras-chave:** lixiviação, metal pesado, complexação, matéria orgânica

## Movement of trivalent chromium as influenced by pH, soil horizon and sources of chromium

**Abstract:** In this work, the chromium (III) movement in soil columns was studied, considering the influence of (i) pH; (ii) soil horizon and (iii) source of Cr. Two soils samples of A and B horizons, differing in organic matter content from São Paulo State - Brazil, were utilized: a) Latossolo Vermelho Eutroférico (Typic Eutrorthox) and b) Latossolo Vermelho Distrófico (Typic Haplorthox). The surface horizons received calcium carbonate. Elution experiments in soil columns were carried out in order to obtain elution curves for different sources of chromium: a) in salt solution (Cr-SALT); b) chelated (Cr-EDTA) and c) associated to a tannery plant residue (Cr-Residue). Chromium elution was higher in the Haplorthox than in the Eutrorthox. Liming did not show influence upon the chromium movement. In the Eutrorthox, the elution was higher in the surface horizon than in the subsurface one, possibly due to the formation of soluble compounds between Cr and fulvic acids. Elution was affected by the chromium source, having the highest values observed in the Cr-EDTA application and the lowest in the Cr-Residue.

**Key words:** leaching, heavy metal, complexation, organic matter

## INTRODUÇÃO

A possível contaminação ambiental por metais pesados decorrente da utilização de resíduos gerados em atividades agroindustriais, tem sido escopo de diversos estudos. O crômio é um desses metais, que pode ser adicionado ao solo por ocasião da aplicação de resíduos de curtume. No Brasil, a utilização agrícola desses resíduos se dá, muitas vezes, sem nenhum

critério, tornando preocupante os riscos de contaminação ambiental.

O estudo desta contaminação deve ser abordado sob diversos aspectos, entre eles a adsorção e a movimentação do elemento no solo. Os estudos de adsorção de solutos em condições estáticas, em que pese fornecerem informações muito importantes quanto à partição do soluto na interface sólido-líquido, apresentam algumas limitações, como a não consideração da possibilidade de dessorção do elemento ao

solo, decorrentes das condições experimentais (Fuller & Warrick, 1986). Recentemente, as pesquisas têm-se voltado ao estudo dinâmico, utilizando colunas de lixiviação, permitindo avaliar-se tanto a adsorção como a dessorção (Selim et al., 1990).

Existem muitos trabalhos na literatura sobre a lixiviação de solutos no solo. Raij & Camargo (1974) estudaram a movimentação de nitrato aplicado como solução salina em solos com carga variável e avaliaram, também, a lixiviação dos íons  $\text{Ca}^{2+}$  e  $\text{SO}_4^{2-}$  nesses solos (Camargo & Raij, 1989). A movimentação de metais pesados tem sido objeto de estudo, como o Zn (Cunha et al., 1996), Zn, Cd, Pb e Cu (Matos et al., 1995), Cr(VI) (Amacher et al., 1988; Selim et al., 1990), Zn, Mn, Pb, Ni, Cd e Cu (Amaral Sobrinho et al., 1997) e Cd, Cr, Cu, Ni e Zn (Bertoncini & Mattiazio, 1999).

Esses pesquisadores têm detectado diferentes resultados, de acordo com o elemento analisado, características do solo (incluindo horizonte e pH) e do líquido utilizado na percolação (solução salina ou resíduo). A diversidade dos resultados, segundo Fuller & Warrick (1986) ocorre porque a predição do movimento de poluentes através do solo depende não só das características do solo (meio poroso) mas, também, do fluido contaminante (solvente) e do poluente propriamente dito (metais pesados, solventes, compostos orgânicos etc.); assim, por ocasião da aplicação de resíduo no solo, deveriam ser consideradas, também, suas características químicas. No caso específico das pesquisas com cromo, ele tem sido aplicado, preferencialmente, como solução salina de Cr(VI) (Selim et al., 1990) ou, então, como parte constituinte de algum resíduo orgânico (Aquino Neto & Camargo, 2000).

O objetivo principal deste trabalho foi estudar a eluviação de Cr(III) em colunas de solo, analisando-se o formato das curvas de eluição. Os objetivos específicos foram avaliar a influência de diferentes fatores na movimentação do cromo: (i) pH; (ii) horizonte e (iii) fontes de cromo.

## MATERIAL E MÉTODOS

Realizaram-se experimentos de lixiviação em colunas utilizando-se a teoria do deslocamento miscível, descrita detalhadamente por Kirkham & Powers (1972). Colunas de percolação de vidro com 4,5 cm de diâmetro interno e 40 cm de altura, foram preenchidas com solo até 10 cm, em camadas de 2,5 cm, com auxílio de um funil de haste longa, procurando-se evitar a segregação por tamanho de agregados. Em cada camada o solo foi compactado, de modo a atingir uma densidade uniforme, determinada previamente. Na base e no topo do solo foram colocados discos de manta geotêxtil, evitando o turbilhonamento e o selamento superficial.

No trabalho, utilizaram-se amostras dos horizontes A e B de dois solos de textura e mineralogia diferentes, classificados de acordo com a EMBRAPA (1999) como: a) Latossolo Vermelho Escuro Eutroférico, textura argilosa (*Typic Eutrorthox*), unidade Ribeirão Preto (LVe) e b) Latossolo Vermelho Amarelo Distrófico, textura média (*Typic Haplorthox*), unidade Laranja Azeda (LVd) cujos atributos se encontram na Tabela 1. A caracterização seguiu metodologia descrita por Camargo et al. (1986). O carbono orgânico total foi determinado

Tabela 1. Atributos químicos e físicos dos horizontes A e B de dois Latossolos do Estado de São Paulo

Atributos	Solo*			
	LVe H. A	LVe H. B	LVd H. A	LVd H. B
pH em KCl 1 mol L <sup>-1</sup> (original)	4,34	5,26	3,58	3,93
pH em KCl (após a calagem)	5,50	-	5,70	-
C orgânico (g kg <sup>-1</sup> )	15,5	3,8	8,3	2,9
Ácido Húmico (g kg <sup>-1</sup> )	3,0	0,5	2,9	0,3
Ácido Fúlvico (g kg <sup>-1</sup> )	3,2	1,4	1,9	1,2
Humina (g kg <sup>-1</sup> )	9,3	1,9	3,6	1,4
Ca (mmol <sub>C</sub> dm <sup>-3</sup> )	13	18	4	4
Mg (mmol <sub>C</sub> dm <sup>-3</sup> )	13	3	1	1
Al + H (mmol <sub>C</sub> dm <sup>-3</sup> )	61,3	27,4	46,4	22,3
T (mmol <sub>C</sub> dm <sup>-3</sup> )	88	39	52	28
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> em CDB (g kg <sup>-1</sup> )	153	166	40	47
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> em oxalato (g kg <sup>-1</sup> )	2,0	3,0	2,0	1,0
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> em H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> (g kg <sup>-1</sup> )	209	222	52	52
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> em CDB (g kg <sup>-1</sup> )	17	17	8	11
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> em oxalato (g kg <sup>-1</sup> )	4	4	2	2
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> em H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> (g kg <sup>-1</sup> )	186	214	71	86
Mn <sub>2</sub> O <sub>3</sub> em CDB (g kg <sup>-1</sup> )	1,2	0,9	0,4	0,3
Mn <sub>2</sub> O <sub>3</sub> em oxalato (g kg <sup>-1</sup> )	0,4	0,2	0,2	0,0
Mn facilim. reduzível (mg kg <sup>-1</sup> )	146	45	1,8	2,5
Argila (g kg <sup>-1</sup> )	560	580	120	150
Silte (g kg <sup>-1</sup> )	300	290	50	50
Areia (g kg <sup>-1</sup> )	140	130	830	800

\* LVe: Latossolo Vermelho Escuro Eutroférico; LVd: Latossolo Vermelho Amarelo Distrófico; H. - Horizonte

por oxidação via úmida, citada por Dabin (1976). No fracionamento do carbono orgânico utilizou-se o método de Schnitzer (1982). A alteração do pH das amostras do horizonte A de ambos os solos, foi feita com a adição de carbonato de cálcio para elevar a saturação por bases a 70%.

Foram aplicadas, nas colunas de solo, três fontes do elemento: a) cromo em solução de CrCl<sub>3</sub> (Cr-SAL); b) complexado com EDTA (Cr-EDTA) e c) presente em resíduo de curtime filtrado (Cr-RESÍDUO). A concentração de cromo utilizada em todas as fontes foi determinada em experimentos prévios, com aplicação de Cr-SAL no LVe para que pudesse ser detectada recuperação do metal no efluente coletado, correspondendo a 500 mg L<sup>-1</sup>. Como o resíduo de curtime coletado apresentava, originalmente, 50 mg L<sup>-1</sup> de cromo (Tabela 2), adicionaram-se 450 mg L<sup>-1</sup> desse metal na forma de CrCl<sub>3</sub>, de modo a se uniformizar as concentrações do cromo em todas as fontes aplicadas. Esperou-se um período mínimo de cinco dias antes da utilização do resíduo enriquecido com cromo, para possibilitar que as possíveis reações de complexação do sal com a matéria orgânica se processassem. As formas de Cr-SAL e Cr-EDTA foram preparadas em solução de Ca(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>-5 mmol L<sup>-1</sup>.

O sistema de lixiviação constou das seguintes etapas: 1) saturação vagarosa da coluna de solo a partir da base, utilizando-se solução deslocadora de Ca(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub> 5 mmol L<sup>-1</sup>; 2) aplicação da solução deslocadora a partir do topo da coluna, até a obtenção de um fluxo constante; 3) aplicação de um pulso de cloreto na forma de CaCl<sub>2</sub> 30 a 40 mmol L<sup>-1</sup>, seguido da aplicação de solução deslocadora; 4) aplicação de 200 mL do

Tabela 2. Caracterização do resíduo de curtume estudado<sup>1</sup>

Parâmetros	Valores
Índice pH	7,90
Resíduo seco a 100 –110 °C (g L <sup>-1</sup> )	9,40
Matéria orgânica total, combustão (g L <sup>-1</sup> )	2,89
Carbono total, orgânico e mineral (g L <sup>-1</sup> )	1,61
Resíduo mineral total (g L <sup>-1</sup> )	6,51
Nitrogênio total (g L <sup>-1</sup> )	0,61
Relação C/N, C total e N total	3/1
P total (g L <sup>-1</sup> )	0,004
K (g L <sup>-1</sup> )	0,025
Ca (g L <sup>-1</sup> )	0,36
Mg (g L <sup>-1</sup> )	0,08
Na (g L <sup>-1</sup> )	1,17
S (g L <sup>-1</sup> )	0,72
Cr (mg L <sup>-1</sup> )	47,2
Fe (mg L <sup>-1</sup> )	1,67
Al (mg L <sup>-1</sup> )	0,39
Mn (mg L <sup>-1</sup> )	0,77
Cu (mg L <sup>-1</sup> )	1,00
Zn (mg L <sup>-1</sup> )	1,00

<sup>1</sup> Coletado em fase intermediária do tratamento, antes da primeira lagoa de decantação, com exceção dos metais pesados e Na, as demais análises foram realizadas na ESALQ, USP - Piracicaba, SP

pulso contendo uma das formas de cromo, com uma concentração inicial  $C_0$  igual a 500 mg L<sup>-1</sup> (considerou-se  $t = 0$ , o início da colocação do pulso de cromo, coincidindo com o início da coleta da primeira amostra de cromo no efluente) e 5) aplicação da solução deslocadora, até completa eluição do cromo. O volume total coletado no efluente é igual à soma dos volumes  $V_i$  de cada amostra coletada nas etapas 4 e 5; esse volume total  $V$  considerado na eluição, corresponde também à soma do volume do pulso aplicado mais o volume de solução deslocadora, aplicado após o pulso. A quantificação das concentrações  $C$  de cromo, foi feita por espectrofotometria de emissão atômica por plasma induzido de argônio (ICP) nas amostras dos efluentes coletados durante as operações 4 e 5, permitindo a obtenção das curvas de eluição, as quais foram obtidas registrando-se graficamente as concentrações  $C/C_0$  em função do volume de poros  $p = V/V_0$ , onde  $V_0$  é o volume de poros total da coluna de solo. A etapa 3 possibilita obter-se o coeficiente de dispersão-difusão necessário à modelagem matemática da movimentação de solutos. Detalhes adicionais da condução desses experimentos são apresentados em Alcântara (1999).

Fez-se a análise dos dados observando-se o formato das curvas de eluição, quanto à altura, início da recuperação do elemento no efluente e inclinação.

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

As curvas de eluição evidenciando o efeito dos diferentes fatores estudados na eluição, são apresentadas na Figura 1. De acordo com Matos (1995) a altura da curva, ou seja, o valor máximo de  $C/C_0$  obtido, é uma medida direta da concentração máxima de cromo recuperada no efluente. O início da recuperação do elemento no efluente, isto é, a partir de quantos volumes de poro  $p = V/V_0$  a concentração relativa  $C/C_0$  começa a ser detectada, é uma medida da defasagem entre o avanço do solvente e o avanço do metal (solutu). As inclinações da curva nos lados esquerdo e direito relacionam-se às taxas de adsorção e desorção do elemento no solo, respectivamente.

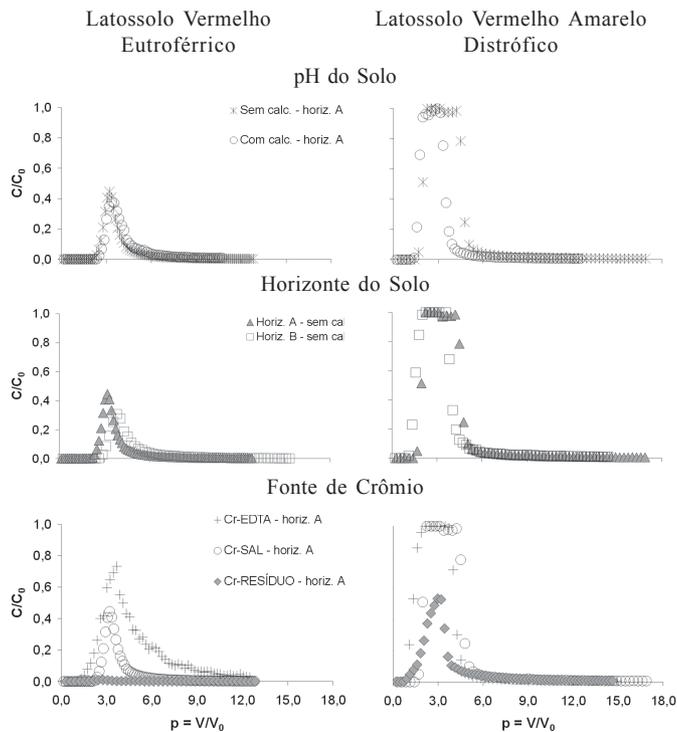


Figura 1. Influência do pH, do horizonte do solo e da fonte de cromo na eluição do metal em dois Latossolos do Estado de São Paulo

No solo LVd, o início da recuperação de cromo no efluente ocorreu antes que no solo LVe, indicando que o Cr(III) deverá atingir maior profundidade no solo LVd em comparação ao solo LVe, no mesmo período de tempo. Alcântara (1999) em estudos de adsorção em condições estáticas com esses dois solos, constatou que a adsorção do cromo foi maior no solo LVe em relação ao solo LVd, o que está de acordo com a menor movimentação detectada naquele solo. Resultados semelhantes foram encontrados por Cunha et al. (1994, 1996) em estudos de adsorção e de movimentação de Zn em solos iguais aos aqui utilizados.

Quanto ao efeito da calagem do solo na eluição do cromo, observa-se que os valores de  $C/C_0$  máximos, o início da recuperação de cromo no efluente e a inclinação da curva em ambos os lados, foram muito semelhantes entre os níveis de calcário, para os dois solos (Figura 1).

De acordo com Bartlett & James (1988) o pH do solo exerce importante papel na adsorção e, conseqüentemente, influiria na movimentação de cromo. Esses autores, trabalhando com adsorção e redução de cromo no solo, citam que o pH altera a quantidade de cargas positivas e negativas dos colóides do solo, especialmente da matéria orgânica e dos óxidos de Fe(III), Al(III) e Mn(III,IV). Outros autores (Camargo & Rajj, 1989) verificaram que a alteração na carga líquida do solo, provocada pela mudança do pH, modificou a movimentação de  $Ca^{2+}$  e de  $SO_4^{2-}$  em colunas de solo; sendo assim, a calagem seria um procedimento eficiente no controle da eluição, principalmente em solos com elevados teores de óxidos, suscetíveis a alterações de carga por modificações do pH. Alcântara (1999) em estudos prévios conduzidos em condições estáticas, também demonstrou maior adsorção do cromo em decorrência do

aumento do pH nesses solos; no entanto, o mesmo não ocorreu em condições dinâmicas de lixiviação. Barrow (1978) já havia alertado para o fato de estudos de adsorção em condições estáticas não refletirem o que acontece sob condições dinâmicas de lixiviação, podendo superestimar a retenção de metais pelo solo. Os mecanismos propostos na literatura para explicar a influência da calagem na adsorção surgiram, quase sempre, em experimentos de incubação e em condições de contato prolongado do líquido contaminante em agitação com o solo, onde o tempo necessário para que as reações cinéticas ocorram não constitui fator limitante. Em condições de avanço rápido de um solvente contendo altas concentrações do soluto, é possível que esse tempo de contato não seja suficiente para que as reações de adsorção ocorram, o que explicaria as pequenas diferenças obtidas nas colunas conduzidas.

Tais resultados reforçam a necessidade de se estudar a movimentação de metais no solo, em condições dinâmicas. A pouca ou nenhuma influência da calagem nas curvas de eluição do cromo sugere que esta prática agrícola, frequentemente utilizada, não seja eficiente para minimizar a movimentação desse metal.

As curvas de eluição agrupadas de maneira a evidenciar o efeito dos horizontes do solo na eluição do cromo, são apresentadas na Figura 1. Os horizontes A e B utilizados para os dois solos diferiram significativamente nos teores de matéria orgânica e de seus constituintes. No solo LVe, com teores bem maiores de ácidos fúlvicos no horizonte superficial em relação ao subsuperficial (Tabela 1), a  $C/C_0$  máxima recuperada no horizonte A foi maior que no horizonte B; além disso, no horizonte A a recuperação de cromo no efluente se iniciou antes que no B, indicando menor defasagem entre o avanço do solvente e o do soluto. No solo LVd, com menores teores de ácidos fúlvicos e com recuperação quase total de cromo nos dois horizontes, não pôde ser evidenciado este efeito.

Gao et al. (1997) verificaram que a adsorção de vários metais no solo estaria relacionada com a formação de complexos entre os metais e a matéria orgânica do solo, e King (1988) observou que metais associados a compostos orgânicos de baixo peso molecular, como o ácido fúlvico, formariam compostos de maior solubilidade em relação a uma solução salina do metal. Sposito et al. (1981) também estudando o efeito de complexantes na solubilidade de metais, concluíram que os ácidos fúlvicos de elevada acidez são substâncias orgânicas capazes de promover maior solubilização dos metais.

O favorecimento da movimentação pela presença de maiores quantidades de ácidos fúlvicos no horizonte A do solo LVe, pode ser importante, em termos práticos. Atualmente, tem-se dado ênfase a sistemas de cultivo que resultem na manutenção e/ou aumento dos teores de matéria orgânica do solo. Se, concomitantemente, aumentarem os teores de ácidos fúlvicos, o cromo poderá ter sua mobilidade aumentada, atingindo mais facilmente o horizonte subsuperficial, o que poderia representar maior risco de contaminação de aquíferos subterrâneos.

Quanto à eluição das diferentes fontes de cromo, os valores de  $C/C_0$  máximos e de início da recuperação de cromo mostram que a maior eluição de cromo ocorreu com a aplicação de Cr-EDTA. Quando o elemento foi aplicado na forma de Cr-RESÍDUO, observaram-se as menores eluições em ambos os

solos, ressaltando-se que, no caso do LVe, praticamente não houve recuperação no efluente. A aplicação do cromo sob a forma de Cr-SAL resultou em comportamento intermediário.

Bertoncini & Mattiazzi (1999) aplicando lodo de esgoto contendo metais pesados em diferentes solos, detectaram uma recuperação muito pequena de cromo no efluente e atribuíram, também, esta grande retenção à elevação do pH do solo, promovida com a aplicação do resíduo, o que não foi observado neste trabalho. Em relação às reações do cromo com o material orgânico particulado do resíduo, Masscheleyn et al. (1992) detectaram que a adsorção do Cr(III) nos sólidos em suspensão (do resíduo adicionado) também teria grande importância na solubilidade do metal. Aquino Neto & Camargo (2000) aplicando lodo de curtume em solos idênticos aos aqui utilizados, citam que o cromo presente em resíduo de curtume estaria predominantemente na forma Cr(III), associado a compostos de baixa solubilidade e ligado às proteínas do tecido cutâneo, em formas complexadas que se disponibilizariam muito lentamente e em pequenas quantidades, o que explicaria a pequena recuperação observada no efluente; no entanto, o presente estudo foi conduzido em um período de tempo curto, não sendo possível avaliar-se o comportamento, considerando-se um período de tempo prolongado. Com o decorrer do tempo, a mineralização desse material orgânico poderá liberar o cromo à solução, o qual, liberado, se não for adsorvido pelo solo, estará suscetível à lixiviação, podendo atingir aquíferos subterrâneos; desta forma, há que se considerar tais fatores em trabalhos posteriores.

A grande eluição do cromo, quando aplicado na forma de Cr-EDTA, demonstra que este complexante aumenta os riscos de contaminação de aquíferos subterrâneos, comportamento que está de acordo com a diminuição da adsorção do cromo observada nesses mesmos solos, em condições estáticas (Alcântara, 1999). No caso da aplicação de Cr-EDTA no solo LVe, de grande capacidade adsorviva, a lenta e prolongada desadsorção sugere que o EDTA poderia ser utilizado na descontaminação desse solo, desde que observados os riscos de contaminação de águas subterrâneas.

É freqüente encontrar-se na literatura, trabalhos como o de Cunha et al. (1996) utilizando complexantes como o EDTA, para simular as reações de complexação entre metais e matéria orgânica do resíduo, porém, os resultados mostraram que as curvas de eluição obtidas com a aplicação de Cr-EDTA e de Cr-RESÍDUO foram totalmente diferentes, razão por que merecem consideração, indicando claramente que estudos futuros através dos quais se busque analisar a movimentação de metais em resíduos, devem ser conduzidos, utilizando-se o resíduo em questão ou, ao menos, considerar-se outras características que poderiam estar influenciando, e não somente a complexação com a matéria orgânica do resíduo. Entre essas características do resíduo, citam-se o pH e a presença de outras substâncias e de materiais orgânicos particulados.

## CONCLUSÕES

1. No Latossolo Vermelho Escuro Eutroférico (Lve), de textura argilosa, a eluição do cromo foi menor que no Latossolo Vermelho Amarelo Distrófico (LVd), de textura média.
2. O aumento do pH provocado pela calagem do solo, teve pouca ou nenhuma influência na eluição do cromo.

3. A movimentação do cromo foi maior no horizonte superficial do LVe com maior teor de ácido fúlvico na matéria orgânica, em relação ao subsuperficial.

4. A eluição do cromo foi maior na forma de Cr-EDTA. A menor eluição foi com a aplicação de Cr-RESÍDUO. A aplicação de Cr-SAL apresentou comportamento intermediário.

## AGRADECIMENTOS

À Dra. Mônica Ferreira de Abreu e a Renata Presto, do Centro de Solos e Recursos Agroambientais do Instituto Agrônomo de Campinas - IAC/CSRA, pela colaboração em várias etapas deste trabalho, em especial nas determinações de cromo.

## LITERATURA CITADA

- Alcântara, M.A.K. Eluição de cromo (III) de resíduo de curtume em colunas de dois Latossolos com diferentes texturas. Campinas: Universidade Estadual de Campinas, 1999. 188p. Tese Doutorado
- Amacher, M.C.; Selim, H.M.; Iskandar, I.K. Kinetics of chromium(VI) and cadmium retention in soils: A nonlinear multireaction model. *Soil Science Society American Journal*, Madison, v.52, p.398-408, 1988.
- Amaral Sobrinho, N.M.B.; Velloso, A.C.X.; Oliveira, C. Solubilidade de metais pesados em solo tratado com resíduo siderúrgico. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Viçosa, v.21, p.9-16, 1997.
- Aquino Neto, V.; Camargo, O.A. Crescimento e acúmulo de cromo em alface cultivada em dois Latossolos tratados com  $\text{CrCl}_3$  e resíduos de curtume. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Viçosa, v.24, p.225-235, 2000.
- Barrow, N.J. The description of phosphorus adsorption curves. *Journal of Soil Science*, Reading, v. 29, p. 447-462, 1978.
- Bartlett, R.J.; James, B.R. Mobility and bioavailability of chromium in soils. In: Nriagu, J.A.; Nieboer, F. (ed.). *Chromium in the natural and human environments*. New York: John Wiley and Sons, 1988. p.267-304.
- Bertoncini, E.I.; Mattiazzi, M.E. Lixiviação de metais pesados em solos tratados com lodo de esgoto. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Viçosa, v.23, p.737-744, 1999.
- Camargo, O.A.; Raij, B. van. Movimento do gesso em amostras de Latossolos com diferentes propriedades eletroquímicas. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Campinas, v.13, p.275-280, 1989.
- Camargo, O.A.; Moniz, A.C.; Jorge, J.A.; Valadares, J.M.A.S. Métodos de análise química, mineralógica e física de solos do Instituto Agrônomo de Campinas. Campinas: Instituto Agrônomo de Campinas, 1986. 94p. Boletim Técnico, 106
- Cunha, R.C.A.; Camargo, O.A.; Kinjo, T. Aplicação de três isotermas na adsorção de zinco em Oxisolos, Alfissolos e Ultissolos. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Campinas, v.31, p.497-501, 1994.
- Cunha, R.C.A.; Camargo, O.A.; Kinjo, T. Eluição de duas fontes de zinco aplicadas em horizonte superficial de um podzólico e de um latossolo. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Campinas, v.20, p.371-378, 1996.
- Dabin, B. Curso sobre matéria orgânica do solo. Parte 1. Análise dos compostos húmicos do solo. Piracicaba: CENA, 1976. 115p. EMBRAPA - Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. Sistema brasileiro de classificação de solos. Brasília: EMBRAPA Produção de informações. Rio de Janeiro: EMBRAPA, Solos, 1999. 412p.
- Fuller, W.H.; Warrick, A.W. Soils in waste treatment and utilization. v.2. Boca Raton: CRC Press. 1986. p.77-141.
- Gao, S.A.; Walker, W.J.; Dahlgren, R.A.; BOLD, J. Simultaneous sorption of Cd, Cu, Ni, Zn, Pb, and Cr on soils treated with sewage sludge supernatant. *Water, Air and Soil Pollution*, Dordresch, v.93, p.331-345, 1997.
- King, L.D. Retention of metals by several soils of the Southeastern United States. *Journal of Environmental Quality*, Madison, v.17, p.239-246. 1988.
- Kirkham, D.; Powers, W.L. *Advanced soil physics*. New York: John Wiley and Sons. 1972. 488p.
- Masscheleyn, P.H.; Pardue, J.H.; Delaune, R.D.; Patrick, W.H. Chromium redox chemistry in a lower Mississippi Valley bottomland hardwood wetland. *Environment Science & Technology*, Washington, v.26, p.217-226, 1992.
- Matos, A.T. Fatores de retardamento e coeficientes de dispersão-difusão do zinco, cádmio, cobre e chumbo em solos do município de Viçosa-MG. Viçosa: Universidade Federal de Viçosa. 1995. 110p. Tese Doutorado
- Matos, A.T.; Costa, L.M.; Fontes, M.P.F.; Martinez, J.A.; Ferreira, P.A. Fatores de retardamento e coeficientes de dispersão-difusão dos metais zinco, cádmio, cobre e chumbo, em solos do município de Viçosa, MG. I. Curvas de eluição dos metais. In: Congresso Brasileiro de Ciência do Solo, 25, Viçosa, 1995. Anais... Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 1995. p.2333-2336.
- Raij, B. van; Camargo, O.A. Nitrate elution from soil columns of three Oxisols and one Alfisol. In: International Congress of Soil Science, 10, Moscow, 1974. Anais... Moscow: International Soil Science Society, 1974. p.384-391.
- Schnitzer, M. Organic matter characterization. In: Page, A.L. (ed.) *Methods of soil analysis*. Madison: American Society of Agronomy, IRC, parte 2, 1982. p.581-594. *Agronomy*, 9
- Selim, H.M.; Amacher, M.C.; Iskandar, I.K. Modeling the transport of heavy metals in soils. Hannover: U.S. Army Cold Regions Research and Engineering Laboratory, 1990. 155p. Monograph 90-2
- Sposito, G.; Holtzclaw, K.M.; Le Vesque-Madore, C.S. Trace metal complexation by fulvic acid extracted from sewage sludge. I: Determination of stability constants and linear correlation analysis. *Soil Science Society American Journal*, Madison, v.45, p.465-468, 1981.