

---

**LIXIVIAÇÃO DE Pb, Zn, Cd e Ni EM SOLO  
PODZÓLICO VERMELHO AMARELO TRATADO COM  
RESÍDUOS SIDERÚRGICOS**

---

**NELSON MOURA BRASIL DO A. SOBRINHO**

**Dr., Prof. Titular, DS - IA - UFRRJ**

**ARY CARLOS XAVIER VELLOSO**

**Dr., Prof. Titular, Lab. Solos - UENF**

**LIOVANDO MARCIANO DA COSTA**

**Dr., Prof. Titular, DS - UFV**

**RESUMO**

A companhia Siderúrgica Nacional (CSN) vem desenvolvendo estudos para disposição adequada dos seus resíduos no Aterro de Resíduos Sólidos Industriais (ARSI). Com objetivo de avaliar a movimentação de Pb, Zn, Ni e Cd provenientes das misturas de resíduos alcalinos e ácidos da CSN, amostras dessas misturas foram colocadas sobre as amostras de solo empacotadas, em colunas de vidro, na proporção 1:4 (resíduo:solo). Após a lixiviação com 50 volumes-poro, as colunas foram seccionadas em quatro partes iguais e os teores de Pb, Zn, Ni e Cd determinados em todas profundidades. O pH do resíduo alcalino resultou na diminuição da vazão nas colunas, na baixa solubilidade do Pb do resíduo e na retenção do Zn, Ni e Cd na camada superficial de 0-5cm. Entretanto, no resíduo ácido a mobilização desses metais foi muito superior à do resíduo alcalino, sendo, inclusive, detectados no efluente em concentrações superiores ao permitido pela FEEMA.

**Palavras-chaves:** metal pesado; resíduo siderúrgico; extração seqüencial; lixiviação; coluna de solo; mobilidade iônica, chumbo, zinco, níquel e cádmio.

**ABSTRACT**

**Pb, Zn, Cd AND Ni LEACHING IN RED-YELLOW  
PODZOLIC SOIL TREATED WITH IRON SMELTER  
RESIDUES**

Air dried subsurface samples of a heavy textured Red-Yellow Podzolic soil, representative of the industrial solid residue pilot landfill (ISRL) of the National Steel Works (Companhia Siderúrgica Nacional-CSN), were packed in 5.4 cm width and 37 cm high glass columns. An acid and alkaline iron smelter residue were placed on the top of the soil columns to make a 4:1 soil-residue ratio, in consonance with the basic CSN project. To evaluate, Ni, Zn, Cd and Pb mobilities the system soil-residue was leached with 50 pore volumes of deionized water at pH 4.5. After leaching the residue was removed from the tops and the soil columns

were sectioned into 4 equal parts. Pb dissolved from the acid residue was retained in the upper 0-5 cm soil columns. Zn, Ni and Cd showed the same distribution pattern, i.e., increased concentration with depth. In the effluents leaching out the columns with acid residue the levels of Zn and Ni were higher than the standard limits allowed by FEEMA.

**Key words:** heavy metal, steel work residue, landfill, leaching, metal mobility

## INTRODUÇÃO

A Companhia Siderúrgica Nacional (CSN) vem desenvolvendo projetos para a disposição adequada dos seus resíduos no Aterro de Resíduos Sólidos Industriais (ARSI). Nesses estudos têm sido obtidas informações básicas sobre as características físicas e químicas dos resíduos a serem dispostos no ARSI (AMARAL SOBRINHO, 1993), a interação desses resíduos com o solo típico do aterro (AMARAL SOBRINHO *et al.*, 1994 ; AMARAL SOBRINHO *et al.*, 1997), e os prováveis riscos de contaminação de solos e águas subterrâneas (AMARAL SOBRINHO *et al.*, 1998). A geração específica dos resíduos sólidos da Companhia Siderúrgica Nacional (CSN) é de 634 kg t<sup>-1</sup> de aço líquido (CANTINI & SOUZA, 1989). Da quantidade total gerada de 2.700.000 t ha<sup>-1</sup>, 4,9% deverão ser dispostos no aterro de resíduos sólidos industriais (ARSI) daquela siderúrgica.

A possível contaminação por metais pesados dos aquíferos próximos ao ARSI dependerá, dentre numerosos fatores, da concentração e solubilidade dos metais pesados nos resíduos, da quantidade de resíduo colocada no aterro, da precipitação pluviométrica local, e da capacidade de interação dessas espécies iônicas com a fase sólida do solo (inorgânica e/ou orgânica). Essa interação é bastante complexa, envolvendo reações de adsorção/dessorção, precipitação/dissolução, complexação e oxirredução (ARAÚJO, 1998).

O movimento dos metais pesados no solo tem sido objeto de numerosas pesquisas (WELCH & LUND, 1989 e AMARAL SOBRINHO *et al.*, 1998).

Métodos de extração seqüencial têm sido

utilizados em estudos de contaminação do solo com metais pesados (GOMES *et al.*, 1997; LÁ, 1998). Nesses estudos têm-se verificado que os elementos de maior mobilidade encontram-se, predominantemente, ligados nas formas químicas solúvel, trocável e carbonato, enquanto os de baixa mobilidade aparecem ligados às frações óxido-Fe,Mn, orgânica e residual (PETRUZZELLI *et al.*, 1986; SHEPPARD & THIBault, 1992; AMARAL SOBRINHO *et al.*, 1994; MAZUR, 1997 e OLIVEIRA, 1998).

Constitui o objetivo deste trabalho avaliar em colunas de amostras de terra a mobilidade de Pb, Cd, Ni e Zn provenientes dos resíduos siderúrgicos alcalino e ácido da CSN.

## MATERIAL E MÉTODOS

Para a simulação do aterro utilizaram-se colunas de vidro com 5,4 cm de diâmetro e 37cm de altura. Essas colunas foram empacotadas com amostras do horizonte B<sub>1</sub> do podzólico vermelho-amarelo (PV) típico do ARSI. O ensaio consistiu em três tratamentos (testemunha, resíduo alcalino e resíduo ácido) e 5 repetições, num total de 15 unidades experimentais (colunas).

Quatro resíduos alcalinos (gerados nos altos fornos) e três resíduos ácidos (produzidos na unidade de fundição), todos sólidos, produzidos na CSN, localizada no município de Volta Redonda (RJ), foram coletados nos locais de geração, retirando-se várias amostras simples do topo, meio e da base das pilhas de rejeitos para formar a amostra composta (ABNT, 1985). Em seguida, secaram-se as sete amostras

compostas ao ar, destorroando-as, quando necessário, com rolo de madeira, e passaram em peneira de plástico de 0,2 mm de abertura aproximadamente. Misturaram-se e homogeneizaram-se massas iguais dos três resíduos ácidos e neste trabalho, tal mistura de resíduos será chamada de resíduo ácido. Os quatro resíduos alcalinos também foram misturados e denominados de resíduo alcalino. Os valores de pH das misturas dos resíduos ácidos e alcalinos foram de 5,3 e 12,5, respectivamente.

Sobre cinco colunas empacotadas do PV colocaram-se as amostras do resíduo siderúrgico alcalino e em outras cinco o resíduo ácido da CSN, de maneira que a proporção altura da coluna de terra para a altura da pilha de resíduos fosse de 4:1, aproximadamente, conforme a concepção básica do projeto do ARSI da CSN (COBRAPI, 1986). As amostras do Bt do PV típico do ARSI apresentaram 650 g kg<sup>-1</sup> de argila, 160 g kg<sup>-1</sup> de silte, 190 g kg<sup>-1</sup> de areia, 6,6 g kg<sup>-1</sup> de carbono orgânico, 130 mmol<sub>c</sub> dm<sup>-3</sup> de CTC efetiva, pH 4,6 e os seguintes teores de metais pesados em mg kg<sup>-1</sup>: Zn-23; Cu-4,4; Ni-15,0; Cd-1,0; Pb-15; s. e Mn-67,5

Maiores detalhes poderão ser encontrados em AMARAL SOBRINHO (1993), AMARAL SOBRINHO *et al.* (1994) e AMARAL SOBRINHO *et al.* (1997).

**Acondicionamento das Colunas** – Sobre um disco de vidro perfurado, localizado na parte inferior das colunas colocou-se uma camada de lã de vidro. A seguir, por intermédio de um funil de cano longo, que era mantido em contínua movimentação, adicionaram-se, a cada coluna, 600 g das amostras de solo, quantidade calculada para produzir uma coluna de 20 cm de altura, aproximadamente. Para se obter um procedimento que pudesse ser repetido uniformemente, além de tornar a densidade da amostra mais regular, as colunas com aquela quantidade da amostra eram lançadas, através de um suporte, dez vezes (número previamente ajustado) de uma altura de 15 cm, e amortecidas em borracha maciça de 3 cm de altura.

**Determinação do volume-poro** - Depois do acondicionamento colocaram-se as colunas em caixas de isopor contendo água deionizada em quantidade necessária para o aparecimento de uma película de água no topo da coluna. Nesse ponto a coluna foi pesada e, por diferença, obtida a massa de água contida na amostra, que correspondeu ao volume-poro para 600 g de solo. Obteve-se o volume-poro de 175 ml, que constituiu a unidade para a percolação dos diversos volumes-poro através das colunas.

**Percolação** - Depois de saturadas as colunas foram colocadas em suportes para mantê-las na posição vertical. A seguir, exceção para a testemunha, por intermédio de um funil, que era mantido em contínua movimentação, colocaram-se em 5 colunas individuais, 150 g do resíduo ácido e em outras 5 colunas a mesma quantidade de resíduo alcalino, de forma que a camada sobre a coluna de terra fosse de 5 cm, aproximadamente. Após, iniciou-se o processo de lixiviação deixando-se verter, vagarosamente, água deionizada ajustada em pH 4,5 considerando uma chuva ácida. Durante a lixiviação manteve-se uma altura de coluna líquida de 6 cm acima da superfície do resíduo. As amostras nas colunas foram lixiviadas com 50 volumes-poro, quantidade correspondente a precipitação total na área do aterro num período de 4 anos, sendo o percolado coletado, a cada 175 ml (correspondente a um volume-poro), e guardado em frascos graduados.

Após cuidadosa remoção do resíduo as colunas de solo foram retiradas e seccionadas em quatro partes iguais (0-5; 5-10; 10-15 e 15-20 cm), secadas ao ar, destorroadas, pulverizadas em almofariz de ágata, homogeneizadas e guardadas em frascos de polietileno para a análise dos metais pesados.

**Extração seqüencial e análises químicas** – As amostras do PV e do resíduo (lixiviados e não-lixiviados) foram submetidas a extração seqüencial segundo método de TESSIER *et al.* (1979), que utiliza seqüencialmente, numa mesma amostra, os seguintes extratores: NaOAc 1 mol L<sup>-1</sup>, ajustado em pH 5 com HOAc, para metais solúveis, trocáveis e associados a carbonatos; NH<sub>2</sub>OH.HCl (cloridrato de

hidroxilamina), 0,04 mol L<sup>-1</sup> para metais pesados ligados a óxidos-Fe, Mn; H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> a 300 g L<sup>-1</sup> ajustado em pH 2 com HNO<sub>3</sub>, a 85 °C, para metais pesados complexados pela matéria orgânica. A fração residual foi determinada por digestão numa mistura de HClO<sub>4</sub> e HF na proporção de 1:5. Os extratos das amostras de terra, de resíduo e dos efluentes foram analisados para Pb, Zn, Ni, e Cd por espectroscopia de absorção atômica. O pH das amostras de terra e de resíduo foi obtido em água na relação 1:2,5

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

Observa-se na tabela 1 que após o processo de lixiviação as colunas de terra sem resíduo (testemunha) e com resíduo ácido apresentaram vazão de 2,4 ml min<sup>-1</sup> e aquelas com resíduo alcalino de 0,8 ml min<sup>-1</sup>. Na coluna com resíduo alcalino a redução de 67% se deveu, provavelmente, a: dispersão das partículas do solo pela elevação do pH do sistema. Antes da lixiviação o pH do resíduo alcalino era 12,5 passando para 8,5 depois de tal processo. A alcalinidade do resíduo elevou o pH da primeira camada de terra de 5,0 para 8,0 (tabela 1), resultando numa maior repulsão entre as partículas pelo aumento da densidade de carga negativa (SPOSITO, 1989) e, conseqüentemente, numa maior dispersão e posterior transporte das mesmas em suspensão, causando adensamento (JUCKSCH *et al.*, 1986).

A distribuição dos metais pesados nas colunas de terra sem resíduo (testemunha), depois da lixiviação com 50 volumes-poro de água em pH 4,5, mostrou que os teores totais desses elementos mantiveram-se constantes nas quatro camadas, apresentando as concentrações de 30 mg kg<sup>-1</sup> para Pb; 23 mg kg<sup>-1</sup> para Zn; 15 mg kg<sup>-1</sup> para Ni e 1,0 mg kg<sup>-1</sup> para Cd (tracejados nas figuras 1 a 5). Tais metais não foram detectados nos efluentes das colunas. Desses teores, aproximadamente 80% estava na forma residual e o restante na fração óxido-Fe,Mn, exceção para Pb (75% residual; 25% trocável) e Zn (65% residual; 20% óxido-Fe,Mn e 15%

trocável).

A diferença entre os teores de Pb, Ni, Cd e Zn totais e extraídos seqüencialmente dos resíduos alcalino e ácido, antes e depois do processo de lixiviação aparecem na tabela 2. Verifica-se no resíduo alcalino que para Pb e Ni não houve perda desses metais da pilha de resíduo para a coluna de terra. Para Zn e Cd ocorreram em relação aos teores totais no resíduo, perdas de 5 e 21%, respectivamente. Tais perdas aconteceram praticamente na fração NaOAc (tabela 2). Para o resíduo ácido, entretanto, verificou-se, em relação ao total, perdas de 58% para Ni, 52% para Zn, 56% para Cd e 7,5% para Pb. As maiores perdas também aconteceram na fração NaOAc.

Os resultados obtidos na tabela 2 indicam, pelo menos qualitativamente que, além da concentração total de metais pesados, o pH e a solubilidade dos resíduos siderúrgicos em NaOAc deverão ser considerados na avaliação dos riscos de contaminação de aquíferos.

A distribuição do Zn e Cd nas quatro camadas das colunas de terra contendo o resíduo alcalino encontram-se nas figuras 1a e 1b. Verifica-se que da quantidade total solubilizada (perda na tabela 2) 61% para Zn e 50% para Cd ficaram retidos na camada superficial. Nesta camada observa-se que a fração extraída com NaOAc (trocável) representou para os dois metais cerca de 50% do total analítico. Essa fração representa o somatório das formas mais lábeis (trocável e carbonato). O pH elevado (pH=8,0) na camada superficial de 0-5cm (tabela 1), após o processo de lixiviação, possivelmente, causou a formação de hidróxidos e/ou hidroxicarbonatos daqueles metais nos primeiros 5cm da coluna de terra.

O movimento das diferentes formas de Pb nas colunas de solo (extração seqüencial), contendo a pilha de resíduo ácido aparece nas Figuras 2. Diferentemente do resíduo alcalino, aconteceu translocação de Pb que se concentrou na camada superficial da amostra de solo. Tal incremento relativo à testemunha foi de 255 mg kg<sup>-1</sup> (Figura 2) e pode ter resultado do pH ácido e dos relativamente elevados teores desse metal no resíduo. Tal incremento correspondeu, aproximadamente, a 90% do mobilizado (perda)

do resíduo (tabela 2). Na camada superficial verifica-se que 76% do Pb total aparece associado à forma trocável, 16% ligado óxidos-Fe, Mn e 8% na forma residual. A relativamente elevada percentagem da fração trocável pode ser atribuída ao pequeno tempo de interação solução percolante x solo (aproximadamente uma semana), não permitindo que as formas ligadas a óxidos-Fe, Mn e/ ou, residual, mais estáveis, predominassem (AMARAL SOBRINHO *et al.*, 1997). A baixa mobilidade do Pb e a conseqüente acumulação nos horizontes superficiais tem sido verificada em diversos estudos (BIDDAPPA *et al.*, 1982; KHAN & FRANKLAND, 1983; DAVIS *et al.*, 1988 e SHEPPARD & SHEPPARD, 1991). KABATA PENDIAS & PENDIAS (1984) atribuíram tal situação à elevada capacidade de complexação do Pb pela matéria orgânica; CLEVINGER (1990) ao acúmulo na fração residual e SHEPPARD & THIBault (1992) à alta afinidade do Pb pelos óxidos-Fe, Mn (GOMES *et al.* 1997). A ausência de Pb na fração orgânica pode ser atribuída ao baixo teor de matéria orgânica no B<sub>1</sub> do PV estudado.

As figuras 3, 4 e 5 mostram o movimento das diferentes formas de Zn, Ni e Cd nas colunas de solo (extração seqüencial), contendo a pilha de resíduo ácido, os respectivos diagramas de barra mostrando a distribuição percentual relativa daquelas formas e concentração desses metais nos efluentes. Verifica-se, em todas as camadas, incrementos das concentrações totais (em relação à testemunha), que atingiram os valores máximos de 164 mg kg<sup>-1</sup> para Zn (2ª camada); 203 mg kg<sup>-1</sup> para Ni (última camada); 1 mg kg<sup>-1</sup> para Cd (3ª camada). Do total mobilizado da pilha do resíduo (tabela 2), observa-se na coluna retenção de 94% para Zn, 68% para Ni, e 97% para Cd.

Os percentuais da retenção observados nas colunas, e as relativamente elevadas concentrações desses metais no resíduo ácido, predizem elevadíssimos potenciais de contaminação de aquíferos.

De acordo com a norma técnica nº 202 da Fundação Estadual de Engenharia do Meio Ambiente (FEEMA, 1985), as concentrações

máximas permitidas para lançamento em corpos d'água são de 1 mg L<sup>-1</sup> para Zn e Ni e de 0,1 mg L<sup>-1</sup> para Cd. As figuras 3c, 4c e 5c mostram que as maiores concentrações dos metais pesados nos efluentes das colunas aconteceram no 3º volume-poro, decrescendo drasticamente após os seguintes. Para Zn (Figura 3c) e Cd (Figura 5c) os limites estabelecidos pela FEEMA foram levemente ultrapassados apenas no 3º volume-poro. No caso do Ni (figura 4c), entretanto, as concentrações dos efluentes foram elevadas, ultrapassando os limites estabelecidos pela FEEMA, verificando-se um pico máximo de 12 mg L<sup>-1</sup> no 3º volume-poro, decrescendo paulatinamente até o final do experimento, em que a concentração (2 mg L<sup>-1</sup>) era, ainda, superior ao limite permitido.

A distribuição percentual dos metais pesados nas diferentes formas químicas, nas quatro camadas, aparecem nas Figuras 3b, 4b e 5b. Para Zn e Ni, a fração trocável situou-se em torno de 50%, e para Cd acima de 70%, números que mais uma vez alertam para a elevada labilidade e, ou, biodisponibilidade de tais metais pesados. A reduzida percentagem desses metais na fração orgânica é justificada pelo baixo teor de carbono orgânico no Bt do PV estudado.

Elevadas percentagens de metais pesados associados à fração trocável foram observados, para Zn, Ni e Cd, em solos do Japão contaminados por resíduos de fundição (BIDDAPPA *et al.*, 1982); para Zn e Ni (OLIVEIRA, 1998) em ensaios de colunas de solo tratados com lodo de esgoto sólido.

## CONCLUSÕES

- 1- O pH, concentração total de metais e a solubilidade em NaOAc pH 5,0 de resíduos siderúrgicos são parâmetros importantes na avaliação dos riscos de contaminação provocados pela disposição final de resíduos siderúrgicos em aterros;
- 2- O pH elevado do resíduo siderúrgico alcalino resultou na diminuição da vazão das

Tabela 1: Valores da vazão e pH (média de cinco repetições) da camada de solo de 0-5 cm das colunas

Tratamento	Vazão (ml min <sup>-1</sup> )	PH (H <sub>2</sub> O)
Testemunha	2,40	5,0
Coluna com resíduo alcalino	0,80	8,0
Coluna com resíduo ácido	2,40	4,8

Tabela 2. Diferença entre os teores de Pb, Zn, Cd e Ni totais e extraídos sequencialmente, nos resíduos ácido e alcalino da CSN, antes e depois da lixiviação com 50 volumes-poro com água em pH 4,5 (média de 5 repetições)

Pesados	Condições	Solução Extratora				Total
		NaOAc	NH <sub>2</sub> OH HCL	H <sub>2</sub> O +HNO <sub>3</sub>	HF+HClO <sub>4</sub>	
mg kg <sup>-1</sup>						
Resíduo alcalino (pH=12,5)						
<b>Chumbo</b>	Resíduo <sup>(1)</sup>	55,00 (20) <sup>(4)</sup>	97,50 (35)	10,00 (4)	112,50 (39)	275,00
	Resíduo <sup>(2)</sup>	55,00 (20)	97,50 (35)	10,00 (4)	112,50 (39)	275,00
	Perda <sup>(3)</sup>	0,00 (0)	0,00 (0)	0,00 (0)	0,00 (0)	0,00
<b>Zinco</b>	Resíduo	326,25 (29)	375,00 (34)	169,16 (15)	247,09 (22)	1117,50
	Resíduo	285,62 (27)	358,13 (34)	169,16 (16)	247,09 (23)	1060,00
	Perda	40,63 (71)	16,87 (29)	0,00 (0)	0,00 (0)	57,50
<b>Cádmio</b>	Resíduo	2,50 (26)	0,00 (0)	0,75 (8)	6,25 (66)	9,50
	Resíduo	0,50 (2)	0,00 (0)	0,75 (3)	6,25 (95)	7,50
	Perda	2,00 (100)	0,00 (0)	0,00 (0)	0,00 (0)	2,00
<b>Níquel</b>	Resíduo	5,00 (14)	7,50 (21)	0,00 (0)	12,50 (65)	35,00
	Resíduo	5,00 (14)	7,50 (21)	0,00 (0)	12,50 (65)	35,00
	Perda	0,00 (0)	0,00 (0)	0,00 (0)	0,00 (0)	0,00
Resíduo ácido (pH=5,3)						
<b>Chumbo</b>	Resíduo	1425,00 (40)	675,00 (19)	121,25 (3)	1378,75 (38)	3600,00
	Resíduo	1155,00 (35)	675,00 (20)	121,25 (4)	1378,75 (41)	3330,00
	Perda	270,00 (100)	0,00 (0)	0,00 (0)	0,00 (0)	270,00
<b>Zinco</b>	Resíduo	196,87 (23)	124,37 (15)	31,25 (4)	487,51 (58)	840,00
	Resíduo	0,00 (0)	42,00 (10)	31,25 (8)	331,75 (82)	405,00
	Perda	196,87 (45)	32,37 (19)	0,00 (0)	155,76 (36)	435,00
<b>Cádmio</b>	Resíduo	2,50 (46)	0,75 (14)	0,25 (4)	2,00 (36)	5,50
	Resíduo	0,00 (0)	0,25 (10)	0,15 (6)	2,00 (84)	2,40
	Perda	2,50 (81)	0,50 (16)	0,10 (3)	0,00 (0)	3,10
<b>Níquel</b>	Resíduo	480,00 (30)	180,00 (11)	37,50 (2)	877,50 (57)	1575,00
	Resíduo	80,00 (12)	43,00 (6)	30,00 (4)	514,00 (78)	667,00
	Perda	400,00 (44)	137,00 (15)	7,50 (1)	363,50 (40)	908,00

<sup>(1)</sup> Teores dos metais no resíduo antes do processo de lixiviação; <sup>(2)</sup> Teores dos metais no resíduo depois do processo de lixiviação; <sup>(3)</sup> Perda do metal no processo de lixiviação; <sup>(4)</sup> Percentagem do metal na fração em relação ao total das frações do metal no resíduo.

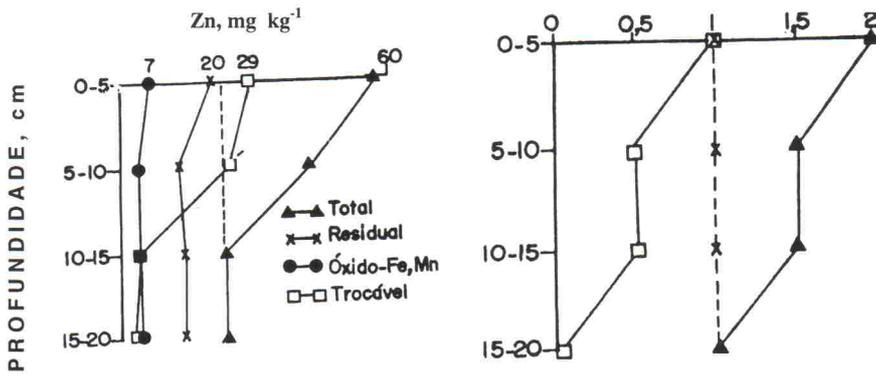


Figura 1. Movimento das diferentes formas de Zn(a) e Cd(b) nas colunas contendo a pilha de resíduo alcalino, após processo de lixiviação com 50 volumes-poro com água pH 4,5.

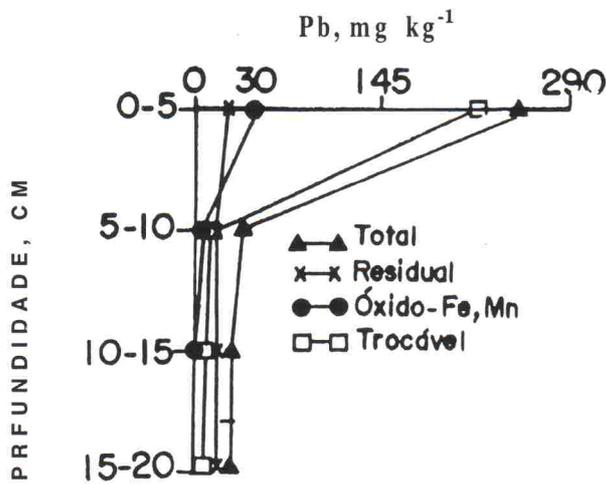


Figura 2. Movimento das diferentes formas químicas de Pb nas colunas contendo a pilha de resíduo ácido, após processo de lixiviação com 50 volumes-poro com água pH 4,5.

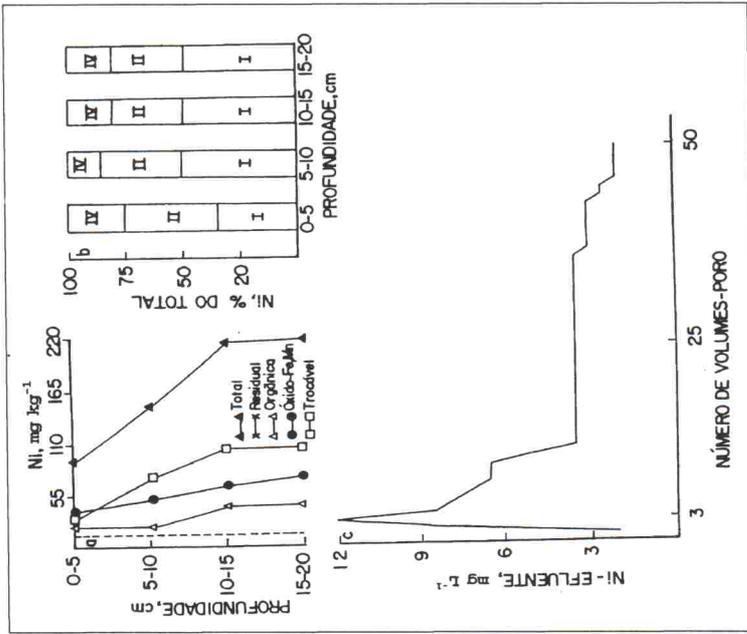


Figura 4. Movimento das diferentes formas químicas de Ni nas colunas contendo a pilha do resíduo ácido (a), os respectivos diagramas de barra mostrando a distribuição percentual relativa de Ni: Trocável (I), Óxido-Fe, Mn (II), Orgânica (III) e Residual (IV), após processo de lixiviação com 50 volumes-poro com água pH 4,5 (b) e os teores nos efluentes (c).

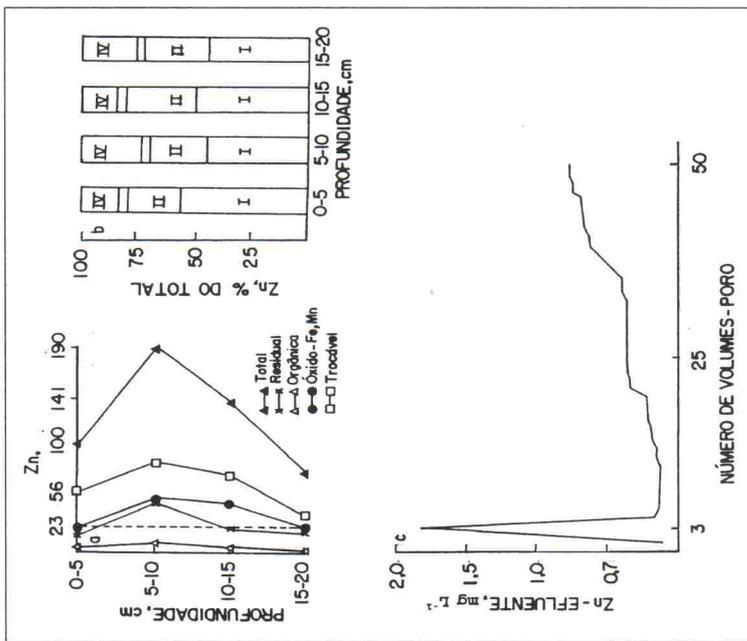


Figura 3. teores nos efluentes Movimento das diferentes formas químicas de Zn nas colunas contendo a pilha do resíduo ácido (a), os respectivos diagramas de barra mostrando a distribuição percentual relativa de Zn: Trocável (I), Óxido-Fe, Mn (II), Orgânica (III) e Residual (IV), após processo de lixiviação com 50 volumes-poro com água pH 4,5 (b) e os (c).

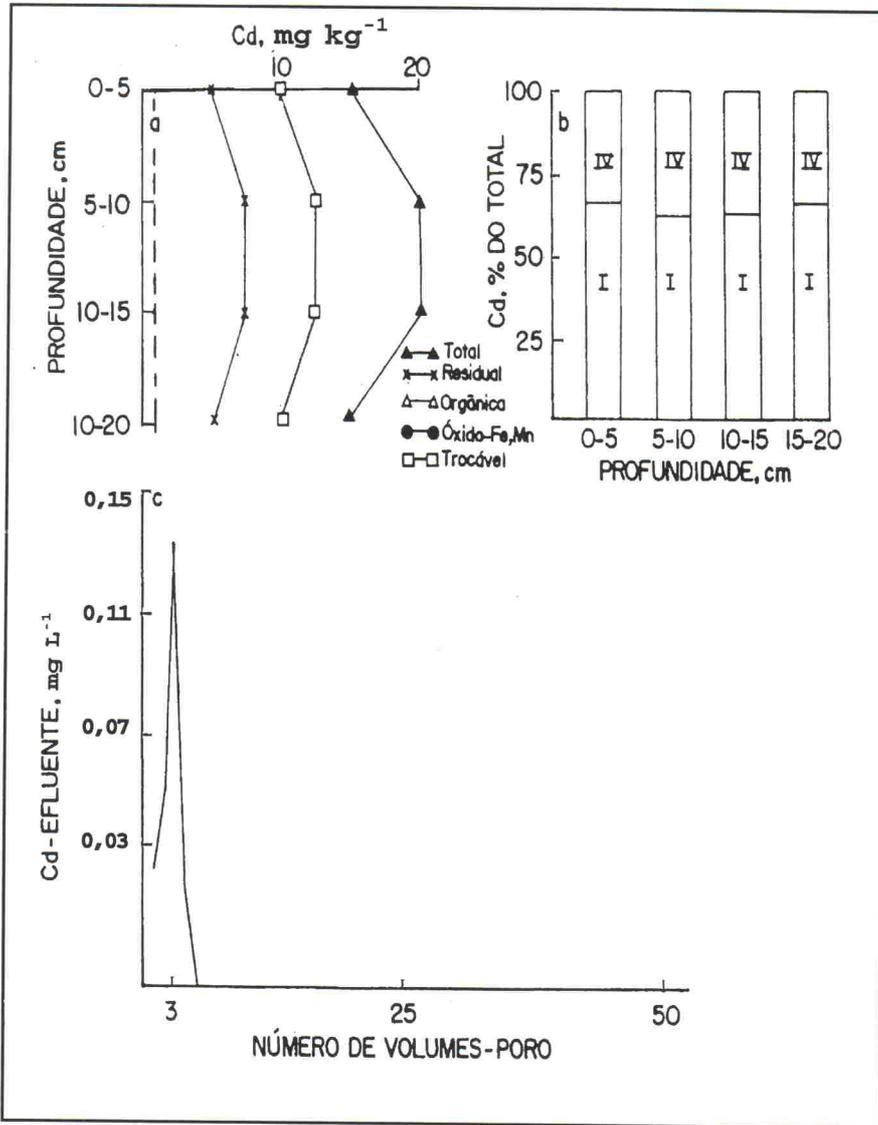


Figura 5. Movimento das diferentes formas químicas de Cd nas colunas contendo a pilha do resíduo ácido (a), os respectivos diagramas de barra mostrando a distribuição percentual relativa de Cd: Trocável (I), Óxido-Fe,Mn (II), Orgânica (III) e Residual (IV), após processo de lixiviação com 50 volumes-poro com água pH 4,5 (b) e os teores nos efluentes (c).

colunas e na menor mobilização do Zn, Ni e Cd que ficaram retidos na camada superficial de 0-5 cm, resultando em baixo risco de contaminação de aquíferos;

- 3- Entretanto, os percentuais de retenção observados nas colunas, e as relativamente elevadas concentrações desses metais no resíduo ácido, predizem elevadíssimos potenciais de contaminação de aquíferos.

## LITERATURA CITADA

- ALLOWAY, B. J. The origins of heavy metals in soils. *In: Heavy Metals in Soils*. New York, John Wiley, p.29-39, 1990.
- AMARAL SOBRINHO, N. M. B. Interação dos metais pesados de resíduos siderúrgicos com solo Podzólico Vermelho-Amarelo. Viçosa, Universidade Federal de Viçosa, p.163, 1993. (Tese de Doutorado)
- AMARAL SOBRINHO, N. M. B., VELLOSO, A. C. X., COSTA, L. M. & OLIVEIRA, C. Formas químicas de zinco e sua absorção por plantas de milho cultivadas em solo tratado com resíduo siderúrgico. *Rev. bras. Ci. Solo*, n.18, p.313-320, 1994.
- AMARAL SOBRINHO, N. M. B.; VELLOSO, A.C. X. & OLIVEIRA, C. Solubilidade de metais pesados em solo tratado com resíduo siderúrgico. *Rev. bras. Ci. Solo*, Campinas, v.21, n. p.9-16, 1997.
- AMARAL SOBRINHO, N. M. B., VELLOSO, A.C. X., COSTA, L. M., OLIVEIRA, C. Mobilidade de Metais Pesados em solo tratado com resíduo siderúrgico ácido. *Rev. bras. Ci. Solo*, Campinas, n. 22, p. 345-353, 1998.
- ARAÚJO, W. S. Relação entre adsorção de metais pesados e propriedades físicas, químicas e mineralógicas das principais classes de solo do Brasil. Seropédica, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, p.93,1998. (Tese de mestrado)
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). Amostragem de resíduos sólidos. São Paulo, Projeto 1.63.02-004, p. 25, 1985.
- BIDDAPPA, C. C., CHINO, M., KUMAZAWA, K. Migration of heavy metals in two japanese soils. *Plant Soil*, The Hague, n.66, p.299-316, 1982.
- CANTINI, V. L. & SOUZA, L. F. Aplicações e mercado de rejeitos siderúrgicos da Companhia Siderúrgica Nacional. In: SEMINÁRIO DE RECUPERAÇÃO DE REJEITOS DA INDÚSTRIA METALÚRGICA, 1., Volta Redonda, 1989. *Anais*. s.l. CORENE/ABM, 1989. p.131-144.
- CLEVENGER, T. E. Use of sequential extraction to evaluate the heavy metals in mining wastes. *Water, Air, and Soil Pollut.*, n.50, p.241-254, 1990.
- COMPANHIA BRASILEIRA DE PROJETOS INDUSTRIAIS (COBRAPI). Relatório básico do plano de proteção ambiental - aterro de resíduos sólidos industriais. s.l. Volta Redonda, 1986. 52p.
- DAVIS, R. D., CARLTON-SMITH, C. H.; STARK, J. H. & CAMPBELL, J. A. Distribution of metals in grassland soils following surface applications of sewage sludge. *Environ. Poll.*, Essex, n.49, p.99-115, 1988.
- FUNDAÇÃO ESTADUAL DE ENGENHARIA DO MEIO AMBIENTE (FEEMA). Padrões de lançamento em corpos receptores, NT 202. Rio de Janeiro, p. 20, 1985.
- GOMES, P. C., FONTES, M. P. F., COSTA, L. M., MENDONÇA, S. Extração fracionada de metais pesados em latossolo vermelho-amarelo. *Rev. bras. Ci. Solo*, Campinas, n.21, p.543-551, 1997.
- JUCKSCH, I., COSTA, L. M., MOURA FILHO, W., RIBEIRO, A. C., SOPRANO, E. Efeito da calagem na dispersão de argila em latossolo vermelho-escuro. *Revista Ceres*, n. 33, p. 456-460, 1986.

- KABATA-PENDIAS, A. & PENDIAS, H. Trace elements in soils and plants. Boca Raton, Florida, CRC Press, p.315, 1984.
- KHAN, D. H. & FRANKLAND, B. Effects of cadmium and lead on radish plants with particular reference to movement of metals through soil profile and plant. *Plant Soil*, The Hague, n.70, p.335-345, 1983.
- LÁ, O. R. Extratores Sequenciais de Metais Pesados no solo. Seropédica, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, p. 167,1998. (Tese de mestrado)
- MAZUR, N. Níquel, zinco, chumbo e cobre em solos que receberam composto de resíduo sólidos urbanos. Viçosa, Universidade Federal de Viçosa, p.129,1997. (Tese de Doutorado)
- OLIVEIRA, C. Avaliação do potencial de contaminação de dois solos agrícolas com lodo de esgoto enriquecido com Cd, Pb, e Zn. Seropédica, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, p.191, 1998. (Tese de Doutorado)
- SHEPPARD, S. C. & SHEPPARD, M. I. Lead in boreal soils. *Water, Air Soil Pollut.*, n. 58, p.79-91,1991
- SHEPPARD, M. I. & THIBAUT, D. H. Desorption and extraction of selected heavy metals from soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, Madison, n. 56, p.415-423, 1992.
- SPOSTO, G. The surface chemistry of soils. New York, Oxford University Press, p.277,1989.
- TESSIER, A.; CAMPBELL, P. G. C. & BISSON, M. Sequential extraction procedure for the speciation of particulate trace metals. *Anal. Chem.*, Washington, v.51, n. 7, p.844-851, 1979.
- WELCH, J. E. & LUND, L. J. Zinc movement in sewage-sludge treated soils as influenced by soil properties, irrigation water quality, and soil moisture level. *Soil Sci.*, Baltimore, v.147, n. 3, p.208-214, 1989.