

# ATENUAÇÃO DE METAIS PESADOS PROVENIENTES DA PERCOLAÇÃO DE LIXIVIADO EM COLUNAS PREENCHIDAS COM SOLO

Study of the attenuation of heavy metals from leachate  
percolation in columns filled with soil

Mariana Consiglio Kasemodel\*

Tânia Leme de Almeida\*\*

Valdir Schalch\*\*\*

**RESUMO** – O presente trabalho visou o estudo da atenuação de metais potencialmente tóxicos, presentes em lixiviado de chorume, em colunas preenchidas com solo. O solo e o lixiviado foram coletados no aterro sanitário de São Carlos-SP. Ambos foram caracterizados previamente. Os ensaios foram montados em colunas de acrílico, as colunas foram preenchidas com solo e o lixiviado de chorume foi percolado ascendentemente. O experimento foi realizado em quatro colunas, sendo que duas foram percoladas com o lixiviado de chorume sem alterações e nas outras duas o lixiviado foi acidificado e enriquecido com metais. A cada 0,2 VP (volume de poro) preenchido, retirou-se alíquotas que foram caracterizadas. O afluente também foi caracterizado a cada 15 dias de experimento. Observou-se que o solo foi capaz de reter metais potencialmente tóxicos, mesmo sendo caracterizado como arenoso. No entanto, a capacidade de atenuação do solo é limitada, observando-se um decréscimo na retenção de metais ao longo do experimento.

**ABSTRACT** – This study aimed at evaluating the soil capacity for retention of heavy metals. Soil and leachate samples were collected at the São Carlos-SP sanitary landfill. Experiments were carried out using acrylic columns which were filled with soil and percolated with leachate slurry in ascending motion to avoid the formation of preferential paths. The experiment was conducted in four columns, two of which were percolated with the unchanged leachate slurry and the other two with acidified leachate enriched with metals. At every 0.2 PV (pore volume) filled, aliquots were withdrawn for characterization. The affluent was also characterized every 15 days. Although the soil was characterized as silty sand, it functioned as a filter in the test columns. However, the attenuation capacity of the soil is limited, a decrease being observed in the attenuation capacity along the experiment.

**PALAVRAS CHAVE** – Atenuação, aterro sanitário, lixiviado.

## 1 – INTRODUÇÃO

O descarte de materiais não aproveitados pela comunidade nem sempre é realizado de maneira correta, podendo causar vários danos irreparáveis ao meio ambiente. O aterro sanitário foi o método encontrado para tentar solucionar a problemática da disposição de Resíduos Sólidos Urbanos (RSU).

---

\* Engenheira Ambiental, Bolsista do Programa de Doutorado em Geotecnia, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. E-mail: mariana.kasemodel@usp.br.

\*\* Professora Assistente, Faculdade de Tecnologia de Jahú. E-mail: tlalmeida@yahoo.com.br.

\*\*\* Professor Associado, Departamento de Hidráulica e Saneamento, Universidade de São Paulo. E-mail: vschalch@sc.usp.br.

Mesmo sendo a tecnologia menos agressora ao meio ambiente, o aterro sanitário ainda enfrenta vários problemas pelo seu elevado poder contaminante. O chorume ou percolato, resultado da degradação da matéria orgânica por microrganismos e da água proveniente de precipitações que infiltra no solo do aterro, é um líquido com alto valor de Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO) e Demanda Química de Oxigênio (DQO) e, portanto, de difícil tratamento (Schalch, 1984).

Os líquidos percolados dos resíduos possuem alto grau de contaminantes; quando esses líquidos atingem os mananciais superficiais ou subterrâneos, podem alterar significativamente a qualidade da água, tornando-a inviável para o consumo e impossível para a sobrevivência de organismos aquáticos.

A contaminação de solos e mananciais por lixiviado de chorume não é rara. O tratamento destas áreas contaminadas é complicado devido à dificuldade de manusear com um sistema dinâmico e o alto grau de contaminantes presentes. Tendo em vista estas questões, o presente estudo visa pesquisar a possibilidade de atenuação do percolato ao passar pelo solo, minimizando a carga de poluentes que pode chegar aos corpos hídricos, apontar possíveis razões para a retenção dos metais potencialmente tóxicos e avaliar a movimentação de contaminantes em solo através de ensaio de colunas.

## 2 – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Chorume ou sumeiro é o líquido produzido pela decomposição de substâncias contidas nos resíduos sólidos, formado pela digestão da matéria orgânica sólida por ação de exo-enzimas produzidas pelas bactérias (Schalch, 1984). A água da chuva, que cai sobre o aterro sanitário, percola pelo lixo e carrega o chorume e a matéria orgânica, dando origem ao percolato ou lixiviado. A NBR 8419 (ABNT, 1984a) define percolato como o líquido que passa através de um meio poroso causando sérios problemas ambientais. A produção é frequentemente observada dentro de poucos meses após o início da operação do aterro, quando a capacidade de campo do aterro é excedida e o resíduo fica saturado na água. A composição química dos líquidos percolados varia de acordo com a idade do aterro sanitário.

Os metais potencialmente tóxicos são elementos altamente prejudiciais aos seres vivos e têm recebido considerável atenção com respeito a acumulação no solo, assimilação pelas plantas e contaminação de águas subterrâneas. Alguns desses elementos são essenciais para várias funções fisiológicas nos seres vivos, como Fe, Cu, Zn e Mn, enquanto outros, como Cd, Pb e Hg, não têm funções biológicas conhecidas (Carneiro *et al.*, 2001). Quando em excesso no solo, esses elementos podem inibir o crescimento das plantas e causar alterações nas comunidades vegetais, como também exercer efeitos adversos sobre microrganismos do solo, interferindo nas funções do ecossistema, com consequências ao meio ambiente e a saúde pública (Carneiro *et al.*, 2001). As concentrações encontradas no solo são variáveis, porém normalmente baixas devido à formação de complexos altamente estáveis destes elementos com ácidos húmicos ou a formação de óxidos e hidróxidos, o que reduz sua solubilidade no solo (Jensen *et al.*, 1999).

O comportamento químico dos metais no solo é bastante complexo e influenciado por diferentes tipos de reação, tais como adsorção, complexação, precipitação, oxidação e redução, que definem a biodisponibilidade desses elementos para as plantas (PROSAB, 1995). A solubilidade e lixiviação definem a disponibilidade desses elementos nos solos e, conseqüentemente, o seu potencial de risco para a saúde humana e para o meio ambiente (PROSAB, 1995).

O conhecimento dos mecanismos de retenção destes materiais é de grande utilidade para projetos de contenção de contaminantes. A habilidade dos solos de reterem metais potencialmente tóxicos é diretamente proporcional à sua capacidade de tamponamento, ou seja, depende da resistência do solo a variações de pH, assim os mecanismos de retenção são diferentes para pH distintos (Abreu *et al.*, 2002).

De acordo com as condições ambientais (pH, Eh, temperatura) e a composição dos solos, os metais podem ser retidos sob a forma de óxidos, hidróxidos, carbonatos, cátions trocáveis e ou confinados à matéria orgânica. As características de retenção diferem entre os metais e entre os tipos de solo, pois a preferência de adsorção entre as espécies metálicas não é igual para os diferentes tipos de solo. É necessário entender os mecanismos de adsorção envolvidos na retenção de metais potencialmente tóxicos e o papel dos vários constituintes, tanto no solo quanto no chorume contaminante (Yong *et al.*, 1992).

Espera-se um comportamento competitivo entre os íons de metais potencialmente tóxicos por sítios de adsorção no solo, quando várias espécies estiverem associadas em um mesmo resíduo contaminado (Lopes, 2009). Durante a especiação de metais potencialmente tóxicos ocorre a formação de complexos com ligantes na fase aquosa, resultando numa competição com os sólidos do solo pela adsorção destes solutos. A presença de vários ligantes no resíduo de lixiviação interfere na adsorção de metais potencialmente tóxicos pelo solo devido à formação de complexos solúveis; este comportamento dificulta a previsão do transporte de contaminantes (Yong *et al.*, 1992).

À medida que ocorre o transporte de contaminantes no solo, diversos fatores relacionados ao fluido percolante, ao próprio solo e às condições ambientes, influenciam o processo de migração e retenção. Dentre estes fatores pode se destacar o tipo de solo, a mineralogia, a capacidade de troca catiônica, as espécies de cátions adsorvidos, a velocidade de percolação, o teor de matéria orgânica, a concentração do contaminante, a presença de outras substâncias na solução percolante, as condições hidrogeológicas e a temperatura e pH do meio (Costa, 2002). Variações de temperatura, além de influírem na velocidade, podem ter grande influência no transporte, promovendo alteração da permeabilidade, da velocidade dos processos de transferência e da solubilidade de substâncias, além de propiciar a ocorrência de reações que não se processam à temperatura ambiente (Costa, 2002).

### 3 – PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

As coletas de solo e de lixiviado foram realizadas no aterro sanitário de São Carlos, São Paulo. As amostras coletadas foram caracterizadas com o intuito de verificar a concentração de metais potencialmente tóxicos presentes em cada, que será de suma importância para analisar o balanço de massas nas colunas de solo, além de verificar parâmetros que influenciam a retenção de metais no solo, como a capacidade de troca catiônica, o pH, a granulometria do solo e a concentração de matéria orgânica.

O lixiviado foi armazenado em refrigerador e permaneceu sob aproximadamente 15°C até o final do experimento. Uma amostra do lixiviado foi analisada assim que foi realizada a coleta, para fazer sua caracterização. Este procedimento foi repetido quinzenalmente para monitorar as características do material percolante. O solo utilizado para preencher as colunas no teste de percolação foi coletado a partir do material inconsolidado de formação Botucatu do aterro sanitário de São Carlos; a cobertura superficial foi desprezada, para evitar que fossem coletados restos de resíduos sólidos urbanos e vegetação.

Em laboratório, parte do lixiviado coletado foi acidificado com 1,5 mL L<sup>-1</sup> de HNO<sub>3</sub> para que o pH fosse reduzido, evitando a precipitação de metais potencialmente tóxicos no início da percolação do lixiviado no solo e promovendo o aumento da mobilidade destes na coluna de solo (Thornton *et al.*, 2000). No mesmo momento da acidificação, foram adicionadas soluções enriquecidas de crômio, chumbo, cobre, manganês, cádmio (10mg L<sup>-1</sup>) e zinco (20 mg L<sup>-1</sup>) para que ocorresse um melhor acompanhamento destes no solo durante o estudo de percolação (Thornton *et al.*, 2000; Yong *et al.*, 2001). Outra parte da amostra foi mantida com suas condições iniciais, sem acidificação e sem adição de metais.

O experimento foi montado em quatro colunas de acrílico preenchidas com o solo coletado no aterro sanitário de São Carlos. Duas colunas, denominadas C e O foram percoladas com o lixiviado

enriquecido e acidificado, e duas colunas, denominadas S e E foram percoladas com o lixiviado *in natura*. As colunas utilizadas no experimento podem ser observadas na Figura 1.



**Fig. 1** – Colunas de percolação preenchidas com solo de aterro sanitário.

As colunas foram divididas em duas partes:

- Uma inferior, de maior dimensão (9 cm de diâmetro e 100 cm de altura) onde o solo ficou armazenado e foi percolado com o lixiviado de chorume;
- E uma superior, de menor dimensão (9 cm de diâmetro e 24 cm de altura), onde ficou armazenado o lixiviado percolado para sua coleta na parte inferior.

As partes da coluna foram conectadas por registros de aço inox e acrílico, acopladas com mangueiras de silicone fechadas com pinças, para a coleta do efluente (Almeida, 2005). Durante a montagem das colunas, foi colocada uma tela fina abaixo de cada coluna, para assegurar um fluxo unidimensional e prevenir o entupimento da saída (Tuxen *et al.*, 2000).

O solo coletado foi desagregado e exposto em lonas para secagem ao ar. Após a secagem, o solo foi quarteado para finalmente preencher as colunas.

Antes do início da percolação com o lixiviado, foi bombeada água pura no solo das colunas até que atingisse 1 volume de poros (VP) percolado, procedimento este que permite o estabelecimento de condições de equilíbrio entre a água e o material sólido e também para procurar prevenir interferências de reações geoquímicas sem relevância para o estudo (Tuxen *et al.*, 2000).

O lixiviado coletado no aterro e acondicionado em refrigerador foi amostrado, antes e após a acidificação e enriquecimento dos metais. Após realizada a coleta e o preparo do lixiviado, este foi percolado com auxílio de bombas peristálticas, as quais estavam conectadas aos galões de lixiviado e às colunas de solo através de mangueiras de silicone. A percolação foi realizada de modo ascendente, para evitar a formação de caminhos preferenciais. As bombas peristálticas foram calibradas para que fosse permitido um fluxo de 201 mL do material percolante por dia em cada coluna, de tal forma que foram coletadas duas amostras efluentes por semana a cada 0,2 volume do poro.

As amostras efluentes retiradas foram preservadas com ácido nítrico concentrado ( $\text{HNO}_3$ ), cerca de  $1 \text{ mol L}^{-1}$ , para determinação de metais. O efluente oriundo da percolação foi analisado para saber de processos de atenuação, ou seja, se o solo está retendo metais potencialmente tóxicos. Foram feitas análises de metais em solução (Zn, Pb, Cd, Ni, Fe, Mn, Cu, Cr, Na, K) através de espectrofotômetro de emissão atômica. Os parâmetros avaliados, assim como os métodos utilizados, estão dispostos no Quadro 1.

**Quadro 1** – Parâmetros avaliados e metodologia utilizada.

Parâmetro	Método
Massa específica dos sólidos ( $\rho_s$ )	ABNT - NBR 6508 (1984b)
Umidade	ABNT - NBR 7181 (1984c)
Granulometria	ABNT - NBR 7181 (1984c)
Massa específica do solo ( $\rho$ )	Nogueira (1995)
Massa específica seca ( $\rho_d$ )	Nogueira (1995)
Capacidade de troca catiônica (CTC)	Péjon (1992) e Gillman e Uehara (1979)
Superfície específica (SE)	Péjon (1992)
pH do solo	Camargo <i>et al.</i> (1996)
Condutividade elétrica	Camargo <i>et al.</i> (1996)
Matéria orgânica	Walkley e Black (1934)
Metais potencialmente tóxicos	EPA 3052 (1996)

## 4 – RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1 – Caracterização física do solo

O solo coletado apresentou densidade das partículas relativamente elevada. A análise granulométrica revelou a presença de 74,6% de areia. A textura do solo define a capacidade deste se deixar atravessar pelos efluentes e exerce influência sobre a capacidade de carga do solo, além de possuir influência direta na taxa de infiltração de água, na aeração, na capacidade de retenção de água, na nutrição, como também na aderência ou força de coesão nas partículas do solo. Ela interfere de maneira direta no comportamento dos contaminantes no solo, determinando a capacidade do solo em retê-los (Almeida, 2009). No Quadro 2 estão apresentados os valores médios obtidos a partir da classificação física do solo.

**Quadro 2** – Valores médios obtidos da caracterização física do solo utilizado no experimento.

Parâmetro	Valor médio
$\rho_s$ (g cm <sup>-3</sup> )	2,86
Umidade (%)	9,09
Superfície específica (m <sup>2</sup> g <sup>-1</sup> )	12,96
Argila, <0,002 mm (%)	19
Silte, 0,002 – 0,06 mm (%)	6
Areia fina, 0,06 – 0,2 mm (%)	40
Areia média, 0,2 – 0,6 mm (%)	33
Areia grossa, 0,6 – 2 mm (%)	1,6
Pedregulho, > 2 mm (%)	0,4

A curva granulométrica do solo está apresentada na Figura 2.

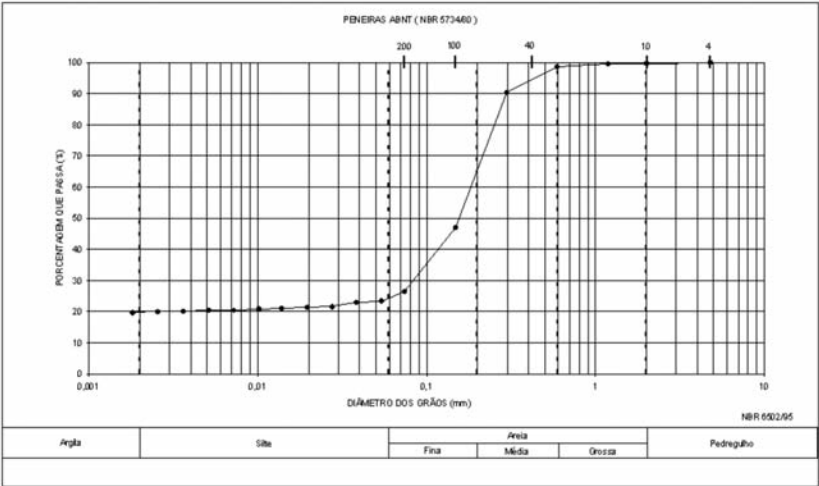


Fig. 2 – Perfil granulométrico do solo utilizado.

A partir dos dados obtidos experimentalmente do Quadro 2, é possível obter demais parâmetros do solo através de relações de massa e volume. Os valores destes índices são apresentados no Quadro 3.

Quadro 3 – Parâmetros físicos calculados do solo.

Parâmetro	Valor médio
$\rho$ (g cm <sup>-3</sup> )	1,47
$\rho_d$ (g cm <sup>-3</sup> )	1,35
e	1,13
n (%)	52,94
Sr (%)	23,07

Estes parâmetros foram essenciais para a definição da quantidade de solo a ser colocada em cada coluna para o experimento de percolação, fluxo diário de lixiviado e intervalo de coleta das amostras efluentes na coluna (Almeida, 2009).

4.2 – Análises químicas do solo

Os valores obtidos na caracterização química do solo estão dispostos no Quadro 4.

Quadro 4 – Parâmetros químicos do solo utilizado nos ensaios de coluna.

Parâmetro	Valor médio
pH	4,93
Eh (mV)	629,5
Capacidade de troca catiônica (mEq 100 g <sup>-1</sup> )	1,65
Matéria orgânica (%)	0,9
Condutividade elétrica (µmho)	48,63

A análise do pH apontou um solo ácido, com média de pH de 4,93. O pH do solo influi na capacidade de retenção de contaminantes no solo; dependendo de seu valor, poderá facilitar a ocorrência de diversas reações, tanto de liberação, quanto de retenção de contaminantes. O pH, por ter apresentado valor relativamente ácido, permite que os contaminantes presentes em percolados de aterro estejam mais disponíveis, devido à diminuição da adsorção destes nos colóides do solo e, também, por conferir menor estabilidade aos complexos que se formam entre metais e a fração de húmus do solo (Alloway, 1995). O potencial elétrico ou Redox, Eh, é um parâmetro que atua juntamente com o pH; seu resultado indica as condições de óxido-redução da solução de solo.

A CTC é um parâmetro importante na retenção de carga orgânica e outros íons menos móveis (Almeida, 2005). Indica a facilidade que o solo tem de trocar cátions para neutralizar as cargas negativas. Este parâmetro é influenciado pelo pH, podendo haver variações de seu valor frente a diferentes condições de concentração de hidrogênio livre no solo. De acordo com as análises químicas, o solo obteve um baixo valor de CTC, com média de 1,7 mEq 100g<sup>-1</sup>, o que indica uma baixa capacidade de reter metais potencialmente tóxicos por troca catiônica.

A condutividade elétrica do solo está relacionada com a quantidade de íons presentes na amostra para a qual contribui em grande parte a matéria orgânica existente no solo, isto é, solos orgânicos possuem mais íons, e por isso, maior condutividade elétrica. A condutividade elétrica oferece informações sobre a concentração salina das soluções. A média obtida para a salinidade do solo foi de 48,63 µmho.

O solo analisado apresentou em sua composição diversos metais; em maior concentração foi encontrado Fe e Zn. Óxidos de ferro são muito comuns em solos de formação Botucatu, resultantes da ação do intemperismo químico em rochas efusivas, que decompõem rapidamente os minerais ferromagnesianos, liberando Mg e Fe como observado por Silva (1983). A presença de íons, como Na e K, pode ser devido a ação do intemperismo químico em feldspatos, que se decompõem mais lentamente que os minerais ferromagnesianos, o que explica a menor concentração de Na e K. Cd e Ni não foram detectados nas amostras de solo (Silva, 1983). Os valores obtidos através da digestão estão dispostos no Quadro 5.

**Quadro 5** – Presença de metais no solo em estudo.

Parâmetro	mg L <sup>-1</sup>	mg kg <sup>-1</sup>
Zn	3,80	18,90
Pb	0,16	0,81
Cd	nd	nd
Ni	nd	nd
Fe	237,90	1189,40
Mn	0,87	4,36
Cu	0,17	0,85
Cr	0,36	1,82
Na	0,48	2,42
K	0,36	1,80

### 4.3 – Caracterização do lixiviado de chorume

Os valores obtidos da caracterização do lixiviado, antes da percolação em colunas de solo, estão dispostos no Quadro 6.

**Quadro 6** – Parâmetros analisados do lixiviado de chorume sem e com acidificação e enriquecimento.

Parâmetros	Amostra SEM acidificação e enriquecimento (A0)		Amostra COM acidificação e enriquecimento (A1)	
Amostra	A01	A02	A11	A12
CTC	25,6	25,2	25,3	25,2
pH	8,55	8,46	7,91	7,39
Eh (mV)	118	93	148	139
Condutividade (mS)	23800	24000	25300	25000
Turbidez (UNT)	186	149	186	185
DQO (mg L <sup>-1</sup> )	4070,08	4049,5	3643,1	4482,5
Zn (mg L <sup>-1</sup> )	1,59	1,72	7,86	32
Pb (mg L <sup>-1</sup> )	0,25	36,3	2,59	2,15
Cd (mg L <sup>-1</sup> )	0,055	0,15	10,09	16,48
Ni (mg L <sup>-1</sup> )	0,455	0,48	0,5	0,56
Fe (mg L <sup>-1</sup> )	4,37	3,88	4,55	3,93
Mn (mg L <sup>-1</sup> )	0,125	0,2	9,34	14,9
Cu (mg L <sup>-1</sup> )	0,075	0,13	8,98	13,98
Cr (mg L <sup>-1</sup> )	0,435	0,58	12,18	28,57
Na (mg L <sup>-1</sup> )	2050	1734	1900	1846
K (mg L <sup>-1</sup> )	1800	1708	1600	1744

### 4.4 – Metais potencialmente tóxicos no efluente

Os resultados obtidos para as colunas S e E estão dispostos nas Figuras 3 e 4, e os obtidos nas colunas C e O na Figura 5, onde fica representada a relação do rácio Ce/Co das concentrações de metais no efluente, Ce, e no afluente, Co, com o volume de poros percolado, VP.

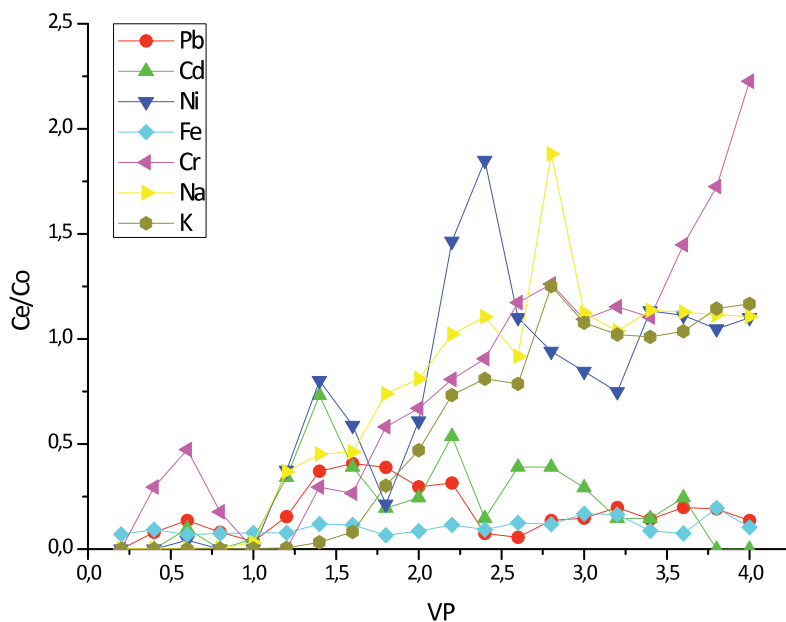
Os primeiros resultados de concentração de metais potencialmente tóxicos foram abaixo dos valores obtidos no decorrer do experimento, pois o lixiviado estava saindo com concentrações de água elevada, já que antes de iniciar a percolação com o contaminante, foi percolado 1 VP de água, saturando a coluna. Porém, alguns metais como o Zn e o Fe apresentaram maiores concentrações nas primeiras análises, devido ao fato de o solo utilizado no experimento ser rico nestes metais.

Como é possível observar na Figura 3, a maioria dos metais foram retidos na coluna do solo. A partir de aproximadamente 2 VP, os metais Ni, Na, K e Cr apresentaram concentrações no efluente superiores às do afluente, indicando a liberação dos mesmos na coluna.

Os metais Zn, Mn e Cu apresentaram elevada concentração relativa (Figura 4), em particular o Mn, que obteve Ce/Co de até 90, o que implica que havia muito mais Mn no efluente do que no afluente.

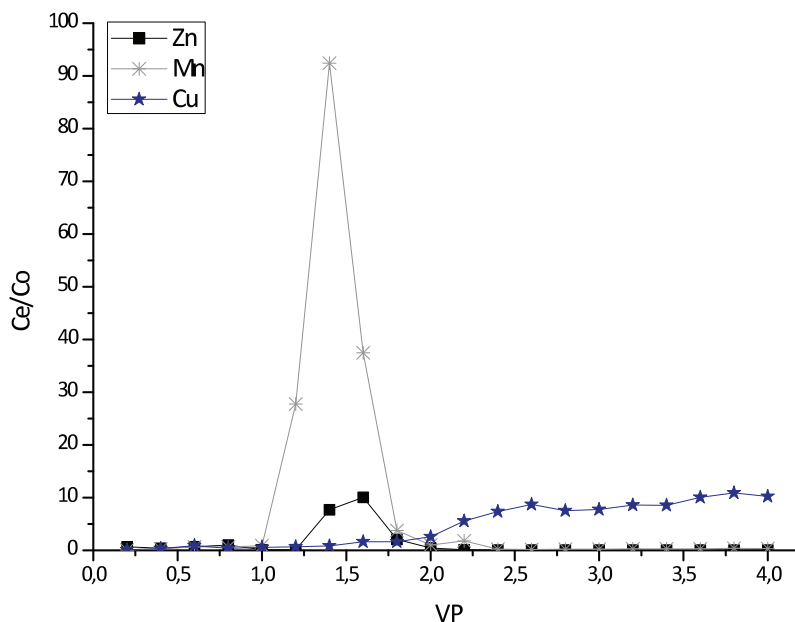
Para as colunas C e O (Figura 5), como era de se esperar, foram detetadas concentrações maiores de metais na saída da coluna. No entanto, como a concentração de alguns dos metais era superior no lixiviado de chorume (que fora enriquecido), as concentrações relativas se mantiveram com a mesma ordem de grandeza que as obtidas nas colunas S e E.



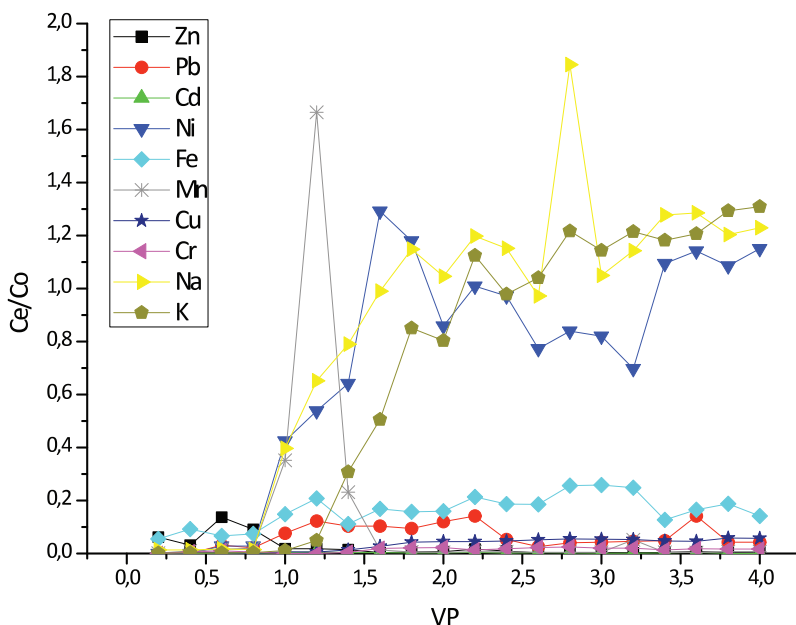


**Fig. 3** – Concentração relativa dos metais potencialmente tóxicos percolados nas colunas S e E (sem acidificação e enriquecimento com metais).

Como pode ser observado na Figura 5, a grande maioria dos metais ficaram retidos durante o experimento. Apenas os metais Mn, Ni, Na e K apresentaram  $C_e/C_o$  superior a 1, o que indica que estes tiveram maior mobilidade no solo. Ocorreu retenção destes metais até aproximadamente 1VP.



**Fig. 4** – Concentração relativa dos metais potencialmente tóxicos percolados nas colunas S e E (sem acidificação e enriquecimento com metais).



**Fig. 5** – Concentração relativa dos metais potencialmente tóxicos percolados nas colunas C e O (com acidificação e enriquecimento com metais).

Foi possível evidenciar o caráter atenuador do solo. Elementos presentes em grandes concentrações no lixiviado, tais como Na e K, tiveram uma taxa crescente de concentração. Isto quer dizer que o solo inicialmente reteve grandes quantidades desses elementos; após a sua saturação dos mesmos, o solo teve sua capacidade de retenção saturada, começando assim, a liberar maiores concentrações de elementos presentes no lixiviado percolado.

## 5 – CONCLUSÕES

O solo proveniente do aterro sanitário de São Carlos em estudo mostrou-se funcionar como um filtro no ensaio de colunas. Foi observada a capacidade de depuração, imobilizando impurezas depositadas no solo e apresentando potencial para retenção dos contaminantes presentes no lixiviado, embora o solo coletado tenha sido classificado como arenoso e evidenciado que as características químicas não se enquadram nos parâmetros indicados para sua utilização em áreas de deposição de resíduos sólidos urbanos.

A capacidade atenuadora do solo é limitada, podendo ocorrer alteração de sua qualidade devido aos efeitos acumulativos ocorridos ao longo da percolação com lixiviado. Porém, o processo de atenuação de plumas contaminantes pode para muitos contaminantes ser remediado naturalmente, limitando os efeitos prejudiciais da contaminação de leitos subterrâneos.

## 6 – AGRADECIMENTOS

Agradecemos às agências de fomento CNPq e FAPESP.

## 7 – REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABNT-Associação Brasileira de Normas Técnicas (1984a). NBR 8419 – *Apresentação de projetos de aterros sanitários de resíduos sólidos urbanos*. Procedimento. Projeto 01:603. 06-006/1993. Rio de Janeiro, 12p.
- ABNT-Associação Brasileira de Normas Técnicas (1984b). NBR 6508 – *Solos: Determinação da Massa Específica*. Rio de Janeiro.
- ABNT-Associação Brasileira de Normas Técnicas (1984c). NBR 7181 – *Solo: Análise Granulométrica*. Rio de Janeiro, 13p.
- Abreu, C.A.; Abreu, M.F.; Berton, R.S. (2002). *Análise química de solo para metais pesados*. Tópicos em Ciência do Solo, v.2, pp. 645-692. Sociedade Brasileira de Ciência do Solo. Viçosa-MG.
- Alloway, B.J. (Ed.). (1995). *Heavy Metals in Soils*. 2<sup>nd</sup> Edition. London: Blackie, Academic & Professional.
- Almeida, T.L. (2005). *Estudo da atenuação dos contaminantes de líquidos percolados no solo*. 126p. Dissertação (Mestrado), Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos.
- Almeida, T.L. (2009). *Implicações ambientais dos processos de atenuação de lixiviado em locais de disposição de resíduos sólidos urbanos*. Tese de Doutorado em Hidráulica e Saneamento, EESC, USP.
- Camargo, O.A.; Moniz, A.C.; Jorge, J.A.; Valadares, J.M.A.S. (1996). *Métodos de análise química, mineralógica e física de solos do Instituto Agrônomo de Campinas*. Campinas: IAC, Boletim Técnico, 106, 94p.
- Carneiro, M.A.C.; Siqueira, J.O.; Moreira, F.A. (2001). *Estabelecimento de plantas herbáceas em solo com contaminação de metais pesados e inoculação de fungos micorrízicos arbusculares*. Pesquisa Agropecuária Brasileira, v.36, n.12.
- Costa, P.O.S. (2002). *Avaliação em laboratório do transporte de contaminantes no solo do aterro sanitário de Sauípe/BA*. Dissertação (Mestrado). Pontifícia Universidade Católica, Rio de Janeiro.
- EPA-Environmental Protection Agency (1996). *Method 3052: Microwave assisted acid digestion of siliceous and organically based matrices*. 20p. Washington.
- Gillman, G.P.; Uehara, G. (1979). *Charge characteristics of soils with variable charge minerals: II. Experimental*. Soil Sci. Soc. Am. J., Madison, vol. 44, no. 2, pp.252-255.
- Jensen, D.L.; Ledin, A.; Christensen, T.H. (1999). *Speciation of heavy metals in landfill-leachate polluted groundwater*. Water Research, v. 33, n. 11, pp. 2642-2650.
- Lopes, C.M. (2009). *Adsorção individual e competitiva de Cd, Cu, Ni e Zn em solos em função da variação do pH*. Dissertação (mestrado). Escola Superior de Agronomia Luiz de Queiroz, Piracicaba, SP.
- Nogueira, J.B. (1995). *Ensaio de laboratório em mecânica dos solos*. São Carlos: Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.
- Péjon, O.J. (1992). *Mapeamento geotécnico regional da Folha de Piracicaba (Esc. 1:100 000): estudos de aspectos metodológicos, de caracterização e de apresentação de atributos*. São Carlos. Tese de Doutorado em Geotecnia, EESC, USP.

- PROSAB-Programa de Pesquisa em Saneamento Básico *apud* EPA (1995). *Manual prático para a compostagem de biossólidos*. Acessado em 07/05/2012. Disponível em: <http://www.finep.gov.br/prosab/livros/Livro%20Compostagem.pdf>.
- Schalch, V. (1984). *Produção e características do chorume em processo de decomposição de lixo urbano*. São Carlos. 103p. Dissertação (Mestrado em Hidráulica e Saneamento), Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.
- Silva, R.B.G. (1983). *Estudo hidroquímico e isotópico das águas subterrâneas do aquífero Botucatu no Estado de São Paulo*. Tese de Doutorado. Instituto de Geociências, São Paulo-SP.
- Thornton, S.F.; Tellam, J.H.; Lerner, D.N. (2000). *Attenuation of landfill leachate by UK Triassic sandstone aquifer materials: Fate of inorganic pollutants in laboratory columns*. Journal of Contaminant Hydrology, Amsterdam, vol. 43, no. 3/4, pp. 327-354.
- Tuxen, N.; Tüchsen, P.L.; Kirsten, R.; Albrechtsen, H.; Bjerg, P.L. (2000). *Fate of seven pesticides in an aerobic aquifer studied in column experiments*. Chemosphere, Oxford, v. 41, no. 9, pp. 1485-1494.
- Walkley, A.; Black, I.A. (1934). *An examination of the Degtjareff method for determining soil organic matter, and a proposed modification of the chromic acid titration method*. Soil Science, Baltimore, v. 37, p. 29-38.
- Yong, R.N.; Mohamed, A.M.O.; Warkentin, B.P. (1992). *Principles of Contaminant Transport in Soils*. Developments in Geotechnical Engineering, 73. Elsevier, Amsterdam. 327p.
- Yong, R.N.; Yaacob, W.Z.W.; Bentley, S.P.; Harris, C.; Tan, B.K. (2001). *Partitioning of heavy metals on soil samples from column tests*. Engineering Geology, Amsterdam, v. 60, no. 1-4, pp. 307-322.