

# ÍONS DE METAIS PESADOS EM SISTEMA SOLO-LIXO-CHORUME-ÁGUA DE ATERROS SANITÁRIOS DA REGIÃO METROPOLITANA DE SÃO PAULO-SP

## HEAVY METALS IONS IN THE SOIL-WASTE-LEACHATE-WATER SYSTEM OF SANITARY LANDFILLS OF THE METROPOLITAN REGION OF SÃO PAULO-SP

Raphael Hypolito<sup>1</sup> e Sibeles Ezaki<sup>1</sup>

Recebido em 07/06/2006, aceito em 13/12/2006

**RESUMO** Este trabalho teve como objetivos a caracterização do conteúdo de metais pesados em dois aterros sanitários, sua distribuição nos compartimentos solo-lixo-chorume-água, bem como a compreensão dos mecanismos de retenção e liberação dos íons poluentes visando maior controle e prevenção dos impactos ambientais. A pesquisa envolveu a caracterização de amostras de solos (tomados como referência e impactados pelo contato com o lixo) e de chorume de dois aterros na Região Metropolitana de São Paulo (RMSP), além da análise da composição de resíduos e de águas de poços a partir de trabalhos existentes. Estudou-se, também, experimentalmente o comportamento dos íons de metais pesados Pb, Cu, Cr, e Ni através de simulações de célula sanitária em colunas. Constatou-se retenção dos íons metálicos na massa de resíduos, adsorção de metais pesados a partículas de solos de cobertura, precipitação de metais nas formas estáveis devido condições físico-químicas e químicas reinantes no interior dos aterros. O chorume, desta forma, apresenta baixas concentrações de metais pesados. Nota-se, contudo, influência das condições redutoras impostas pela decomposição de material orgânico, nas fases anaeróbicas, na liberação de íons de manganês e de ferro às águas subterrâneas nos poços do entorno dos aterros.

Palavras Chave: metais pesados, aterro sanitário, solo, chorume, água subterrânea.

**ABSTRACT** The aim of this project was the total content characterization of heavy metals in two sanitary landfills, its distribution within its compartments (soil-waste-leachate-water) and also the understanding of heavy metal retention and release mechanisms may considering control and prevention of environmental impacts. The research consisted of soils (standard and contaminated) and leachates characterization, as well as data analysis of RMSP waste and ground water composition. The study of heavy metals Pb, Cu, Cr and Ni ionic behaviour was conducted by experimental columns that simulated sanitary cell. As a result of this work, it was observed ionic retention of metals in the waste mass, adsorption of heavy metals by cover soil particles and precipitation of metals as stable forms, due to physical-chemical and chemical conditions that occur within landfills. The leachate, therefore, shows low concentration of heavy metals. It was noted, however, that reduction conditions were imposed by organic matter decomposition to the environment, during anaerobic phases, causing the ionic release of manganese and iron to water wells nearby and in the limits of landfills.

Keywords: heavy metals, sanitary landfill, soil, leachate, ground water.

### INTRODUÇÃO

A disposição de resíduos urbanos em aterros, embora ofereça medidas estruturais de segurança (impermeabilização de base, drenagem, coleta e tratamento de chorume etc.) que minimizam riscos à saúde pública e impactos ambientais, não deixa de constituir uma forma de armazenamento de lixo no solo (CETESB, 1997; ABNT, 1997). Além disso, apesar dos avanços nas tecnologias de tratamento e reaproveitamento de resíduos, não há ainda garantia de separação total dos componentes do lixo, sejam estes tóxicos ou não.

Poucos são os trabalhos de caracterização de resíduos antes ou depois de serem aterrados, dificultando a determinação do conteúdo de metais pesados que chegam aos aterros. Os trabalhos divulgados mostram imensa variabilidade na composição gravimétrica do lixo domiciliar associada, entre outros fatores, à renda social do bairro (ORTH; MOTTA, 1998) e aos hábitos de consumo e que refletem sua composição química. Esta variabilidade é tanto espacial como temporal e se estende para os

aterros, onde o lixo distribui-se heterogeneamente.

Alia-se a isto, o fato de alguns aterros, como o Aterro 1 estudado, receberem resíduos industriais (classes II e III, e inclusive classe I) e lodos de esgoto com conteúdos consideráveis de metais pesados que são co-dispostos aos resíduos domiciliares e também distribuídos aleatoriamente. Dada a grande variabilidade de resíduos dispostos em aterros e a falta de normas mais específicas de amostragens, utilizou-se como referência os trabalhos de LIMPURB (2003) e Orth; Motta (1998) para o conteúdo de metais pesados no lixo.

Considerando a existência e a entrada de componentes tóxicos num aterro, teve-se como proposta o estudo do comportamento de metais pesados, visando a prevenção e maior controle da qualidade ambiental. Nesse contexto, é importante ressaltar que o aterro sanitário é um ambiente complexo e em constante transformação física, físico-química, química e microbiológica. O estudo dos metais pesados

<sup>1</sup>IG/SMA - Universidade de São Paulo ([raphael.hypolito@br2001.com.br](mailto:raphael.hypolito@br2001.com.br)), ([sibezaki@usp.br](mailto:sibezaki@usp.br))

neste ambiente implica na investigação das condições que influem na liberação, transporte e retenção desses íons e, portanto, da sua interação com outros materiais ou substâncias no interior do aterro, sejam estes resíduos líquidos, semi-sólidos e sólidos e solos de cobertura.

Neste trabalho foram determinados mecanismos de fixação e mobilidade do Pb, Cu, Cr, Ni associados a solos de dois aterros sanitários da Região Metropolitana de São Paulo (RMSP) – SP, com idades em torno de 30 anos (DBO=2300-2700 mg/L; DQO=4500-7500 mg/L). Além disso, foram estabelecidas correlações entre dados de campo - solo, lixo, chorume - e experimentais, que levaram à melhor compreensão da dinâmica de aterros com a avaliação de sua influência na qualidade das águas subterrâneas nos seus limites.

### MATERIAL E MÉTODOS

O estudo dos metais nos aterros depende da análise isolada e conjuntural de fatores, que

envolvem: (1) reconhecimento da composição do lixo quanto ao conteúdo original de metais, (2) caracterização dos atributos naturais do meio (geológicos, pedológicos, hidrológicos etc.) e dos materiais utilizados na cobertura do lixo, (3) caracterização dos resíduos gerados nas fases de decomposição de materiais orgânicos, (4) estudo das propriedades específicas inerentes a cada metal pesado e (5) averiguação das alterações que ocorrem no sistema solo-lixo-chorume-água com distribuição dos íons metálicos em cada um destes compartimentos.

Para tanto, o trabalho foi desenvolvido em duas etapas. A primeira consistiu na avaliação da distribuição dos íons de metais pesados no lixo, água, chorume e solo de cobertura (antes e após contato com chorume) nos Aterros 1 e 2 (Figura 1). A segunda parte tratou do estudo do comportamento iônico dos metais em células sanitárias pela simulação em colunas experimentais e sua comparação com os processos que ocorrem nos aterros.

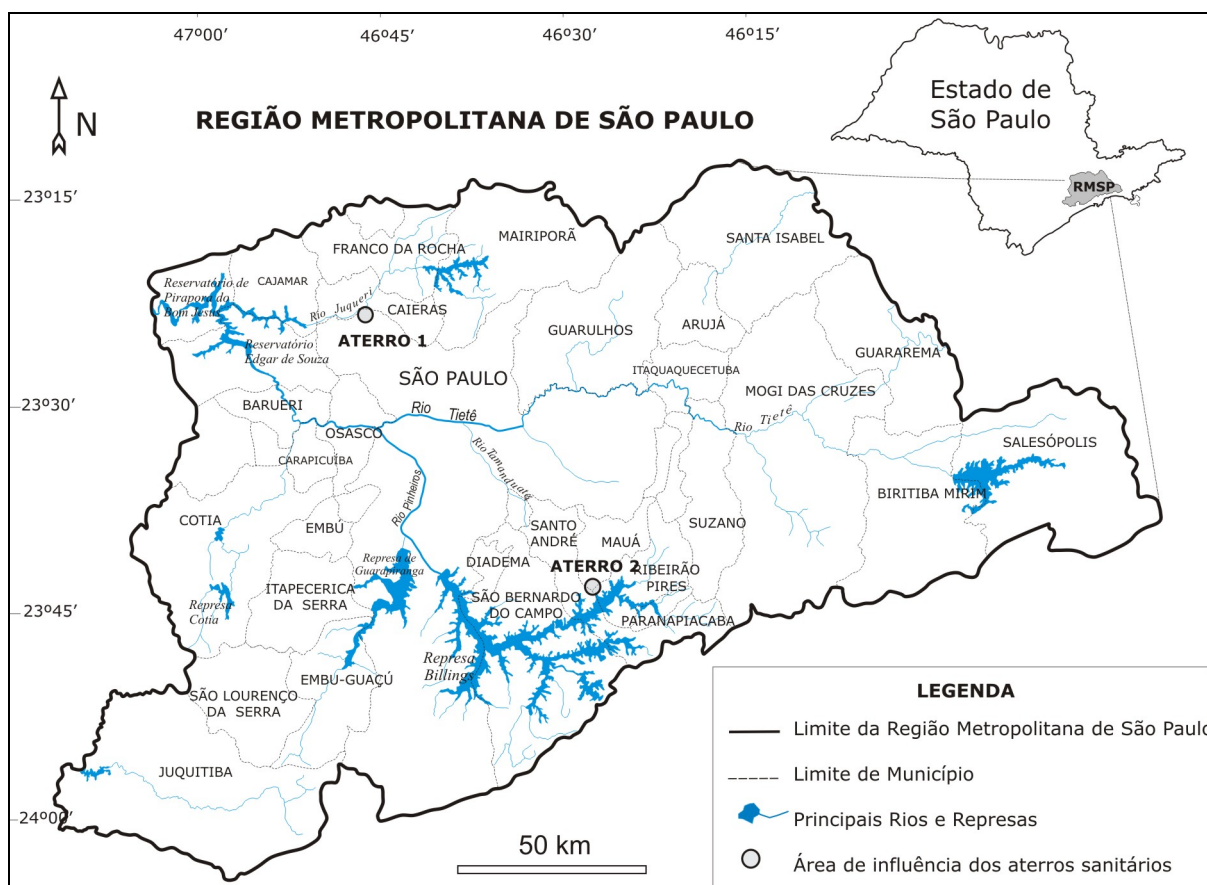


Figura 1- Localização dos Aterros Sanitários 1 e 2 estudados na Região Metropolitana de São Paulo-SP  
Figure 1- Localization of sanitary landfills (A and B) in the Metropolitan Region of São Paulo

**Amostragem de solos e chorume dos Aterros**

Foram coletados solos tomados como referência e impactados, respectivamente, nas proximidades e interior dos aterros, com trados manuais tipo concha e holandês de 10 cm de diâmetro.

As amostras referência foram coletadas ao longo de perfis de 17 m (Aterro 1) e 4 m (Aterro 2) de profundidade e, dadas suas características homogêneas, foram reunidas formando amostras compostas para cada perfil (SA-R e SB-R).

As amostras de solo contaminado (SCA-1a, SCA-2a, SCA-3) foram coletadas em células na base, em porção mediana e no topo do Aterro 1.

Foram abertas trincheiras com auxílio de retro-escavadeira, com cerca de 1 m de largura e 3 m de profundidade, nos taludes das células. As escavações avançaram 3 m em relação à berma, extraíndo a cobertura final gramada, juntamente com todo o resíduo aterrado, até se atingir a camada de solo subjacente a esta célula (Figura 2). Na interface entre a camada de solo e de lixo foi identificado e amostrado material de consistência pastosa, cor cinza, úmida, com odor indicando presença de chorume (SCA-1b e SCA-2b). Amostras superficiais de solo de cobertura (SCA-4 e SCA-5) também foram coletadas na base de taludes com auxílio de pás (Figura 3).

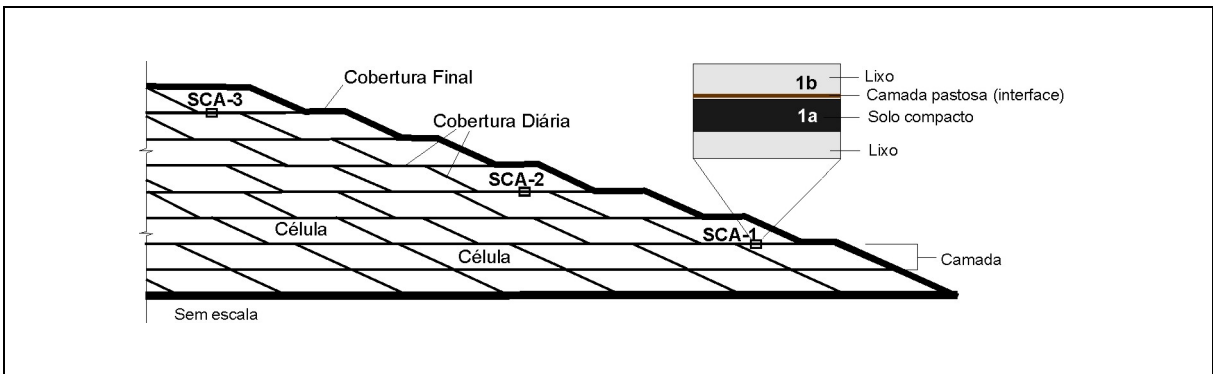


Figura 2- Esquema de camadas de lixo e solo compactados mostrando os pontos de escavação de solo contaminado

Figure 2- Construction scheme of waste and compacted soil layers showing the position of contaminated soils excavation points

No Aterro 2 coletaram-se amostras de solo de cobertura final em contato com chorume (SCB-1 a SCB-4), em locais onde se executava dreno de águas pluviais, e nas paredes de um pequeno aterro controlado, escavado, e com camada exposta (de 1 a 2 m de espessura) de lixo (SCB-5 a SCB-9) (Figura 3).

Amostras de chorume (de 2 L) foram coletadas, no ponto topograficamente mais baixo dos aterros, situados à saída do dreno principal numa caixa coletora (Aterro 1) e à saída da lagoa de aeração (Aterro 2) e preservadas a 4°C.

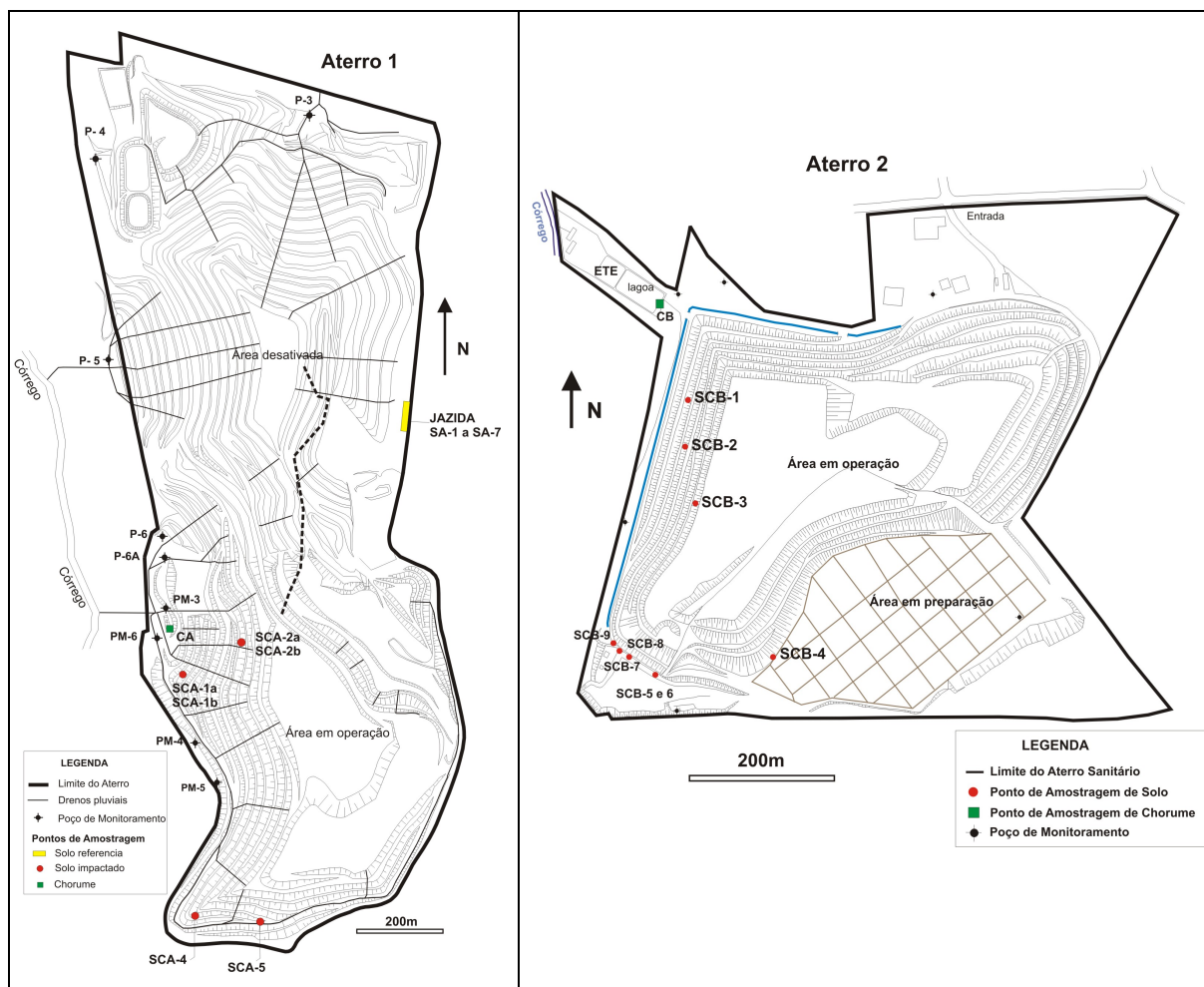


Figura 3- Localização dos pontos de amostragem de solos e chorume nos aterros  
 Figure 3- Localization of soil and leachate samples collection in landfills

**Tratamento e caracterização dos materiais dos aterros**

As amostras de solo foram secas à temperatura ambiente, destorroadas, homogêneas, quarteadas e peneiradas, separando-se a fração < 2mm.

Os valores de pH de solos foram determinados pelo método de Raji et al. (1987) adaptado por Hypolito (2004), que implica na medição potenciométrica da atividade hidrogeniônica no sobrenadante das misturas de solo/KCl (1N) e solo/ CaCl<sub>2</sub> (0,01M) na proporção 10 mL : 25 mL (solo:solução), após terem sido mantidas em atmosfera inerte de nitrogênio por 2 minutos, agitadas e mantidas em repouso por 30 minutos. A determinação de ΔpH foi obtida por pH CaCl<sub>2</sub> – pH KCl (TAN, 1982; MEKARU; UEHARA, 1972).

A análise granulométrica foi realizada pelo método da dispersão total (Pipeta de Robson) e os resultados projetados em Diagrama Triangular do Departamento de Agricultura dos Estados Unidos para classificação textural. Determinou-se a composição química total por Fluorescência de Raios X (PW2400-Phillips).

A Capacidade de Troca Catiônica (CTC) foi calculada pela soma dos cátions trocáveis (K<sup>+</sup>, Ca<sup>2+</sup>, Mg<sup>2+</sup>) com acidez potencial (H<sup>+</sup> + Al<sup>3+</sup>) no Laboratório de Fertilidades dos Solos da ESALQ-USP. As bases foram determinadas a partir de extração dos teores disponíveis de K, Ca, Mg das amostras por resina trocadora, quantificando-se K por fotometria de chama e Ca e Mg por espectrofotometria de absorção atômica. Os cátions H<sup>+</sup>+Al<sup>3+</sup> foram extraídos com solução de acetato de cálcio (1N, pH 7,0), que foi titulada com solução de NaOH 0,025 mol L<sup>-1</sup>.

A fração argila foi encaminhada para análise mineralógica por Difração de Raios com radiação Cu Kα (X/D5000-Siemens).

Para determinação dos metais pesados associados aos interstícios dos solos e adsorvidos às suas partículas foram realizadas extrações totais (HNO<sub>3</sub> 8M) e seletivas conforme metodologia de Marques (2003). As amostras de solo foram mantidas a 40 °C e, posteriormente, em dessecador por 1 h. Na seqüência, pesou-se com precisão (até a 4ª decimal) 1 g de solo transferido, para béquer de 150 mL e adicionados 50 mL de solução (água destilada ou ácido

nítrico). O conteúdo foi agitado a cada 30 minutos e após 2 h foi filtrado. A solução avolumada foi analisada por Espectrofotometria de Absorção Atômica (AA700BC/CG) no Laboratório de Hidrogeoquímica II, CEPAS – IGc/USP.

As amostras de chorume foram separadas em duas alíquotas para análise química por espectrofotometria de absorção atômica, sendo uma filtrada (membrana acetato 0,45 µm) e a outra tratada com mistura de HNO<sub>3</sub>/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> para eliminação total de matéria orgânica.

O conteúdo de metais pesados nos resíduos foi levantado nos trabalhos realizados por LIMPURB (2003) e Orth; Motta (1998).

Os resultados de análises químicas de água subterrânea de poços foram obtidos em relatórios de empresas que operam os aterros estudados.

### Experimentos

A etapa experimental consistiu na reprodução das condições ambientais de aterros em colunas para controle das fases de decomposição dos resíduos orgânicos e no acompanhamento das características do chorume gerado.

Foram realizados dois experimentos (I e II) em colunas de PVC contendo, da base para o topo, camadas de solo, de matéria orgânica representando o lixo e solo. A espessura das camadas dos aterros guardam a proporção lixo:solo de 8:1, mas no experimento, com o objetivo de acelerar o processo de decomposição, ela foi reduzida para 4:1. Utilizou-se bananas picadas como lixo artificial; esta fruta foi escolhida por ser de fácil decomposição e por não conter sementes (EZAKI, 2004).

Experimento I – a geração e composição de chorume foram monitoradas através de colunas com 6” de diâmetro e 50 cm de altura, uma das quais (A) foi considerada referência (ou branco) e a outra (B), foi dopada por metais pesados em quantidades conhecidas. Os líquidos percolados foram coletados através de tubo de 1”, perfurado, que simulava um poço. O solo utilizado (fração < 2 mm) corresponde ao solo não impactado utilizado no Aterro 1. O experimento durou 360 dias.

Experimento II – Assim como no Experimento I, utilizou-se uma coluna referência (C) e outra impactada por metais pesados (D). O solo, neste caso, correspondeu ao do Aterro 2. A duração do experimento foi de 270 dias.

As colunas A e C (referências) foram percoladas com água destilada, enquanto nas outras adicionou-se solução contendo 1 mg dm<sup>-3</sup> de íons chumbo, cobre, cromo e níquel. As soluções iônicas foram adicionadas

semanalmente nas colunas (200 mL nas colunas A e B; e 100 mL em C e D), sendo as amostras de chorume coletadas após 12 horas.

As fases de decomposição microbiológica foram acompanhadas através de dados de parâmetros indicativos como temperatura, pH (Potenciômetro DIGIMED), potencial redox ou Eh (Potenciômetro DIGIMED) e condutividade elétrica (Condutivímetro WTW). Efetuaram-se também, para controle da evolução dos experimentos, leituras de Na<sup>+</sup> e K<sup>+</sup> por Fotometria de Chama (B262/Micronal). Para acompanhamento da concentração dos íons Pb, Cr, Cu e Ni no chorume (das colunas e do aterro) as amostras foram, em seguida, tratadas com agente oxidante enérgico (H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>) para eliminação da matéria orgânica, procedendo-se as determinações de concentrações por espectrofotometria de absorção atômica.

Os parâmetros experimentais foram também acompanhados *in situ* nos Aterros 1 e 2, através da medição de pH, condutividade elétrica, temperatura, Eh e oxigênio dissolvido nas amostras de chorume bruto.

Após finalização dos experimentos, os solos das colunas foram submetidos a extrações totais de íons metálicos para averiguar as associações dos metais pesados com as características dos solos (dos Aterros 1 e 2) e matéria orgânica.

## RESULTADOS E DISCUSSÕES

### Solos e Chorumes dos Aterros

O solo do Aterro 1 apresenta textura argilosa a franco argilosa. Predominam caulinita, mica (muscovita e/ou ilita), quartzo e gibbsita e, secundariamente, ocorrem óxi-hidróxidos de ferro. A CTC apresenta-se baixa no valor de 13,7 mmol<sub>c</sub> dm<sup>-3</sup>. Os valores de ΔpH de solo (Tabela 1) foram negativos para a maioria das amostras de solo (branco) demonstrando baixa capacidade de adsorção de íons metálicos à superfície de seus constituintes. Amostras impactadas pelo chorume, ao contrário, apresentaram ΔpH positivos indicando presença de cargas negativas, que facilitam a adsorção catiônica.

O solo do Aterro 2 apresenta texturas franco argilo-arenosa e franco-arenosa. Foram identificados caulinita, mica (muscovita e/ou ilita), quartzo e vermiculita. A capacidade de troca catiônica (CTC) é baixa, contudo cerca de três vezes maior (38,8 mmol<sub>c</sub>.dm<sup>-3</sup>) que no Aterro 1. Os valores de ΔpH dos solos (Tabela 1) demonstram presença predominante de cargas positivas livres dos colóides do solo, aptas a adsorverem metais.

Tabela 1- Valores de pH e ΔpH dos solos dos Aterros 1 e 2

Table 1- pH and ΔpH values of soils of Landfills 1 and 2

	SOLO REFERÊNCIA				SOLO IMPACTADO			
	Amostra	pH CaCl <sub>2</sub>	pH KCl	ΔpH	Amostra	pH CaCl <sub>2</sub>	pH KCl	ΔpH
A t e r r o  1	SA-0	4,42	4,31	+ 0,11	SCA-1a	7,33	7,21	+ 0,12
	SA-1	6,30	6,20	+ 0,10	SCA-1b	7,77	7,66	+ 0,11
	SA-2	5,80	6,00	- 0,20	SCA-2a	7,07	7,00	+ 0,07
	SA-3	6,10	6,10	0,00	SCA-2b	7,18	7,03	+ 0,15
	SA-4	4,30	4,80	- 0,50	SCA-3	7,20	7,17	+ 0,03
	SA-5	5,50	5,90	- 0,40	SCA-4	6,59	6,11	+ 0,48
	SA-6	4,30	4,50	- 0,20	SCA-5	7,20	7,12	+ 0,08
	SA-7	4,20	4,50	- 0,30				
	SA-R	4,83	5,01	- 0,18				
A t e r r o  2	Amostra	pH CaCl <sub>2</sub>	pH KCl	ΔpH	Amostra	pH CaCl <sub>2</sub>	pH KCl	ΔpH
	SB-a1	3,70	3,40	+ 0,30	SCB-1	7,74	7,76	- 0,02
	SB-a2	3,90	3,86	+ 0,04	SCB-2	7,76	7,74	+ 0,02
	SB-a1	4,03	3,92	+ 0,09	SCB-3	7,79	7,76	+ 0,03
	SB-b2	4,14	4,08	+ 0,06	SCB-4	7,95	7,97	- 0,02
	SB-c1	4,14	4,13	+ 0,01	SCB-5	7,69	7,54	+ 0,15
	SB-c2	4,26	4,20	+ 0,06	SCB-6	7,80	7,89	- 0,09
	SB-R	4,08	4,05	+ 0,03	SCB-7	7,57	7,50	+ 0,07
					SCB-8	7,40	7,35	+ 0,05
					SCB-9	7,23	7,12	+ 0,11

A determinação da composição química quantitativa (elementos maiores e traço envolvendo os íons estruturais, adsorvidos e intersticiais) dos solos que estiveram em contato com chorume, bem como nas amostras de interface (solo/lixo), indicou intensa adsorção de

cátions. Dentre os cátions, aqueles em porcentagens maiores, constatou-se no Aterro 1 elevado enriquecimento de manganês, cálcio e magnésio, enquanto potássio e cálcio foram os mais lixiviados em relação ao solo branco (Tabela 2).

Tabela 2- Composição química dos solos (referência e impactado) do Aterro 1

Table 2- Chemical composition of soils (standard and contaminated) of Landfill 1

Parâmetro	Limite de Detecção	Unid.	CETESB Valores Referência /Alerta	Solo Referência	Solo impactado com chorume						
					Base		Meio		Topo	Superficial (berma/talude)	
					SCA 1a	SCA 1b (interface)	SCA 2a	SCA 2b (interface)	SCA 3	SCA 4	SCA 5
SiO <sub>2</sub>	0,30	%	-	58,63	58,91	57,77	57,29	58,23	61,10	59,08	62,79
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,021	%	-	21,41	19,07	19,19	20,54	20,03	18,83	16,19	15,99
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,003	%	-	9,07	11,40	11,32	10,45	10,54	7,55	8,92	8,82
MnO	0,001	%	-	0,02	0,26	0,26	0,26	0,34	0,06	0,42	0,25
MgO	0,012	%	-	0,11	0,51	0,65	0,35	0,33	0,26	4,26	2,56
K <sub>2</sub> O	0,006	%	-	2,39	0,97	1,13	1,21	1,13	2,63	3,10	2,00
CaO	0,003	%	-	0,02	0,06	0,30	0,09	0,12	0,30	0,34	0,16
Na <sub>2</sub> O	0,015	%	-	0,28	0,18	0,29	0,09	0,18	0,43	0,15	0,18
TiO <sub>2</sub>	0,003	%	-	1,03	1,39	1,41	0,85	0,84	0,80	0,98	0,89
S	30	mg kg <sup>-1</sup>	-	< 32	< 30	165	< 30	113	201	< 32	< 32
Cl	237	mg kg <sup>-1</sup>	-	<237	854	814	<237	252	396	183	182
F	214	mg kg <sup>-1</sup>	-	398	<214	<214	341	303	479	1525	1072
Cr	4	mg kg <sup>-1</sup>	40 / 75	<b>107</b>	<b>110</b>	<b>114</b>	<b>91</b>	<b>91</b>	<b>99</b>	<b>83</b>	<b>95</b>
Cu	2	mg kg <sup>-1</sup>	35 / 60	23	53	52	39	40	<b>129</b>	24	<b>101</b>
Ni	1	mg kg <sup>-1</sup>	13 / 30	11	<b>59</b>	<b>57</b>	<b>44</b>	<b>47</b>	<b>42</b>	<b>48</b>	<b>39</b>
Pb	2	mg kg <sup>-1</sup>	17/100	22	22	17	<b>145</b>	<b>242</b>	44	17	23
Zn	1	mg kg <sup>-1</sup>	60/300	16	63	82	72	103	75	106	187

Obs: Em negrito - valores que ultrapassaram os Valores Alerta da CETESB (2001)

O cobre foi intensamente adsorvido às partículas dos solos de células mais recentes (topo), enquanto elevados teores de chumbo foram averiguados somente nas amostras de célula mediana no aterro. Todas as amostras demonstraram contaminação por níquel, ultrapassando o valor de alerta estabelecido pela CETESB (2001). O solo referência apresentou teores naturalmente elevados de cromo possivelmente associados à composição original das rochas locais (micaxistos, rochas cálcio-silicáticas, xistos porfiroblásticos).

Nos solos coletados no Aterro 2, também se constatou forte adsorção de cátions magnésio e cálcio. O potássio encontrava-se, como esperado, em processo de lixiviação (Tabela 3).

Estes solos não apresentaram enriquecimento significativo de metais pesados. Os valores orientadores de alerta preconizados pela CETESB (2001) não foram atingidos para Pb, Ni e Zn.

Tabela 3- Composição química dos solos (referência e impactado) do Aterro 2

Table 3- Chemical composition of soils (standard and contaminated) of Landfill B

Parâmetro	Limite de Detecção	Unid.	CETESB Valores Refer. /Alerta	Solo Ref.	Solo impactado com chorume								
					SCB 1	SCB 2	SCB 3	SCB 4	SCB 5	SCB 6	SCB 7	SCB 8	SCB 9
SiO <sub>2</sub>	0,30	%	-	66,72	64,43	74,94	71,36	65,03	62,24	60,29	65,4	62,98	61,74
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,021	%	-	17,12	17,09	11,46	13,97	18,10	20,08	20,46	19,65	20,42	21,16
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,003	%	-	7,30	6,43	4,05	4,90	5,78	0,01	0,07	0,03	0,02	0,05
MnO	0,01	%	-	0,04	0,04	0,04	0,04	0,84	0,02	0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01
MgO	0,012	%	-	0,13	0,27	0,40	0,25	0,21	0,02	0,34	< 0,01	0,02	0,06
K <sub>2</sub> O	0,006	%	-	1,79	1,51	1,09	0,83	0,90	0,07	0,12	0,06	0,13	0,06
CaO	0,003	%	-	< 0,01	0,69	0,69	0,99	0,07	0,18	0,1	0,09	0,06	0,06
Na <sub>2</sub> O	0,015	%	-	0,07	0,19	0,14	0,12	1,33	0,94	0,98	0,943	1,02	0,98
TiO <sub>2</sub>	0,003	%	-	0,96	0,96	0,66	0,83	0,09	0,07	0,07	0,05	0,06	0,07
S	30	mg kg <sup>-1</sup>	-	80	3653	877	< 100	112	487,8	392,2	515,7	700,5	42,8
Cl	15	mg kg <sup>-1</sup>	-	< 15	205	546	693	561	351	551,5	< 223	360,7	498,4
F	223	mg kg <sup>-1</sup>	-	485	704	654	1481	1308	33,4	33,1	27	30,1	26,3
Cr	4	mg kg <sup>-1</sup>	40 / 75	<b>80</b>	73	54	66	62	21	18	16	25	20
Cu	2	mg kg <sup>-1</sup>	35 / 60	24	25	26	26	27	12	12	12	9	10
Ni	1	mg kg <sup>-1</sup>	13 / 30	12	14	12	21	23	<b>39</b>	<b>46</b>	<b>58</b>	<b>49</b>	<b>59</b>
Pb	2	mg kg <sup>-1</sup>	17 / 100	24	39	30	56	48	97	17	21	23	16
Zn	1	mg kg <sup>-1</sup>	60 / 300	22	59	54	55	54	62	60	65	63	62

Obs: Em negrito - valores superiores aos teores Alerta da CETESB (2001)

A disponibilidade iônica foi investigada através de tratamentos com água destilada para determinação da concentração de íons intersticiais

e com HNO<sub>3</sub> (8M), para extração total dos íons disponíveis associados aos solos (Tabelas 4 e 5).

Tabela 4- Resultado das extrações de metais de solo em água e em HNO<sub>3</sub> (8M) do Aterro 1Table 4- Results of metals extractions from soil of Landfill 1 using water and HNO<sub>3</sub> (8M)

Metal mg dm <sup>-3</sup>	Limite de Detecção	Extrator	Referência	SCA 1a	SCA 1b	SCA 2a	SCA 2b	SCA 3	SCA 4	SCA 5
Pb <sup>2+</sup>	0,05	H <sub>2</sub> O	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
		HNO <sub>3</sub>	2,8	10,2	16,8	61,5	89,5	17,4	9,2	9,9
Cu <sup>2+</sup>	0,025	H <sub>2</sub> O	0,1	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	0,4	0,1	0,2
		HNO <sub>3</sub>	0,4	12,4	16,2	5,2	11,2	25,4	4,3	11,1
Cr <sub>(t)</sub>	0,02	H <sub>2</sub> O	n.d.	n.d.	0,1	n.d.	n.d.	0,1	n.d.	n.d.
		HNO <sub>3</sub>	n.d.	2,6	6,0	0,9	1,7	6,9	1,2	1,2
Ni <sup>2+</sup>	0,04	H <sub>2</sub> O	n.d.	0,3	n.d.	0,7	n.d.	0,2	n.d.	n.d.
		HNO <sub>3</sub>	0,8	10,1	12,5	3,9	7,9	9,6	2,4	2,1

Obs: n.d.: não detectado

Tabela 5- Dados das extrações de metais de solo em água e em HNO<sub>3</sub> (8M) do Aterro 2Table 5- Data of metals extraction from soils of Landfill 2 using water and HNO<sub>3</sub> (8M)

Metal mg dm <sup>-3</sup>	Limite de Detecção	Extrator	Referência	SCB 1	SCB 2	SCB 3	SCB 4	SCB 5	SCB 6	SCB 7	SCB 8	SCB 9
Pb <sup>2+</sup>	0,05	H <sub>2</sub> O	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
		HNO <sub>3</sub>	3,9	13,5	19,3	44,0	15,1	3,1	23,4	20,1	14,4	23,7
Cu <sup>2+</sup>	0,025	H <sub>2</sub> O	0,2	0,2	0,5	0,1	0,2	0,3	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
		HNO <sub>3</sub>	0,4	10,9	13,4	26,5	3,0	1,9	2,6	1,0	1,7	1,8
Cr <sub>(t)</sub>	0,02	H <sub>2</sub> O	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
		HNO <sub>3</sub>	0,4	3,3	3,4	3,7	1,2	<0,10	10,1	<0,10	4,6	6,8
Ni <sup>2+</sup>	0,04	H <sub>2</sub> O	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
		HNO <sub>3</sub>	0,3	3,4	2,3	2,5	1,5	4,0	5,2	4,4	4,3	4,7

Obs: n.d.: não detectado

Os resultados analíticos demonstram baixas concentrações de íons de metais pesados nos espaços intersticiais dos solos dos aterros. A extrações nítricas (totais), entretanto, mostraram enriquecimento de metais pesados em relação aos solos de referência (10 vezes maiores) e elevados valores de íons adsorvidos e disponíveis ao meio.

Os parâmetros de chorume medidos em campo e os resultados analíticos das amostras (brutas e tratadas com solução nítrica), bem como a média geral dos valores obtidos, encontram-se nas Tabelas 6 e 7. As amostras de chorume foram catalogadas com as siglas CA (Aterro 1) e CB (Aterro 2).

Tabela 6- Teores de metais pesados (mg dm<sup>-3</sup>) no chorume do Aterro 1Table 6- Heavy metals concentrations (mg dm<sup>-3</sup>) in the leachate of Landfill 1

Parâmetro	26/07/01		25/04/02		25/06/02		22/01/02		MÉDIA		
	CA-1	CA-2	CA-3	CA-4							
pH	8,09	7,73	7,94	7,63	7,84						
Eh (mV)	-313,00	-	-353,00	-51,00	-239,00						
CE (mS cm <sup>-1</sup> )	31,30	28,30	30,80	232,00	80,60						
Metal	VMP	Filtrada	H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> / HNO <sub>3</sub>	Filtrada	H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> / HNO <sub>3</sub>	Filtrada	H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> / HNO <sub>3</sub>	Filtrada	H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> / HNO <sub>3</sub>	Filtrada	H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> / HNO <sub>3</sub>
Pb <sup>2+</sup>	1,50	0,34	-	0,04	0,31	0,01	0,05	0,01	0,06	0,10	0,14
Cu <sup>2+</sup>	1,50	0,04	0,09	0,07	0,32	0,06	0,09	0,04	0,08	0,05	0,15
Cr <sub>total</sub>	5,00	0,36	0,42	0,29	0,61	0,33	0,50	0,23	0,37	0,30	0,47
Ni <sup>2+</sup>	2,00	0,37	0,38	0,29	0,50	0,32	0,39	0,24	0,30	0,30	0,39
Cd <sup>2+</sup>	0,009	0,02	-	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00
Co <sup>2+</sup>	-	-	-	0,07	0,13	0,09	0,10	0,07	0,09	0,08	0,11
Zn <sup>2+</sup>	5,00	0,5	0,9	1,11	2,73	0,73	0,52	0,80	0,66	0,78	1,20

VMP: Valor Máximo Permitido - Decreto 8.468 de 08/09/76 e Decreto 15.425 de 23/07/80 do Artigo 19A.

Tabela 7- Teores em mg dm<sup>-3</sup> de metais pesados no chorume do Aterro 2Table 7- Heavy metals concentrations (mg dm<sup>-3</sup>) in the leachate of Landfill 2

Parâmetro	13/08/03		02/10/03		19/11/03		23/01/04		MÉDIA		
	CB-3	CB-1	CB-7	CB-5	CB-11	CB-9	CB-15	CB-13			
pH	8,31	-	-	7,89	7,71	7,97					
Eh (mV)	-150,00	-	-	-390,00	-304,00	-281,33					
CE (mS.cm <sup>-1</sup> )	31,30	-	-	26,80	24,10	27,40					
Metal	VMP	Filtrada	H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> / HNO <sub>3</sub>	Filtrada	H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> / HNO <sub>3</sub>	Filtrada	H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> / HNO <sub>3</sub>	Filtrada	H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> / HNO <sub>3</sub>	Filtrada	H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> / HNO <sub>3</sub>
Pb <sup>2+</sup>	1,50	0,02	0,64	0,03	0,54	0,02	0,70	0,043	0,54	0,03	0,61
Cu <sup>2+</sup>	1,50	0,06	0,08	0,06	0,07	n.d.	0,05	0,022	0,08	0,06	0,07
Cr <sub>total</sub>	5,00	0,37	0,62	0,26	0,56	0,40	0,30	0,474	0,45	0,31	0,48
Ni <sup>2+</sup>	2,00	0,24	0,57	0,29	0,56	0,28	0,51	0,305	0,63	0,27	0,57
Cd <sup>2+</sup>	0,009	0,00	0,05	0,002	0,05	n.d.	0,07	0,002	0,05	0,002	0,06
Co <sup>2+</sup>	-	0,08	0,35	0,08	0,37	0,10	0,46	0,104	0,45	0,09	0,41
Zn <sup>2+</sup>	5,00	0,53	3,16	1,91	2,12	0,30	0,95	0,963	4,26	1,21	2,62

Obs: n.d.: não detectado



Em geral, o chorume (bruto) apresenta baixos teores de íons de metais pesados, uma vez que as condições no aterro são muito redutoras (na fase anaeróbia metanogênica) e o pH é alcalino, favorecendo a precipitação de metais pesados na forma de sulfetos, sulfatos, carbonatos e óxi-hidróxidos no seu interior. Os chorumes dos Aterros 1 e 2 apresentaram tais características. Constatou-se com o tratamento do chorume com  $\text{HNO}_3/\text{H}_2\text{O}_2$ , sensível elevação nos teores dos metais estudados, indicando associação dos mesmos com a matéria orgânica.

#### **Metais pesados nos compartimentos solo-lixo-chorume**

O conteúdo total de metais, disponíveis ou não, num aterro corresponde ao somatório dos íons presentes nos compartimentos solo-lixo-chorume.

No lixo, a disponibilidade dos íons depende das atividades físicas, químicas, microbiológicas que ocorrem no aterro como um todo, influenciando no tempo de liberação dos metais dos resíduos originais.

No solo, além de estarem na estrutura mineral, os íons podem ocorrer sob a forma adsorvida à superfície sólida, e nas soluções intersticiais, na forma complexada ou associada a colóides. Sua disponibilidade é função também das condições químicas e físico-químicas reinantes no meio, bem como de outras características como as mineralógicas, texturais, pH, CTC etc.

No chorume, os íons encontram-se em solução, associados às partículas coloidais (orgânicas e inorgânicas) e sob a forma de complexos.

A determinação dos conteúdos de metais em cada um dos compartimentos não é efetuada de forma sistemática no Brasil, uma vez que exige metodologias padronizadas de amostragem, tratamento de amostras e análises. A Tabela 8 mostra, em síntese, a distribuição e o conteúdo dos íons de metais pesados no sistema solo-lixo-chorume dos aterros estudados. Os valores médios do lixo bruto foram extraídos de LIMPURB (2003) demonstram grande variabilidade nas concentrações de metais considerando um total de 96 distritos do Município de São Paulo. Os teores de metais

determinados nos ensaios de lixiviação e solubilização da fração pastosa de resíduo aterrado, determinados por Carvalho (1999), apresentam valores relativamente baixos em comparação ao lixo bruto. Isso indica que os metais devem estar contidos, em grande parte, nos resíduos de origem e que sua lixiviação, dependendo do tipo de resíduo, é um processo lento.

Os solos de cobertura desempenham importante papel na retenção de metais pesados provenientes do lixo. Ao se comparar amostras de solos dos Aterros 1 e 2 tomados como referência (brancos) aos solos impactados, constata-se relativo enriquecimento em metais pesados, tanto nas análises químicas totais, como nas extrações seletivas (Tabela 8). Isso se deve a fenômenos de adsorção/precipitação, resultado do contato chorume/solo/lixo.

Análises químicas dos chorumes dos aterros, por outro lado, mostraram baixos teores de íons de metais pesados indicando efetiva retenção nos solos e lixos.

#### **Metais nas Águas Subterrâneas**

As análises químicas de águas de poços situados à jusante do Aterro 1 demonstraram a influência dos produtos da decomposição do lixo na sua qualidade quando comparados aos valores naturais (de poços a montante ao aterro) e, de forma mais rigorosa, aos limites exigidos pela Portaria de Potabilidade Nº 518 do Ministério da Saúde (BRASIL, 2004).

Constatou-se valores medianos de concentração de ferro e manganês em alguns poços que ultrapassam os limites de  $0,3 \text{ mg dm}^{-3}$  (para ferro) e  $0,1 \text{ mg dm}^{-3}$  (manganês) preconizados pelo Ministério da Saúde (Tabela 9).

As elevadas concentrações de íons ferro e manganês se devem às condições redutoras características do ambiente com presença de material em decomposição anaeróbia. Estes metais, comumente presentes nas partículas minerais do solo, como era de se esperar, tornam-se móveis em tais condições. Trata-se de indicativo de escape e infiltração de chorume em algum local do aterro.

Tabela 8- Conteúdo de metais pesados nos principais compartimentos do aterro sanitário: lixo, solo e chorume  
Table 8- Heavy metals content in the three main compartments of sanitary landfill: waste, soil and leachate

<b>LIXO BRUTO</b>		<b>(mg kg<sup>-1</sup>)</b>	<b>Pb<sup>2+</sup></b>	<b>Cu<sup>2+</sup></b>	<b>Cr<sub>(t)</sub></b>	<b>Ni<sup>2+</sup></b>
<b>2003</b> (LIMPURB, 2003)	Média (n=96)		72,0	85,4	35,5	13,7
	Mín. - Máx.		5,5 - 390,0	4,5 - 2880,0	11,0 - 113,3	10,7 - 20,1
<b>2000</b> (LIMPURB, 2003)	Média (n=96)		28,3	256,3	3,3	18,8
	Mín. - Máx.		9,4 - 114,0	6,7 - 2070,0	1,8 - 16,0	1,7 - 163,0
<b>1998</b> (LIMPURB, 2003)	Média (n=96)		21,5	23,9	2,2	0,4
	Mín. - Máx.		3,9 - 51,0	5,0 - 140,0	0,0 - 6,0	- 5,0
<b>1998</b> (ORTH; MOTTA, 1998)	Média (n=10)		21,70	25,60	4,25	5,00
	Mediana (n=10)		<b>9,90</b>	<b>12,95</b>	<b>4,35</b>	-
	Mín. - Máx.		8,10 - 51,00	1,40 - 140,00	2,10 - 6,00	n.d. - 5,00
<b>FRAÇÃO PASTOSA DO LIXO</b> (CARVALHO, 1999)	Lixiviação	Média (n=14)*	n.d.	0,18	0,08	0,24
		Mediana (n=14)*	<b>n.d.</b>	<b>0,15</b>	<b>0,07</b>	<b>0,015</b>
		Mín. - Máx.	n.d.	0,03 - 0,48	0,02 - 0,17	n.d. - 0,58
	Solubilização	Média (n=14)*	n.d.	0,11	0,12	0,22
		Mediana (n=14)*	<b>n.d.</b>	<b>0,08</b>	<b>0,09</b>	<b>0,22</b>
		Mín. - Máx.	n.d.	0,02 - 0,33	n.d. - 0,30	n.d. - 0,54
<b>SOLO - Metais adsorvidos e estruturais</b>						
<b>(solos branco e impactado)</b>		<b>(mg kg<sup>-1</sup>)</b>	<b>Pb<sup>2+</sup></b>	<b>Cu<sup>2+</sup></b>	<b>Cr<sub>(t)</sub></b>	<b>Ni<sup>2+</sup></b>
<b>Aterro 1</b>	Branco		22,0	23,0	107,0	11,0
	Média (n=7)		72,9	62,6	97,6	48,0
	Mediana (n=7)		<b>23,0</b>	<b>52,0</b>	<b>95,0</b>	<b>47,0</b>
	Mín. - Máx.		17,0 - 242,0	24,0 - 129,0	83,0 - 114,0	39,0 - 59,0
<b>Aterro 2</b>	Branco		24,0	24,0	80,0	12,0
	Média (n=9)		38,6	17,7	39,4	35,7
	Mediana (n=9)		<b>30,0</b>	<b>12,0</b>	<b>25,0</b>	<b>39,0</b>
	Mín. - Máx.		30,0 - 56,0	25,0 - 27,0	54,0 - 73,0	12,0 - 23,0
<b>SOLO - Metais adsorvidos</b>						
<b>Aterro 1</b>	Branco		2,8	0,4	n.d.	0,8
	Média (n=7)		30,6	12,3	2,9	6,9
	Mediana (n=7)		<b>16,8</b>	<b>11,2</b>	<b>1,7</b>	<b>7,9</b>
	Mín. - Máx.		10,2 - 89,5	5,2 - 25,4	0,9 - 6,9	7,9 - 12,5
<b>Aterro 2</b>	Branco		3,9	0,4	0,4	0,3
	Média (n=9)		19,6	7,0	4,7	3,6
	Mediana (n=9)		<b>19,3</b>	<b>2,6</b>	<b>3,7</b>	<b>4,0</b>
	Mín. - Máx.		13,5 - 44,0	3,0 - 26,5	1,2 - 3,7	1,5 - 3,4
<b>CHORUME Médias (n=4)</b>						
<b>Aterro 1</b>	Bruto *		0,10	0,05	0,30	0,30
	H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> /HNO <sub>3</sub> *		0,14	0,15	0,47	0,39
<b>Aterro 2</b>	Bruto *		0,03	0,06	0,31	0,27
	H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> /HNO <sub>3</sub> *		0,61	0,07	0,48	0,57

• Unidade: mg/L ou mg dm<sup>-3</sup>

N.d. = não detectado

Tabela 9- Resultados analíticos as águas subterrâneas de poços do Aterro 1

Table 9- Analytic results of water wells from Landfill 1

<b>Aterro 1</b>		<b>P3</b>	<b>P4</b>	<b>P5</b>	<b>P6</b>	<b>P6A</b>	<b>PM3</b>	<b>PM6</b>	<b>PM4</b>	<b>PM2 Montante</b>
<b>Fe</b> (mg dm <sup>-3</sup> )	Média	<b>0,73</b>	0,03	<b>2,34</b>	<b>2,25</b>	0,04	0,12	0,28	0,06	0,14
	Mediana	0,04	0,03	<b>2,60</b>	<b>0,65</b>	0,03	0,03	0,08	0,03	0,15
	Mín-Máx	0,03 - 3,00	0,03 - 0,04	0,03 - 4,60	0,30 - 6,40	0,03 - 0,08	0,03 - 0,32	0,03 - 1,12	0,03 - 0,10	0,03 - 0,3
<b>Mn</b> (mg dm <sup>-3</sup> )	Média	<b>0,19</b>	<b>0,14</b>	<b>4,30</b>	<b>3,89</b>	<b>4,81</b>	<b>2,45</b>	<b>1,57</b>	<b>1,61</b>	0,02
	Mediana	0,03	0,10	<b>5,00</b>	<b>4,50</b>	<b>7,20</b>	<b>2,40</b>	<b>0,80</b>	0,04	0,03
	Mín-Máx	0,01 - 0,75	0,04 - 0,30	0,16 - 6,10	0,01 - 5,50	0,17 - 8,36	2,40 - 2,90	0,08 - 5,50	0,04 - 7,25	0,002 - 0,03

OBS: em negrito - valores que ultrapassaram limites da Portaria de Potabilidade

Fonte: dados obtidos na Empresa (Campanhas de coleta: 07/10/99, 24/02/00, 04/10/00, 20/02/01, 05/06/01)

Não foram detectados na água íons de metais pesados tóxicos, como por exemplo, de chumbo, cádmio, ou mesmo de outros íons como zinco, níquel, cobalto etc. Estes metais foram contidos no lixo ou adsorvidos aos solos, como constatado experimentalmente.

**Resultados experimentais**

O acompanhamento dos parâmetros experimentais nas colunas permitiu averiguar as transformações que ocorreram no seu interior, bem como as tendências comportamentais dos íons metálicos em função do tempo.

Foram reproduzidas experimentalmente as fases decomposicionais aeróbia, aeróbia/anaeróbia e anaeróbia, de modo semelhante ao que ocorre naturalmente nos

aterros. A duração dessas fases foi inferida com base nestas tendências e associação entre parâmetros, além da comparação com modelos como os de Stantforth *et al.* (1979 *apud* Teixeira 1993), Lima (1988) e Pohland; Harper (1985).

A fase aeróbia foi caracterizada, principalmente, pela queda do pH, presença de ácidos orgânicos complexantes e elevação da condutividade elétrica (CE), no início do experimento (Figura 4).

Na fase aeróbia/anaeróbia o pH manteve-se ácido, constante, com queda de CE indicando variações na disponibilidade iônica do sistema. A passagem desta fase para a anaeróbia foi marcada pelo início do aumento de pH.

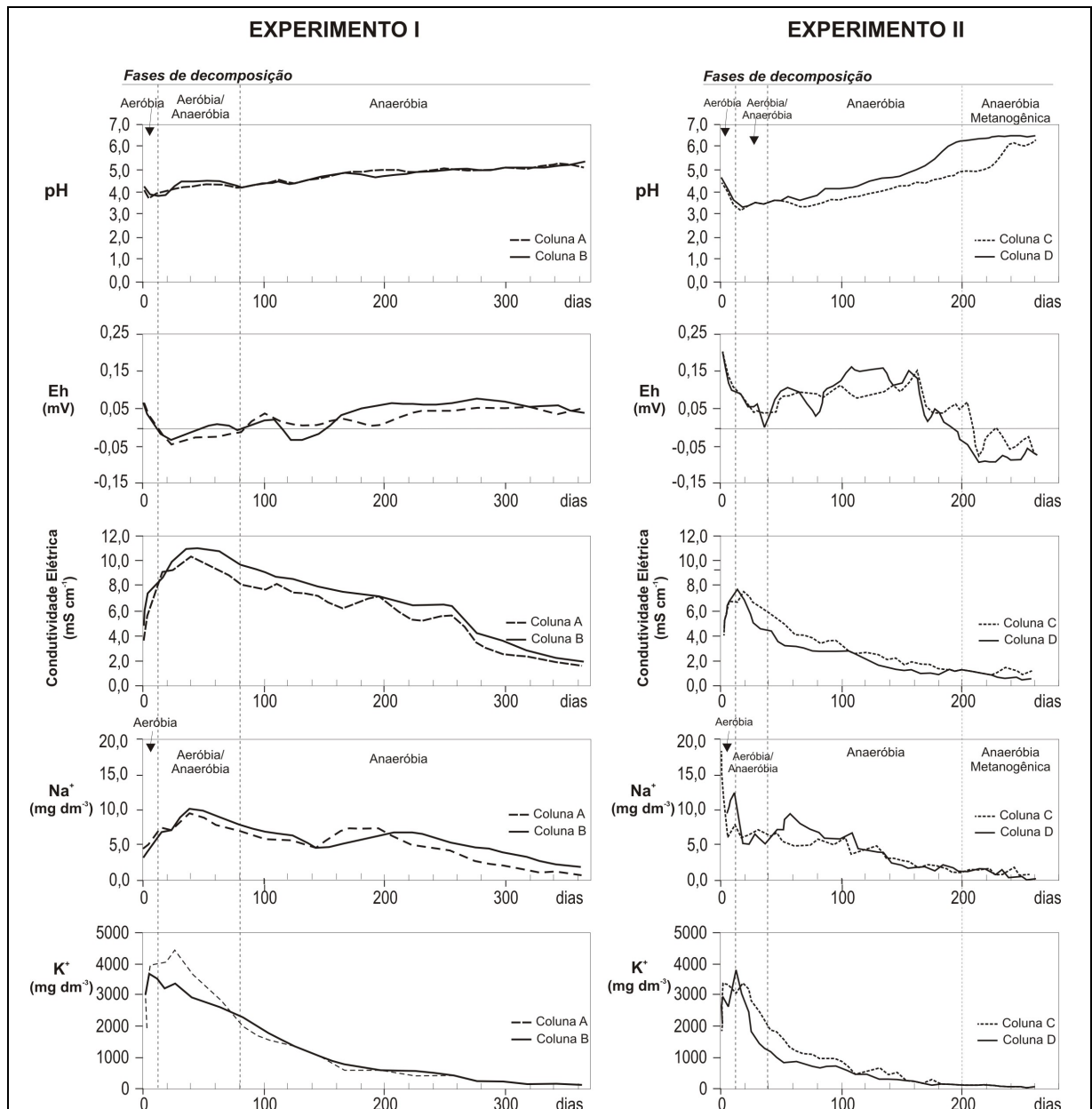


Figura 4- Evolução dos parâmetros experimentais nos chorumes das colunas  
 Figure 4- Evolution of experimental parameters in the leachate of columns

A fase anaeróbia caracterizou-se pela queda progressiva da CE, ou seja, da concentração de metais no chorume e pela elevação do pH. (Figura 4). Há tendência do pH do chorume elevar-se até a neutralidade ou a valores alcalinos (pH em torno de 8) que também foi observado em outros experimentos e medido em aterros com mais de 10 anos, como no caso dos aterros estudados.

Nas células das colunas C e D, onde menor quantidade de matéria orgânica (Banana) foi utilizada, as transformações químicas e biológicas ocorreram de forma mais acelerada, permitindo a observação da fase anaeróbia metanogênica. Esta caracterizou-se pelos baixos teores de metais que se mantiveram constantes até o final dos experimentos. Constatou-se valores de Eh cada vez mais redutores,

compatíveis com os modelos já mencionados e também verificados nos chorumes dos Aterros 1 e 2.

Quando se considera a composição química dos chorumes gerados nos experimentos, constata-se que íons metálicos apresentaram comportamentos semelhantes (Figura 5).

A queda de pH no final da fase de decomposição aeróbia e os baixos valores na fase de transição propiciaram solubilidade dos materiais com elevação na concentração de metais em solução e, conseqüentemente, aumento da condutividade elétrica.

O acréscimo dos íons metálicos no chorume, principalmente de  $K^+$  nas fases iniciais, elevou a força iônica favorecendo solubilização e deslocamento de íons adsorvidos.

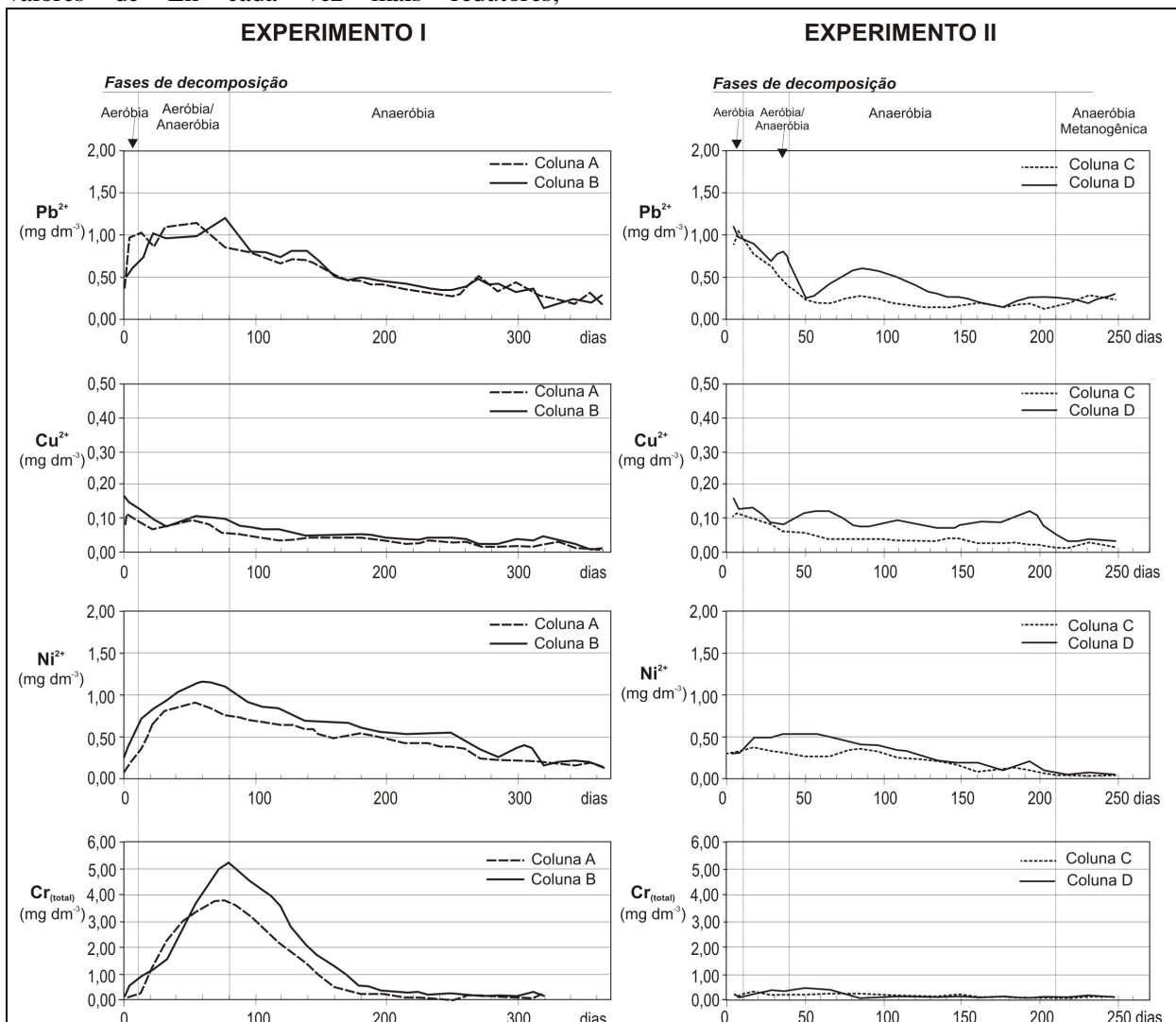


Figura 5- Concentração de metais pesados nos chorumes dos experimentos 1 e 2  
 Figure 5- Heavy metals concentrations in the leachates of Experiments 1 and 2

Com a progressiva elevação do pH, durante a fase anaeróbia, ocorreu formação de compostos estáveis, insolúveis sob as formas carbonática e óxi-hidróxida, especialmente de Pb e Cu que

precipitam a partir de pH=5. Observou-se que no pH atingido o níquel não chegou a precipitar-se, pois isso ocorre a partir de pH=8, e uma

diminuição em sua concentração se deve essencialmente ao fenômeno de adsorção.

Nas fases anaeróbia (Colunas A, B) e anaeróbia metanogênica (Colunas C, D) a diminuição da disponibilidade iônica implica na diminuição da força iônica com os fenômenos de precipitação e adsorção mais acentuados (Figura 4).

Para o cromo total, pode-se afirmar que houve forte influência tanto do pH como do Eh. As condições redutoras e pH ácido ( $\text{pH} < 5$ ) nas fases iniciais de decomposição, indicam predomínio de  $[\text{CrOH}]^{2+}$  como espécie dissolvida (Stumm; Morgan, 1996). O aumento de pH, mesmo nas condições oscilantes de Eh, implicam presença de cromo na forma trivalente.

Com a finalização dos experimentos, as extrações totais realizadas nos solos mostraram que a adsorção dos íons metálicos na Colunas B ocorreu com maior eficiência no solo do topo e em menor intensidade na matéria orgânica devido formação de íons complexos solúveis. Os sítios de adsorção das partículas sólidas durante todas as fases, não foram completamente ocupados devido à presença de matéria orgânica, produto de decomposição do lixo, e pelo deslocamento intermitente devido a adição contínua de eletrólitos (Pb, Cr, Cu, Ni). Os produtos orgânicos gerados pela banana, imprimiram maior mobilidade aos íons devido formação de complexos solúveis (Figura 6).

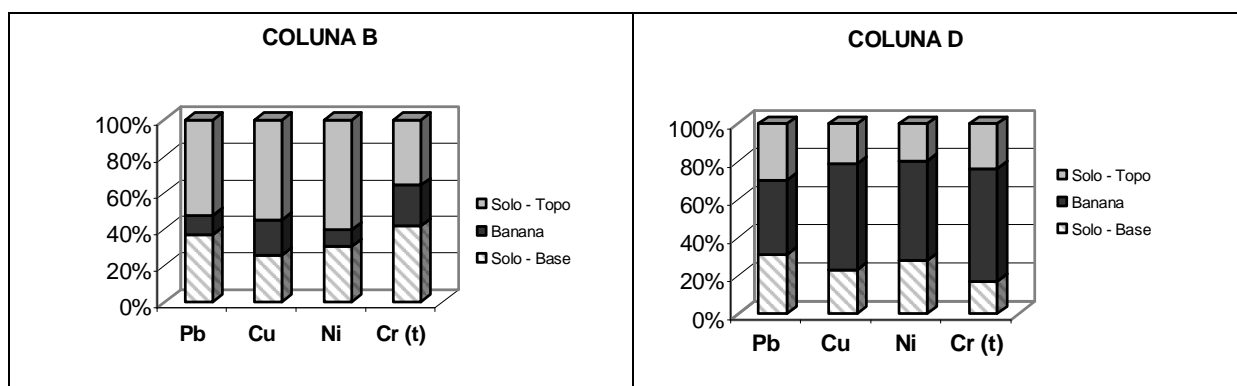


Figura 6- Resultados das extrações nítricas de metais pesados dos solos das colunas B (Aterro 1) e D (Aterro 2)  
Figure 6- Results of nitric extractions of heavy metals from soils of columns B (Landfill 1) and D (Landfill 2)

O comportamento iônico na Coluna D foi distinto, uma vez que o solo do Aterro 2, com maior permeabilidade, acarretou menor tempo de contato solo/solução e retenção; o acúmulo dos íons metálicos com a matéria orgânica deve-se ao elevado pH que propiciou precipitações na forma óxi-hidróxida. Mesmo com a presença de vermiculita, mineral com alto poder de adsorção, a característica textural deste solo não favoreceu a adsorção de metais.

A percolação de soluções dos íons metálicos nas colunas mostrou, portanto, maior retenção no Aterro 1 indicando que prevaleceu a composição textural sobre a CTC e mineralogia.

## CONCLUSÕES

Caracterizações químicas e mineralógicas dos materiais dos Aterros 1 e 2, assim como levantamentos bibliográficos, indicaram o conteúdo e distribuição de metais pesados existentes nos compartimentos solo-lixo-chorume-água, constituindo ferramenta para avaliação da entrada, permanência e saída dos metais deste sistema e, portanto, de controle da qualidade ambiental.

Os solos impactados pelo contato com chorume em ambos os aterros, quando comparados aos solos tomados como referência, mostraram elevados teores de metais pesados devido fenômenos de adsorção/precipitação. As extrações seletivas com água, e totais, com solução nítrica, mostraram baixos teores de íons contidos intersticialmente no solo e elevadas concentrações de íons metálicos adsorvidos. Baixos teores de íons de metais pesados nos chorumes dos aterros, por sua vez, indicam sua retenção nos solos e lixos.

Deve-se reconhecer, contudo, que os experimentos constituem significativo avanço no sentido de compreensão dos mecanismos que regem a mobilidade e retenção dos metais nos compartimentos de uma célula sanitária. A reprodução dos processos decompositivos da matéria orgânica pelo acompanhamento dos parâmetros experimentais possibilitou determinar a influência das variações de condutividade elétrica, pH, Eh no comportamento dos metais.

Assim, na fase inicial de decomposição, as condições físico-químicas e químicas favorecem a solubilização dos materiais e disponibilização

dos íons metálicos, enquanto nas fases anaeróbias, com a elevação do pH, a tendência é a fixação dos metais pesados. O chorume das colunas na fase final do experimento, portanto, apresentou baixas concentrações de metais pesados, assim como ocorre nos aterros estudados, indicando que os íons metálicos foram retidos na massa do lixo ou nos solos em função das condições químicas impostas pelo meio.

A capacidade de retenção de íons de metais pesados nos solos de aterros depende de uma conjunção de fatores como composição textural, capacidade de troca catiônica, mineralogia, conteúdo de matéria orgânica etc., podendo um fator prevalecer sobre outro. No caso dos solos dos aterros estudados, cuja mineralogia é semelhante, diferindo apenas pela presença de vermiculita (Aterro 2), a textura silto-argilosa no aterro 1 é que propiciou maior retenção de metais pesados.

O experimento reproduziu apenas uma única célula sanitária dificultando comparações das camadas de solo do experimento com aquelas do aterro. Serão necessárias, em trabalhos futuros, coletas sistemáticas de amostras de um aterro levando-se em conta as variações temporais das camadas sobrepostas de solo/lixo, objetivando comprovar a influência da infiltração e percolações (vertical e lateral) de chorumes mais recentes nas sucessivas camadas. Outro fator que deve ser considerado é a variabilidade composicional dos resíduos e a dificuldade de amostragem que podem interferir no controle do conteúdo e distribuição de metais.

Uma vez reconhecida a propriedade incorporadora de íons poluentes no solo e alguns dos mecanismos que regem o comportamento dos metais pesados, deve-se destacar a necessidade de caracterização dos diferentes tipos de solos utilizados para cobertura de resíduos quanto suas características texturais, mineralógicas e químicas. Essa prática deve ser adotada como medida de segurança, uma vez que permitirá a seleção dos solos mais apropriados e a melhoria de suas propriedades para a função de proteção.

Deve-se alertar, também, para a necessidade de incorporar sistematicamente à avaliação da qualidade das águas e ao estudo do comportamento de contaminantes, parâmetros físico-químicos que muitas vezes não são considerados nos trabalhos, como Eh, pH, alcalinidade, condutividade elétrica, temperatura etc.

O estudo do comportamento de metais pesados, considerando o sistema solo-lixo-chorume-água, permite compreender os mecanismos de mobilidade e fixação de íons poluentes na interface destes compartimentos, em função das variações nas condições químicas e físico-químicas no aterro. Contribui, portanto, para a investigação e diagnóstico ambiental em áreas destinadas à disposição de resíduos sólidos urbanos e também, para a determinação das quantidades e do potencial de íons que podem ser disponibilizados ao meio.

## REFERÊNCIAS

- ABNT- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Aterros de resíduos não-perigosos – critérios para projetos, implantação e operação. NBR 13896. São Paulo, 1997.
- BRASIL. Ministério da Saúde. Portaria N° 518, de 25 de março e 2004. Estabelece os procedimentos e responsabilidades relativos ao controle e vigilância da qualidade da água para consumo humano e seu padrão de potabilidade. Diário Oficial da União, Brasília, v. 59, p. 266-270, 26 mar. 2004, Seção 1.
- CETESB-COMPANHIA DE TECNOLOGIA DE SANEAMENTO AMBIENTAL, São Paulo (Estado). Aterro Sanitário. Apostilas Ambientais. São Paulo, CETESB, 1997, 40 p.
- CETESB-COMPANHIA DE TECNOLOGIA DE SANEAMENTO AMBIENTAL, São Paulo (Estado). Relatório de estabelecimento de valores orientadores para solos e águas subterrâneas no Estado de São Paulo/ Dorothy C.P. Casarini [*et al*]. Série Relatórios Ambientais. São Paulo, CETESB, 2001. (Disponível em <<http://cetesb.sp.gov.br>>).
- CARVALHO, M.F. Comportamento Mecânico de Resíduo Sólidos Urbanos. São Carlos, 1999. Tese (Doutorado). Escola de Engenharia de São Carlos, USP.
- EZAKI, S. Íons de metais pesados (Pb, Cu, Cr e Ni) associados a solos de cobertura de resíduos sólidos em dois aterros sanitários da Região Metropolitana de São Paulo-SP. São Paulo, 2004. Dissertação (Mestrado em Hidrogeologia). IGc/USP. 123p.
- HYPOLITO, R. Geoquímica da interação solo/rocha/água (GGE-800). Determinação de pH de solo. Parte V. Programa de Recursos Minerais e Hidrogeologia. CEPAS/IGc-USP, texto didático, p.67, 2004.
- MARQUES, J. F. Comportamento de íons Pb, Zn e Cu em área impactada por escória, produto da reciclagem de baterias chumbo-ácido. São Paulo, 2003. Dissertação (Mestrado em Hidrogeologia), IGc/USP.
- LIMPURB - Departamento de Limpeza Urbana do Município de São Paulo. Caracterização Gravimétrica e Físico-química dos Resíduos Sólidos Domiciliares do Município de São Paulo-2003. São Paulo, Limpurb, 2003, 33p. Disponível em: <<http://www.prefeitura.sp.gov.br>>.
- ORTH, M.H.A.; MOTTA, R.S. Caracterização Gravimétrica e Físico-Química dos Resíduos Sólidos Domiciliares no Município de São Paulo realizada em maio de 1998. Revista Limpeza Pública, N° 48, p. 9-16, 1998.
- LIMA, L.M.Q. Estudo comparativo da recirculação de chorume na aceleração da metanogênese em aterro sanitário. São Carlos, 1988. Tese (Doutorado), Escola de Engenharia de São Carlos - USP.
- MEKARU, T.; UEHARA, G. Anion adsorption in ferruginous tropical soils. Soil Sci. Soc. Amer. Proc, v. 36, p. 296-300, 1972.
- POHLAND, F.G.; HARPER, S.R. Critical Review and Summary of Lachate and gas production from landfills. Cincinnati, USEPA, Office of Research and Development, 1985. EPA/600/2-86/073.
- RAIJ, B. V.; QUAGGIO, L. A.; CANTARELLA, H. Análise química do solo para fins de fertilidade. Campinas : Fundacao Cargill, 170p., 1987.
- STUMM, W.; MORGAN, J.J. Aquatic Chemistry. Chemical Equilibria and Rates in Natural Waters. New York: John Wiley; Sons, 3<sup>rd</sup> ed., 1022p., 1996.
- TAN, K.H. Principles of Soil Chemistry. (Books in soils and the environment). Marcel Dekker, New York, 1982, 267 p.
- TEIXEIRA, E.N. Efeito inibidor da recirculação direta de chorume na decomposição anaeróbia de resíduos sólidos. São Carlos, 1993. Tese (Doutorado), Escola de Engenharia de São Carlos - USP.

## AGRADECIMENTOS

Ao Centro de Pesquisas de Águas Subterrâneas – CEPAS do Instituto de Geociências da USP pelo suporte laboratorial. À CAPES pela bolsa de estudos concedida.

