

# INVESTIGAÇÃO GEOFÍSICA EM ATERRO MUNICIPAL DE RESÍDUOS SÓLIDOS DOMICILIARES, CORDEIRÓPOLIS, BRASIL

Geophysical investigation in municipal solid waste landfill, Cordeirópolis, Brazil

César Augusto Moreira\*

Antonio Celso de Oliveira Braga\*\*

Cesar D'Abronzio Martinelli\*\*\*

**RESUMO** – Este trabalho apresenta os resultados do método geofísico da Eletrorresistividade na avaliação de lixiviado percolado em solo, proveniente da decomposição de matéria orgânica contida em resíduos sólidos domiciliares. O sistema de operação do aterro consiste basicamente na escavação de valas com cinco metros de profundidade, deposição diária de 7m<sup>3</sup> de resíduos sólidos domiciliares provenientes de um município de 17 000 habitantes e posterior cobertura pelo solo retirado durante a escavação das valas. A ausência de impermeabilização das valas ou de sistemas de coleta de gases e líquidos, justificam a aplicação da geofísica na caracterização e monitoramento do fluxo de percolados no solo e águas subterrâneas. A ocorrência de valores de resistividade inferiores a 30Ω.m nos resultados e ausência desta faixa de valores na linha de referência, aliado a característica de elevada quantidade de sólidos totais dissolvidos no líquido proveniente da decomposição da matéria orgânica, revelam zonas de concentração de chorume no solo. Esta faixa de valores foi descrita em diversas investigações geofísicas realizadas em áreas de aterros de resíduos sólidos na região Sudeste do Brasil, notadamente caracterizadas por solos espessos e teores variáveis de argila e areia.

**ABSTRACT** – This paper presents the results of the Electrical Resistivity geophysical method in the evaluation of leachate percolation in soil, originated from decomposition of organic matter contained in domestic solid waste. The landfill system operation consists basically in five meters deep ditch excavation, daily deposition of 7m<sup>3</sup> of domestic solid waste from a city with 17.000 inhabitants and subsequent cover by soil removed during ditch excavation. Absence of ditch waterproofing and of gas and liquid collection systems, justify the application of geophysics in the characterization and monitoring of the percolated flux in soil and groundwater. The occurrence of resistivity values below 30Ω.m in the results and the absence of this range in the reference line, coupled with the presence of high total dissolved solids in the liquid derived from organic matter decomposition, reveal leachate concentration zones in soil. This range of values has been described in diverse geophysical investigations carried out in solid waste landfills in the Brazilian Southeast region, notably characterized by thick soil layers and variable clay and sand content.

**PALAVRAS CHAVE** – Aterro sanitário, chorume, geofísica, resistividade elétrica.

---

\* Professor Assistente Doutor, Departamento de Geologia Aplicada, Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista (UNESP). E-mail: moreirac@rc.unesp.br.

\*\* Livre Docente, Departamento de Geologia Aplicada, Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista (UNESP). E-mail: acobraga@rc.unesp.br.

\*\*\* Professor Adjunto, Departamento de Geologia, Centro de Ciências, Campus do Pici, Universidade Federal do Ceará (UFC). E-mail: cmartinelli@ufc.br.

## 1 – INTRODUÇÃO

A intensificação do convívio em cidades e a padronização das formas de fabricação e consumo são traduzidas no expressivo aumento da produção de resíduos sólidos, constituindo um grande desafio para os gestores públicos. As formas atualmente utilizadas para disposição final de resíduos sólidos podem ser resumidas em incineração, compostagem, disposição em lixões e aterros tipo sanitário ou controlado.

Aterro sanitário é uma forma de disposição de resíduos sólidos urbanos no solo, sem causar danos a saúde pública e a segurança da população com impactos ambientais mínimos, sob confinamento dos resíduos ao menor volume possível e recobrimento com camada de terra ao final de cada jornada de trabalho ou em intervalos menores de tempo, além de impermeabilização da base e laterais das células de disposição de resíduos (ABNT, 1989). Lixão é uma forma de disposição de resíduos sobre o solo sem quaisquer critérios técnicos, medidas de proteção ao meio ambiente ou a saúde pública (IPT/CEMPRE, 2000). Aterro controlado representa um passo sentido a um aterro sanitário, ou seja, é elaborado mediante critérios técnicos que visam minimizar essencialmente o impacto visual e o controle de vetores de doenças, sem requerer impermeabilização do substrato local, fato que o diferencia de um aterro sanitário (SMA, 2005).

Atualmente os aterros são alvos de críticas por não compreenderem reciclagem, necessitarem de grandes áreas para implantação, operação sujeita a condições climáticas favoráveis, além do conseqüente risco de contaminação do solo e água subterrânea pela disposição dos materiais diretamente sobre o solo.

Contudo, os aterros são a principal forma atualmente empregada na disposição final de resíduos sólidos urbanos, bem como resíduos provenientes de outras formas de destinação, como coleta seletiva, compostagem e incineradores.

O gerenciamento de aterros sanitários compreende uma série de procedimentos, como:

- Implantação de políticas de redução do volume de material destinado, pela implantação de programas de coleta seletiva e compostagem.
- Rígido controle operacional do material destinado, com minimização do período entre a chegada e destino final; cobertura do resíduo por solo ou material inerte e de baixa permeabilidade.
- Monitoramento da área de forma direta e indireta, para avaliação da área impactada pelo fluxo de chorume e variações diante das sazonalidades ambientais.

Numa tentativa de reverter um quadro de predomínio de lixões em centenas de municípios de pequeno porte, a Secretaria de Estado do Meio Ambiente do Estado de São Paulo em atendimento à Política Brasileira de Meio Ambiente, instituída pela lei 6938 de 1981, elabora em 2000 o projeto Aterro Sanitário em Valas, para conversão de lixões em aterros controlados no Estado.

No âmbito dos resíduos sólidos que devem ter tratamentos e destinos específicos, classificados genericamente em industriais, domésticos e serviços de saúde, são destacados os resíduos gerados pelas residências e comércio em geral, em cidades com até 100 000 habitantes, segundo os Inventários Estaduais de Resíduos Sólidos Domiciliares (CETESB, 2005), que no Estado de São Paulo somam 578 municípios, áreas alvo do projeto da Secretaria do Meio Ambiente.

O procedimento técnico operacional dos aterros controlados consiste no preenchimento de valas escavadas com dimensões apropriadas, onde os resíduos são depositados sem compactação e posteriormente cobertos com terra (SMA, 2005). O confinamento dos resíduos sem compactação impede o aproveitamento integral da área a ser aterrada, fato que torna esse processo não recomendado para a maioria das comunidades com produção de resíduos superior a 10 toneladas por dia.

A escavação de valas exige condições favoráveis no que se refere à profundidade do nível freático e constituição do solo. Terrenos com nível freático raso ou muito próximo da superfície são

impróprios, uma vez que possibilitam a contaminação do aquífero. Terrenos rochosos também não são indicados devido às dificuldades de escavação e a possibilidade de fluxo de contaminantes em fraturas. Solos excessivamente arenosos não apresentam coesão suficiente, causando o desmoronamento das paredes das valas.

O município de Cordeirópolis adere ao projeto Aterro Sanitário em Valas em 2000, numa tentativa de melhoria nas condições ambientais de destinação final de resíduos sólidos gerados por seus municípios, cujo volume na época era de aproximadamente 5m<sup>3</sup> por dia.

Esta área foi estudada por meio do uso do método geofísico da Eletroresistividade. A ausência de impermeabilização das valas ou sistemas de coleta de gases e líquidos justifica a aplicação da geofísica na caracterização e monitoramento do fluxo de percolados no solo e águas subterrâneas.

O principal objetivo deste trabalho é determinar a existência de contrastes em termos de resistividade elétrica entre o aterro de Cordeirópolis e áreas adjacentes pela presença de lixiviados provenientes de decomposição de matéria orgânica contida nos resíduos sólidos domiciliares, investigar o eventual fluxo de lixiviado abaixo das valas e para além dos limites do aterro controlado, além de avaliar a eficácia da geofísica como ferramenta de caracterização de contaminações em solo e águas subterrâneas numa área ausente de sistemas de monitoramento ambiental.

## **2 – CARACTERÍSTICAS DE CONTAMINANTES PROVENIENTES DA DECOMPOSIÇÃO DE MATÉRIA ORGÂNICA E EXEMPLOS DE APLICAÇÃO DA ELETRORRESISTIVIDADE A ATERROS DE RESÍDUOS SÓLIDOS DOMICILIARES**

Plumas de contaminação proveniente de resíduos sólidos são freqüentemente caracterizadas por uma solução de quatro grupos de poluentes (Christensen *et al.*, 1994):

- Matéria orgânica dissolvida, expressa pela demanda química de oxigênio ou carbono orgânico total, incluindo CH<sub>4</sub>, ácidos graxos voláteis e compostos mais refratários como húmicos e fúlvicos.
- Macrocomponentes inorgânicos como Ca, Mg, Na, K, NH<sub>4</sub><sup>+</sup>, Fe, Mn, Cl, SO<sub>4</sub><sup>2+</sup> e HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>.
- Metais pesados: Cd, Cr, Cu, Pb, Ni e Zn.
- Compostos orgânicos derivados de petróleo, que incluem hidrocarbonetos aromáticos, fenóis e compostos clorados alifáticos.

Outros elementos podem ser encontrados neste ambiente, como B, As, Se, Ba, Li, Hg e Co, sempre em concentrações muito baixas e de importância secundária.

O material lixiviado proveniente de aterros recentes é freqüentemente caracterizado por altos níveis de ácidos orgânicos, amônia e sólidos totais dissolvidos, mas grande parte da massa biodegradada é fragmentada com o tempo e a concentração destes parâmetros decresce no material lixiviado de aterros antigos (Quadro 1).

O material lixiviado pode conter substâncias tóxicas e perigosas em formas sólida e gasosa e pode apresentar elevadas concentrações dos íons cloreto, ferro e zinco. Os elementos com elevada mobilidade iônica geralmente apresentam altas concentrações em comparação aos elementos de baixa mobilidade iônica (Bagchi, 1987). O pH tende a aumentar com o tempo, pois formas ácidas iniciais tendem a estados neutralizados, com decréscimo da demanda de oxigênio químico e biológico (Quadro 1).

A quantidade de água subterrânea contaminada resultante da invasão de material lixiviado depende da hidrogeologia da área e da capacidade de atenuação do substrato. Este processo pode ser efetivo por diluição e dispersão na água subterrânea em aquíferos de alta permeabilidade e elevada

**Quadro 1** – Mudanças típicas nas concentrações de lixiviado com a idade do resíduo (valores em mg/L) (Farquhar, 1989; Birks e Eyles, 1997).

Parâmetro	Idade do resíduo		
	0 - 5 anos	5 - 10 anos	10 - 20 anos
STD	10000 - 25000	5000 - 10000	2000 - 5000
pH	5 - 6	6 - 7	7 - 7.5
DOB	10000 - 25000	1000 - 4000	50 - 100
DOQ	15000 - 40000	10000 - 20000	1000 - 5000
N Amoniacal	500 - 1500	300 - 500	50 - 200
P total	100 - 300	10 - 100	
Cloreto	1000 - 3000	500 - 2000	100 - 500
Sulfato	500 - 2000	200 - 1000	50 - 200
Cálcio	2000 - 4000	500 - 2000	300 - 500
Sódio + Potássio	2000 - 4000	500 - 1500	100 - 500
Magnésio + Ferro	500 - 1500	500 - 1000	100 - 500
Zinco + Alumínio	100 - 200	50 - 100	10 - 50
Alcalinidade	10000 - 15000	1000 - 6000	500 - 2000

condutividade hidráulica. No caso de aquíferos menos permeáveis ou de baixa condutividade hidráulica, a contaminação carregada com sais inorgânicos pode provocar mineralizações no aquífero (Meju, 2000).

A avaliação de contaminações provocadas por aterros municipais de resíduos sólidos domiciliares é uma questão que envolve a análise integrada do meio físico. Os aspectos fundamentais necessários à caracterização de tais áreas sugerem estudos hidrogeológicos, geológicos e pedológicos.

O acompanhamento e monitoramento das contaminações eventualmente presentes requerem a detecção, caracterização, acompanhamento e prognósticos sobre o fluxo das plumas de contaminação geradas no solo e seus possíveis efeitos aos ecossistemas.

Análises químicas em amostras de solo e água subterrânea são ferramentas tradicionalmente empregadas no estudo de áreas impactadas por contaminações. Caracterizadas como formas diretas de investigação, são necessárias para a proposição e estabelecimento de técnicas de tratamento e remediação. Entretanto, este tipo de análise apresenta caráter pontual e sua avaliação diante das discontinuidades intrínsecas ao ambiente geológico muitas vezes dificulta sua interpretação.

Em contrapartida, a geofísica consiste num conjunto de métodos indiretos de investigação geológica multipontual e que permite tanto detalhamentos quanto a cobertura de grandes áreas. Este tipo de análise é baseado em medidas de parâmetros físicos intrínsecos aos materiais geológicos, como propriedades elétricas, mecânicas, térmicas, magnéticas, gravitacionais, dentre outras. A versatilidade e sensibilidade do instrumental geofísico a alterações no ambiente geológico pela presença de contaminantes como chorume, aliado à diversidade de técnicas de processamento de dados, possibilitam a extrapolação espacial de dados pontuais e o dimensionamento adequado de contaminações em solo e águas subterrâneas.

Com o objetivo de estimar a extensão e espessura de resíduos e definir a profundidade do nível freático contaminado do aterro sanitário de Mallard North – Illinois (Estados Unidos), Carpenter *et al.* (1990) utilizam a técnica de sondagem elétrica vertical em arranjos Wenner e Schlumberger. Os resultados indicam o arranjo Schlumberger como o mais adequado ao estudo em áreas contaminadas, além de permitirem definir estratos de cobertura de resíduos (15 $\Omega$ .m a 30 $\Omega$ .m), estratos com resíduos insaturados (9 $\Omega$ .m a 19 $\Omega$ .m) e o nível saturado de acúmulo de chorume.

A integração de análise estrutural, condutividade hidráulica e resistividade por meio de sondagens elétricas verticais, possibilitaram a Frohlich *et al.* (1996) uma estimativa das propriedades hidráulicas do maciço fraturado onde está localizado o aterro sanitário central de Rhode Island (Estados Unidos). A definição de caminhos preferenciais de fluxo d'água no maciço foi possível

devido a baixa resistividade elétrica associada a planos de fratura. A correlação linear inversa entre condutividade hidráulica e resistividade elétrica das camadas estudadas sugere que íons presentes na água contida em fraturas são em parte condutores de corrente elétrica.

A caracterização do aterro de East Anglia (Reino Unido) em termos de resistividade e carga-bilidade por Aristodemou e Thomas-Betts (2000), revelam aumento nos valores de carga-bilidade na área do aterro dentro da zona saturada e com o aumento da profundidade, ao passo que tais intervalos foram caracterizados por valores de resistividade em torno de  $0,3\Omega.m$  para a zona saturada e entre  $0,3\Omega.m$  e  $50\Omega.m$  com variação da profundidade. Ambos os parâmetros permitiram distinguir de forma clara regiões afetadas por contaminantes.

Num estudo realizado no aterro sanitário municipal de Creta (Grécia), Soupios *et al.* (2007) obtiveram sucesso na aplicação da técnica de tomografia elétrica combinada a medidas de microtremores naturais (HVSr - horizontal to vertical spectral ratio). Valores de resistividade elétrica extremamente elevada indicam a presença de cavidade no substrato cárstico do aterro, ao passo que intervalos bastante baixos para os padrões da área indicam zonas contaminadas. Os resultados de microtremores foram úteis essencialmente na detecção de cavidades cársticas, além de sua correlação com intervalos altamente resistivos nas seções.

A combinação das técnicas geofísicas de sondagem elétrica vertical contínua, radar de penetração no solo e *Very Low Frequency* (VLF) identificam claramente a distribuição de zonas de baixa condutividade elétrica em solo e na rocha subjacente no aterro sanitário Tveta (Suécia), segundo Olofsson *et al.* (2006). Análises químicas na água subterrânea do aterro indicam elevada quantidade de sais dissolvidos, que confirmam a suposta composição eletrolítica do nível freático a partir dos dados geofísicos.

### 3 – LOCALIZAÇÃO E DESCRIÇÃO DA ÁREA DE ESTUDOS

O aterro municipal de Cordeirópolis está localizado no km 4,5 da Rodovia Cássio de Freitas Levi, Estado de São Paulo, Brasil (Figura 1).

O município de Cordeirópolis possui cerca de 17 000 habitantes, cuja economia está baseada na produção de pisos cerâmicos e cultivo de cana de açúcar, com produção atual de lixo de  $7m^3/dia$ . O sistema de operação do aterro municipal consiste na abertura de valas com 5m de profundidade por 4m de largura e 80m de comprimento, abertas na direção NW/SE, para deposição de resíduos diretamente sobre o solo e posterior recobrimento com 1m de solo. Possui  $48\ 400m^2$  de área disponível e início das atividades em novembro de 2001, com vida útil estimada em 20 anos.

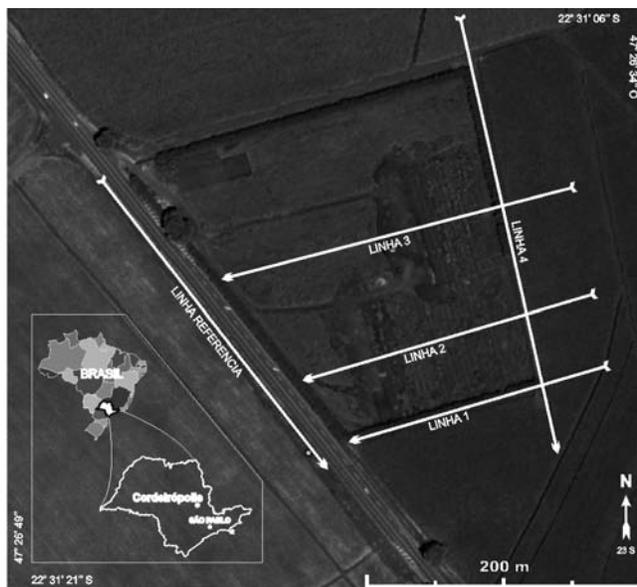
A topografia da área do aterro é bastante plana, com altitude entre 660m e 559m e declive médio de 0,5% sentido sudeste. O substrato é constituído por solo argiloso com 10m de espessura, sobre um corpo de diabásio fraturado com 15m de espessura. Abaixo de 25m de profundidade ocorrem arenitos finos e siltitos pertencentes à Formação Tatuí. O aterro é cercado por fazendas de cultivo de cana de açúcar.

O nível freático está situado a uma profundidade média de 50m, determinada por meio de sondagens elétricas verticais, com fluxo d'água subterrânea para sudeste. Distante 500m do aterro em sentido sudeste, ocorre um pequeno córrego na cota 600m.

Não existem poços de monitoramento ou quaisquer outras formas ou procedimentos de monitoramento implantados até o momento na área do aterro ou adjacências.

### 4 – MÉTODO

A aquisição de dados geofísicos utilizou a técnica de Caminhamento Elétrico, por meio do arranjo dipolo-dipolo. Este arranjo consiste na instalação de pares de eletrodos metálicos ao longo



**Fig. 1** – Área de estudos, com posição das linhas de levantamento geofísico.

da linha de investigação, para transmissão de corrente elétrica e geração de campo elétrico em profundidade, e posterior leitura por meio de pares de eletrodos de recepção (Orellana, 1972). A disposição de forma adequada dos pares de eletrodos de corrente e potencial permite leituras de resistividade elétrica para diversos níveis de profundidade na linha investigada. Este trabalho aplicou o arranjo dipolo-dipolo com 5m de espaçamento entre eletrodos e leituras de resistividade em 8 níveis de profundidade.

Na área estudada foram realizadas 5 linhas de caminamento elétrico (Figura 1). As linhas 2 e 3 cruzam as cavas de resíduos enterrados, enquanto que as linhas 1 e 4 estão localizadas nos limites da área. A linha referência está disposta em uma área a montante do fluxo d'água subterrânea e separada da área do aterro pelo talude de implantação da rodovia que cruza a área (Figura 1), com o objetivo de determinar os valores naturais de resistividade em diversos níveis no terreno para sua posterior comparação com as linhas que eventualmente sofrem influência de contaminantes provenientes do aterro.

O equipamento utilizado foi o resistímetro Terrameter SAS 4000, fabricado pela ABEM Instrument AB (Suécia), com resolução de 1 $\mu$ V. Este equipamento é calibrado para medidas de resistividade por meio de ciclos periódicos de corrente elétrica alternada e de baixa frequência, procedimento que permite a filtragem de ruídos do sinal adquirido. A razão V/I, ou seja, potencial (V) pela corrente (I) transmitida, permite leituras diretas de resistência elétrica em ohms ( $\Omega$ ). A resistência associada ao fator K, que representa o espaçamento dos eletrodos em superfície, resulta no parâmetro resistividade elétrica  $\rho$  ( $\Omega$ .m) (equação 1):

$$\rho = K \frac{\Delta V}{I} \quad (1)$$

## 5 – APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS

Os dados foram processados no *software* RES2DINV (Loke e Barker, 1996; Loke, 1998), apresentados sob a forma de seções distância  $\times$  profundidade. Os intervalos de resistividade apresentados nas seções foram definidos pela linha referência (Figura 2), calibrada por descrições geológicas realizadas no talude da rodovia.

Este talude apresenta formação de solo vermelho-escuro por alteração da rocha subjacente, sem estruturas ou elementos de transporte. O intervalo entre  $30\Omega.m$  e  $200\Omega.m$  varia entre 0m e 2m de profundidade, é representado por solo argiloso com matéria orgânica (horizonte A e A/B). O intervalo entre  $200\Omega.m$  e  $2000\Omega.m$ , varia de 2m a 6m de profundidade e define um horizonte de solo argiloso estruturado e com fraturas verticais (horizonte B). O intervalo entre  $2000\Omega.m$  e  $10\ 000\Omega.m$  varia entre 6m e 8m de profundidade e representa um solo argiloso com fragmentos arredondados de rocha bastante alterados (horizonte C/R). Acima de  $10\ 000\Omega.m$  e entre 8m e 10m de profundidade ocorrem fragmentos de rocha parcialmente alterados (horizonte R).

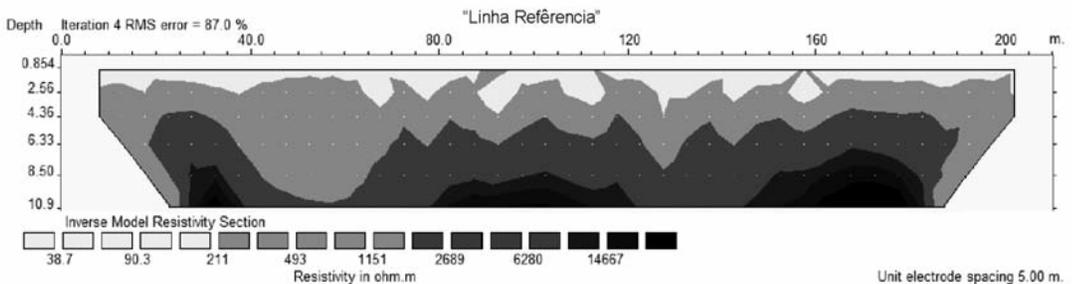


Fig. 2 – Linha referência, com profundidade e distância na superfície em metros e resistividade em  $\Omega.m$ .

Inicialmente são discutidas as linhas 2 e 3, que cruzam as cavas de resíduos e apresentam valores de resistividade bastante baixos (Figuras 3 e 4). A primeira cava é cruzada a 50m do início de ambas as linhas, sendo os primeiros 50m utilizados para o cultivo de cana de açúcar. A linha 2 cruza um total de 160m de cavas com resíduos, entre 50m e 210m em sua extensão (Figura 3). A linha 3 cruza um total de 130m de cava com resíduos, entre 50m e 180m em sua extensão (Figura 4).

Ambas as linhas apresentam valores de resistividade inferiores a  $30\Omega.m$ , abaixo do valor mínimo descrito na linha referência (Figura 2). Estes intervalos estão posicionados entre 4m e 8m de profundidade, são pontuais e aparentemente desconexos (Figuras 3 e 4).

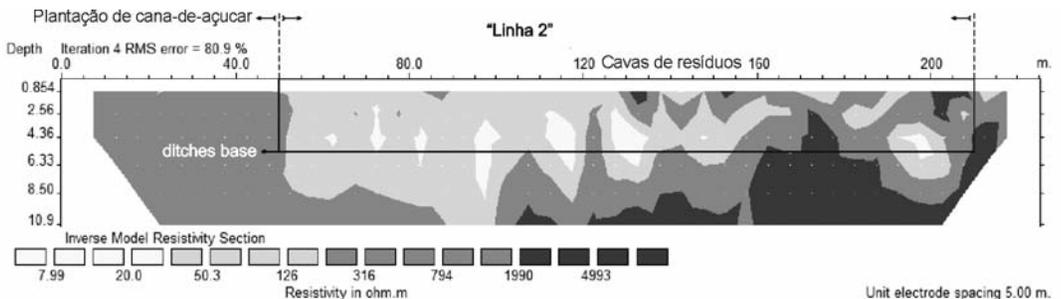


Fig. 3 – Linha 2, com profundidade e distância na superfície em metros e resistividade em  $\Omega.m$ .

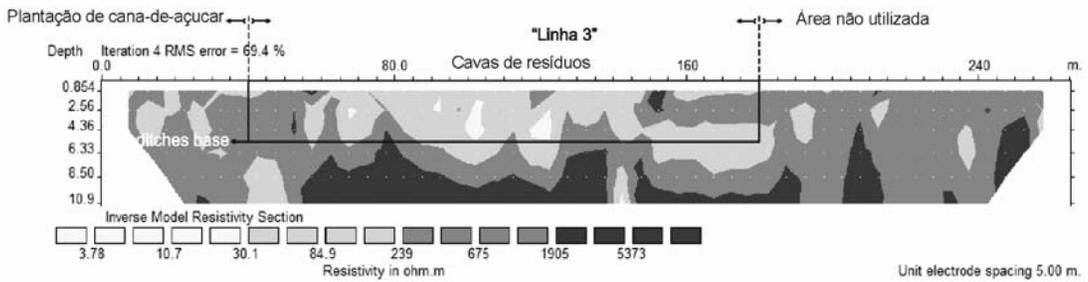


Fig. 4 – Linha 3, com profundidade e distância na superfície em metros e resistividade em  $\Omega.m$ .

O intervalo entre  $2000\Omega.m$  e  $10\ 000\Omega.m$  é predominante na porção basal das seções, abaixo dos 5m de profundidade na linha 3 e desde os 2,5m até a base da linha 2. Em ambas as seções não existem valores de resistividade superiores a  $10\ 000\Omega.m$ .

A linha 1 também apresenta valores de resistividade inferiores a  $30\Omega.m$ , em pontos localizados a 6m de profundidade, num intervalo entre 35m e 65m de sua extensão (Figura 5). A partir de 4m de profundidade até a base da seção em entre 10m e 115m, predominam valores de resistividade entre  $30\Omega.m$  e  $200\Omega.m$ , com áreas localizadas entre 130m e 150m a mesma profundidade. O intervalo entre  $2000\Omega.m$  e  $10\ 000\Omega.m$  é restrito a uma área entre 35m 45m e na base da seção, ausentes valores superiores a  $10\ 000\Omega.m$  (Figura 5).

O intervalo entre  $30\Omega.m$  e  $200\Omega.m$  apresenta continuidade lateral, predominantemente entre 50m e 205m de extensão e da superfície a base na seção na linha 2 e entre 10m e 185m na linha 3 e desde a superfície até 8m de profundidade, em contraste com a linha referência, em que este intervalo ocorre por toda extensão da seção mas somente até 2m de profundidade (Figura 2). O intervalo entre  $200\Omega.m$  e  $2000\Omega.m$  também ocorre em ambas as seções em profundidades superiores as descritas na linha referência.

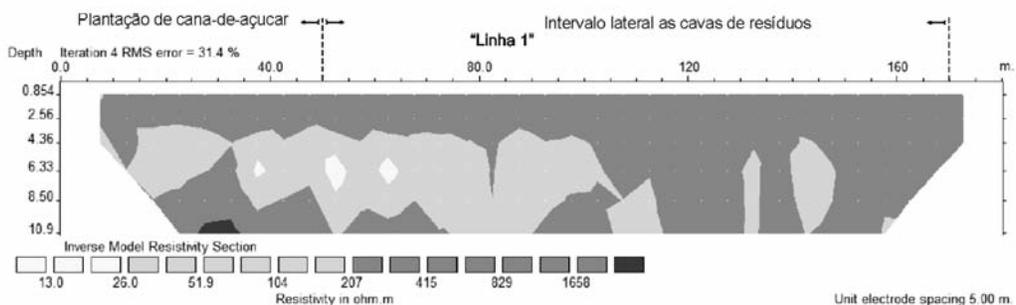


Fig. 5 – Linha 1, com profundidade e distância na superfície em metros e resistividade em  $\Omega.m$ .

A linha 4 apresenta os mesmos intervalos de resistividade descritos na linha referência, ou seja, não apresenta valores de resistividade inferiores a  $30\Omega.m$  (Figura 6). O intervalo de resistividade entre  $30\Omega.m$  e  $200\Omega.m$  ocorre em áreas desconexas e predomina entre 140m e 290m em sua extensão, com início a 4m de profundidade até a base da seção. Os valores entre  $200\Omega.m$  e  $2000\Omega.m$  ocorrem em toda extensão da seção, desde a superfície até a base. O intervalo entre  $2000\Omega.m$  e  $10\ 000\Omega.m$  também ocorre em áreas desconexas por toda extensão, com ocorrência de valores superiores a  $10\ 000\Omega.m$  apenas em áreas restritas (Figura 6).

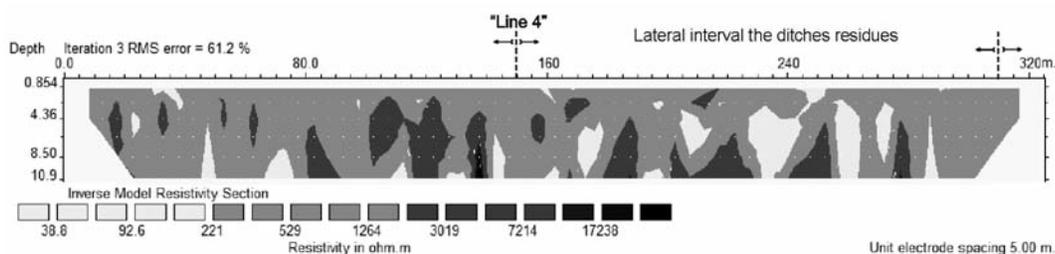


Fig. 6 – Linha 4, com profundidade e distância na superfície em metros e resistividade em  $\Omega.m.$ .

## 6 – DISCUSSÃO

A ausência de valores de resistividade inferiores a  $30\Omega.m$  na linha referência e a ocorrência desta faixa de valores nas linhas 1, 2 e 3 indica a presença de compostos que não estão presentes no ambiente natural. A ocorrência deste intervalo de resistividade entre 2m e 8m de profundidade indica sua relação com a cava de resíduos, escavada e preenchida até 5m de profundidade.

A ocorrência do intervalo de resistividade de  $30\Omega.m$  a  $200\Omega.m$  em diversas profundidades nas seções, em contraste com a ocorrência deste intervalo apenas até 2m de profundidade na linha referência, também indica a presença de compostos que reduzem a resistividade do solo e não estão presentes no ambiente natural. A limitação deste intervalo de resistividade ao intervalo de ocorrência das cavas de resíduos também é um indicativo de sua relação com os resíduos sólidos enterrados.

O produto líquido gerado durante o processo de decomposição da matéria orgânica contida nos resíduos, denominado chorume, é caracterizado pelo enriquecimento em sólidos totais dissolvidos. Sua presença no meio físico é definida por baixos valores de resistividade elétrica, diante da facilidade no trânsito de corrente elétrica (Knödel *et al.*, 2007).

Além dos limites da área de influência do aterro, a quantidade de sólidos totais dissolvidos (STD) e a condutividade elétrica apresentam valores intrínsecos aos do ambiente natural (Bennett e Siegel, 1987). A condutividade elétrica pode ser medida em termos de STD, devido à associação do íon cloreto como indicador conservativo da presença de chorume em amostras de água (Baedecker e Apgar, 1984). O trabalho de Bell e Jermy (1995), dentre muitos outros, descreve a relação direta entre decréscimo de STD e da condutividade elétrica com o distanciamento do aterro.

A linha 1 está lateralmente distante cerca de 3m das cavas de resíduos cruzadas pela linha 2 (Figura 1), e apresenta os intervalos de resistividade associados a cava de resíduos descritos nas seções 2 e 3. Inclusive nesta linha, o intervalo de resistividade de  $30\Omega.m$  a  $200\Omega.m$  está presente numa área ausente de cavas de resíduos, ou seja, entre 0m e 50m, à semelhança ao que ocorre na linha 3 (Figura 4).

A ocorrência deste intervalo de resistividade na segunda metade da linha 4 (Figura 6) indica conexão com a cava de resíduos, visto que entre 150m e 280m esta linha dista 5m das cavas de resíduos cruzadas pelas linhas 2 e 3 (Figura 1).

A ocorrência de valores de resistividade abaixo de  $200\Omega.m$  nas linhas externas ao aterro indica que o contaminante ultrapassa os limites da área. A presença de valores de resistividade abaixo de  $200\Omega.m$  em profundidades superiores a 2m nas linhas 1 e 4 indica que o fluxo de contaminantes é no sentido Sudeste.

A correlação entre anomalias de baixa resistividade em áreas de aterro, apresentada em diversos trabalhos de aplicação de métodos elétricos e a elevada quantidade de sólidos totais dissolvidos (STD) que caracteriza o contaminante proveniente da degradação de resíduos sólidos, permite afirmar que as anomalias de baixa resistividade no intervalo entre  $30\Omega.m$  e  $200\Omega.m$  definem áreas

impactadas por contaminantes (Mondelli *et al.*, 2007; Lago *et al.*, 2009; Santos *et al.*, 2009; Bortolin e Malagutti Filho, 2010).

## 7 – CONCLUSÕES

Na ausência de poços de monitoramento ou outras técnicas diretas de investigação na área do aterro, a caracterização geológica em conjunto com a aplicação de técnicas geofísicas podem ser uma alternativa para caracterização e monitoramento de materiais lixiviados.

Devido à necessidade em determinar os teores de material lixiviado, principalmente nas áreas de baixa resistividade, análises químicas em amostras de solo e água subterrânea são indispensáveis. Portanto, técnicas indiretas de investigação devem ser aplicadas de forma complementar em estudos ambientais, seja para caracterização inicial de áreas contaminadas, determinação de áreas anômalas ao parâmetro físico estudado ou no monitoramento de áreas comprovadamente contaminadas.

Elevadas quantidades de STD associado a plumas de contaminação provenientes de aterro e seu comportamento no ambiente geológico, caracterizado como condutor elétrico contrastante em relação ao ambiente natural, permitiram sua detecção por meio do método da Eletroresistividade.

A realização de ensaios geofísicos apenas sobre as cavas de resíduos ou nos limites da área do aterro não permitiu definir intervalos anômalos de resistividade. A comparação destes ensaios com os padrões de resistividade naturais ao ambiente geológico, por meio da linha referência, permitiu a definição de intervalos de baixa resistividade e sua associação à presença de materiais lixiviados de resíduos sólidos.

A adoção de linha de referência, disposta em área próxima mas não influenciada por fluxo proveniente do aterro, é necessário devido a ausência de padrões de resistividade elétrica que permitam claramente estipular zonas com enriquecimento em chorume. Embora trabalhos de aplicação de Eletroresistividade em aterros demonstrem que valores de resistividade elétrica abaixo de  $200\Omega.m$  podem ser associados a áreas com acúmulo de chorume (Mondelli *et al.*, 2007; Lago *et al.*, 2009; Santos *et al.*, 2009; Bortolin e Malagutti Filho, 2010), fatores como umidade, porosidade e composição mineralógica do solo são particularidades locais que influenciam de forma considerável os valores resultantes deste tipo de investigação.

Neste sentido, a detecção de valores de resistividade elétrica abaixo de  $200\Omega.m$  em profundidades correspondentes ao intervalo de resíduos e abaixo das valas, concomitante a ausência deste padrão na linha de referência, são fatores que permitem afirmar a influencia de chorume percolado provenientes da decomposição da matéria orgânica contida nos resíduos enterrados.

## 8 – AGRADECIMENTOS

Este trabalho foi realizado com apoio da CAPES – Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior. Agradecemos ao técnico Francisco Manoel Garcia Barrera e ao Sr. Carlos Aparecido Moreira pelo auxílio na aquisição de dados.

## 9 – REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT (1989). *NBR 10703: Degradação do Solo*. Rio de Janeiro, 41 p.

Aristodemou, E.; Thomas-Betts, A. (2000). *DC resistivity and induced polarization investigations at waste disposal sites and its environments*. *Journal of Applied Geophysics*, vol. 44, pp. 275-302.

- Baedecker, M. J.; Apgar, M. A. (1984). *Hydrogeochemical studies at a landfill in Delaware*. Groundwater Contamination, National Academic Press, Washington, pp. 127-138.
- Bagchi, A. (1987). *Natural attenuation mechanisms of landfill leachate and effects of various factors on the mechanism*. Waste Management Research, no. 5, pp. 453-464.
- Bell, F. G.; Jermy, C. A. (1995). *A seepage problem associated with an old landfill in the greater Durban area*. In: Sarsby, R. W. (Ed.), Waste Disposal by Landfill – GREEN'93, A. A. Balkema, Rotterdam, pp. 607-614.
- Bennett, P.; Siegel, D. I. (1987). *Increased solubility of quartz in water due to complexing by organic compounds*. Nature, vol. 326, pp. 684-686.
- Birks, J.; Eyles, C. A. (1997). *Leachate from landfill along the Niagara Escarpment*. In: Eyles, N. (Ed.), Environmental Geology of Urban Areas. Geological Association of Canada, Canada, pp. 347-363.
- Bortolin, J. R. M.; Malagutti Filho, W. (2010). *Método da Eletroresistividade aplicado no monitoramento temporal da pluma de contaminação em área de disposição de resíduos sólidos urbanos*. Engenharia Sanitária e Ambiental, vol. 15, pp. 367-374.
- Carpenter, P. J.; Kaufmann, R. S.; Price, B. (1990). *Use of resistivity soundings to determine landfill structure*. Ground Water, vol. 28, pp. 569-575.
- CETESB – Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental (2005). *Inventário estadual de resíduos sólidos domiciliares: relatório de 2005*. Coord. Novaes Júnior, A. C. & Neto, A. S., São Paulo, 95 p.
- Christensen, T. H.; Kjeldsen, P.; Albrechtsen, H. J.; Heron, G.; Nielsen, P. H.; Bjerg, P. L.; Holm, P. E. (1994). *Attenuation of landfill leachate pollutants in aquifers*. Critical Review in Environmental Science and Technology, no. 24, pp. 119-202.
- Farquhar, G. J. (1989). *Leachate: production and characterisation*. Canadian Journal of Civil Engineering, n° 16, pp. 317-325.
- Frohlich, R. K.; Fisher, J. J.; Summerly, E. (1996) *Electric-hydraulic conductivity correlation in fractured crystalline bedrock: Central Landfill, Rhode Island, USA*. J. Applied Geophysics, n° 35, pp. 249-259.
- IPT/CEMPRE (2000). *Lixo Municipal: manual de gerenciamento integrado*. 2ª ed., São Paulo, 234p.
- Knödel, K.; Lange, G.; Voigt H. (2007). *Environmental Geology Handbook of Field Methods and Case Studies*. Springer, Berlin.
- Lago, A. L.; Elis, V. R.; Borges, W. R.; Penner, G. C. (2009). *Geophysical investigation using resistivity and GPR methods: a case study of a lubricant oil waste disposal area in the city of Ribeirão Preto, São Paulo, Brazil*. Environmental Geology, vol. 58, pp. 407-417.
- Loke, M. H.; Barker, R. D. (1996). *Rapid least-squares inversion of apparent resistivity pseudosections by a quasi-Newton method*. Geophysical Prospecting, n° 44, pp. 131-152.
- Loke, M.H. (1998). RES2DINV v. 3.53, Rapid 2D Resistivity & IP Inversion using the Least-square method.

- Meju, M. A. (2000). *Geoelectrical investigation of old/abandoned, covered landfill sites in urban areas: model development with a genetic diagnosis approach*. Journal of Applied Geophysics, vol. 44, pp.115-150.
- Mondelli, G.; Giacheti, H. L.; Boscov, M. E. G.; Elis, V. R.; Hamada, J. (2007). *Geoenvironmental site investigation using different techniques in a municipal solid waste disposal site in Brazil*. Environmental Geology, vol. 52, pp. 871-887.
- Olofsson, B.; Jernberg, H.; Rosenqvist, A. (2006). *Tracing leachates at waste sites using geophysical and geochemical modelling*. Environmental Geology, no. 49, pp. 720-732.
- Orellana, E. (1972). *Prospeccion Geoelectrica en Corriente Continua*. Biblioteca Técnica Philips, Paraninfo, Madrid.
- Santos, A. A.; Shiraiwa, S.; Silvino, A. N. O.; Silva, W. P. S.; Silva, N. A.; Silveira, A.; Migliorini, R. B. (2009). *Comparação entre a investigação direta da água subterrânea e Radar de Penetração no Solo (GPR) na área do aterro sanitário de Cuiaba (MT)*. Revista Brasileira de Geociências. vol. 39, n°4, pp. 768-722.
- SMA - Secretaria do Meio Ambiente do Estado de São Paulo (2005). *Procedimentos para implantação de Aterro Sanitário em Vala*. São Paulo.
- Soupios, P. M.; Kouli, M.; Vallianatos, F.; Vafidis, A.; Stavroulakis, G. (2007). *Estimation of aquifer hydraulic parameters from surficial geophysical methods: a case study of Keritis Basin in Chania (Crete – Greece)*. Journal of Hydrology, n° 338, pp. 122-131.