

## DEGRADAÇÃO DE RESÍDUOS E ALTERAÇÕES NA RESISTIVIDADE ELÉTRICA, pH E Eh

César Augusto Moreira<sup>1</sup>, Antonio Celso de Oliveira Braga<sup>2</sup> e Maximilian Fries<sup>1</sup>

Recebido em 31 março, 2008 / Aceito em 17 abril, 2009  
Received on March 31, 2008 / Accepted on April 17, 2009

**ABSTRACT.** DC resistivity combined with pH and Eh measured in soil samples, were used for evaluation of the geochemical behavior of buried solid waste, during the degradation process of organic matter. The studied area is a controlled landfill, characterized by the disposition of domestic waste in ditches, of which closed ditches were selected among 12/2001 to 12/2007. The presence of values below  $30\Omega\cdot m$  in the lines obtained on the ditches and the absence of this value range in the reference line, suggest the leachate presence. The time correlation between pH and Eh can indicate the geochemical predominant conditions, which govern the solubility or precipitation of ions, consequently, the electric resistivity pattern. The pattern described for the closed ditches between 2005 and 2007 can indicate growing leachate production. The obtained data for the 2004 ditch suggest initial processes of geochemical instability, with relative increase of the electric resistivity probably associated to the ions precipitation, whose evolution results in the pattern described for the 2003 ditch. The retaking of the decomposition process of organic residues is evidenced by high and low resistivity value and pH and Eh increase, for the 2001 and 2002 ditches.

**Keywords:** waste, landfill, leachate, monitoring, electrical resistivity.

**RESUMO.** Medidas de resistividade elétrica, combinadas com medidas pH e Eh em amostras de solo, foram utilizadas para avaliação do comportamento geoquímico de resíduos sólidos enterrados, durante o processo de degradação de matéria orgânica. A área estudada é um aterro controlado, caracterizado pela disposição de resíduos sólidos domiciliares em valas, das quais foram selecionadas valas fechadas entre 12/2001 a 12/2007. A presença de valores abaixo de  $30\Omega\cdot m$  nas linhas realizadas sobre as valas e a ausência desta gama de valores na linha de referência, sugerem a presença de chorume. A correlação temporal entre pH e Eh pode indicar as condições geoquímicas predominantes, que governam a solubilidade ou precipitação de íons e, conseqüentemente, o padrão de resistividade elétrica. O padrão descrito para as valas fechadas entre 2005 e 2007 pode indicar produção crescente de chorume. Os dados obtidos para a vala de 2004 sugerem processos iniciais de instabilidade geoquímica, com aumento relativo da resistividade elétrica provavelmente associada à precipitação de íons, cuja evolução resulta no padrão descrito para a vala de 2003. A retomada do processo de decomposição de resíduos orgânicos é evidenciada pela presença de intervalos de alta e baixa resistividade e pelo aumento do pH e Eh, para as valas de 2001 e 2002.

**Palavras-chave:** lixo, aterro, chorume, monitoramento, resistividade elétrica.

---

<sup>1</sup>Universidade Federal do Pampa, UNIPAMPA, Campus Caçapava do Sul, Rua Rui Vieira Machado, s/n, Bairro Floresta, 96570-000 Caçapava do Sul, RS, Brasil. – E-mails: cesargeologia@yahoo.com.br; maximilianfries@unipampa.edu.br

<sup>2</sup>Universidade Estadual Paulista, UNESP, Campus Rio Claro, Av. 24-A, 1515, Bela Vista, Caixa Postal 178, 13506-900 Rio Claro, SP, Brasil. – E-mail: acobraga@rc.unesp.br

## INTRODUÇÃO

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

O acompanhamento e monitoramento das contaminações eventualmente presentes requerem a detecção, caracterização 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 de 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 a avaliação diante das descontinuidades intrínsecas ao ambiente geológico, muitas vezes, dificulta sua interpretação.

A aplicação dos métodos geofísicos em estudos ambientais, essencialmente na caracterização e monitoramento de áreas impactadas por contaminantes, é crescente diante da demanda de novas técnicas de investigação ambiental. A possibilidade de aquisição de dados em larga escala a um custo relativamente baixo, além da vantagem de produtos 1D, 2D e 3D, permite uma avaliação mais adequada do ambiente, principalmente quando integrado a resultados diretos de investigação.

Alterações no processo de aeração em perfis de solo podem afetar drasticamente o conteúdo e a proporção de elementos químicos. Mudanças adicionais em sua estrutura podem criar zonas onde a difusão de oxigênio é restrita, tais como pequenos canais ou poros com água no interior de agregados, que resulta em consumo de oxigênio mais acentuado, em relação ao oxigênio sob a forma gasosa.

Os principais materiais que constituem o lixo doméstico são resíduos orgânicos (restos de frutas, legumes, vegetais, carnes, cereais, etc.), papéis, plásticos, latas, tecidos, madeira, dentre outros.

Em zonas onde o acesso de ar é mais eficiente, a decomposição de resíduos orgânicos é facilitada, cuja intensificação resulta na queda dos níveis de oxigênio e aumento da acidez resultante da geração de chorume. Medidas de potencial redox (Eh) e potencial hidrogeniônico (pH), portanto, representa uma alternativa para avaliação de estados de oxidação/redução e acidez/alcalinidade em áreas contaminadas.

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 à baixa resistividade elétrica associada a planos de fratura. A correlação linear inversa entre condutividade hidráulica e resistividade elétrica das camadas estudadas, sugerem 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 cargabilidade por Aristodemou & Thomas-Betts (2000), revelam aumento nos valores de cargabilidade 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 aumento da profundidade. Ambos os parâmetros permitiram distinguir de forma clara, regiões afetadas por contaminantes.

Delimitar plumas de contaminação a partir da definição de frentes de oxidação/redução pode ser uma técnica auxiliar em avaliações geoquímicas. Naudet et al. (2003, 2004) utilizam o método de potencial espontâneo concomitante a medidas de Eh, no estudo da evolução de uma pluma de contaminação proveniente do aterro sanitário Entressen – França. Os resultados indicam que o potencial espontâneo decresce progressivamente na zona aeróbica, aumenta drasticamente na frente de oxidação/redução e finalmente alcança o padrão da área de estudos ao atingir a zona de oxidação. Há uma correlação em perfil entre potencial espontâneo negativo e medidas Eh, com geração de potencial elétrico por processos de oxidação/redução da matéria orgânica contida nos resíduos.

Este trabalho apresenta os resultados da aplicação do método da eletrorresistividade, por meio da técnica de caminhamento elétrico, concomitante a coleta de solo de cobertura da interface solo/lixo para realização de medidas de pH e Eh, num aterro de resíduos sólidos domiciliares do tipo vala. Foram selecionadas valas fechadas entre 12/2001 e 12/2007, com o objetivo de verificar a relação entre degradação de resíduos orgânicos e a variação nos parâmetros físicos medidos.

## CARACTERÍSTICAS DE CONTAMINANTES PROVENIENTES DE ATERROS DE RESÍDUOS SÓLIDOS

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

**Tabela 1** – Variações típicas nas concentrações de chorume relacionadas com a idade do resíduo (Farquhar, 1989; Birks & Eyles, 1997) (valores em mg/l).

Parâmetro	Idade do resíduo			
	0–5 anos	5–10 anos	10–20 anos	>20 anos
STD	10000–25000	5000–10000	2000–5000	>1000
pH	5–6	6–7	7–7,5	7,5
DBO	10000–25000	1000–4000	50–100	<50
DQO	15000–40000	10000–20000	1000–5000	<1000
N Amoniacal	500–1500	300–500	50–200	<30
P total	100–300	10–100		<10
Cloreto	1000–3000	500–2000	100–500	<100
Sulfato	500–2000	200–1000	50–200	<50
Cálcio	2000–4000	500–2000	300–500	<500
Sódio + Potássio	2000–4000	500–1500	100–500	<100
Magnésio + Ferro	500–1500	500–1000	100–500	<100
Zinco + Alumínio	100–200	50–100	10–50	<10
Alcalinidade	10000–15000	1000–6000	500–2000	<500

- 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 compostos 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 frequentemente 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 (Tab. 1).

O material lixiviado contém substâncias tóxicas e perigosas em formas sólida e gasosa e podem 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 geralmente aumenta com o tempo, pois formas ácidas iniciais tendem a estados neutralizados, com decréscimo da demanda de oxigênio químico e biológico (Tab. 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 em água subterrânea, nos aquíferos de elevada permeabilidade e 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).

#### 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 (Fig. 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 em 6m<sup>3</sup>/dia.

A área de estudos é um aterro controlado do tipo vala, para deposição apenas de resíduos sólidos domiciliares. O sistema de operação consiste na abertura de valas com 5m de profundidade por 4m de largura e 80m de comprimento, para deposição de resíduos diretamente sobre o solo e posterior recobrimento com 1m de solo. Possui 48.400m<sup>2</sup> de área disponível e início das atividades em novembro de 2001, com vida útil estimada em 20 anos.

As valas selecionadas para estudo apresentam dimensões semelhantes e receberam volumes semelhantes de resíduos sólidos domiciliares. Durante o período compreendido entre o fechamento da primeira e da última vala selecionada, ou seja, entre

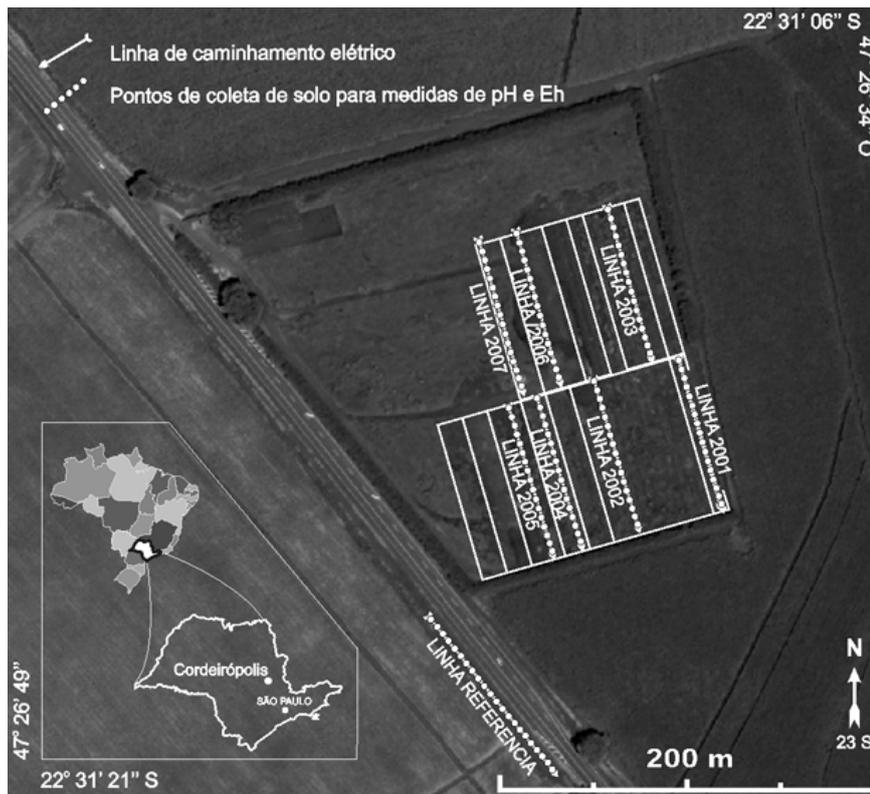


Figura 1 – Área de estudos.

12/2001 e 12/2007, ocorreu um pequeno aumento no volume de lixo gerado pelos municípios. Entretanto, devido à preservação dos hábitos de consumo da população durante o período, é presumível que o volume de resíduos orgânicos tenha se mantido proporcionalmente constante e que, portanto, seja possível a realização de análises temporal de parâmetros físicos influenciados pela decomposição de resíduos orgânicos.

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, com fluxo d'água subterrânea para sudeste. Distante 500m do aterro em sentido sudeste, ocorre um pequeno córrego na cota 600m.

## MÉTODO

Foi adotada a técnica de caminhamento elétrico para aquisição dos dados para as medidas de resistividade elétrica, por meio

do arranjo dipolo-dipolo. Este arranjo consiste na instalação de pares de eletrodos metálicos ao longo da linha de investigação, para transmissão de corrente elétrica e geração de campo elétrico em profundidade (eletrodos de corrente), e posterior leitura por meio de pares de eletrodos de recepção (eletrodos de potencial) (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 utilizou 5m de espaçamento entre eletrodos, leituras de resistividade em 8 níveis de profundidade em linhas com 80m de extensão.

Foram realizadas 8 linhas de caminhamento elétrico entre novembro e dezembro de 2007, divididas entre linha de referência e linhas em valas com data de fechamento (Fig. 1). A linha de referência objetiva determinar os valores naturais de resistividade e está separada do aterro pelo talude de implantação da rodovia que cruza a área. As demais linhas foram realizadas em valas de resíduos com data de fechamento entre 12/2001 e 12/2007.

O equipamento utilizado foi o resistivímetro Terrameter SAS 4000, fabricado pela ABEM (Suécia), com resolução de  $1\mu\text{V}$ . Este equipamento é calibrado para medidas de resistividade por meio de ciclos periódicos de corrente elétrica alternada e de bai-

xa 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 medida é multiplicada pelo fator  $K$ , que representa o espaçamento dos eletrodos em superfície e resulta no parâmetro resistividade aparente (Eq. 1):

$$\rho = \frac{\Delta V}{I} \quad \Omega.m \quad (1)$$

Foram realizadas medidas de Eh e pH em amostras de solo coletadas em todos os pontos de leitura de resistividade, ou seja, ao longo das linhas de aquisição de dados geofísicos (Fig. 1).

O procedimento consistiu na perfuração do solo de cobertura das valas, coleta de solo de interface com os resíduos enterrados, pesagem das amostras e separação em porções com 20g, segundo EPA (2002).

O procedimento de leitura do pH e Eh consiste na mistura das amostras separadas em 20ml de água destilada, agitação contínua durante 1 minuto, seguida pela inserção de eletrodo de platina. A leitura foi realizada após 10 minutos, período necessário para estabilização dos valores.

Foi utilizado o equipamento PH-1500 em conjunto com eletrodo de ORP-897, ambos fabricados pela Instrutemp (Brasil). Este equipamento é capaz de realizar medidas de pH, Eh, sólidos totais dissolvidos e oxigênio dissolvido, seja em meio aquoso ou sólido, a partir da seleção dos eletrodos adequados. O eletrodo ORP-897 consiste num eletrodo de platina conjugado a um eletrólito de referência, constituído de cloreto de prata (Pt/AgCl), que permite leituras diretas de potencial de oxidação/redução em meio aquoso.

Os dados interpretados foram processados no *software* RES2DINV, apresentados sob a forma de seções distância  $\times$  profundidade (Figs. 2 e 3).

Os intervalos de resistividade foram definidos pela linha de referência invertida, correlacionável aos horizontes de solo presentes em exposição ao longo da rodovia de acesso ao aterro.

Em termos gerais, os modelos de inversão apresentam características semelhantes às respectivas pseudo-seções, ou seja, predomínio de baixa resistividade nas seções de 2004, 2005, 2006 e 2007, e predomínio de alta resistividade nas seções de 2001, 2002 e 2003 (Figs. 2 e 3).

As seções processadas apresentam elevado erro RMS, principalmente os modelos gerados a partir dos resultados obtidos nas valas de 2001, 2002, 2003 e 2004 (Fig. 3). Coincidentemente, os valores de resistividade medidos nestas valas apresentam variações extremas, com medidas entre  $2\Omega.m$  e  $9600\Omega.m$ . Embora num contraste menor de valores, as demais seções

também apresentam este comportamento (Fig. 2).

Sob este aspecto, atribuímos o elevado erro RMS das seções modeladas à ampla gama de valores de resistividade medidos, provavelmente resultantes da contaminação proveniente da decomposição dos resíduos orgânicos e da presença de diversos tipos de resíduos domiciliares enterrados.

Os dados de pH e Eh foram tabelados e são apresentados sob a forma de gráfico (Figs. 4 e 5). Os pontos correspondem aos valores medidos enquanto que as curvas representam a idade de fechamento da vala de resíduo amostrada. Os valores máximos, mínimos e a média por linha também são apresentados em gráfico (Fig. 6).

## APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS

Em termos gerais, nas seções referentes às valas fechadas entre 2004 e 2007 predominam valores de baixa resistividade, enquanto que para as seções de 2001 a 2003 são predominantes valores elevados de resistividade (Figs. 2 e 3).

Uma análise comparativa das seções permite afirmar a ocorrência de medidas de resistividade inferiores a  $30\Omega.m$  em todas as seções realizadas sobre as valas de resíduos (Fig. 2).

Estas áreas anômalas estão provavelmente associadas a zonas de concentração de chorume, produzido pela degradação de resíduos orgânicos, que migraram para a base das valas e permeiam o solo subjacente. As áreas com resistividade entre  $30\Omega.m$  e  $300\Omega.m$  podem indicar áreas parcialmente saturadas por chorume.

A ocorrência de valores de resistividade abaixo de  $300\Omega.m$  no intervalo de solo sob as valas de resíduos – entre 5m e 10m, pode indicar que o chorume possivelmente atinge a camada de diabásio sotoposta, caracterizado por juntas verticais e, provavelmente, atinge os siltitos da Formação Tatuí.

Os valores de Eh para a vala de 2007 são bastante semelhantes aos medidos na linha de referência, com extremos entre 197mV e 265mV. A vala de 2006 apresenta algumas medidas relativamente elevadas, tendência realçada para as valas de 2004 e 2005, caracterizadas por ampla variação e os valores médios mais elevados, com extremos entre 156mV e 354mV (Figs. 4 e 6).

Os dados de pH apresentam ampla variação, seja para medidas efetuadas numa mesma vala, seja para medidas comparadas entre valas. Entretanto, os valores para as valas de 2006 e 2007 apresentam certa estabilidade, com média das medidas próxima a 7 (Fig. 5).

O pH médio da vala de 2005 é o mais baixo em relação aos demais, próximo de 6,4. Ocorre um aumento progressivo dos valores médios da vala de 2005 para 2002, 2003 e 2004, culmi-

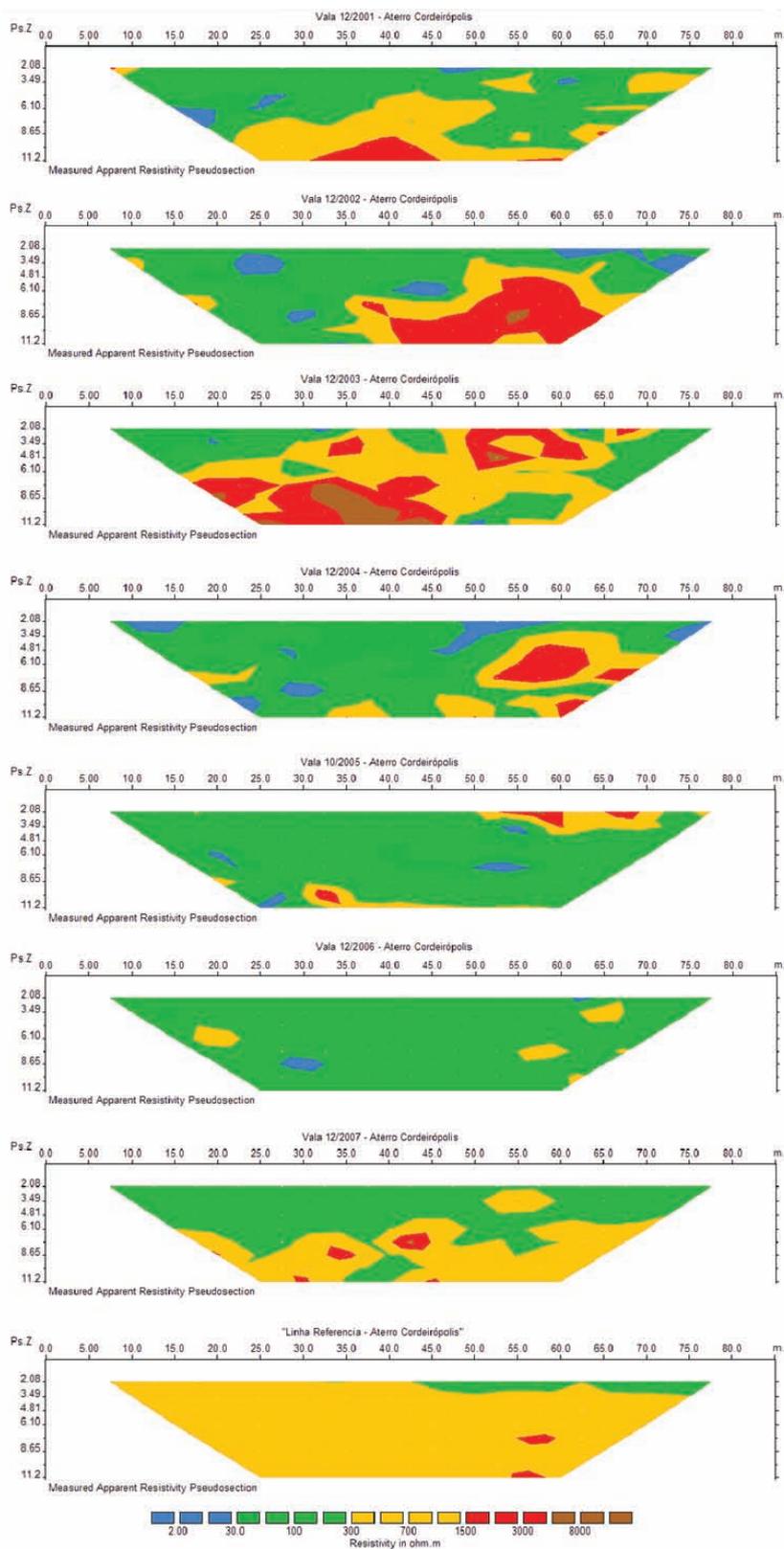


Figura 2 – Pseudo-seções de resistividade aparente medidas.

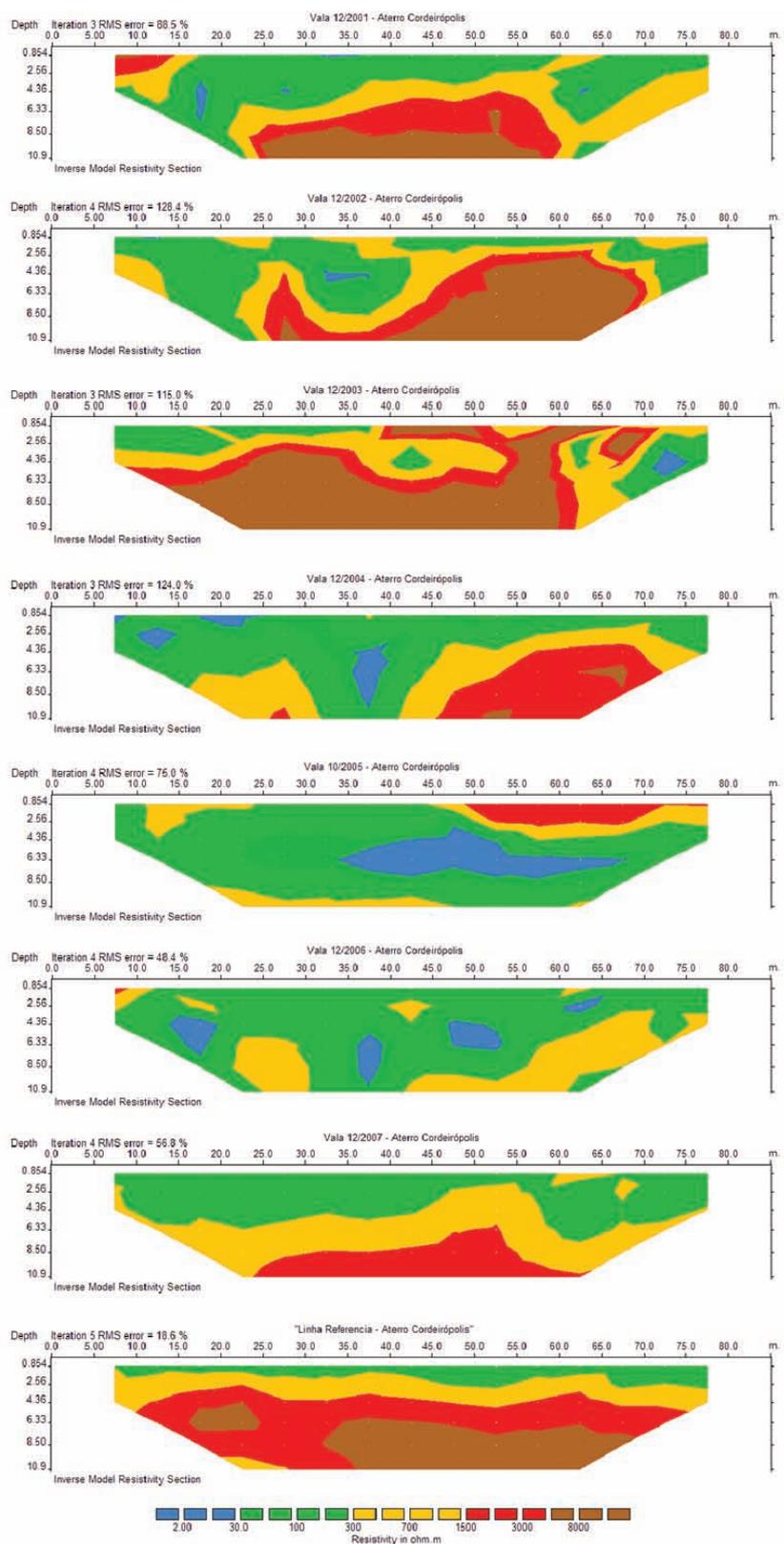


Figura 3 – Modelo de inversão de resistividade das seções.

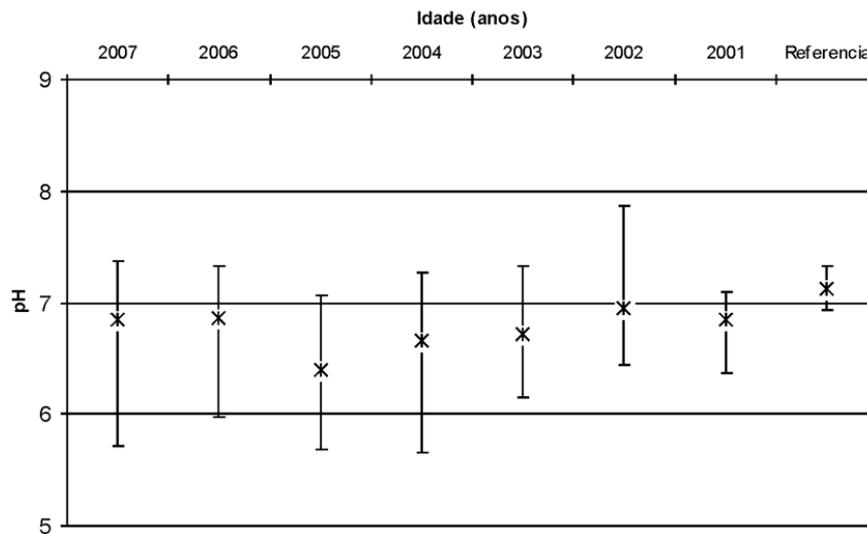


Figura 4 – Medidas de Eh.

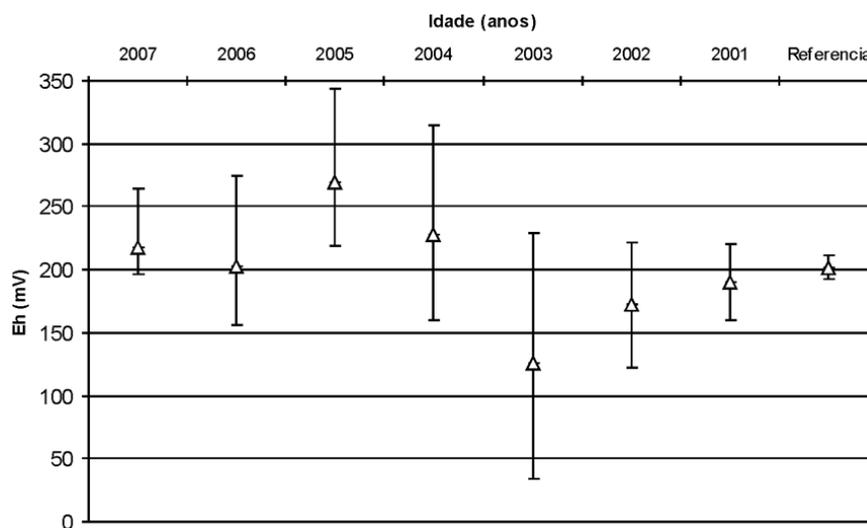


Figura 5 – Medidas de pH.

nando com média próxima a 7. Ocorre uma queda suave no valor médio para a vala de 2001 (Fig. 5).

## DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

A relação entre anomalias de baixa resistividade e elevadas quantidades de sólidos totais dissolvidos, característica de contaminantes provenientes da degradação de resíduos orgânicos (Tab. 1), é descrita em diversos trabalhos de aplicação de métodos elétricos (Cavalcanti et al., 2001; Silva et al., 2002; Shiraiwa et al., 2002; Gallas et al., 2005; Lago et al., 2006; Laureano & Shiraiwa, 2008). Desta forma, é possível apontar a ocorrência

de chorume nas valas de resíduos, principalmente nas áreas com valores abaixo de  $30\Omega.m$  e entre  $30\Omega.m$  e  $200\Omega.m$  (Fig. 2).

Embora os materiais para análise de pH e Eh tenham sido coletados na interface solo/lixo, ou seja, numa posição periférica ao corpo de resíduos sólidos, estes materiais apresentaram coloração marrom escuro a preto, contrastante ao solo vermelho-escuro coletado na linha de referência.

Esta característica aponta condições geoquímicas relativamente redutoras. Em termos gerais, as medidas de pH e Eh em amostras de solo sobre áreas contaminadas refletem o comportamento geoquímico dos contaminantes, contudo, de forma ate-

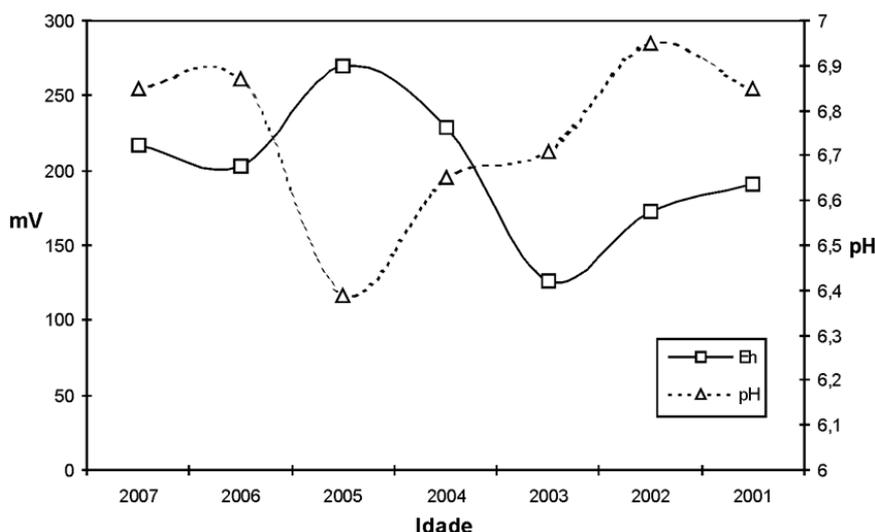


Figura 6 – Valores extremos e médios de Eh e pH.

nuada (EPA, 2002). Amostras obtidas em maiores profundidades nas valas provavelmente realçariam a tendência averiguada nos materiais de interface solo/lixo, pois seriam coletadas em ambiente relativamente mais redutor e mais ácido. Neste caso haveria o aumento na magnitude das medidas, mas com provável preservação nas tendências gerais de variação dos parâmetros.

A interpretação adequada do resultado geofísico requer o estabelecimento de correlações com parâmetros que avaliem o comportamento geoquímico do ambiente investigado, como o pH e Eh. A degradação de resíduos orgânicos é um processo dinâmico e variável temporal e espacialmente, caracterizado por fases ou estados sucessivos de alteração físico-química.

O trabalho de Farquhar & Rovers (1973) apresenta quatro fases de decomposição, determinados pelo acompanhamento da variação de concentrações dos gases, ácidos voláteis e celulose, complementado por Ress (1980) pelo acréscimo da 5ª fase:

- *Fase aeróbica*: essencialmente caracteriza pelo curto período de residência dos resíduos orgânicos, e elevada disponibilidade de oxigênio. O carbono é convertido em  $\text{CO}_2$  e o hidrogênio em  $\text{H}_2\text{O}$ , num processo que ocorrem durante poucas semanas. Início da geração de chorume.
- *Fase anaeróbica*: ocorre devido à queda no teor de  $\text{O}_2$  devido ao consumo na fase anterior, resulta em condições redutoras. A quebra de cadeias orgânicas produz compostos sucessivamente mais simples, como ácidos orgânicos e compostos iônicos. Grande produção de chorume, elevada acidez e alto teor de sais e elementos metálicos em solução.

- *Fase metanogênica instável*: resulta da diminuição na quantidade de água e  $\text{O}_2$  e combinação do hidrogênio com o  $\text{CO}_2$  em detrimento a outras formas ácidas, resulta na queda de produção de chorume e redução da acidez. Por conseqüência, inicia-se a precipitação de elementos anteriormente em solução.
- *Fase metanogênica estável*: caracterizada pela combinação de carbono e hidrogênio geração de grandes quantidades de  $\text{CH}_4$ , conversão de ácidos em compostos mais alcalinos e queda na saturação do ambiente. Ocorre drástica redução no teor de elementos em solução, via precipitação de sais e complexação e precipitação de espécies metálicas.
- *Fase regressiva*: ocorre escassez de matéria orgânica, com queda gradativa na produção de  $\text{CH}_4$  e  $\text{CO}_2$  e estabilização geoquímica do aterro. Novas incursões de oxigênio via fraturas de compactação ou infiltração de água de chuva, provocam o retorno a fases de degradação anteriores, até o completo consumo da matéria orgânica.

O padrão correlativo descrito para as linhas 2004, 2005, 2006 e 2007, com oxidação em áreas com predomínio de baixa resistividade, indica que a degradação de resíduos orgânicos está em atividade, ou seja, elevado consumo de oxigênio e liberação de íons por quebra de cadeias carbônicas ou dissolução de sais pelo estabelecimento de ambiente ácido. A seção de 2005 confirma este padrão, caracterizada pela ocorrência de predominantes de baixa resistividade e da menor média de pH em relação às demais seções.

Entretanto, o padrão correlativo descrito na linha 2003 provavelmente rompe o processo em curso nas valas de resíduos mais recentes. A relação entre queda no Eh, aumento no pH e alta resistividade pode indicar alterações geoquímicas renunciadas na linha 2004, onde ocorrem valores elevados de resistividade em relação às seções de 2005, 2006 e 2007.

O processo de consumo de matéria orgânica resulta na geração de ácidos orgânicos e liberação de íons (Tab. 1), que em parte são produtos diretos deste processo. Entretanto, a interação de ácidos orgânicos com materiais contidos nos resíduos sólidos ou nos constituintes minerais do ambiente geológico, pode também resultar na solubilização de íons no chorume.

A continuidade deste processo por longos períodos pode resultar na saturação do chorume em íons. O resultado é a desestabilização geoquímica do sistema e precipitação destes elementos.

Aparentemente este processo está em curso na linha 2003, pois o estabelecimento de condições relativamente redutoras apontadas pelas medidas de Eh e aumento do pH, indica desaceleração no processo de degradação, e a presença de intervalos bastante resistivos pode indicar a precipitação de íons anteriormente em solução.

Sob novas condições geoquímicas, os elementos precipitados tendem ao rearranjo sob a forma de neoformações minerais, principalmente em terrenos argilosos e de baixa condutividade hidráulica, como no caso da área de estudos. A assimilação de fases minerais pelo ambiente geológico e conseqüente insaturação do chorume, permite a retomada do processo de degradação.

O indicativo desta continuidade pode ser reconhecido no padrão correlativo das linhas 2001 e 2002, caracterizadas por aumento nos valores de Eh e ocorrência de medidas de resistividade abaixo de  $30\Omega.m$ .

## CONCLUSÕES

Na ausência de poços de monitoramento ou outras formas diretas de investigação na área do aterro, a caracterização geológica juntamente com a aplicação de técnicas geofísicas, analíticas de campo e o cruzamento com a idade de fechamento das valas de resíduos demonstram ser uma alternativa para caracterização e monitoramento em aterros de resíduos sólidos.

Elevadas concentrações de íons em contaminações provenientes de aterro e seu comportamento no ambiente geológico, caracterizado como condutor elétrico contrastante em relação ao ambiente natural, permitiram sua detecção pela aplicação do método de eletrorresistividade.

Os valores de resistividade abaixo de  $30\Omega.m$  podem estar associados a elevadas concentrações de sais dissolvidos e con-

seqüentemente, com elevado grau de contaminação, que gradualmente passa para níveis com menor grau de contaminação, provavelmente nos intervalos entre  $30\Omega.m$  e  $200\Omega.m$ .

Os dados sugerem uma evolução contínua do processo de consumo de matéria orgânica entre 2004 e 2007, com geração de chorume e liberação de grande quantidade de íons, determinados pela ocorrência de baixos valores de resistividade, aumento do Eh e queda do pH.

A seção de 2003 define um contraponto ao processo com curso nos primeiros anos. O surgimento de um amplo intervalo com resistividade extremamente elevada, com queda no Eh e aumento do pH indica baixo consumo de oxigênio e estagnação no processo de consumo de matéria orgânica.

A causa provável reside na saturação do chorume em íons, que provoca a precipitação destes elementos e o conseqüente desequilíbrio geoquímico. A presença de valores com elevada resistividade abaixo de  $5m$ , ou seja, abaixo da vala de resíduos, indica que este processo ocorre no ambiente geológico e que pode estar havendo também a neoformação de minerais.

A ocorrência de medidas altas e baixas de resistividade, em conjunto com o aumento do Eh nas valas de 2001 e 2002, indica retomada no processo de consumo de matéria orgânica.

A ocorrência de baixos valores de resistividade, sob a base das valas, pode indicar uma nova assimilação de materiais precipitados e/ou neoformados, por ataque ácido do chorume gerado nesta fase.

Alterações de rochas básicas tipicamente enriquecidas em Ferro resultam em solos de vermelhos, semelhantes ao descrito na área. A interação do chorume neste tipo de solo pode resultar na solubilização mineral. A saturação iônica do chorume pode resultar no retorno destes elementos ao ambiente geológico.

Neste sentido, a aplicação de técnicas geofísicas sensíveis a concentrações de minerais metálicos, como o método de Polarização Induzida, pode contribuir ao entendimento nos processos geoquímicos envolvidos na degradação de resíduos orgânicos, a partir da identificação de zonas enriquecidas em nestes minerais.

## AGRADECIMENTOS

Este trabalho foi realizado com o apoio da CAPES – Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior. Agradecemos a Fabíola Coutinho Servidoni e a Leonardo Zani Castelo pelo auxílio na aquisição de dados.

## REFERÊNCIAS

ARISTODEMOU E & THOMAS-BETTS A. 2000. DC resistivity and induced polarization investigations at waste disposal sites and its environments. *Journal of Applied Geophysics*, 44: 275–302.

- BAGCHI A. 1987. Natural attenuation mechanisms of landfill leachate and effects of various factors on the mechanism. *Waste Management Research*, 5: 453–464.
- BIRKS J & EYLES CA. 1997. Leachate from landfill along the Niagara Escarpment. In: EYLES N (Ed.). *Environmental Geology of Urban Areas*. Geological Association of Canada. Canada. p. 347–363.
- CAVALCANTI SS, SATO HK & LIMA OAL. 2001. Geofísica elétrica na caracterização da hidrologia subterrânea na região do aterro metropolitano centro, Salvador, Bahia. *Revista Brasileira de Geofísica*, 19(2): 155–168. Disponível em: <<http://www.scielo.br/pdf/rbg/v19n2/v19n2a4.pdf>>. Acesso em: 2 dez. 2008.
- CHRISTENSEN TH, KJELDTSEN P, ALBRECHTSEN HJ, HERON G, NIELSEN PH, BJERG PL & HOLM PE. 1994. Attenuation of landfill leachate pollutants in aquifers. *Critical Review in Environmental Science and Technology*, 24: 119–202.
- EPA. Environmental Protection Agency. 2002. *Preparation of the Soil Sampling Protocols: Sampling Techniques and Strategies*. EPA/600/R-92/128, Washington: EPA, 169 p.
- FARQUHAR GJ. 1989. Leachate: production and characterization. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 16: 317–325.
- FARQUHAR GJ & ROVERS FA. 1973. Gas production during refuse decomposition. *Water, Air and Soil Pollution*, 2(10): 483–499.
- FROHLICH RK, FISHER JJ & SUMMERLY E. 1996. Electric-hydraulic conductivity correlation in fractured crystalline bedrock: Central Landfill. Rhode Island, USA. *Journal of Applied Geophysics*, 35: 249–259.
- GALLAS JDF, TAIOLI F, SILVA SMCP, COELHO OGW & PAIM PSG. 2005. Contaminação por chorume e sua detecção por resistividade. *Revista Brasileira de Geofísica*, 23(1): 51–59. Disponível em: <<http://www.scielo.br/pdf/rbg/v23n1/a05v23n1.pdf>>. Acesso em: 2 dez. 2008.
- LAGO AL, ELIS VR & GIACHETI HL. 2006. Aplicação integrada de métodos geofísicos em uma área de disposição de resíduos sólidos urbanos em Bauru-SP. *Revista Brasileira de Geofísica*, 24(3): 357–374. Disponível em: <<http://www.scielo.br/pdf/rbg/v24n3/a05v24n3.pdf>>. Acesso em: 2 dez. 2008.
- LAUREANO AT & SHIRAIWA S. 2008. Ensaio Geofísicos no Aterro Sanitário de Cuiabá-MT. *Revista Brasileira de Geofísica*, 26(2): 173–180. Disponível em: <<http://www.scielo.br/pdf/rbg/v26n2/a05v26n2.pdf>>. Acesso em: 2 dez. 2008.
- MEJU MA. 2000. Geoelectrical investigation of old/abandoned, covered landfill sites in urban areas: model development with a genetic diagnosis approach. *Journal of Applied Geophysics*, 44: 115–150.
- NAUDET V, REVIL A, BOTTERO JY & BÉGASSAT P. 2003. Relationship between self-potential (SP) signals and redox conditions in contaminated groundwater. *Geophysical Research Letters*, 30(21): 1–4.
- NAUDET V, REVIL A, RIZZO E, BOTTERO JY & BÉGASSAT P. 2004. Groundwater redox conditions in a contaminant plume from geoelectrical investigations. *Hydrogeology and Earth System Sciences*, 8(1): 8–22.
- ORELLANA E. 1972. *Prospección Geoelectrica en Corriente Continua*. Biblioteca Técnica Philips, Madrid: Paraninfo, 523 p.
- RESS JF. 1980. The fate of carbon compounds in the landfill disposal of organic matter. *Journal of Chemical Technology and Biotechnology*, 30: 161–175.
- SHIRAIWA S, LISOVSKY SP, ELIS VR, PORSANI JL & BORGES WR. 2002. Estudos geofísicos integrados no lixão de Cuiabá, MT, Brasil – Resultados Preliminares. *Revista Brasileira de Geofísica*, 20(3): 181–186. Disponível em: <<http://www.scielo.br/pdf/rbg/v20n3/a04v20n3.pdf>>. Acesso em: 2 dez. 2008.
- SILVA JE, LOUREIRO EML, ELIS VR, HODO FY & PORSANI JL. 2002. Aplicação de ensaios elétricos e eletromagnéticos em problemas de poluição ambiental. *Revista Brasileira de Geofísica*, 20(3): 193–198. Disponível em: <<http://www.scielo.br/pdf/rbg/v20n3/a06v20n3.pdf>>. Acesso em: 2 dez. 2008.

## NOTAS SOBRE OS AUTORES

**César Augusto Moreira.** Bacharel em Geologia pelo Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista (UNESP) em 2003. Mestre e Doutor em Geociências, área de concentração em Geociências e Meio Ambiente pela UNESP em 2006 e 2009, respectivamente. Atualmente é professor do curso de graduação em geofísica na Universidade Federal do Pampa (UNIPAMPA), Campus de Caçapava do Sul – RS. Especializado em métodos elétricos e eletromagnéticos aplicados em estudos ambientais e hidrogeológicos.

**Antonio Celso de Oliveira Braga.** Geólogo formado pela Universidade Estadual Paulista – Unesp (1978). Doutor em Geociências (1997) e Livre-docente na disciplina Métodos Geoeletrônicos Aplicados na Hidrogeologia (2006) pela Universidade Estadual Paulista – Unesp/Campus de Rio Claro. Foi geólogo no Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo – IPT (1978 a 1995). Desde 1998 é docente do Departamento de Geologia Aplicada – IGCE/Unesp – Rio Claro, atuando em hidrologia e geofísica aplicada à hidrogeologia e estudos ambientais, envolvendo os métodos geoeletrônicos.

**Maximilian Fries.** Bacharel em Geologia pelo Instituto de Geociências e Ciências Exatas (IGCE) da Universidade Estadual Paulista (UNESP) em 2000. Mestre em Geociências pela UNESP em 2003 e Doutor em Geociências pela UNESP em 2008. Desde 2007 é professor do curso de graduação em geofísica na Universidade Federal do Pampa (UNIPAMPA), Campus de Caçapava do Sul – RS. Trabalha com os métodos potenciais da gravimetria e magnetometria, geoprocessamento e geotectônica.