

APLICAÇÃO INTEGRADA DE MÉTODOS GEOFÍSICOS EM UMA ÁREA DE DISPOSIÇÃO DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS EM BAURU-SP

Alexandre Lisboa Lago¹, Vagner Roberto Elis² e Heraldo Luiz Giacheti³

Recebido em 7 abril, 2006 / Aceito em 2 agosto, 2006
Received on April 7, 2006 / Accepted on August 2, 2006

ABSTRACT. Geophysics has shown effectiveness in identify areas contaminated by urban solid wastes, contributing to become more effective sounding programs directed to collect of samples and installation of monitoring systems. In this context, this work had as purpose evaluating the potentialities of the integration of geophysical methods (resistivity, induced polarization and self-potential) in the environmental characterization of the area of the sanitary landfill of the city of Bauru-SP. The self-potential method allowed to detect the direction of the underground flow. The resistivity and induced polarization methods allowed to identify anomalies inside of the saturated zone, that characterize the presence of contamination generated for the migration of the percolated proceeding of the disposal of solid waste. This contamination is confirmed by direct investigation (chemical analysis of the water collected in the monitoring wells). The geophysical methods used had supplied a great number of information about the several characteristics related to interaction between waste disposal area and environment.

Keywords: Applied Geophysics, Electrical Methods, Urban Solid Waste.

RESUMO. A geofísica tem mostrado eficácia em identificar áreas contaminadas pela disposição de resíduos sólidos urbanos, contribuindo para tornar mais efetivos os programas de sondagem voltados à coleta de amostras e instalação de sistemas de monitoramento. Dentro desse contexto, este trabalho teve como finalidade avaliar as potencialidades da integração dos métodos geofísicos (eletrorresistividade, polarização induzida e potencial espontâneo) na caracterização geoambiental da área do aterro sanitário da cidade de Bauru-SP. O método do potencial espontâneo permitiu detectar o sentido do fluxo subterrâneo. Os métodos da eletrorresistividade e polarização induzida permitiram identificar anomalias dentro da zona saturada, que caracterizaram a presença da contaminação gerada pela migração do percolado proveniente da disposição dos resíduos sólidos. A contaminação é confirmada por investigação direta (análise química da água coletada nos poços de monitoramento). Os métodos geofísicos utilizados forneceram um grande número de informações sobre as diversas características relacionadas à interação entre a área de disposição de resíduos sólidos urbanos e o meio físico.

Palavras-chave: Geofísica aplicada, Métodos Elétricos, Resíduos Sólidos Urbanos.

¹Pós-Graduação em Geofísica – IAG/USP – Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas da Universidade de São Paulo. Rua do Matão, 1226, Cidade Universitária, Butantã, 05508-090 São Paulo, SP, Brasil. Tel: (11) 3091-2792; Fax: (11) 3091-5034 – E-mail: alexandre@iag.usp.br

²IAG/USP – Departamento de Geofísica, Rua do Matão, 1226, Cidade Universitária, Butantã, 05508-090 São Paulo, SP, Brasil. Tel: (11) 3091-4749; Fax: (11) 3091-5034 – E-mail: vagnelis@iag.usp.br

³Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia de Bauru – UNESP. Av. Dr. Luiz Edmundo Carrijo Coube s/n, Vargem Limpa, 17033-360 Bauru, SP, Brasil. Tel: (14) 3103-6112; Fax: (14) 3103-6101 – E-mail: giacheti@feb.unesp.br

INTRODUÇÃO

Os impactos ambientais causados pela intervenção do homem no meio ambiente constituem atualmente uma das grandes preocupações mundiais. A crescente concentração populacional em áreas urbanas e o conseqüente aumento da produção de resíduos domésticos e industriais vêm gerando muitos problemas relacionados a forma de disposição desses resíduos e, conseqüentemente, em relação à contaminação de solos e águas subterrâneas.

Dessa forma, os problemas vinculados às áreas de disposição de resíduos são considerados, a nível global, como uma das principais fontes potenciais de contaminação de água subterrânea, além de outros tipos de atividades e empreendimentos antrópicos. Em geral, essas fontes de contaminação são: áreas de disposição de resíduos sólidos (urbanos e industriais); lagoas de tratamento de efluentes industriais; disposição de esgoto; disposição de resíduos radioativos; atividades agrícolas; vazamento de petróleo e derivados; e rejeitos de atividades mineradoras. Acrescenta-se, também, a contaminação de água doce pela intrusão da água salgada marinha em regiões costeiras.

A degradação das águas superficiais e subterrâneas por problemas de contaminação e poluição vem gerando dificuldades para o aproveitamento desses recursos hídricos e intensificando sua escassez. A poluição das águas subterrâneas é muito mais preocupante do que das águas superficiais, visto que estas rapidamente se renovam e se recuperam após cessar o lançamento de efluentes.

Devido à preocupação com o problema da poluição de solos e águas subterrâneas, os profissionais ligados às Ciências da Terra estão estimulados a pesquisar procedimentos para estudar, avaliar e procurar novas soluções que possam minimizar os efeitos danosos causados pela disposição de resíduos em interação direta com o meio físico. Dentre esses procedimentos pode ser enquadrado o uso de métodos geofísicos.

A natureza não invasiva dos métodos geofísicos (não afeta e não destrói camadas selantes naturais ou artificiais), aliada ao baixo custo operacional, rapidez e facilidade de aplicação dos ensaios, torna-os uma excelente ferramenta para ser aplicada em estudos ambientais. De uma forma geral, a utilização de geofísica na caracterização de uma área afetada por substâncias poluentes consiste na detecção e mapeamento da extensão da área afetada, além de fornecer informações sobre a profundidade da zona saturada, direção do fluxo subterrâneo e profundidade do substrato rochoso inalterado.

Alguns métodos geofísicos vêm sendo utilizados para de-

tecar e monitorar a contaminação gerada por líquidos percolados dos depósitos de resíduos industriais e urbanos. Devido às características químicas desses resíduos, que normalmente se refletem em alterações na condutividade elétrica no local onde estão dispostos, utilizam-se principalmente os métodos elétricos com bons resultados (Benson et al., 1982). A aplicação desses métodos geofísicos em estudos relacionados a contaminação de solo e água subterrânea é amplamente relatada na literatura, como por exemplo: Elis & Zuquette (1997), Hyoung-Soo & Yeonghwa (1997), Elis (1999), Meju (2000), Moura (2002), Shiraiwa et al. (2002) e Gallas et al. (2005).

Portanto, o método da eletrorresistividade, que se mostra eficiente e de baixo custo operacional, caracteriza uma ferramenta adequada ao estudo de áreas de disposição de resíduos, principalmente em países em desenvolvimento, como o Brasil, onde os problemas ambientais gerados por essa atividade são grandes. No entanto, a integração com outros métodos geofísicos pode fornecer informações importantes e também diminuir o problema da ambigüidade na interpretação dos dados.

Dentro desse contexto, o principal objetivo desse trabalho é integrar diferentes métodos geofísicos (eletrorresistividade, polarização induzida e potencial espontâneo), visando uma adequada caracterização geoambiental da área utilizada para disposição de resíduos sólidos urbanos na cidade de Bauru-SP.

CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

A cidade de Bauru possui cerca de 320 mil habitantes, que descartam cerca de 250 toneladas de lixo por dia. O aterro de resíduos sólidos urbanos de Bauru opera desde 1993 e localiza-se a cerca de 15 km do centro urbano, próximo às coordenadas 22° 15' S e 49° 10' W. Está instalado próximo a Rodovia Marechal Rondon (SP-330), ao lado de um presídio estadual de segurança. A área do aterro é de aproximadamente 270.000 m², e situa-se a mil metros de importante drenagem e de áreas de pastagens cujas sedes estão instaladas num raio superior a 200 metros. Na Figura 1, adaptada de IPT (1981), pode ser observada a localização da área e o contexto geológico regional.

Na área de estudo ocorrem arenitos do Grupo Bauru, o qual é representado pelas Formações Adamantina (inferior) e Marília (superior). Este grupo apresenta uma seqüência basal lamítica, de origem lacustre, sobre a qual encontram-se arenitos finos a grossos, argilosos, avermelhados, com algumas intercalações de lamitos avermelhados (Cavaguti & Silva, 1992). Estas unidades são importantes, pois a água subterrânea explorada na região de Bauru provém dos grupos Bauru e São Bento (formações Serra

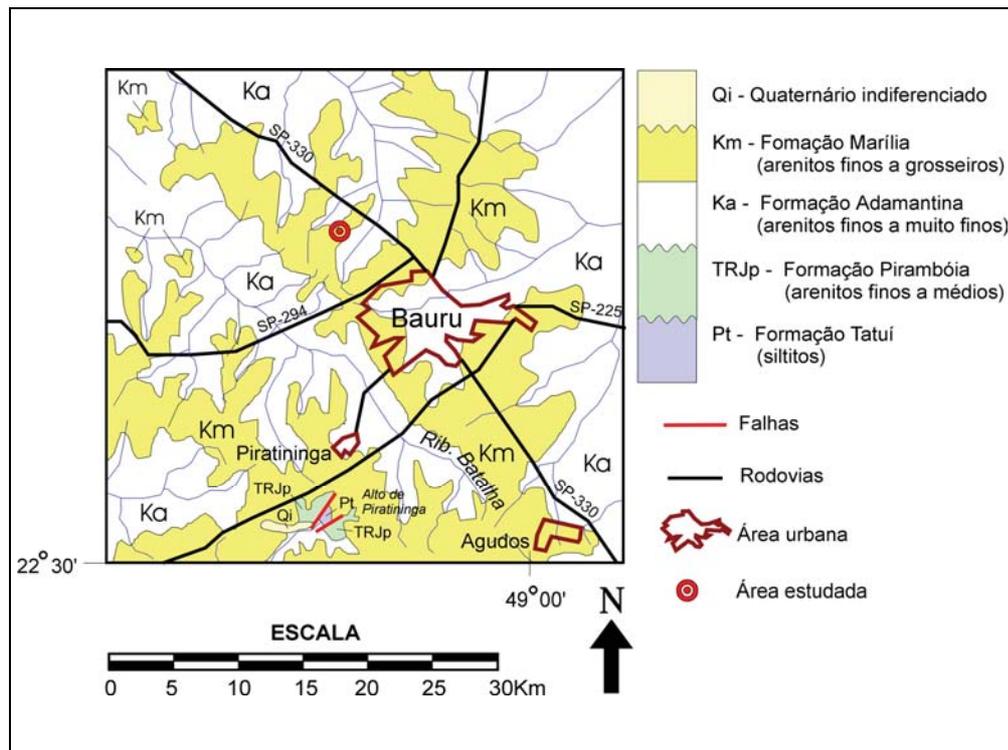


Figura 1 – Mapa geológico da região de Bauru, SP.

Geral, Botucatu e Pirambóia). O Grupo Bauru tem espessura média de 120 m e constitui o aquífero superior, onde foram perfurados os poços mais rasos. Apesar de ser importante fonte de água no contexto local, caracteriza-se por ser um aquífero de baixa qualidade, porque apresenta coeficiente de permeabilidade muito variável, principalmente em função da variação textural (arenitos finos alternados com bancos de lamitos, siltitos e arenitos lamíticos) e também da presença de cimento e nódulos carbonáticos.

O nível d'água localiza-se a uma profundidade de no mínimo 5 m abaixo da cota da base do aterro sanitário (Giacheti, 2002).

O solo superficial é constituído por uma camada de areia fina, silto-argilosa de tonalidade acinzentada, seguido por solo composto por areia argilosa de cor marrom avermelhada. Abaixo dessas camadas é encontrado o solo de alteração de arenito sobre a rocha inalterada. O solo do aterro possui textura de areia fina a média argilosa.

MÉTODOS

O método geofísico da eletrorresistividade é amplamente utilizado, devido à possibilidade de aplicação nos diversos campos de estudo, como mineração, geologia de engenharia, hidrogeologia

e estudos ambientais. Esse método de prospecção geofísica emprega uma corrente elétrica artificial que é introduzida no terreno através de dois eletrodos (denominados A e B), com o objetivo de medir o potencial gerado em outros dois eletrodos (denominados M e N) nas proximidades do fluxo de corrente, permitindo assim calcular a resistividade aparente em subsuperfície e, conseqüentemente, a resistividade real através do processo de inversão. A resistividade (e seu inverso, a condutividade) de solos e rochas pode ser afetada principalmente pela composição mineralógica, porosidade, teor em água e natureza dos sais dissolvidos, o que permite a ampla aplicação do método em estudos ambientais e hidrogeológicos. Existem várias técnicas de aplicação do método da eletrorresistividade como sondagem elétrica vertical e caminhamento elétrico, as quais encerram uma grande variedade de configurações eletródicas, o que lhe confere um elevado grau de versatilidade.

A polarização induzida é um fenômeno elétrico estimulado por corrente, observado como resposta retardada à voltagem, em materiais naturais (Summer, 1976). O fenômeno se observa quando se faz passar corrente elétrica através de um eletrólito que contém corpos ou partículas que possuem condutividade eletrônica. O método da polarização induzida possibilita, de forma

análoga a eletrorresistividade, a realização de sondagens e caminhamentos, utilizando várias configurações eletródicas.

As técnicas utilizadas neste trabalho foram o caminhamento elétrico e a sondagem elétrica vertical. A análise conjunta de resistividade e cargabilidade foi feita de forma quantitativa, através do programa RES2DINV da Geotomo Software (2003). O RES2DINV é um programa de inversão para resistividade e polarização induzida (modelagem por suavização). Os dados obtidos através da técnica de sondagem elétrica vertical foram processados através do programa IPI 6.1 (Bobachev et al., 1990-95).

Potenciais elétricos naturais ou espontâneos ocorrem na sub-superfície terrestre, causados por atividade eletroquímica e eletrocínética. De acordo com Telford et al. (1990), o fator de controle, em todos os casos, é a água subterrânea. Os potenciais podem estar associados à presença de corpos metálicos, contatos entre rochas de diferentes propriedades elétricas, atividade bio-elétrica de materiais orgânicos, gradientes térmicos e de pressão nos fluídos subterrâneos, e outros fenômenos de natureza similar. As medidas de SP foram realizadas segundo o método de potenciais, que consiste na determinação da diferença de potencial de uma série de estações com relação a uma estação base (Telford et al., 1990). O eletrodo móvel percorreu uma malha com estações a cada 20 metros ao longo de 5 perfis paralelos. A análise das medidas obtidas pelo método do potencial espontâneo foi feita de forma qualitativa através do software Surfer 6.0 (Golden Software, 1997).

ENSAIOS GEOFÍSICOS REALIZADOS

Na área de estudo foram realizados ensaios geofísicos com os métodos da eletrorresistividade, polarização induzida e potencial espontâneo, descritos a seguir:

- 9 sondagens elétricas verticais de resistividade, arranjo Schlumberger, com espaçamento AB máximo de 150 metros, denominadas de SEV1 a SEV 9;
- 5 linhas de caminhamento elétrico dipolo-dipolo de resistividade e polarização induzida (denominadas de C1 a C5), com espaçamento dos eletrodos de 10 metros e 5 níveis de investigação;
- 5 linhas de potencial espontâneo (método de potenciais), com espaçamento dos eletrodos de 20 metros, denominadas de SP1 a SP5.

A localização desses ensaios na área de estudo é apresentada na Figura 2.

ENSAIOS REALIZADOS E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Interpretações dos dados obtidos pelo método do potencial espontâneo

Esses ensaios foram realizados com a finalidade de auxiliar na definição do sentido do fluxo subterrâneo e avaliar o nível de interação entre os resíduos e o meio físico. De acordo com Hyoung-Soo & Yeonghwa (1997) uma grande variação de potencial espontâneo dentro da área de resíduos indica intensa atividade geoquímica no local, sendo que em aterros sanitários podem ser observadas variações nos valores de várias centenas de milivolts, o que ocorre pelo mecanismo de eletrofiltração, como pode ser constatado no mapa de potencial espontâneo do aterro sanitário de Bauru-SP (Figura 3).

Como foram tomados cuidados na escolha do local da estação base, no uso de eletrodos não-polarizáveis, não ocorrendo registro de chuvas na área no período do levantamento e considerando a influência dos resíduos, o potencial medido deve estar associado ao comportamento do fluxo da água subterrânea e chorume, que é caracterizado pelo aumento dos valores de potencial natural no sentido do fluxo. O fluxo detectado pelo SP, segue no sentido principal de leste para oeste-noroeste da área (Figura 3).

Interpretações dos dados obtidos pelas sondagens elétricas verticais

As sondagens elétricas verticais podem ser divididas em dois conjuntos: um representado pelos ensaios realizados fora da cava preenchida com resíduos (sondagens de 1 a 7) e outro pelas sondagens executadas sobre a cava preenchida com resíduos (sondagens 8 e 9).

As sondagens 1, 2, 3, 4, 5, 6 e 7, forneceram dados a respeito da posição do nível d'água e do posicionamento dos diversos materiais em subsuperfície (materiais naturais e contaminados). Os resultados dessas sondagens mostraram uma grande heterogeneidade nos modelos geoeletricos obtidos, sobretudo em relação às camadas mais superficiais. A esses materiais convencionou-se chamar de solo na interpretação geoeletrica. Na Tabela 1 são apresentados os resultados do modelo geoeletrico obtido para esse primeiro conjunto de sondagens.

Um exemplo de sondagem pertencente a esse conjunto é a SEV2, apresentada na Figura 4. A camada 1 dessa sondagem, com 3136 ohm.m, representa o solo superficial. A camada 2, com 188 ohm.m, corresponde ao solo não saturado. A camada 3, com 11 ohm.m, retrata um solo residual arenoso, porém com valores de resistividade baixos, o que sugere que existe uma provável

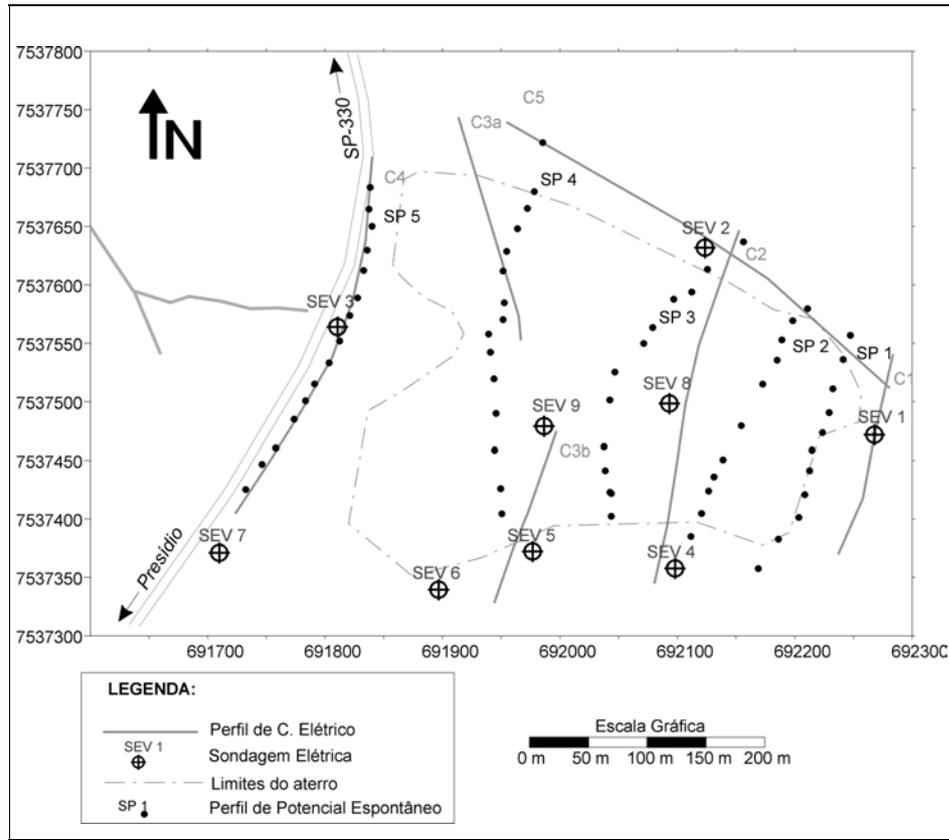


Figura 2 – Mapa de localização dos levantamentos geofísicos realizados no Aterro Sanitário de Bauru-SP.

Tabela 1 – Modelo geoeletrico das sondagens elétricas verticais realizadas fora da cava preenchida com resíduos, proposto para o Aterro Sanitário de Bauru-SP.

Camada	Espessura (m)	Resistividade (ohm.m)	Interpretação
1	0,75 – 1,59	26,4 – 3136	Solo superficial
2	0,78 – 5,93	24,3 – 670	Solo não saturado
3	3,14 – 4,58	11,0 – 11,7	Solo não saturado contaminado *
4	2,61 – 6,52	17,4 – 81,3	Zona de capilaridade
5	–	10,4 – 22,3	Zona saturada

* ocorre nas SEVs 2, 4 e 5.

percolação de chorume através desse material, pois a SEV2 é contígua ao limite setentrional do aterro. A camada 4, com 24,1 ohm.m, representa uma camada de material sem contaminação com teor de umidade maior que as camadas sobrejacentes (zona de capilaridade). A camada 5, com 16,4 ohm.m, representa a zona saturada.

As sondagens 8 e 9, realizadas dentro da cava preenchida com resíduos, possibilitaram a definição da espessura da camada

de resíduos, com valores de resistividade baixos (10,2 a 18,8 ohm.m), e, conseqüentemente, a base do aterro, definida por valores de resistividade mais elevados (28,9 a 29,9 ohm.m). O conjunto de resultados das sondagens executadas sobre os resíduos pode ser observado na Tabela 2.

A SEV 8, apresentada na Figura 5, mostra as variações de resistividade que caracterizam o modelo geoeletrico para os ensaios executados sobre a cava preenchida com resíduos.

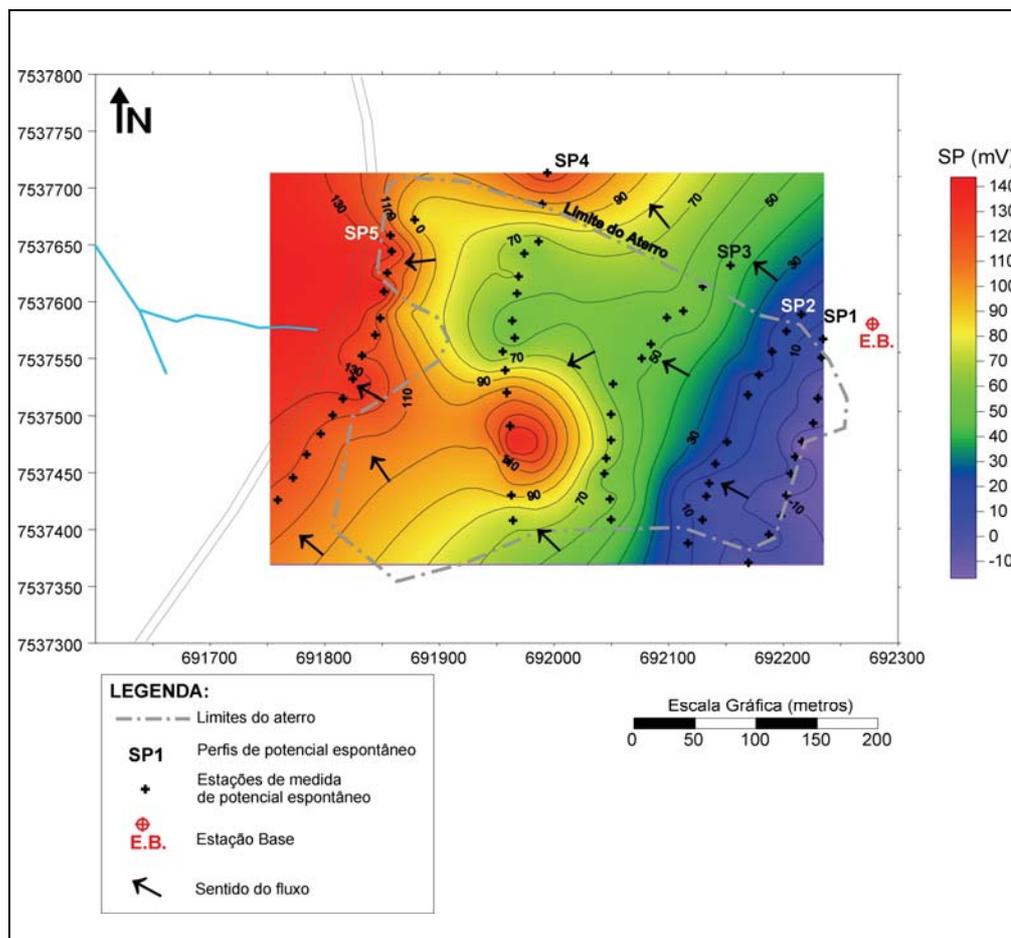


Figura 3 – Mapa de potencial espontâneo do Aterro Sanitário de Bauru – SP.

Tabela 2 – Modelo geoeétrico das sondagens elétricas verticais realizadas dentro da cava preenchida com resíduos, proposto para o Aterro Sanitário de Bauru-SP.

Camada	Espessura (m)	Resistividade (ohm.m)	Interpretação
1	0,73 – 2,02	28,8 – 166	Material de cobertura do aterro
2	4,05 – 4,37	18,3 – 18,8	Resíduos
3	16,4 – 20,1	10,2 – 10,4	Resíduos + chorume
4	–	28,9 – 29,9	Base do aterro

A realização dos ensaios de sondagem elétrica vertical permitiram estudar a posição da zona saturada na área do aterro. Através dos dados obtidos para a profundidade da zona saturada foi construído, tomando-se as cotas do nível d'água em cada sondagem elétrica, o mapa de fluxo subterrâneo, apresentado na Figura 6, que mostra que o sentido principal do fluxo local é de leste para oeste-noroeste, em correspondência à interpretação dos dados de SP.

Interpretações dos dados obtidos pelos caminhamentos elétricos de resistividade e IP

Foram realizadas 5 linhas de resistividade/IP, cujas localizações foram programadas procurando cobrir uniformemente a área de interesse. Foram selecionadas as seções de resistividade e capacidade das Linhas C2 e C4, e os mapas de resistividade/IP nas profundidades de 10 e 22 metros.

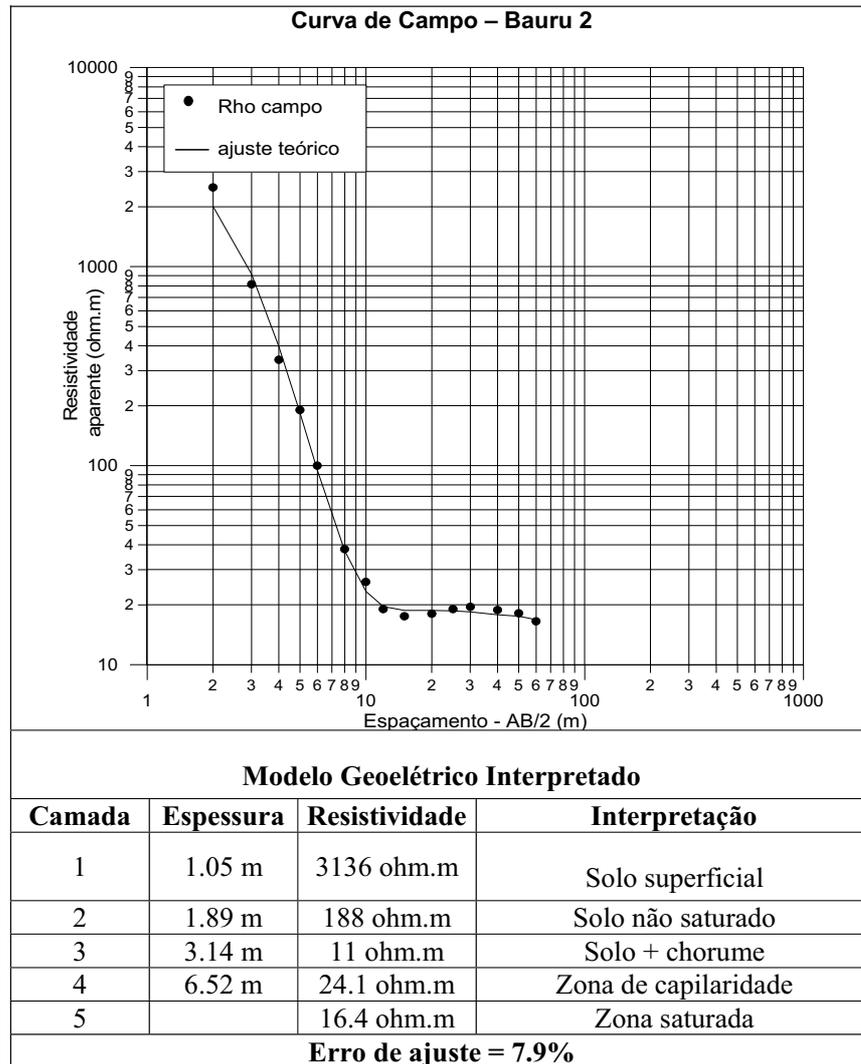


Figura 4 – Interpretação da SEV 2.

A Linha C2 foi realizada de forma a atravessar a cava preenchida com resíduos. A Linha C4 foi executada a jusante da área, com o objetivo de identificar zonas anômalas que podem caracterizar o desenvolvimento de uma provável contaminação dentro da zona saturada.

Na Figura 7, são apresentadas as seções modeladas de resistividade e cargabilidade, obtidas pela inversão que ajusta os dados das pseudo-seções da Linha C2. A seção de resistividade (Figura 7c) mostrou que os valores de resistividade superiores a 40 ohm.m são interpretados como sendo relativo as zonas de material natural. Observa-se a zona mais condutora entre as distâncias 52 e 248 metros que caracterizaram a cava preenchida com resíduos. A seção de cargabilidade (Figura 7d) mostrou que

as zonas de material natural são caracterizadas por baixos valores de cargabilidade (menores do que 10 mV/V); enquanto que, a cava preenchida com resíduos é caracterizada por altos valores de cargabilidade em relação ao meio natural. Observa-se que a cargabilidade é sensível à presença de resíduos, e que o efeito IP é relacionado à presença de materiais polarizáveis dentro da cava de resíduos, tais como: latas, papéis, pilhas e restos de metais. Os resultados de polarização induzida possibilitam delinear a cava preenchida com resíduos.

Na Figura 8, são apresentadas as seções modeladas de resistividade e cargabilidade, obtidas pela inversão que ajusta os dados das pseudo-seções da Linha C4. Pode-se observar a presença dos materiais não saturados e a presença da zona sa-

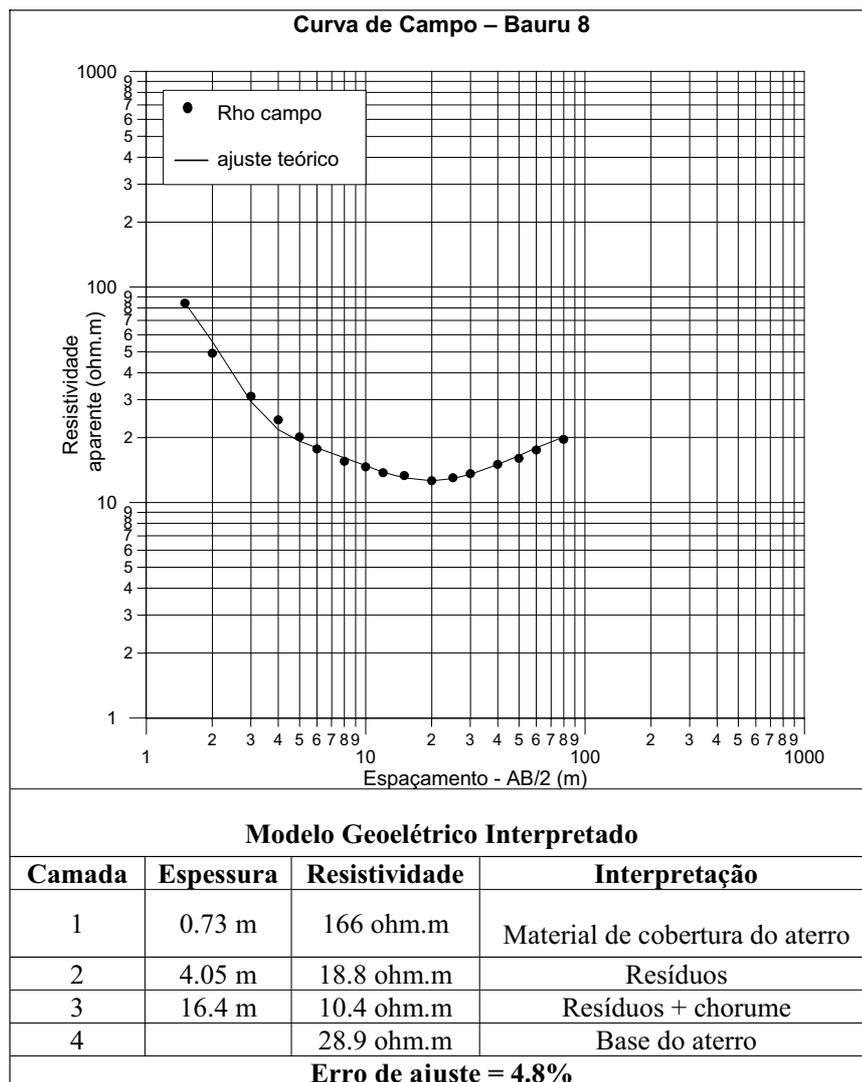


Figura 5 – Interpretação da SEV 8.

turada. A seção de resistividade (Figura 8c) mostrou que os materiais não saturados (solos superficiais) são caracterizados por valores de resistividade superiores a 100 ohm.m. A zona saturada é caracterizada pela tendência de menor resistividade em profundidade de 12 metros no início do perfil, próxima de 5 metros no centro e no final do perfil (devido a topografia local). Os resultados de resistividade definem melhor o solo superficial e a zona saturada do que a cargabilidade.

Observa-se dentro da zona saturada anomalias de menor resistividade (principalmente nas posições entre 110 e 150 metros e 220 e 260 metros), sugerindo uma provável contaminação da água subterrânea. A variação dos valores de cargabilidade é mais complexa (Figura 8d), com a ocorrência de anomalias de baixa

cargabilidade (< 4 mV/V) alternadas com zonas com valores superiores a 12 mV/V. Ressalta-se que o efeito IP alto pode ser ocasionado por materiais polarizáveis provenientes da disposição dos resíduos sólidos, dentre outros fatores que podem aumentar o valor da cargabilidade. Entretanto, observa-se, anomalias de baixos valores de cargabilidade (< 4 mV/V) entre as posições 90 e 110 metros e 135 e 155 metros, e da posição 230 metros até o final do perfil. Estas anomalias sugerem a ocorrência de processos de contaminação pela migração de chorume proveniente da cava preenchida com resíduos, visto que água subterrânea com sais dissolvidos e chorume (ambos condutivos) não se polarizam devido a elevada condutividade iônica dos fluidos.

Para uma visualização em planta da variação da resistividade

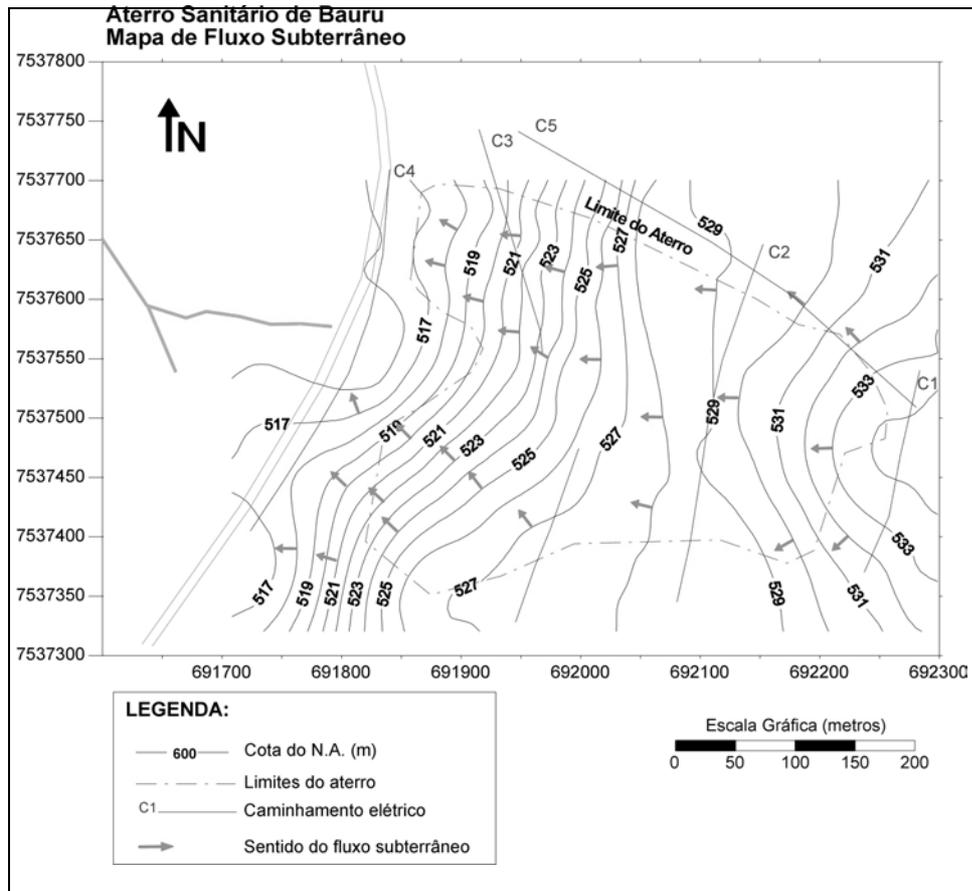


Figura 6 – Mapa de fluxo subterrâneo do Aterro Sanitário de Bauru-SP elaborado pelas informações obtidas através das sondagens elétricas.

e cargabilidade foram elaborados mapas para as profundidades de 10 e 22 metros. A Figura 9 mostra o mapa na profundidade de 10 metros caracterizando, em sua maior parte, a zona não saturada. Nesse mapa (Figura 9a) pode ser observada a anomalia de baixa resistividade na área ocupada pelos resíduos e os materiais naturais, de maior resistividade. Uma zona mais condutora é visualizada se desenvolvendo no sentido WNW no centro da Linha 1, que seria característica da presença da zona saturada mais rasa nesse local. Essa zona também pode caracterizar a presença de contaminação, e como já referido anteriormente, é um ponto sugerido para investigação utilizando uma técnica invasiva com coleta de amostras de solo e/ou água. Levando-se em consideração que a água subterrânea com chorume não se polariza, o incremento da cargabilidade observado no mapa (Figura 9b) deve ser explicado por materiais polarizáveis dentro do depósito de resíduos.

A Figura 10 mostra os mapas de resistividade e cargabilidade na profundidade de 22 metros. Esses mapas possivelmente ca-

racterizaram os materiais abaixo da zona saturada e permitiram observar o sentido preferencial de fluxo local. Observa-se a zona de menor resistividade (Figura 10a) desenvolvendo-se no sentido WNW, principalmente e, também, uma tendência de aumento da área de menor resistividade no sentido SW. O mapa de cargabilidade para esse nível apresenta uma anomalia de alta cargabilidade dentro do depósito, possivelmente causada pela influência de materiais polarizáveis dentro do corpo de resíduos. Observa-se também uma diminuição dos valores de cargabilidade fora do corpo de resíduos, no sentido do fluxo subterrâneo (região da SEV 3), sugerindo novamente a presença de chorume rico em sais dentro da zona saturada.

RESULTADOS DA INVESTIGAÇÃO POR MÉTODOS DIRETOS

Dentro de um programa de caracterização geoambiental é imprescindível a utilização de métodos de coleta e análise de solos e/ou águas para identificar os contaminantes e suas

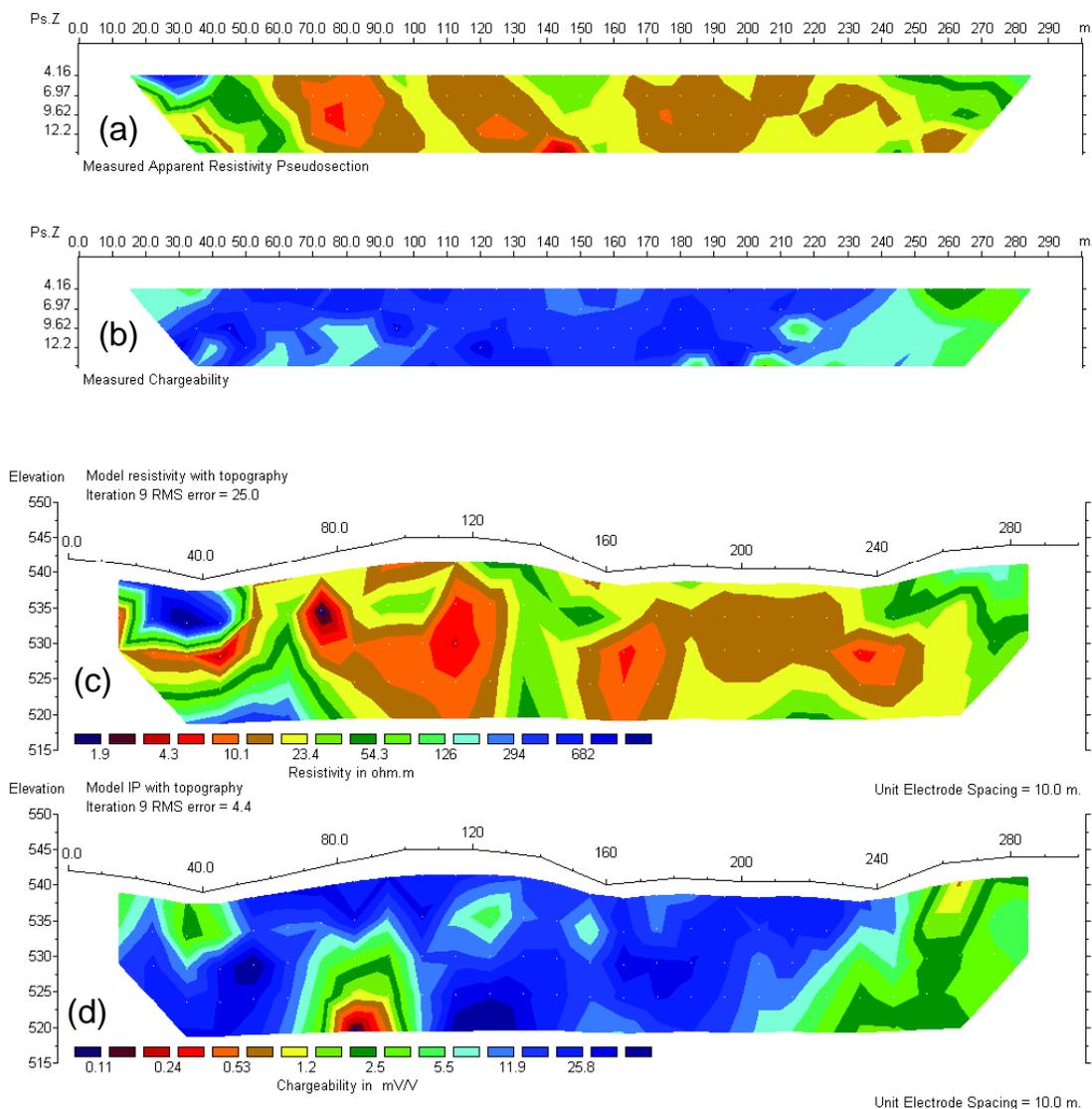


Figura 7 – Seção de resistividade e cargabilidade da Linha C2.

concentrações. A partir das informações obtidas pelos ensaios geofísicos, foi possível identificar zonas de possível contaminação. Dessa forma, recomendou-se a realização de ensaios diretos em posições específicas onde foram observadas assinaturas geofísicas, que sugeriram a presença de contaminantes. Os locais sugeridos para a realização dos ensaios diretos foram as posições de anomalias de baixa resistividade identificadas na linha C4. Nestes locais foram executados ensaios de sondagem com o piezocone de resistividade (Mondelli, 2004) e posteriormente construídos poços de monitoramento (Figura 11), nos quais realizou-se coleta de material para análise.

Os resultados dos ensaios com piezocone de resistividade

são apresentados na Figura 12. O piezocone (CPTU) utiliza as relações entre a resistência de ponta, q_c , o atrito lateral, f_s ; e a poro-pressão, U , para interpretar o perfil em termos de textura e estimar parâmetros geotécnicos. O piezocone de resistividade (RCPTU) consiste em um módulo de resistividade que é instalado atrás do piezocone padrão. Os resultados do conjunto de ensaios RCPTU realizados na área de interesse à jusante do aterro (Figura 12) podem ser interpretados considerando as informações da seção de resistividade da Linha C4, uma vez que foram realizados sobre essa linha. Observa-se que os valores de resistividade medidos com o RCPTU na região não saturada variam de 250 a 1500 ohm.m, o que condiz com os valores desta mesma região

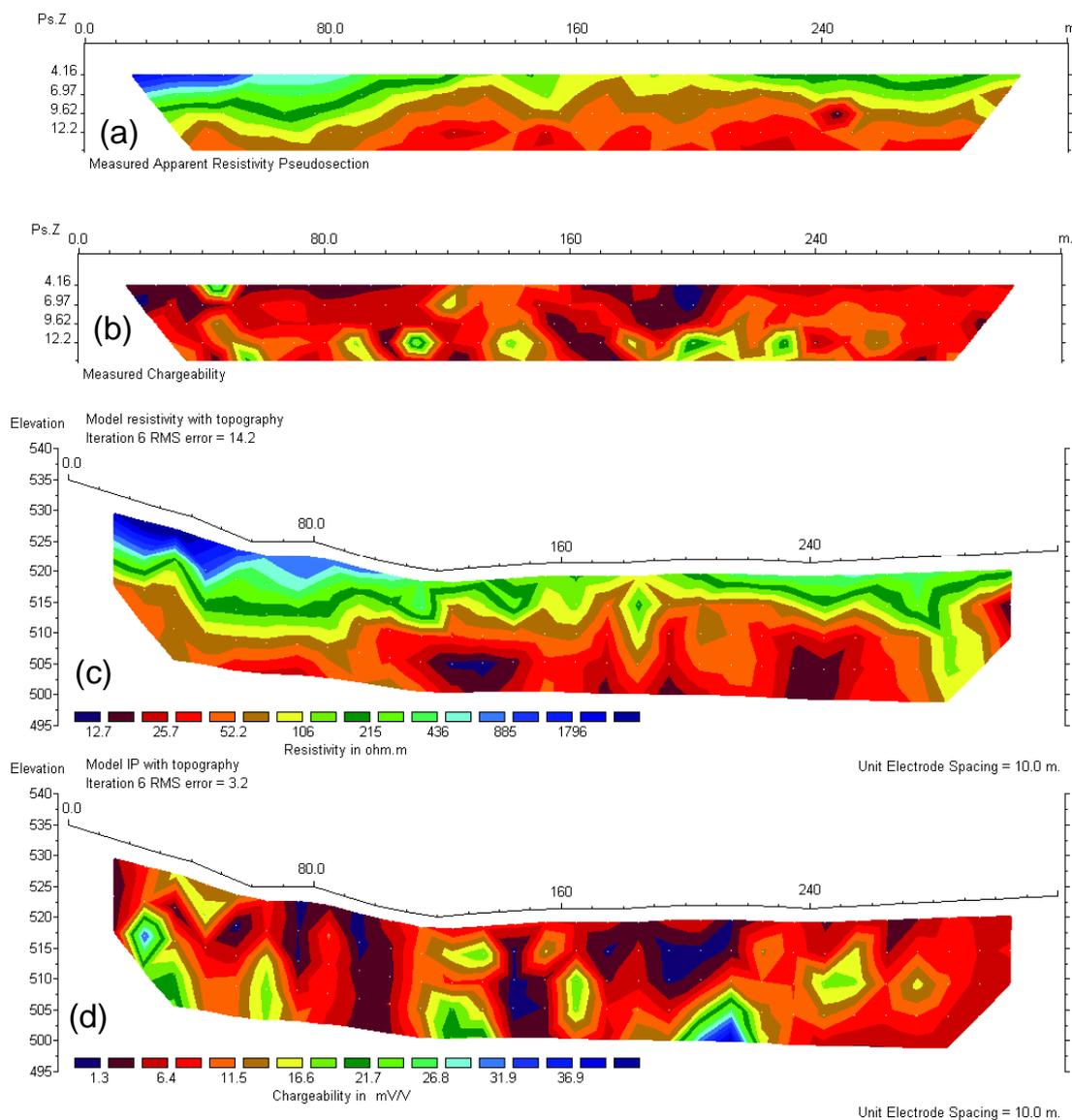


Figura 8 – Seção de resistividade e cargabilidade da Linha C4.

obtidos com a geofísica de superfície. Na zona saturada a variação de resistividade tem uma correspondência com a variação textural interpretada pelo CPTU e também está dentro do intervalo obtido pelos ensaios de superfície. Convém salientar que o perfil interpretado com base nos CPTU's tem apresentado limitações para solos tropicais, como referido por Marques (2002). De fato, comparando-se essa interpretação com a análise granulométrica observa-se que em camadas interpretadas como argila existe porcentagem considerável de areia, devendo estas ser classificadas como areias argilosas. Nos resultados desses ensaios pode-se observar valores de resistividade bastante baixos, em especial

para o RCPTU 03 (< 10 ohm.m), o que pode ser um indicativo de contaminação.

Na Tabela 3 são apresentados os resultados das análises de água, na qual pode-se observar que vários parâmetros mostram valores acima dos limites estabelecidos pelas normas de potabilidade.

Dessa forma, a contaminação existe como constatado nas análises das águas dos poços de monitoramento P01 (coordenadas 7.537.590N e 691.845E) e P05 (7.537.455N e 691.759E), realizadas no dia 12/08/2003. Apesar da contaminação ser incipiente (Cádmio 0.08 mg/L, Cromo total 0,228 mg/L, Níquel 0.118 mg/L,

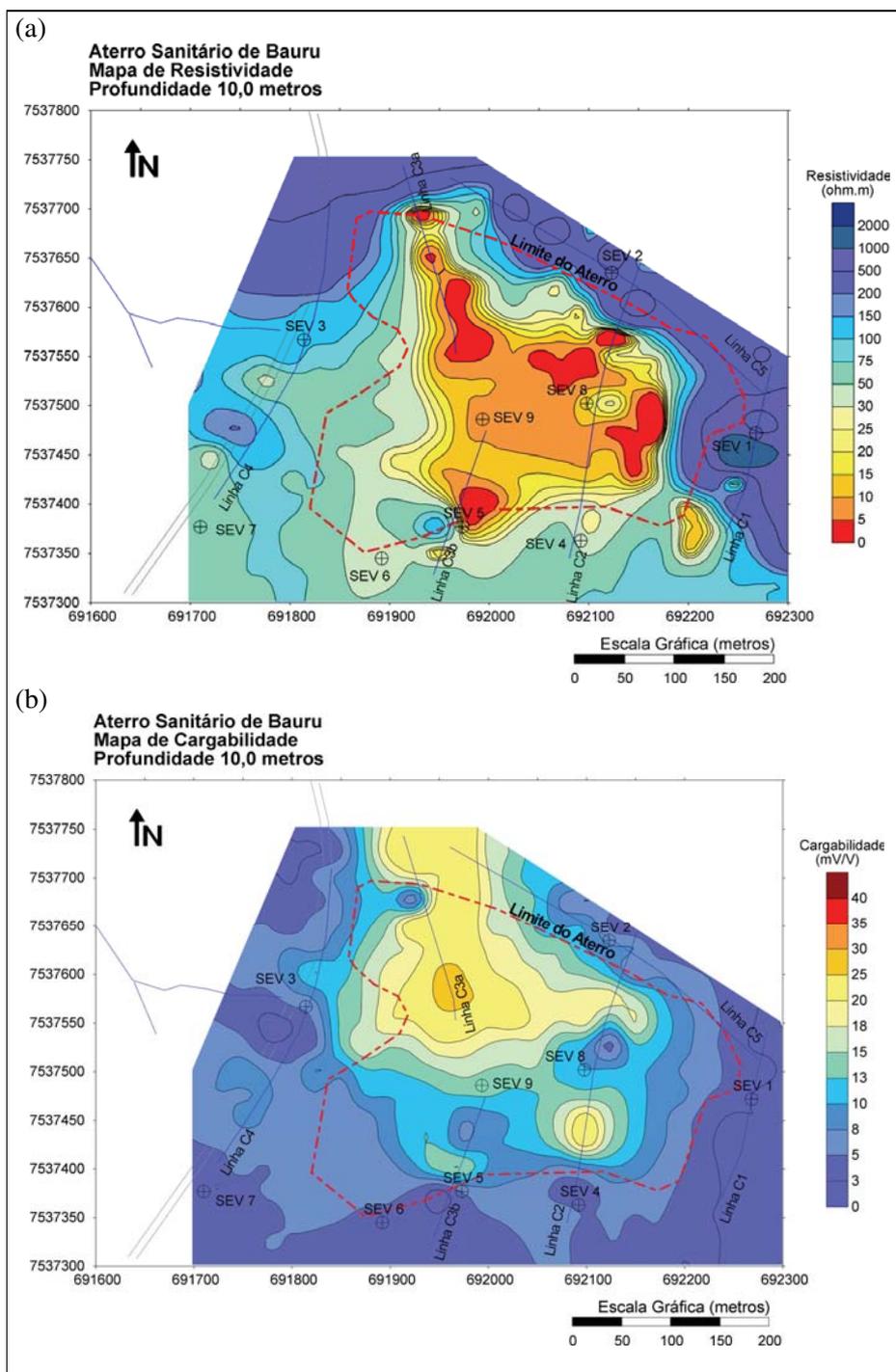


Figura 9 – Mapa de resistividade/IP na profundidade de 10 metros.

DBO 17 mg/L e DQO 66 mg/L), as concentrações mostram que os valores estão acima dos permitidos pela Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental – CETESB (2001). É impor-

tante lembrar que os metais cádmio e cromo são considerados contaminantes perigosos e o monitoramento contínuo do aterro possibilitará que os técnicos responsáveis tomem as medidas

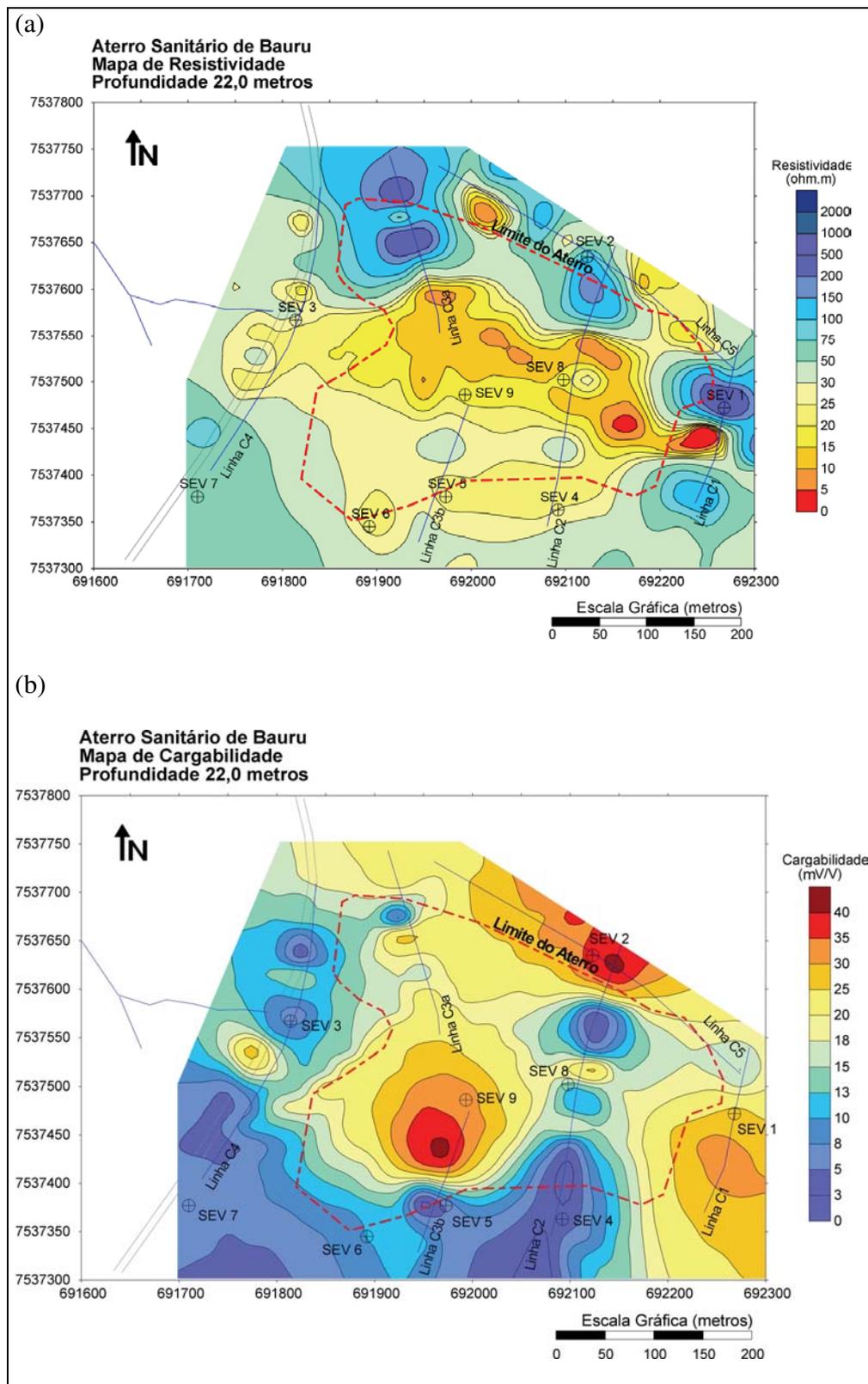


Figura 10 – Mapa de resistividade/IP na profundidade de 22 metros.

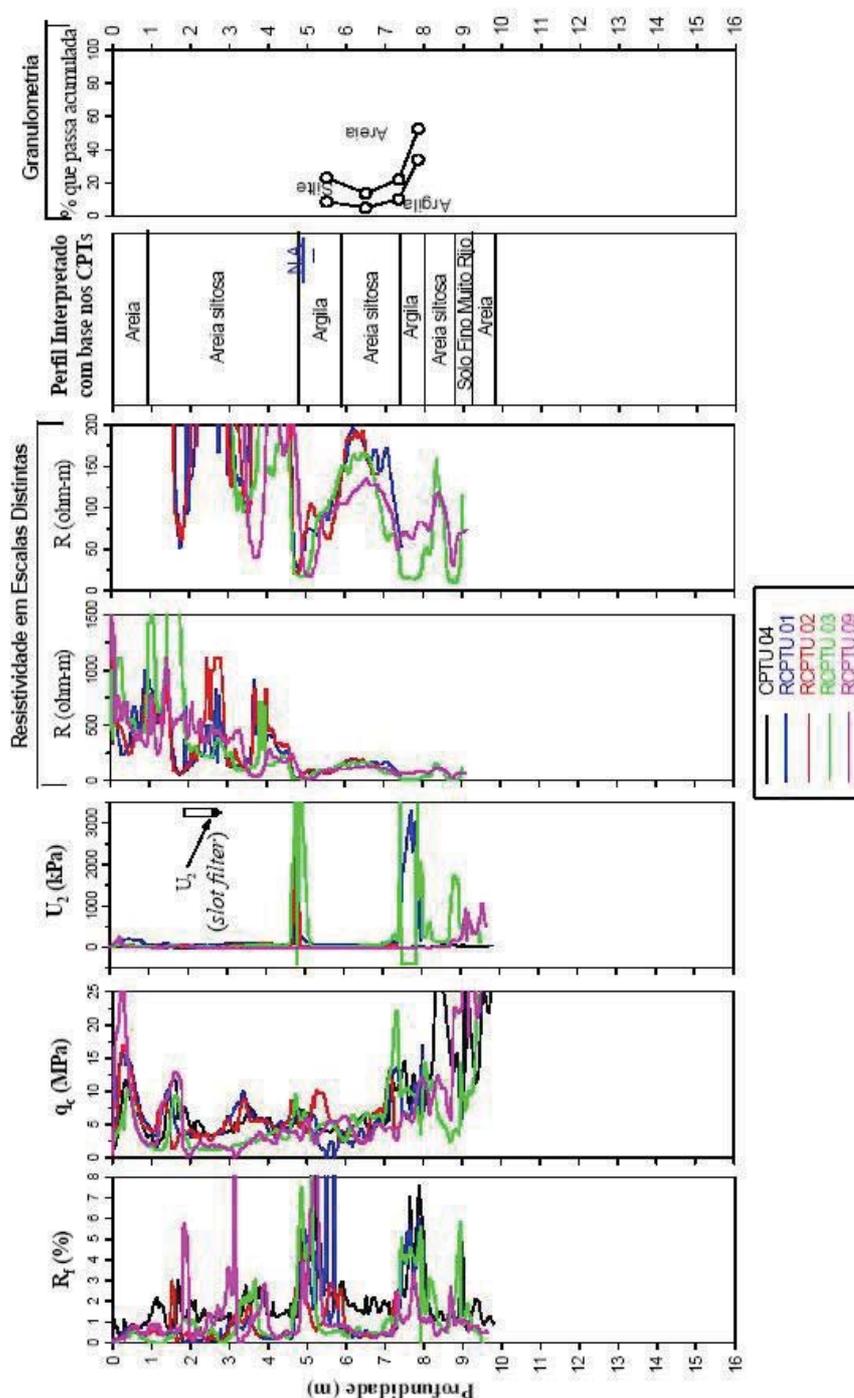


Figura 12 – Resultados de ensaios RCPTU realizados a jusante do aterro (Mondelli, 2004).

de estudo quanto às características do meio físico e quanto às relações entre os resíduos e o local de disposição.

Pela análise qualitativa dos dados obtidos pelo método do potencial espontâneo, concluiu-se que o fluxo da água subterrânea

da área de estudo detectado pelo SP e confirmado pelo método da eletrorresistividade, segue no sentido principal de leste para oeste-noroeste da área, caracterizado pelo crescimento dos valores de potencial natural no sentido do fluxo. Portanto, o SP

Tabela 3 – Análise das águas dos poços de monitoramento permanente instalados no Aterro Sanitário de Bauru-SP.

PARÂMETRO	POÇOS DE MONITORAMENTO PERMANENTES								
	P01	P02	P03	P04	P05	P06	P07	P08	P09
pH	4.64	5.41	6.22	5.88	7.9	4.84	5.36	5.78	5.89
Alcalinidade (mg/L)	5	13	122	118	72	6	37	56	73
Cloretos (mg/L)	98	5	5.5	5	21	3.5	61.5	43.5	59
Condutividade (s/cm)	465	47	183	174	360	55	257	161	286
OD (mg/L)	3.08	4.59	4.01	3.65	2.34	2.44	3.78	3.69	3.79
DBO (mg/L)	18	8.9	6	3.5	9	10	3.2	11	2.9
DQO (mg/L)	39	18	8	4	16	13	3	16	3
Carbono orgânico total (mg C/L)	1.433	0.585	0.731	0.948	3.034	3.28	1.361	1.187	1.583
Sulfatos (mg/L)	<1	1	<1	<1	65	9	<1	<1	<1
Sulfetos (mg/L)	<0.001	0.001	<0.001	<0.001	0.003	0.007	<0.001	<0.001	<0.001
Nitrogênio amoniacal (mg/L)	0.15	0.05	0.02	0.05	0.91	0.08	0.11	0.04	0.32
Nitrogênio nitrato (mg/L)	1.08	0.27	0.54	0.66	14.85	0.49	0.24	0.53	0.77
Nitrogênio nitrito (mg/L)	0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001
Nitrogênio total (mg/L)	0.28	0.13	0.33	0.2	0.41	0.2	0.23	0.15	0.56
Fosfato total (mg/L)	0.04	0.03	0.06	0.04	0.07	0.04	0.04	0.03	0.04
Coliformes totais (UFC/100 mL)	1060	600	900	18000	500	250	450	1200	20000
E. COLI (UFC/100 mL)	10	0	0	0	0	0	0	10	10
Zinco (mg/L)	0.2	0.19	0.07	0.15	0.19	0.13	0.16	0.11	0.08
Cádmio (mg/L)	<0.0006	<0.0006	<0.0006	0.02	0.08	<0.0006	<0.0006	<0.0006	<0.0006
Níquel (mg/L)	0.06	<0.008	<0.008	<0.02	0.09	<0.008	0.02	<0.008	<0.008
Ferro total (mg/L)	34.5	18.2	4.1	1.1	15.5	1.8	27.4	1	3.1
Cromo total (mg/L)	<0.005	<0.005	<0.005	<0.005	<0.005	<0.005	<0.005	<0.005	<0.005

Notas: (1) A cor cinza destaca os poços que mais sofreram a influência da pluma de contaminação. (2) A cor vermelha destaca os parâmetros que mais apresentaram alteração. (3) A cor amarela destaca os valores que estão acima dos limites estabelecidos pelas normas de potabilidade.

fornece respostas úteis ao estudo do fluxo da água subterrânea, além de ser um método de operação simples e de baixo custo.

A análise das curvas obtidas pela técnica de sondagem elétrica vertical realizada fora da cava preenchida com resíduos, possibilitou definir a posição do nível d'água e do posicionamento dos diversos materiais em subsuperfície (foram identificados 5 horizontes geoeletricos), assim como possibilitou observar a profundidade do nível d'água, a qual variou entre 8,03 e 12,6 metros. A heterogeneidade elétrica observada nas camadas mais superficiais reflete a mistura de materiais que caracterizam o solo superficial da área, representado ora por uma camada de areia fina, silto-argilosa, seguida de solo coluvionar, ora pelo próprio

colúvio composto de areia argilosa. Isto foi constatado a partir das sondagens piezocone de resistividade realizadas no local, tendo em vista que essa ferramenta de investigação tem grande aplicabilidade para esse fim.

A análise das curvas obtidas pela técnica de sondagem elétrica vertical realizadas sobre a cava preenchida com resíduos, permitiu a determinação da estrutura do aterro sanitário, constituído de material de cobertura do aterro (28,8 – 166 ohm.m); resíduos (18,3 – 18,8 ohm.m); resíduos e chorume (10,2 – 18,8 ohm.m); base da cava (28,9 – 29,9 ohm.m).

Os dados obtidos pela técnica de caminhamento elétrico e IP foram interpretados com o auxílio de software de inversão, que

além de ser um processo de interpretação simples e rápido, permitiu uma primeira aproximação para o formato dos corpos e a obtenção de valores reais de resistividade e cargabilidade, de forma a tornar os resultados mais precisos e confiáveis.

A resistividade, muito mais do que a cargabilidade, permitiu definir o limite entre a zona não saturada e a zona saturada, como evidenciado na Linha C4 (jusante do aterro). A resistividade e a cargabilidade foram sensíveis à presença da contaminação dentro da zona saturada. Os baixos valores de resistividade associados aos baixos valores de cargabilidade em pontos específicos dentro da zona saturada, caracterizam a presença de contaminantes.

A resistividade e a cargabilidade definiram com clareza os limites laterais entre a cava preenchida com resíduos e o meio natural, como observado na Linha C2. A cava preenchida com resíduos apresentou baixos valores de resistividade associados com altos valores de cargabilidade, enquanto que os materiais naturais apresentaram altos valores de resistividade associados com baixos valores de cargabilidade.

Outro resultado obtido diz respeito aos mapas de resistividade/IP construídos, que mostraram zonas de menor resistividade e cargabilidade se desenvolvendo, principalmente, no sentido WNW, caracterizando o possível caminho da contaminação, que é concordante com o sentido do fluxo subterrâneo local.

Levando em consideração que muitas vezes somente a resistividade não consegue discriminar argila e água com altas concentrações de sais, como no caso de contaminação por chorume, a combinação com IP é importante, pois auxilia na diferenciação entre zonas com argila (que se polarizam) e com chorume (que não se polarizam devido a elevada condutividade iônica). No caso do depósito de resíduos mais especificamente, o incremento da cargabilidade está relacionado com a presença de materiais polarizáveis dispostos na cava, tais como: latas, papéis, pilhas, fragmentos de metais polarizáveis.

A partir dessa conclusão e de outras informações obtidas pelos ensaios geofísicos, recomendou-se que as sondagens com o piezocone de resistividade, instalações de poços de monitoramento e amostragem de solo e água fossem realizadas em posições específicas onde foram observadas assinaturas geofísicas que sugeriram a presença de contaminantes.

Os ensaios diretos confirmam a existência da contaminação, como constatado nas análises das águas dos poços de monitoramento. Concentrações anômalas de metais pesados e alterações de valores de alguns parâmetros físico-químicos foram observadas nos locais indicados pelos resultados geofísicos, evidenciando a importância do uso de geofísica em programas de caracterização geoambiental.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pela concessão da bolsa de pesquisa, à Fundação de Amparo a Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP) pelo auxílio concedido para a realização das etapas de campo e programa de investigação direta, ao Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas da USP (IAG/USP) pelo suporte à pesquisa e aos revisores da Revista Brasileira de Geofísica.

REFERÊNCIAS

- BENSON RC, GLACCUM RA & NOEL MR. 1982. Geophysical techniques for sensing buried wastes and waste migration. U.S. Environmental Protection Agency, Las Vegas, Nevada, 236 p.
- BOBACHEV AA, MODIN IN, PERVAGO EV & SHEVNIN VA. 1990-95. IPI (Vertical Electrical Sounding and Induced Polarization Interpretation), developed in Geological Department of the Moscow University. Disponível em: <http://www.geol.msu.ru/deps/geophys/rec_labe.htm>. Acesso em: 10 abr. 2003.
- CAVAGUTI N & SILVA FP. 1992. Gestão dos recursos hídricos subterrâneos na cidade de Bauru – SP, face as características hidrogeológicas especiais da região. Anais do VII Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas, Belo Horizonte, MG, p. 74–79.
- CETESB. COMPANHIA DE TECNOLOGIA DE SANEAMENTO AMBIENTAL. 2001. Relatório de estabelecimento de valores orientadores para solos e águas subterrâneas no Estado de São Paulo. São Paulo, SP, 73 p.
- ELIS VR & ZUQUETTE LV. 1997. Determinação da estrutura do aterro sanitário de Ribeirão Preto-SP através de métodos geoeletricos. Anais do V Congresso Internacional da Sociedade Brasileira de Geofísica, V1, São Paulo, SP, p. 417–420.
- ELIS VR. 1999. Avaliação da aplicabilidade de métodos elétricos de prospecção geofísica no estudo de áreas utilizadas para disposição de resíduos. Tese (Doutorado). Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista, Rio Claro, SP, 264 p.
- 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.
- GEOTOMO SOFTWARE. 2003. Geoelectrical Imaging 2D & 3D – RES2DINV, ver. 3.52 for Windows 98/Me/2000/NT/XP. Rapid 2D Resistivity & IP inversion using the least-squares method. Geotomo Software, Penang, Malaysia, 125 p.
- GIACHETI HL. 2002. Piezocone de resistividade na investigação geoambiental de solos tropicais: aplicação em um aterro sanitário. Relatório final de pesquisa, Universidade Estadual Paulista, Bauru, SP, 239 p.

- GOLDEN SOFTWARE, Inc. 1997. Surfer® for Windows Version 6. User's Guide. Golden, Colorado, USA.
- HYOUNG-SOO K & YEONGHWA K. 1997. Geoelectrical Monitoring in Nanji Waste Landfill. Anais do V Congresso Internacional da Sociedade Brasileira de Geofísica, V1, São Paulo, SP, p. 417–420.
- IPT. INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS DO ESTADO DE SÃO PAULO. 1981. Mapa Geológico do Estado de São Paulo. IPT, São Paulo, SP, 2 volumes.
- 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.
- MARQUES MAM. 2002. Tecnologia do Piezocone para investigação geotécnica e geoambiental de solos tropicais. Dissertação (Mestrado). Faculdade de Engenharia da Universidade Estadual Paulista, Bauru, SP, 208 p.
- MONDELLI G. 2004. Investigação geoambiental em áreas de disposição de resíduos sólidos urbanos utilizando a tecnologia do piezocone. Dissertação (Mestrado). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 264 p.
- MOURA HP. 2002. Emprego da eletroresistividade e polarização induzida na caracterização geométrica de áreas de disposição de resíduos sólidos urbanos. Tese (Doutorado). Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista, Rio Claro, São Paulo, 223 p.
- 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.
- SUMMER JS. 1976. Principles of Induced Polarization for Geophysical Exploration. Elsevier Scientific Publishing Co, Amsterdam, 227 p.
- TELFORD WM, GELDART LP & SHERIFF RE. 1990. Applied Geophysics. Second Edition. Cambridge University Press, Cambridge, 770 p.

NOTAS SOBRE OS AUTORES

Alexandre Lisboa Lago. Geólogo pelo Centro de Geociências da Universidade Federal do Pará em 1998. Em 2004 obteve o título de Mestrado em Ciências, área de Geofísica Aplicada, pelo Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas da Universidade de São Paulo (IAG/USP). Atualmente está fazendo o Doutorado (bolsista Capes) junto ao Programa de Pós-Graduação em Geofísica do IAG/USP, desenvolvendo a pesquisa "Investigação geofísica 3D com aplicação em meio ambiente: estudo sobre uma área de disposição de resíduos de óleo automotivo em Ribeirão Preto-SP".

Vagner Roberto Elis. Graduado em Geologia em 1990 pela Universidade Estadual Paulista. Mestre em Geociências pela Universidade Estadual Paulista em 1993 desenvolvendo a dissertação "A aplicação de geofísica para análise do meio físico: Importância para elaboração de mapeamento geotécnico". Doutor em Geociências pela Universidade Estadual Paulista em 1999 defendendo a tese "Avaliação da aplicabilidade de métodos elétricos de prospecção geofísica no estudo de áreas utilizadas para disposição de resíduos". Docente do Departamento de Geofísica do Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas da Universidade de São Paulo, com atuação nas áreas de Geofísica Aplicada a estudos ambientais e hidrogeológicos.

Heraldo Luiz Giacheti. Engenheiro Civil pela Universidade Estadual Paulista. Doutor em Engenharia (Geotecnia-São Carlos), pela Universidade de São Paulo, em 1991 defendendo a tese "Estudo Experimental de Parâmetros Dinâmicos de Alguns Solos Tropicais do Estado de São Paulo", com Pós-Doutorado em Geotecnia Ambiental pela University of British Columbia, U.B.C., Canadá. Professor Livre-docente da Faculdade de Engenharia de Bauru, FEB-UNESP, desde 2001, com atuação nas áreas de Geotecnia, Mecânica de Solos e Geotecnia Ambiental.