

APLICAÇÃO INTEGRADA DE MÉTODOS GEOELÉTRICOS EM ÁREAS DE DISPOSIÇÃO DE RESÍDUOS INDUSTRIAIS: CIDADE DE FRANCA, BRASIL

Integrated application of geophysical methods to investigate industrial waste disposal areas: Franca City, Brazil

Vagner Roberto Elis*

Lázaro Valentim Zuquette**

RESUMO - Actualmente existe um crescente interesse pelo estudo de técnicas combinadas de investigação geológico-geotécnica para caracterizar áreas expostas aos mais variados tipos de fontes de poluição. Nesse campo de estudo têm sido extensamente aplicados métodos geofísicos, especialmente os métodos da resistividade eléctrica e electromagnético indutivo, que possibilitam a investigação de uma série de características do meio físico frente ao processo de contaminação, de uma maneira rápida e a baixos custos. A utilização integrada de outros métodos ainda pouco aplicados, como o potencial espontâneo e a polarização induzida, com esses métodos tradicionalmente utilizados, como a resistividade eléctrica, permitem uma análise ainda mais detalhada do problema ambiental, fornecendo informações espaciais e temporais que possibilitam avaliar e orientar com maior rigor as investigações directas, técnicas de monitoramento e remediação. Nesse trabalho são apresentados os resultados de aplicação integrada de métodos geofísicos eléctricos na caracterização de uma área de disposição de resíduos industriais na região de Franca, estado de São Paulo, Brasil. Os resultados permitiram definir e delimitar as zonas que foram afectadas pelo fluxo dos líquidos percolados a partir das cavas.

SYNOPSIS - An increasing interest by studies of the prospecting techniques of the environmental components when they are exposed to pollution activities is observed nowadays. Several environmental characteristics can be investigated by geophysical methods, main by the electrical and electromagnetic methods. This work shows some results get by geophysical surveys in the search of geoenvironmental information about the damage caused by industrial waste disposal. The resistivity, induced polarization and spontaneous potential methods, were carried out in industrial waste disposal area, in the Franca region, state of São Paulo. The results show in this paper confirms that the geophysical methods produce high quality information to assess areas affected by contaminants from waste disposal. Geological and geotechnical attributes of the land (groundwater level, groundwater flow, soil layer thickness) and detection and delimitation of the waste bodies and the interference with the surrounding media can be assessed using these methods. Combining the different geophysical methods is an effective way to get detailed information required in a geological geotechnical characterization program.

1 - INTRODUÇÃO

Devido a crescente preocupação com a protecção do meio ambiente e a preservação da qualidade dos mananciais hídricos, as áreas de disposição de resíduos, tanto domésticos como industriais, têm merecido especial atenção dos profissionais ligados à investigação e caracterização geoambiental. Dentro desse contexto, alguns métodos geofísicos -

* Professor Doutor, Instituto de Astronômico e Geofísico/USP, São Paulo, Brasil. E-mail: vagnelis@iag.usp.br

** Professor Livre Docente, Escola de Engenharia de São Carlos/USP, São Carlos, Brasil. E-mail: lazarusl@sc.usp.br

principalmente os métodos da resistividade eléctrica e magnético indutivo - vêm sendo utilizados nesse campo de aplicação principalmente no mapeamento e monitoramento de frentes de contaminação (Kelly, 1976; Costa e Ferlim, 1993). A aplicação destes métodos geofísicos poderão fornecer, desde que adequadamente escolhidos e dimensionados, informações importantes com respeito a forma e estrutura dos depósitos de resíduos, permitindo determinar o volume de resíduos e o perfil vertical do sistema resíduos – meio físico (Carpenter *et al.*, 1990), definição do sentido de fluxo das águas subsuperficiais, bem como as relações envolvendo a taxa de poluentes no sistema e as características geológicas, geotécnicas e hidrogeológicas da área.

Este trabalho apresenta os resultados da aplicação integrada dos métodos da resistividade eléctrica, polarização induzida e potencial espontâneo em uma área de disposição de resíduos industriais, oriundos do tratamento de couro na região de Franca, estado de São Paulo, Brasil.

A investigação geoambiental por meio de técnicas geofísicas foi adoptada em função das características geológico-geotécnicas da área que é caracterizada por uma pequena espessura de material inconsolidado residual recobrindo os basaltos fracturados, assim como pela variabilidade do topo da zona saturada durante o ano, que se posiciona desde o meio rochoso até o terroso. Devido a essas características geológico-geotécnicas a investigação geoambiental por meio de poços de monitoramento seria muito onerosa e de grande incerteza em função das variações da zona saturada e das características geológicas para perfuração.

2 - CARACTERIZAÇÃO GEOLÓGICO-GEOTÉCNICA DA ÁREA ESTUDADA

O trabalho foi desenvolvido em uma área de disposição de resíduos ricos em crómio, originados da indústria do couro, em Restinga – SP (Fig. 1).

A região de Franca é conhecida pelo grande desenvolvimento da indústria de calçados e outros produtos de couro. Os processos de preparação do couro para a confecção desses produtos produzem resíduos líquidos que contêm metais pesados, em especial, o crómio e o cádmio. De uma forma geral, altas concentrações de metais pesados no ambiente natural são preocupantes em função de sua acção tóxica em homens e animais, que incluem defeitos genotóxicos e mutações, produzindo desordem genética e câncer.

Os resíduos dos curtumes são dispostos nas proximidades das indústrias ou nos arredores da cidade e, em alguns casos, lançados directamente nos cursos d'água superficiais. A área estudada nesse trabalho é caracterizada pela disposição em valas desse tipo de resíduo no município de Restinga, vizinho à cidade de Franca.

A área localiza-se à margem da Rodovia Cândido Portinari, a cerca de 5 km da cidade de Franca (Fig. 2). O substrato rochoso é caracterizado por basaltos fracturados da Formação Serra Geral, recobertos por solos residuais argilosos e silto-argilosos com espessuras da ordem de 10 metros, sendo 6 metros de solo residual maduro e 3 e 4 metros de saprolito. Texturalmente a porcentagem de argila aumenta em direcção à superfície enquanto a fracção silte aumenta em direcção ao topo rochoso (base do perfil de alteração). A condutividade hidráulica varia entre 10^{-5} e 10^{-6} m/s, associado a uma variação do índice de vazios de 0,9 a 1,2, de peso específico dos sólidos de 2,8 a 3,2 e da capacidade de troca catiónica entre 10 a 15 cmol ⁽⁺⁾/kg de material. Mineralogicamente são encontrados espécies como a gibsit, magnetita, ilmenita e óxidos e hidróxidos de Fe e Al, que apresentam-se em porcentagens variadas de acordo com o grau de alteração (intemperismo). O nível da zona saturada é bastante próximo da superfície, principalmente nos períodos chuvosos, quando chega inclusive a aflorar em alguns pontos. A área está posicionada em uma vertente próxima de um curso d'água denominado de Ribeirão dos Bagres. A situação regional pode ser observada na fotografia aérea apresentada na Fig. 3.



Fig. 1 – Localização da área de ensaio no Estado de São Paulo.

O local de disposição dos resíduos é constituído por um conjunto de 4 valas construídas nas camadas superiores de solo residual do basalto, com cerca de 4 metros de largura por 20 metros de comprimento cada, e profundidades nunca superiores a 2 metros (Fig. 4), sem nenhum tipo de barreira impermeabilizante nas bases e laterais.

As características geológicas básicas estão relacionadas a seguir:

- Nível d'água a 4 metros de profundidade - pela classificação aqui utilizada, valores de profundidade menores que 5 metros começam a ser problemáticos, devido a profundidades das cavas serem da ordem de 2 metros.
- Declividade de 12%; valores maiores que 15% são restritivos.
- A área está em uma zona de possibilidade de ocorrência de fenómenos erosivos.

3 - METODOLOGIA GEOFÍSICA UTILIZADA

A aplicação de métodos eléctricos possibilita o estudo de diversas características do meio físico, que têm grande importância para a caracterização de áreas contaminadas. As características geológicas, geotécnicas, hidrogeológicas e ambientais que podem ser obtidas são: (a) profundidade do substrato rochoso; (b) presença de discontinuidades; (c) variações texturais do solo (em alguns casos); (d) profundidade do nível d'água; (e) fluxo das águas subsuperficiais; (f) presença e distribuição espacial de resíduos; (g) contaminação de solos e (h) contaminação de águas subterrâneas e formato da frente de contaminação, que são de grande valor na avaliação e monitoramento ambiental.

Por meio dos métodos eléctricos utilizados neste trabalho, procurou-se avaliar todas as características do meio físico de maneira a permitir uma avaliação geoambiental. Convém salientar que, evidentemente, dados de métodos directos de investigação, como poços

tubulares, sondagens e outros, se disponíveis no local de estudo, não devem ser desprezados no processo de interpretação geofísica, pois permitem um maior refinamento do modelo.

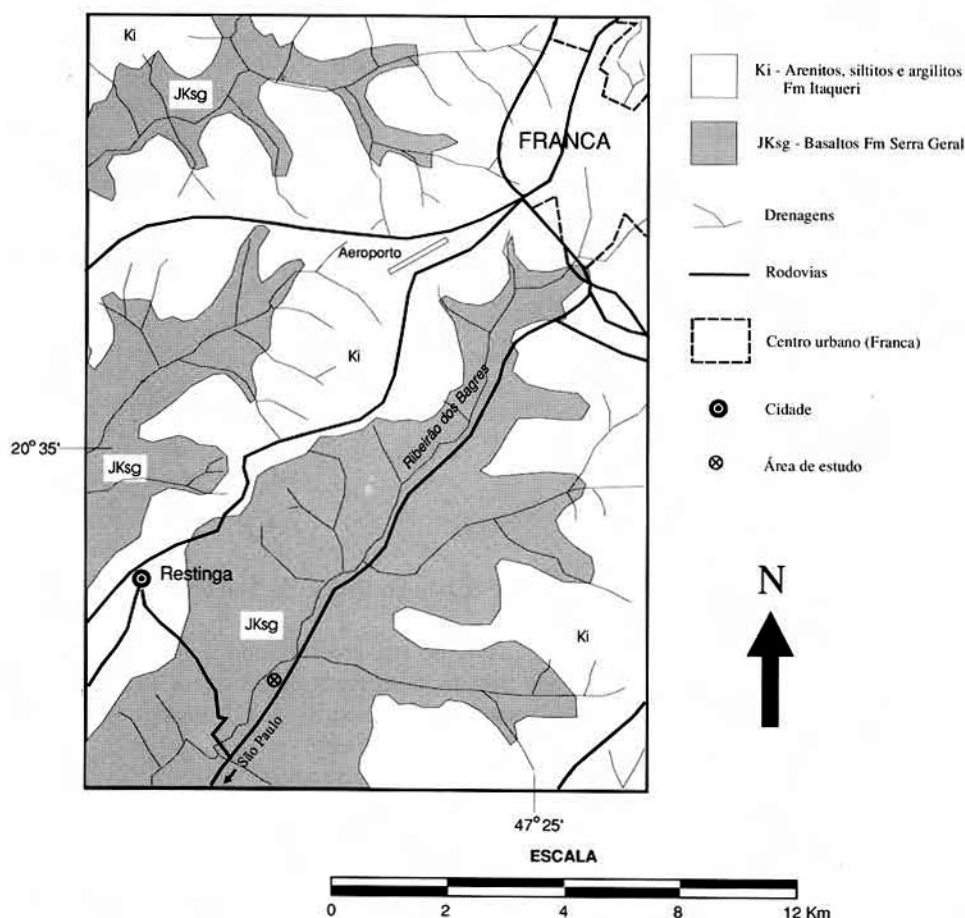


Fig. 2 – Mapa geológico e localização da área de estudo no Município de Restinga, na região de Franca (SP).

Dessa forma, foram realizados os seguintes ensaios:

- Sondagens eléctricas verticais (arranjos Schlumberger) para estudar o perfil vertical do solo, profundidade do topo rochoso, profundidade da zona saturada e fluxo subterrâneo;
- Caminhamento eléctrico - resistividade e polarização induzida (arranjo dipolo - dipolo) para mapear os locais preenchidos com resíduos e a área de influência da contaminação;
- Ensaios de potencial espontâneo (método de gradientes) com o objectivo de identificar zonas de maior actividade geoquímica, que podem indicar a infiltração de líquidos percolados nas camadas de solo da base do aterro.

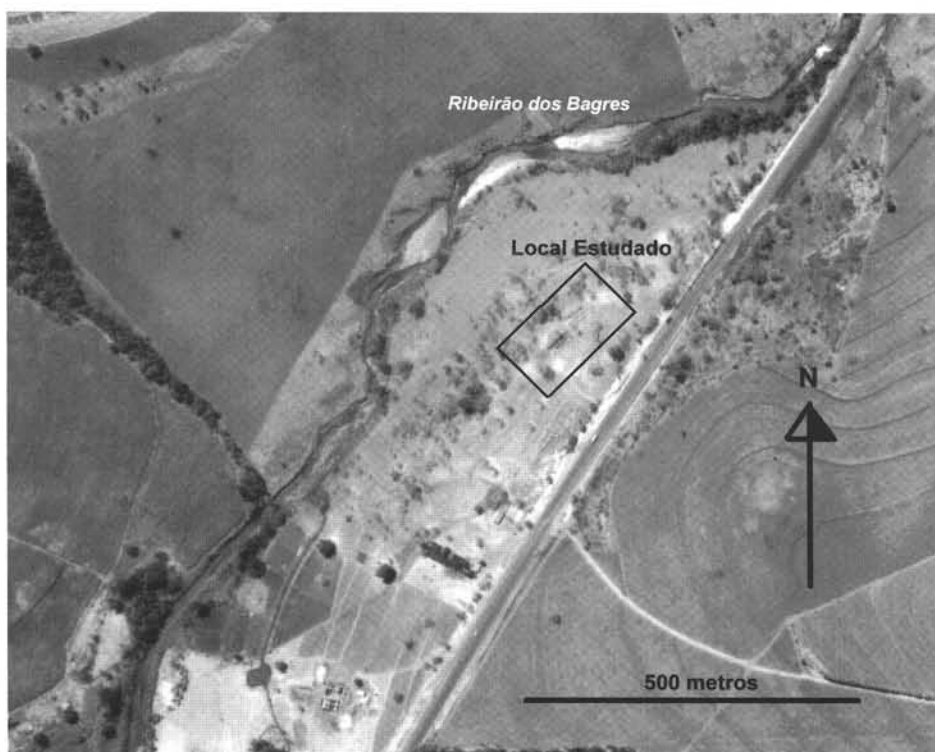


Fig. 3 – Fotografia aérea da área estudada. Observar posição das cavas.



Fig. 4 – Cava preenchida com resíduos industriais.

3.1 - Método da Resistividade Eléctrica

O método da resistividade eléctrica é provavelmente o método geofísico mais utilizado, principalmente a técnica de sondagem eléctrica, devido à possibilidade de aplicação nos mais diversos campos de estudo, como mineração, geologia de engenharia, hidrogeologia e estudos ambientais.

Este método de prospecção geofísica utiliza uma corrente eléctrica artificial I que é introduzida no terreno por meio de dois eléctrodos (denominados de A e B), com o objectivo de medir o potencial ΔV gerado em outros dois eléctrodos (denominados de M e N) nas proximidades do fluxo de corrente eléctrica, permitindo assim calcular a resistividade ρ em subsuperfície, através da equação:

$$\rho = K \cdot \frac{\Delta V}{I} \quad (\text{ohm.m}) \tag{1}$$

sendo K um factor geométrico que depende das posições dos eléctrodos no terreno e pode ser calculado para qualquer arranjo por meio da fórmula geral:

$$K = \frac{2\pi}{(1/AM) - (1/AN) - (1/BM) + (1/BN)} \tag{2}$$

A variedade de técnicas de aplicação de ensaios (caminhamento ou perfil eléctrico e sondagem, por exemplo) que possibilitam a investigação no sentido vertical (sondagem eléctrica) ou lateral (caminhamento eléctrico) e uma variedade ainda maior de arranjos de campo (Schlumberger, Wenner, dipolo-dipolo, polo-dipolo, Lee, entre outros) conferem ao método uma versatilidade muito grande. Na Fig. 5 são mostradas as configurações de campo de sondagem eléctrica e de caminhamento dipolo-dipolo. Essas várias possibilidades de aplicação de ensaios permite que a utilização de técnicas e arranjos diferentes atendam às necessidades de investigação dos mais variados parâmetros importantes para a caracterização da área e determinação da zona afectada pelos contaminantes.

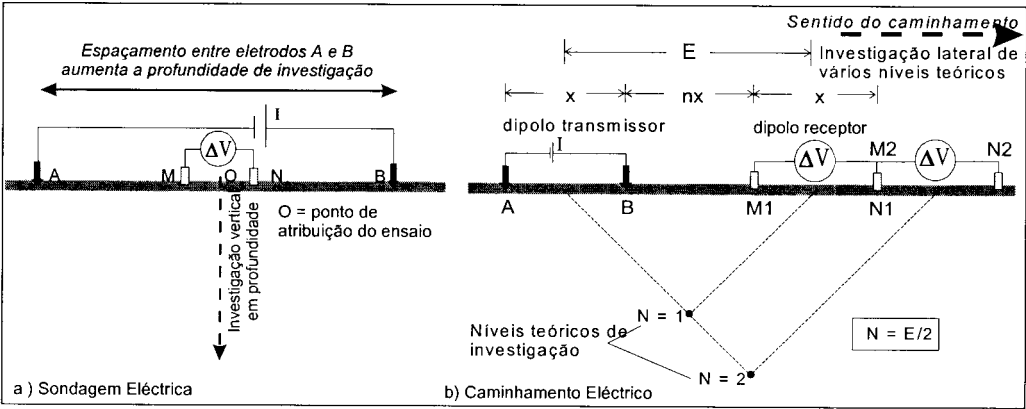


Fig. 5 – Configuração dos ensaios de sondagem eléctrica (a) e caminhamento eléctrico dipolo-dipolo (b).

No presente trabalho, os ensaios de sondagem eléctrica foram executados com um resistímetro de potência de saída de 500 W, utilizando o arranjo Schlumberger, com abertura máxima entre os eléctrodos de corrente de 300 metros. A interpretação das curvas de SEV foi realizada por meio de softwares específicos, a partir de inversão, usando regressão em cadeia.

Os ensaios de caminhamento foram realizados com o arranjo dipolo-dipolo, juntamente com as medidas de polarização induzida que serão descritas mais adiante. As secções obtidas foram processadas através de um software que utiliza um método de elementos finitos de modelagem 2D para resistividade e IP. Nesse método, o modelo é construído a partir de uma secção dividida em células rectangulares, formando uma rede que estende-se lateralmente do primeiro eléctrodo de corrente até o último eléctrodo de potencial (INTERPEX, 1996). Em seguida, cada célula é dividida em quatro triângulos para construir a malha dos elementos finitos (Fig. 6). Cada célula terá uma única resistividade e um único valor de cargabilidade.

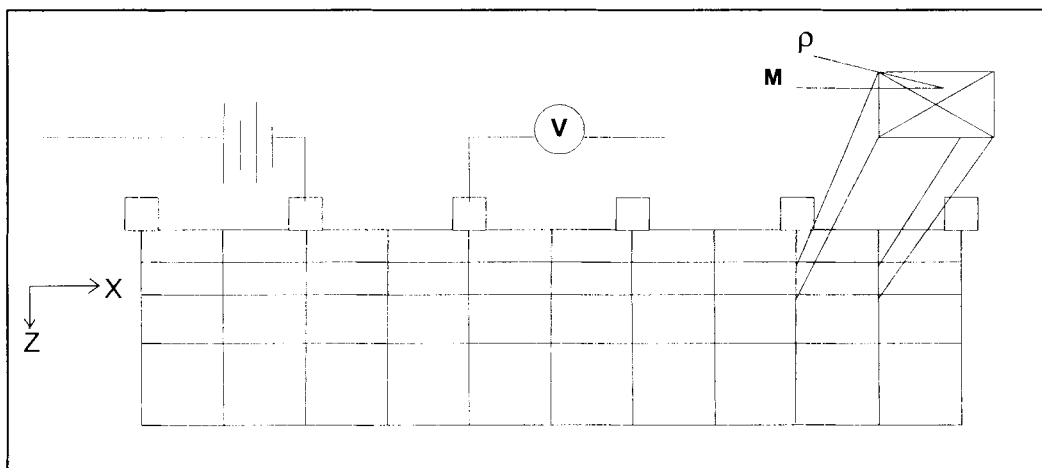


Fig. 6 – Rede de células utilizada na inversão de resistividade e IP.

3.2 - Método da Polarização Induzida (IP)

A Polarização Induzida (IP) é um fenómeno eléctrico estimulado por corrente eléctrica observado como resposta retardada à voltagem, em materiais naturais (Sumner, 1976). No IP - Domínio do tempo, ao se aplicar, por intermédio dos eléctrodos de corrente de A e B cravados na superfície do terreno, uma diferença de potencial ΔV primária ao solo, é provocada consequentemente uma polarização do mesmo. Essa diferença de potencial primária (ΔV_p) não se estabelece e nem se anula instantaneamente quando a corrente é emitida e cortada em pulsos sucessivos. Ela varia com o tempo na forma de uma curva $\Delta V_{IP} = f(t)$. A amplitude de um valor $\Delta V_{IP}(t)$ está directamente ligada à maior ou menor capacidade que os materiais geológicos têm de se polarizarem, constituindo-se, portanto, na base do método. Esta capacidade de polarização constitui a susceptibilidade IP dos materiais da terra. O parâmetro medido em IP (Tempo) é chamado de cargabilidade (M) e pode ser expressa em % ou milivolt/Volt (mV/V):

$$M = \frac{\Delta V_{IP} \times 1000}{\Delta V_p} \quad (\text{mV/V}) \quad (3)$$

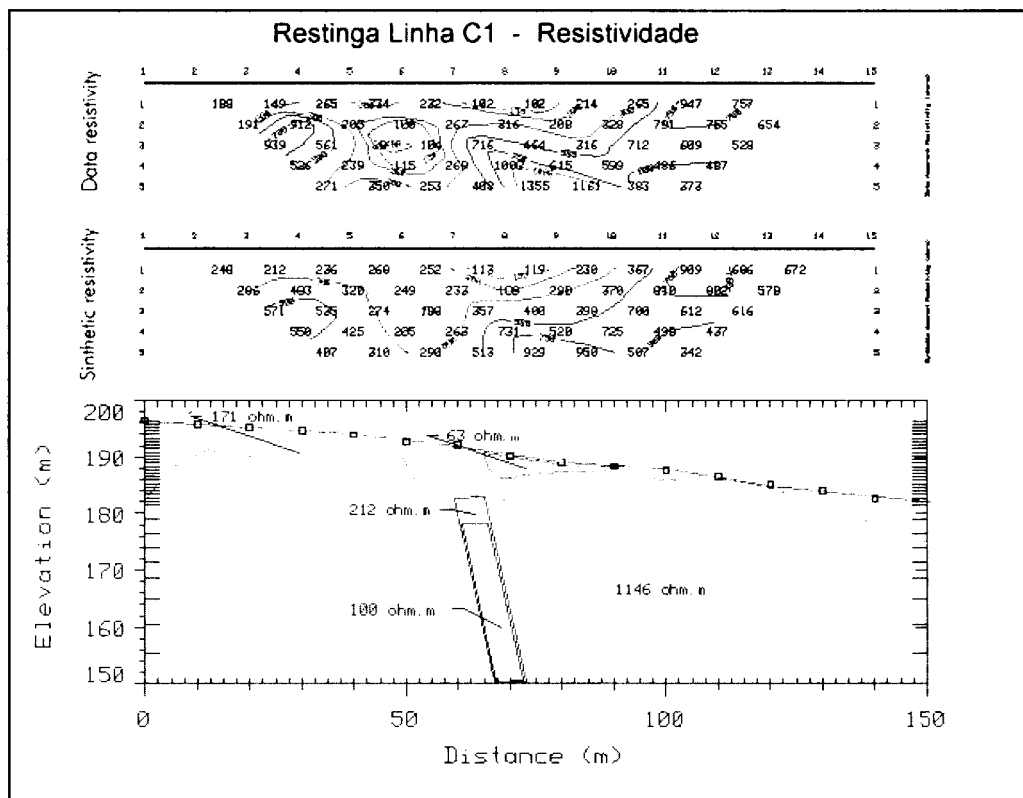


Fig. 7 – Ensaio de caminhamento eléctrico interpretado por modelagem poligonal. A comparação entre as pseudo-seções de campo e sintética, que é gerada pelo modelo poligonal, permitem a análise do ajuste do modelo aos dados reais.

As medidas de IP, normalmente, são realizadas de forma muito semelhante às de resistividade aparente, podendo analisar as diferenças de polarizabilidade do meio físico no sentido vertical (Sondagem IP), como também no sentido horizontal a profundidades constantes (Caminhamento IP), utilizando os mesmos arranjos de eléctrodos do método da resistividade eléctrica. Neste trabalho, o procedimento foi a aplicação de caminhamento dipolo-dipolo com medidas no domínio do tempo, sendo utilizado um conjunto transmissor de 3 kW de potência e um receptor digital. Os ensaios foram executados com tempo de integração de 2 segundos e tempo de atraso (*delay time*) de 130 milissegundos.

No caso de estudos de áreas contaminadas, as pesquisas com o método da polarização induzida ainda são muito recentes. Vogelsang (1995) cita que o método deve detectar principalmente materiais e rochas electricamente polarizáveis dentro de depósitos de resíduos sólidos urbanos. Em casos de resíduos líquidos com alto teor em sais dissolvidos, como é o caso da área em estudo neste trabalho, é esperado um comportamento da cargabilidade semelhante ao de água salgada, onde a alta concentração iônica não apresenta polarização e, portanto, a resposta IP é muito baixa.

3.3 - Método do Potencial Espontâneo (SP)

Potenciais eléctricos naturais ou espontâneos (SP) ocorrem em subsuperfície, e são relativos às actividades eletroquímicas e eletrocinéticas. De acordo com Telford *et al.* (1990), o factor de controle, em todos os casos, é a água subsuperficial. Esses potenciais são associados com alteração de corpos de sulfetos, variações nas propriedades das rochas (conteúdo mineral) em contactos geológicos, actividade bioeléctrica em material orgânico, corrosão, gradientes termais e de pressão em fluidos subterrâneos, e outros fenómenos de natureza similar. No caso de estudo de contaminação, grandes variações dos valores de potencial espontâneo reflectem condições de actividade geoquímica, sendo que em aterros sanitários podem ser observadas variações nos valores de várias centenas de milivolts. Dessa forma, ensaios de SP permitem avaliar se existe movimento de fluidos dos resíduos para o meio físico.

Existem duas modalidades de aquisição de dados. O método de potenciais, onde um eléctrodo permanece fixo e outro se desloca fazendo as leituras em estações sucessivas, e o método de gradientes, utilizado neste trabalho, onde os dois eléctrodos são movidos a cada estação de medida. Para as duas modalidades são necessários dois tipos de correcção: a correcção da polarização de eléctrodos, que consiste em colocar-se os dois eléctrodos a poucos centímetros de distância e medir o potencial entre eles, que deve ser descontado de todas as leituras do perfil. A outra correcção deve ser feita entre os perfis, medindo-se o potencial entre o início de cada perfil ou em uma linha base. Os valores lidos em todos os perfis são então corrigidos em relação ao perfil inicial. No presente trabalho foi utilizado um milivoltímetro digital que possui um sistema apropriado para medição de potencial espontâneo, com escala de leitura entre 0,001 e 1999 mV. Os resultados são apresentados sob a forma de mapas de potencial espontâneo, a partir dos quais é realizada a interpretação qualitativa das anomalias.

4 - ENSAIOS REALIZADOS E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

A área de estudo, como citado anteriormente, é caracterizada pela disposição de resíduos industriais oriundos do tratamento de couro para a fabricação de calçados. Esse processo gera um resíduo pastoso, especialmente rico em crómio e cádmio. Nesse local foram realizados 6 ensaios de sondagem eléctrica, 3 linhas de caminhamento eléctrico dipolo-dipolo resistividade e IP (Linhas C1, C2 e C5), 2 linhas de caminhamento dipolo-dipolo (C3 e C4, somente resistividade) e 4 linhas de potencial espontâneo, conforme distribuição apresentada na Fig. 8. Em duas linhas de caminhamento eléctrico foram realizados levantamentos em épocas pluviométricas distintas para avaliar o efeito da precipitação no comportamento do local.

A interpretação das SEVs permitiu posicionar a zona saturada e o topo do basalto, que estão bem próximos à superfície, sendo que o nível d'água aflora em alguns pontos nos períodos chuvosos. É importante ressaltar que os ensaios de sondagem eléctrica foram executados durante o período de chuvas, época em que o nível d'água está posicionado, em grande parte, dentro da delgada camada de solo, normalmente menor que 10 metros. Na Fig. 9 são apresentados os resultados das SEVs 2 e 4, que mostra essas características do local. Os resultados das SEVs 3 e 5 são apresentados na Fig. 10 e mostram camadas acima da zona saturada com alta resistividade que caracterizam solos com fragmentos de rocha (solos saprolíticos). Um outro factor a ser considerado nesses resultados é a variação dos valores de resistividade para a rocha sã, que provavelmente está associado a variações no grau de fracturação. Como será visto adiante, a presença de fracturas na área é confirmada pelos ensaios de caminhamento eléctrico.

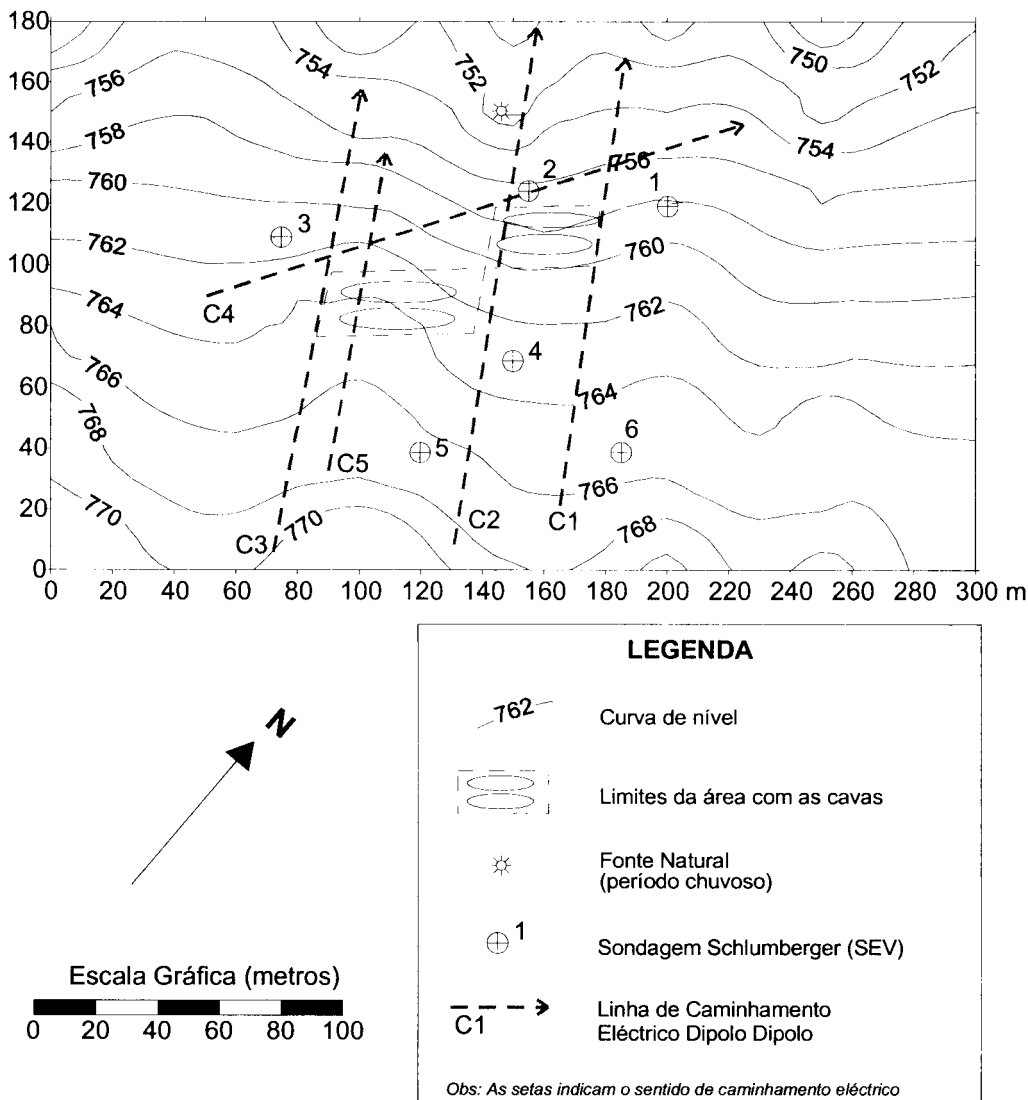


Fig. 8 – Mapa de localização dos ensaios geoeletricos na área das cavas.

Esses resultados mostram que nesse período de chuvas o fluxo subsuperficial ocorre dentro do pacote de material inconsolidado e tem o comportamento apresentado no mapa da Fig. 11. Nos períodos de estiagem, ocorre uma variação significativa do topo da zona saturada, que passa a estar situado no campo da rocha pouco alterada e o fluxo de líquidos passa a ser governado por fracturas no basalto. As fracturas e linhas de fluxo são detectadas pelos ensaios de potencial espontâneo, como discutido adiante.

Os resultados das sondagens eléctricas e as observações de campo possibilitaram a construção de um perfil geológico-geotécnico que atravessa a encosta, passa pelo local dos resíduos e segue até o Ribeirão dos Bagres, que é apresentado na Fig. 12. Esse perfil mostra as

relações entre as camadas de solo e a posição da zona saturada. Pode-se notar a pouca espessura das camadas de solo residual, o nível d'água próximo da superfície e a declividade da encosta (12% em média), características do local que estão em condição limite para que a área seja considerada adequada para receber esse tipo de empreendimento, como citado no início do texto.

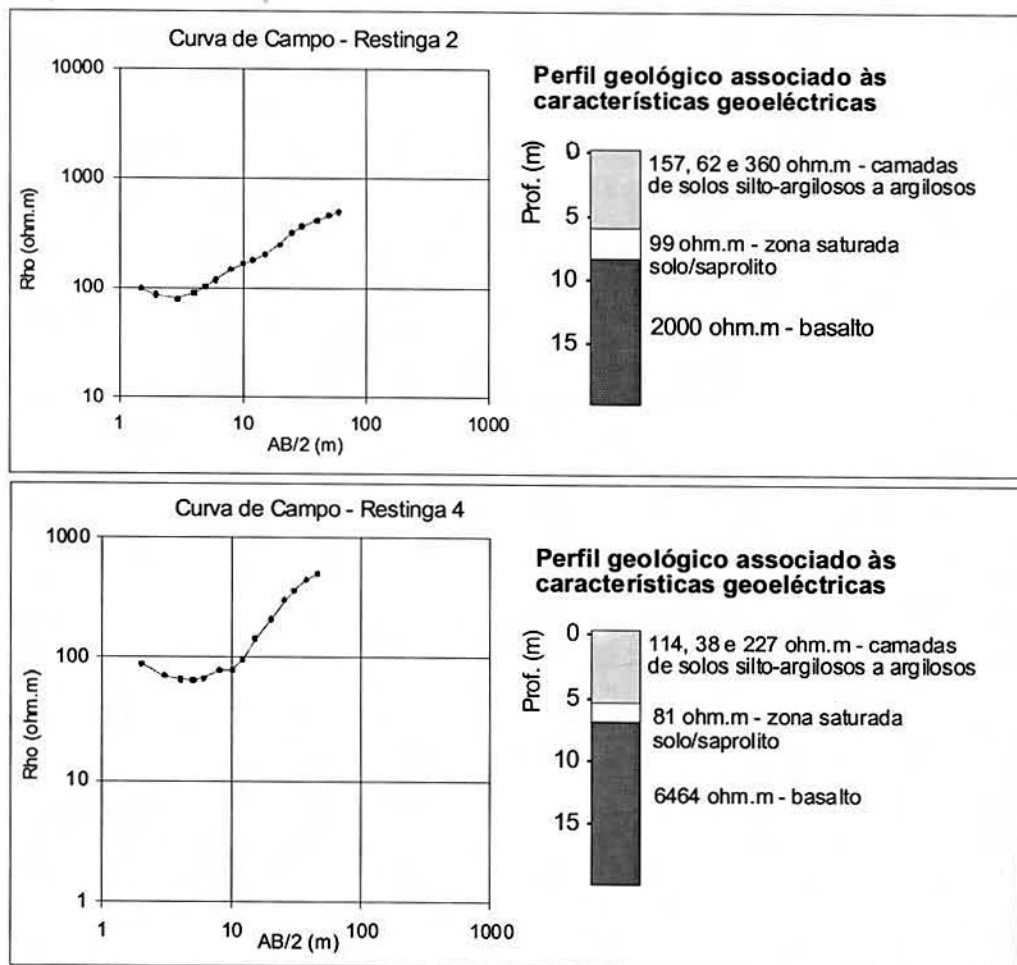


Fig. 9 – Resultados das SEVs 2 e 4, mostrando a pequena espessura de material inconsolidado (solo + saprolito) e a posição da zona saturada em período chuvoso.

Os ensaios de caminhamento eléctrico possibilitaram a elaboração de secções e mapas de resistividade aparente. As anomalias causadas pelos resíduos são condutoras, o que possivelmente se deve à presença de quantidade representativa de cloretos nos resíduos gerados. De acordo com Gois (1997), nos resíduos dos curtumes de Franca, os principais metais ocorrem sobre a forma de soluções aquosas de crómio e cádmio, associados ao potássio, o cálcio, o magnésio e o enxofre.

Os ensaios geofísicos não mostraram influência de contaminação nas camadas mais profundas, apesar das condições naturais (nível d'água e topo rochoso muito rasos, além de uma zona fracturada inferiormente às valas, determinada pelos ensaios geofísicos) parecerem

não serem adequadas para receber os resíduos. Dois factores contribuem para isso: as valas foram construídas em material argiloso com coeficiente de permeabilidade entre 10^{-3} e 10^{-4} cm/s (moderadamente favorável para receber resíduos líquidos, de acordo com a classificação de Zuquette *et al.*, 1994) e o material disposto ser bastante viscoso (quase uma espécie de pasta). A quantidade de resíduos dispostos diariamente não gera volume de líquidos suficiente para que, por infiltração, possam atingir as camadas mais profundas, e por outro lado ficam expostos às condições climáticas e grande parte dos líquidos são evaporados.

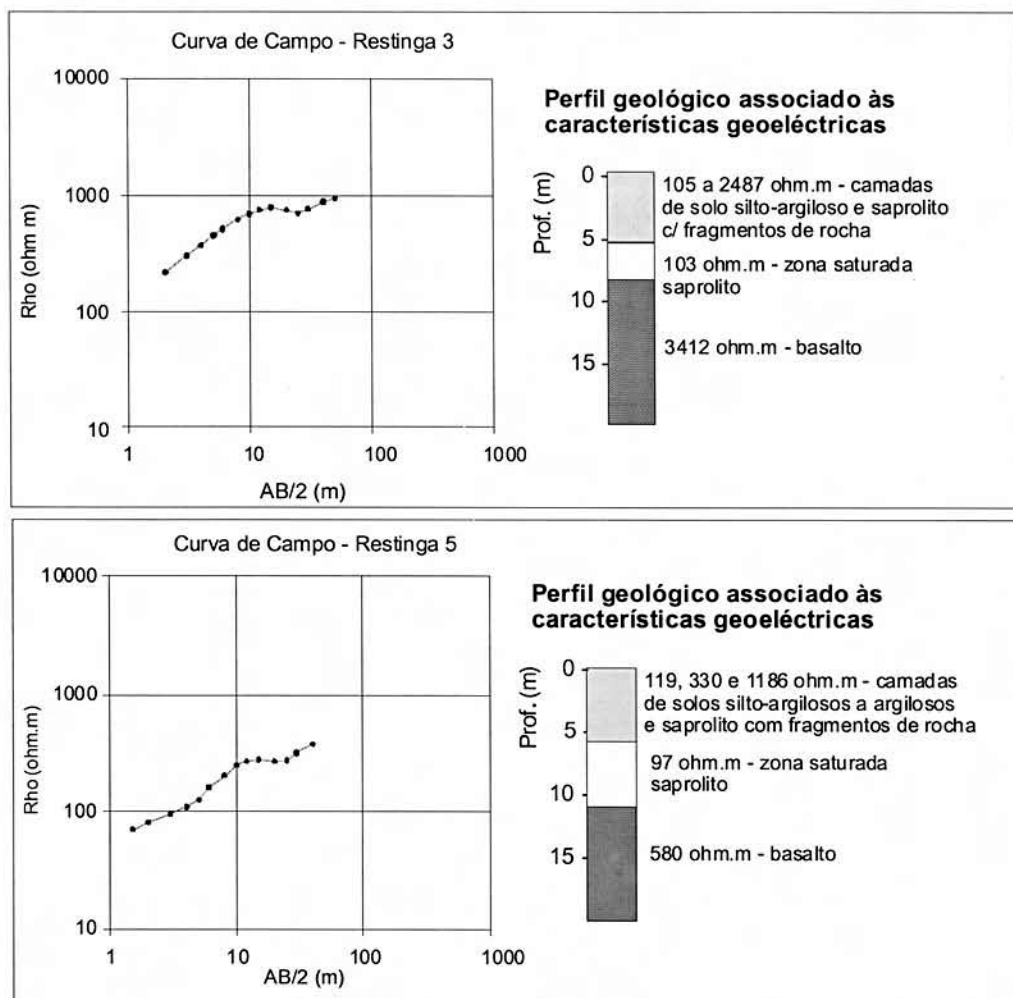


Fig. 10 – Resultados das SEVs 3 e 5, realizadas em locais onde ocorre solo com fragmentos de rocha, caracterizados por altos valores de resistividade. A variação de resistividade para o basalto está relacionada a variação no grau de fracturação.

Os valores de cargabilidade aparente variaram nas pseudo-seções entre 4 e 11 mV/V, sendo que os maiores valores foram interpretados como preenchimento de argila na parte superior da zona de fractura e o basalto (provavelmente, essa pequena anomalia ocorre em

razão da presença de magnetita na rocha). As secções interpretadas dos ensaios de caminhamento eléctrico, apresentadas a seguir, mostram essas relações.

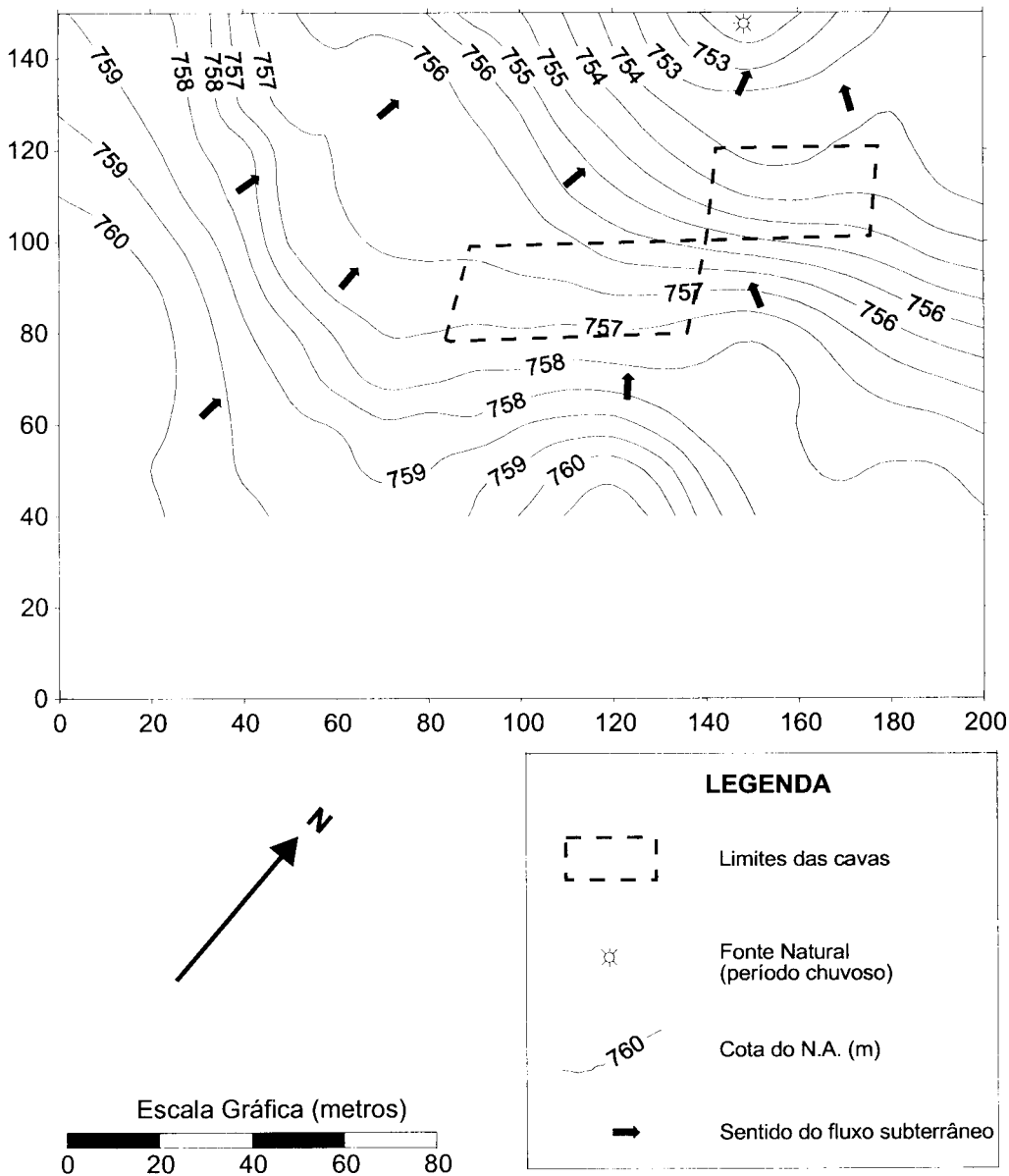


Fig. 11 – Mapa de fluxo subsuperficial da área no período de chuvas.

Na Fig. 13 são apresentadas as secções de resistividade e cargabilidade aparente obtidas, e o perfil interpretado da Linha C1. Podem ser individualizados o solo (171 ohm.m), o basalto (1146 ohm.m), com uma zona de fractura (80 ohm.m), e a zona de influência dos resíduos,

com 63 ohm.m. A zona de influência da contaminação fica restrita a camada de solo superficial. Como pode ser notado, os valores de cargabilidade para o solo superficial, a zona de resíduos e a própria fratura têm valores baixos de cargabilidade, que variam entre 5 e 6,5 mV/V. O basalto apresentou valores um pouco maiores, de 14 mV/V e a maior responsável pela anomalia foi uma área existente no topo da zona de fratura, com 21 mV/V. Essa área foi interpretada como um preenchimento de material argiloso, possivelmente não saturado.

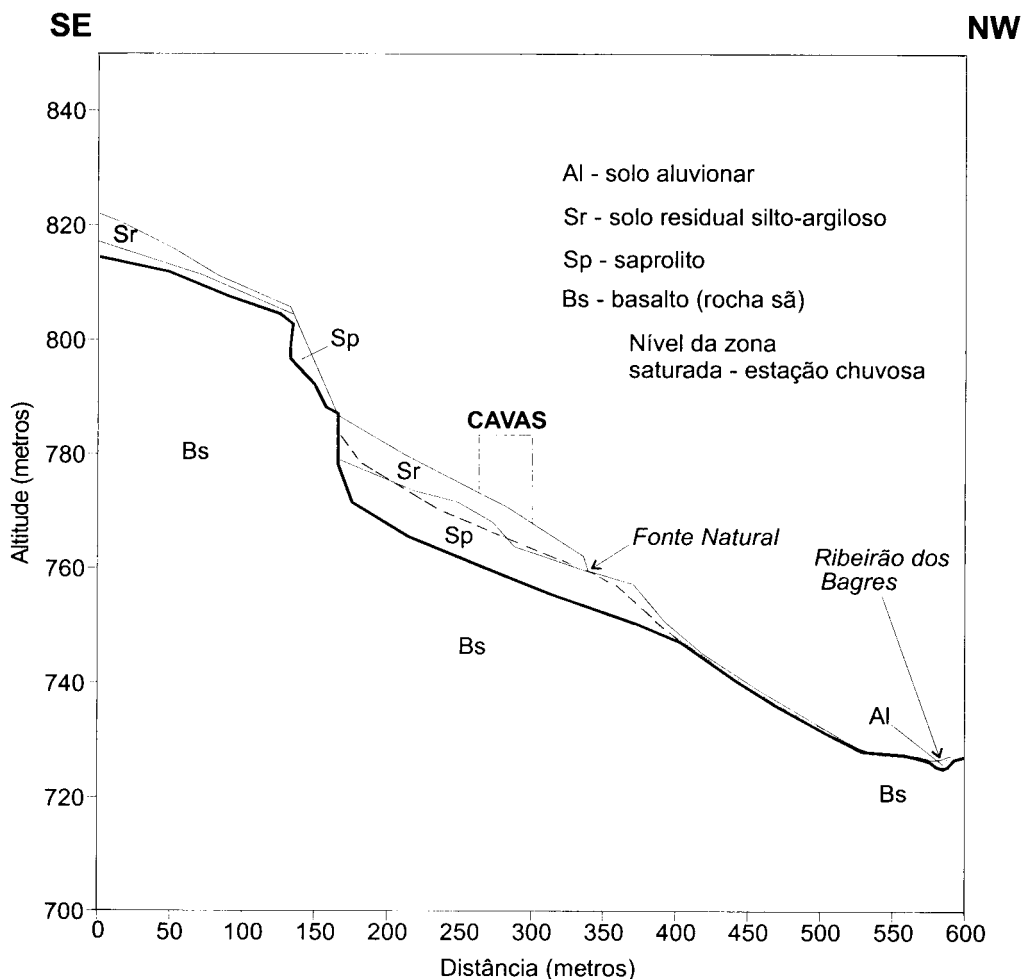


Fig. 12 – Perfil geológico-geotécnico da encosta onde está situada a área de disposição de resíduos. O local das cavas está entre as posições 250 e 300 metros do perfil.

Na linha C2 (Fig. 14), que passa pelo centro da área das valas, pode ser observado um aumento da área de influência dos resíduos, que apresenta inclusive valor menor de resistividade (19 ohm.m) em relação a C1, mas continua restrita à parte mais superficial, atingindo somente a camada de solo residual do basalto. A zona de fratura também ocorre, com mergulho para NE, da mesma forma que na linha vizinha. É possível individualizar, considerando dados de polarização induzida, os resíduos recentemente dispostos na primeira

vala, com valor de cargabilidade de 3,5 mV/V, inferiores inclusive ao valor obtido para a área de influência de resíduos (8 mV/V). Novamente, as maiores anomalias foram causadas pelo preenchimento de material argiloso (25 mV/V) e o basalto (20 mV/V).

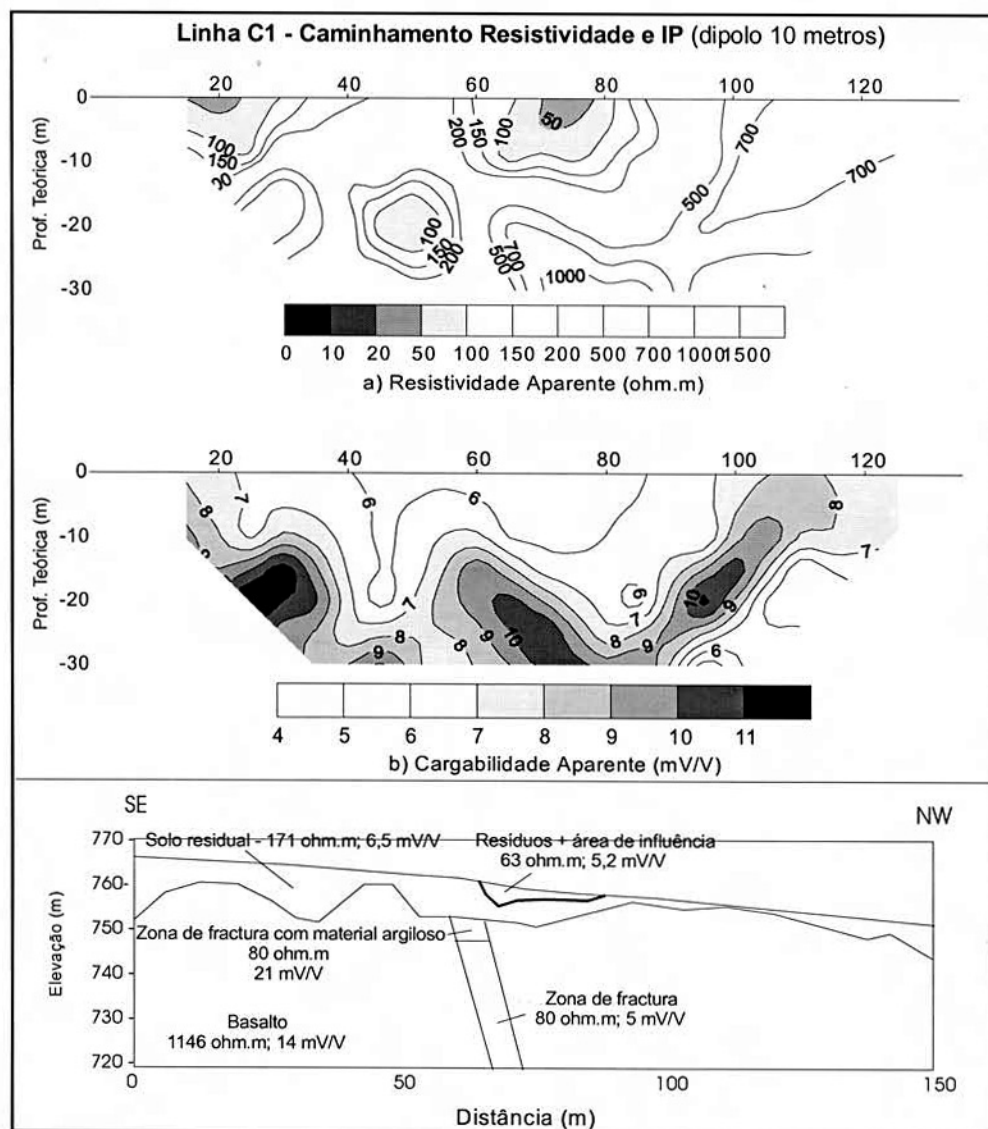


Fig. 13 – Seções de resistividade e cargabilidade interpretadas da Linha C1.

Dessa forma, o método da resistividade eléctrica pode ser considerado como o mais adequado para estudo desse tipo de área de disposição de resíduos. O método da polarização induzida apresentou resultados menos claros e de interpretação mais difícil em termos de materiais existentes e implica ensaios de campo mais trabalhosos e demorados em função das características do próprio método, mas, por outro lado, complementou os dados de resistividade e auxiliou sua interpretação.

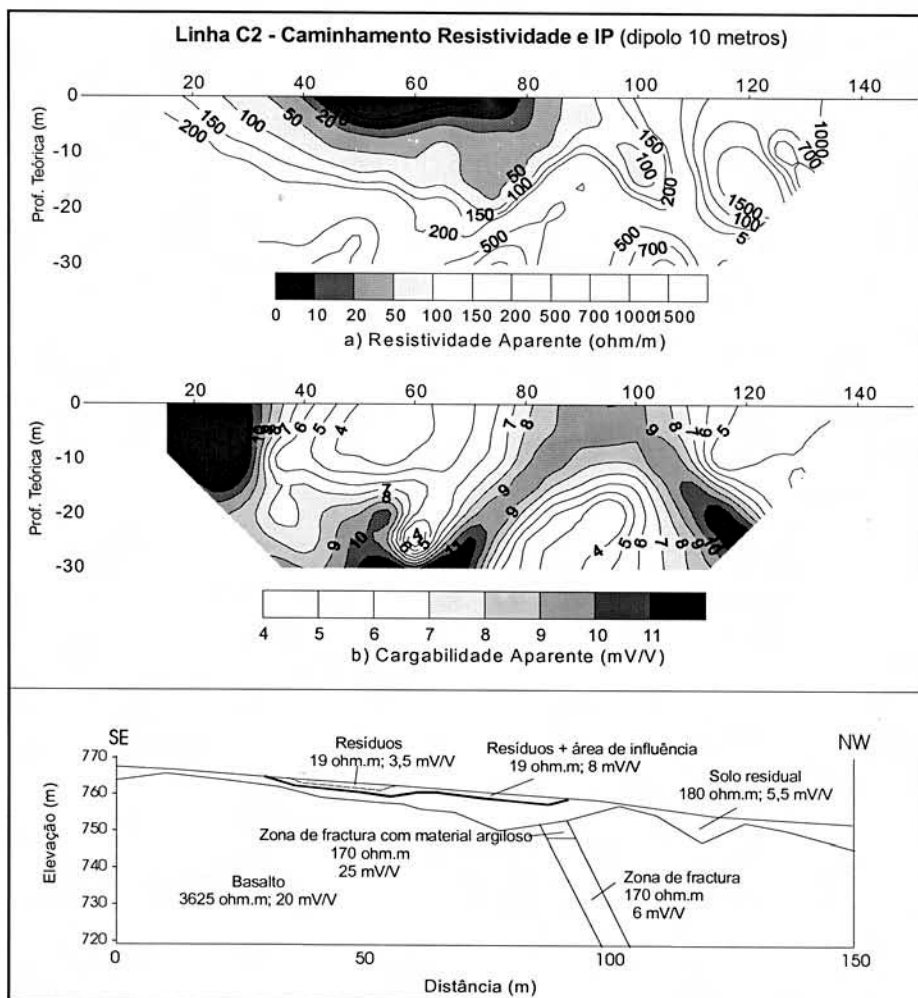


Fig. 14 – Secções de resistividade e cargabilidade aparentes e modelo obtido para a Linha C2.

Foram realizados ensaios em períodos pluviométricos diferentes na Linha C1 para observar possíveis relações entre o período de aplicação do ensaio e variações dos valores de resistividade aparente. Esses ensaios foram aplicados obedecendo às mesmas posições para os eléctrodos no perfil em quatro datas diferentes. Os resultados são apresentados na Fig. 15. A variação de resistividade mostra que existe uma influência das chuvas no comportamento eléctrico, principalmente no local onde estão os resíduos. A diminuição de resistividade nos períodos de maior pluviosidade sugere que a água das chuvas penetra nos resíduos e contribui para uma elevação da carga contaminante no local. Esse comportamento fica claro quando são comparados os ensaios realizados em Janeiro de 1997 com os de Julho de 1996. O primeiro realizado em período de chuvas, apresentou valores de resistividade na zona condutora de até 20 ohm.m, ao passo que na secção do período de estiagem os valores mínimos ficaram entre 20 e 50 ohm.m. O ensaio executado em Abril de 1997, no final de um período de chuvas, mostra que existe variação dos valores de resistividade em outros ensaios, não ocorrendo valores inferiores a 50 ohm.m, mas um aumento da área de influência dos valores de resistividade entre 50 e 100 ohm.m. Observando os dados dessas três épocas, pode-se concluir

que as variações de resistividade se relacionam, então, não só ao fato dos dados serem colectados em período de chuva, mas também à ocorrência de chuvas na semana imediatamente anterior aos ensaios de campo. O ensaio de Agosto de 1998 não possibilita uma análise da influência da quantidade de chuvas no local, pois a cava estava sem receber resíduos há mais de um mês, estando o material existente totalmente seco em função da evaporação da parte líquida. Devido a ausência de resíduos dispostos recentemente no local, é notável a variação dessa zona anômala, que teve sua dimensão bastante reduzida e os valores de resistividade aparente nunca inferiores a 100 ohm.m.

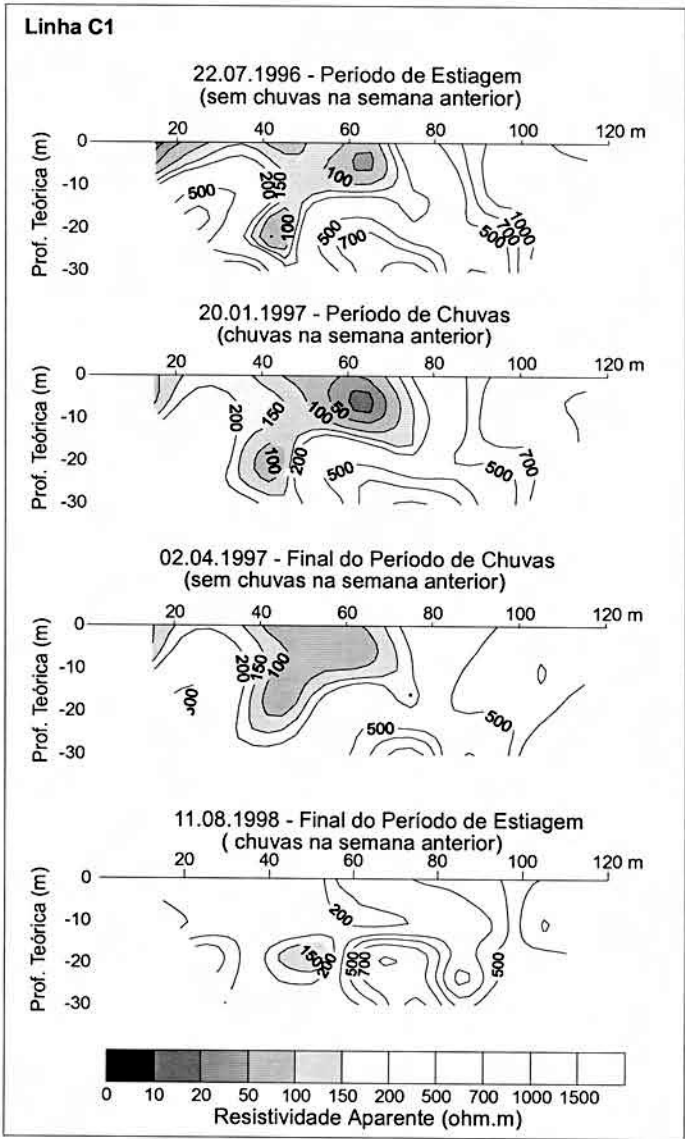


Fig. 15 – Resultados de ensaios de resistividade realizados em períodos pluviométricos diferentes na Linha C1.

O potencial de aplicação da resistividade na caracterização da área contaminada fica claro quando os valores obtidos para o nível 10 metros dos ensaios de caminhamento eléctrico são utilizados para a elaboração de um mapa de resistividade aparente. O mapa possibilita a delimitação da área de influência dos resíduos, bem como a identificação da zona de fractura existente no local. Esse mapa, apresentado na Fig. 16, mostra que a zona contaminada fica restrita às proximidades das valas, onde estão concentrados os valores de resistividade inferiores a 150 ohm.m. Um eixo de menor resistividade alinhado na direcção NW caracteriza a zona de fractura observada nas secções de caminhamento eléctrico. Uma zona de fracturação secundária pode ser visualizada com direcção norte.

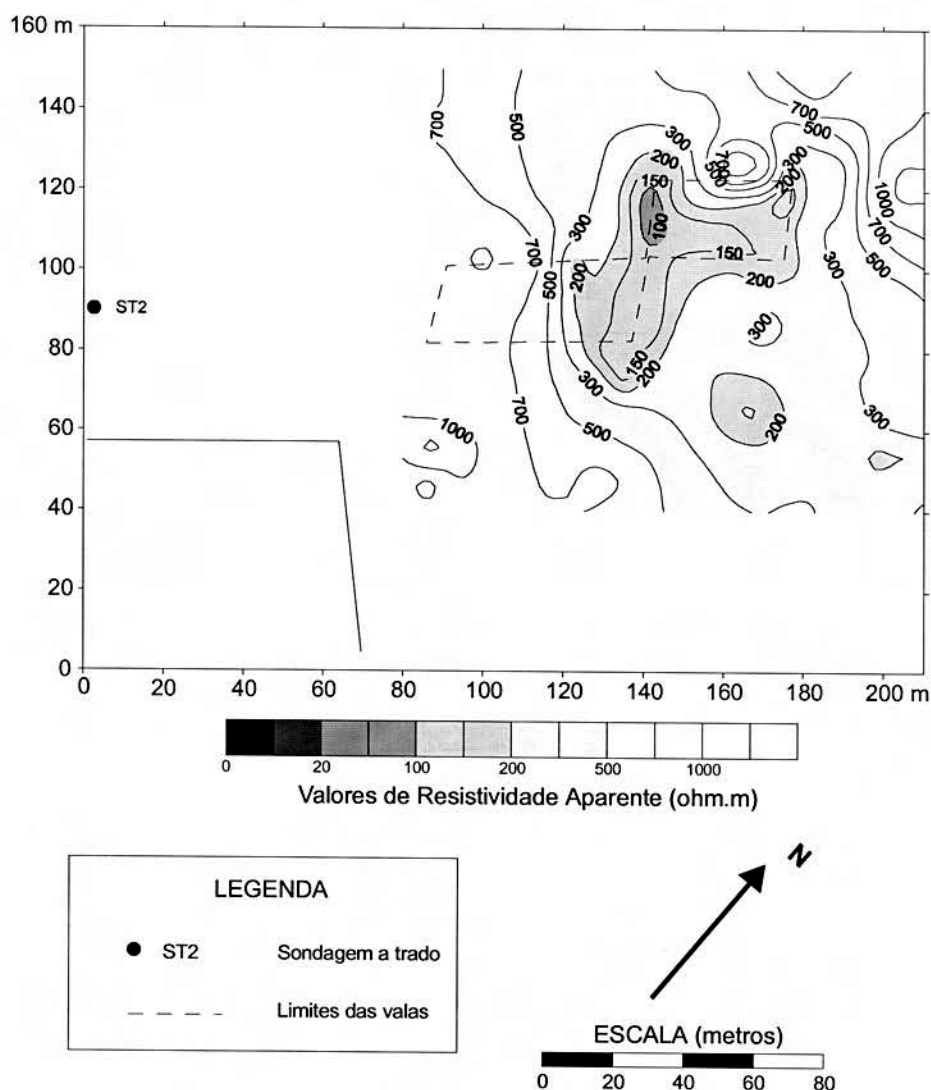


Fig. 16 – Mapa de resistividade aparente do nível 10 metros.

No mapa do nível 20 metros, apresentado na Fig. 17, pode ser observado que a influência dos resíduos praticamente deixa de existir, ocorrendo apenas uma pequena zona de valores da ordem de 200 ohm.m na área dos resíduos. Zonas menos resistivas ocorrem fora da área das valas e representam as zonas mais fracturadas dentro do basalto, descritas acima.

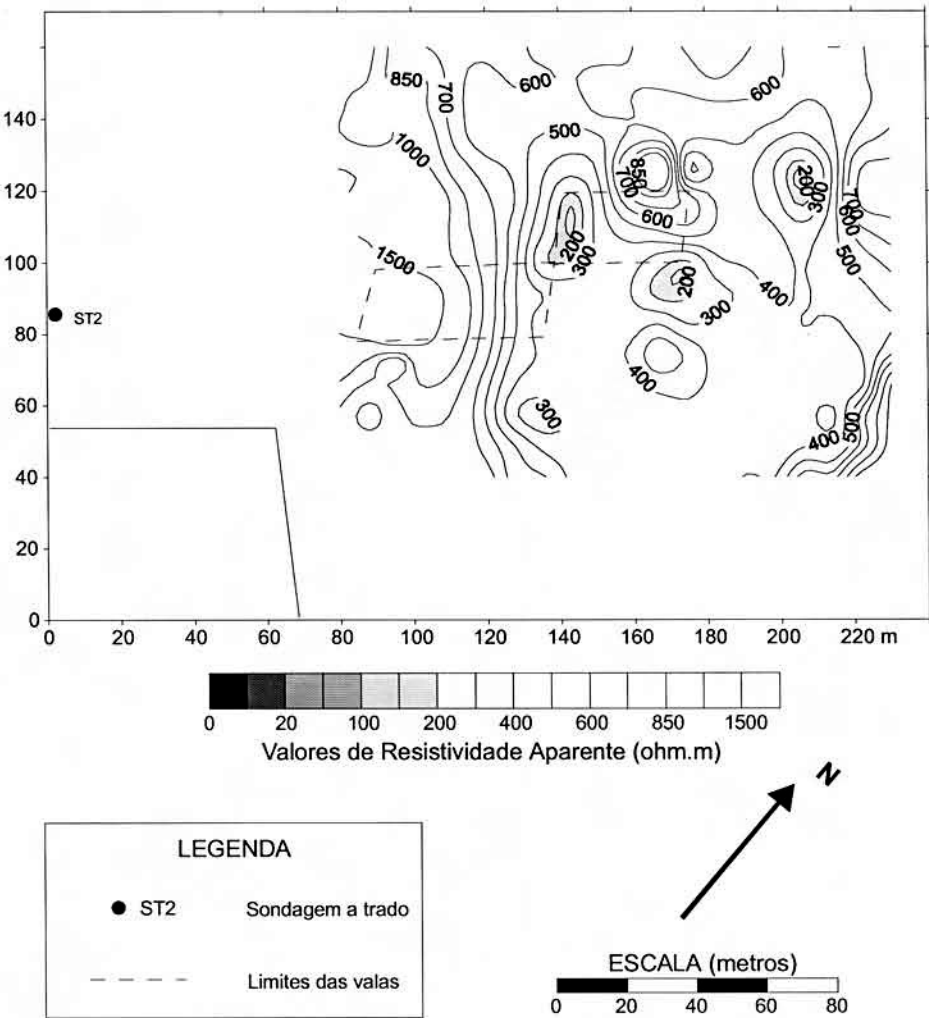


Fig. 17 – Mapa de resistividade aparente do nível 20 metros.

Devido à pequena espessura da cobertura inconsolidada e à proximidade da superfície da zona saturada, o aquífero superficial dessa área apresenta um comportamento distinto nas épocas de chuvas e estiagem. Durante os períodos de alta pluviosidade, o nível freático fica posicionado na cobertura inconsolidada e o fluxo nessa porção se dá pelos poros desse material. Nos períodos de estiagem o nível freático torna-se mais profundo e o fluxo obedece à rede de fraturação existente no basalto.

Em função dessa característica, um dos objectivos dos ensaios de potencial espontâneo foi justamente auxiliar na definição do sentido de fluxo nas zonas de fractura. De acordo com Magalhães *et al.* (1996), o fluxo subterrâneo é caracterizado pelo crescimento dos valores de potencial natural no sentido do fluxo. Dessa forma, observando-se o mapa de potencial espontâneo da Fig. 18, nota-se esse tipo de comportamento justamente na zona de fraturamento principal definida nos mapas de resistividade aparente. Uma outra zona com valores altos de SP ocorre no extremo oeste do mapa, porém, não está associada a nenhuma anomalia condutora no mapa de resistividade aparente, podendo representar um sistema de fractura secundário.

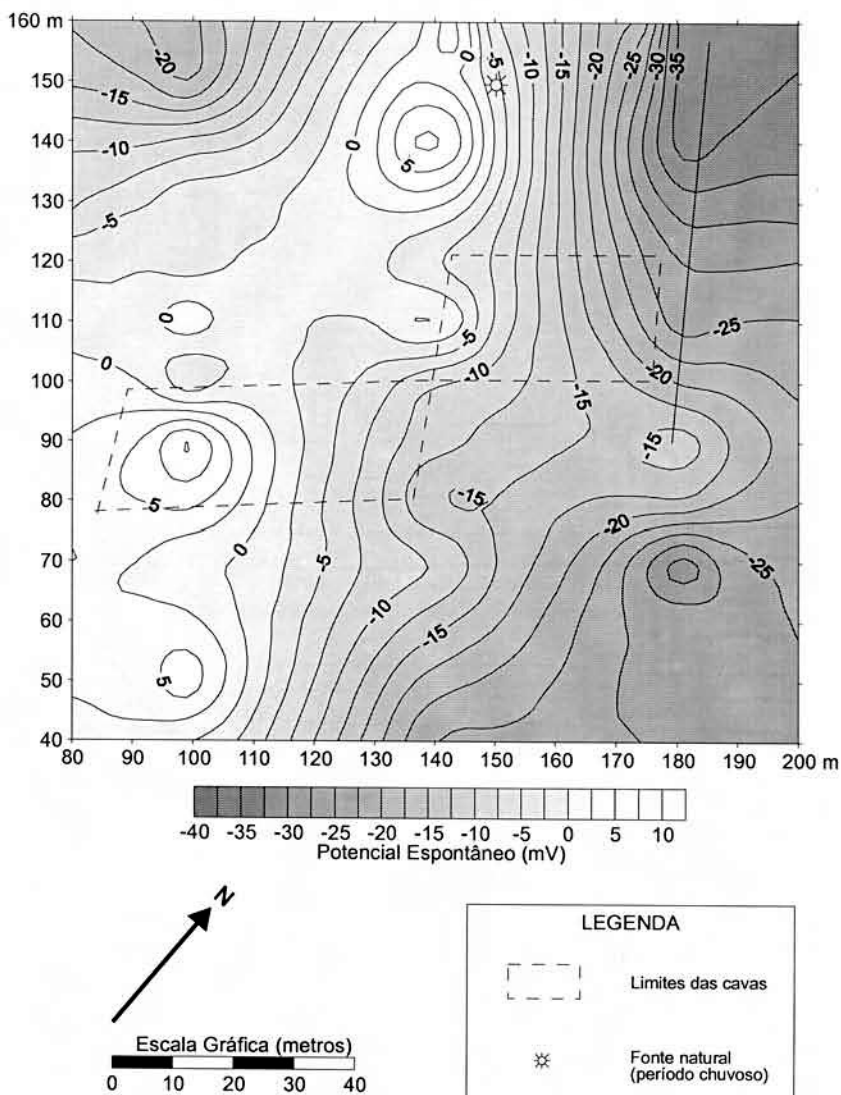


Fig. 18 – Mapa de potencial espontâneo da área de Restinga.

O outro objectivo da aplicação destes ensaios foi avaliar o nível de interacção entre os resíduos e o meio físico. Como já visto no caso do Lixão de Ribeirão Preto, de acordo com Hyoung-Soo & Yeonghwa (1997), grandes variações dos valores de potencial espontâneo (SP) reflectem condições de actividade geoquímica, sendo que em aterros sanitários podem ser observadas variações nos valores de várias centenas de milivolts. No caso em questão, de uma forma geral, a amplitude de variação dos valores de potencial espontâneo foi pequena (-35 a 5 mV) e não mostrou nenhuma anomalia na área dos resíduos, o que sugere que não existe actividade geoquímica relevante entre os resíduos e o solo.

5 - CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os resultados obtidos mostram o grande potencial de aplicação dos métodos eléctricos no estudo de áreas de disposição de resíduos em termos da intensidade de contaminação do meio físico. A metodologia utilizada forneceu uma grande quantidade de dados e informações que, por sua vez, permitiu uma avaliação das áreas de disposição de resíduos quanto às características do meio físico e quanto às relações entre os resíduos e meio físico.

O método da resistividade eléctrica, entre os utilizados, mostrou-se como a melhor ferramenta para aplicação nesse campo de estudo, principalmente devido à sua grande versatilidade, facilidade e rapidez de aplicação dos ensaios em campo. Na área de disposição dos resíduos a aplicação conjunta dos ensaios de sondagem e caminhamento possibilita a definição do fluxo subterrâneo, do perfil de alteração, espessura de camada de resíduos e posição da zona saturada, que são de extrema importância no estudo de áreas contaminadas.

Os resultados dos ensaios de polarização induzida não mostraram uma relação de contraste entre a área de influência da contaminação e o meio físico. Por outro lado, a cargabilidade se apresentou como um parâmetro muito útil no auxílio à detecção de zonas de fractura que ficariam mascaradas, nos dados de resistividade, pela anomalia causada pelos resíduos.

O potencial espontâneo é bastante adequado para estudar alvos mais específicos, como actividade geoquímica e fluxo em zonas fracturadas. Na área de disposição de resíduos de couro em Restinga, a aplicação do método auxiliou na definição de fluxo em zonas fracturadas, que é o sistema de fluxo local mais importante, principalmente nos períodos de estiagem.

AGRADECIMENTOS

Os autores gostariam de agradecer às instituições CNPq e FAPESP pelo apoio financeiro fornecido, o qual possibilitou a elaboração deste trabalho.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Carpenter, P. J.; Kaufmann, R.S. e Price, B. *The use of resistivity soundings to determine landfill structure*. Ground Water 28 (4), pp. 569-575, 1990
- Costa, A. F. U. e Ferlin, C. A. *Aplicação prática de métodos eléctricos na detecção e monitoramento da contaminação de águas subterrâneas*. Anais do II Congresso Internacional da Sociedade Brasileira de Geofísica, Rio de Janeiro, pp. 1210-1212, 1993.
- Gois, D.L. 1997. *Estudo experimental para obtenção de curvas de chegada de cromo e cádmio para materiais inconsolidados da região de Franca*. Dissertação de Mestrado, Rio Claro - SP, Instituto de Geociências e Ciências Exatas - UNESP, 98p.
- Hyoung-Soo, K. e Yeonghwa, K. *Geoelectrical Monitoring in Nanji Waste Landfill*. Anais do V Congresso Internacional da Sociedade Brasileira de Geofísica, São Paulo (SP), Vol 1, pp. 494-498, 1997.

- INTERPEX Limited *RESIX IP2DI v3 – Resistivity and Induced Polarization Data Interpretation Software. User's Manual*. Golden, Colorado, U.S.A., 280 p., 1996.
- Kelly, W. E. *Geoelectric Sounding for delineating groundwater contamination*. Ground Water 14 (1), pp. 6-10, 1976.
- Kimmel, G. E. e Braids, O. C. *Leacheate plumes in a highly permeable aquifer*. Ground Water 12, pp. 388-393, 1974.
- Magalhães, F. S.; Azevedo, A. A.; Birelli, C. A. e Blanco, R. G. *Estudos geotécnicos e geofísicos em áreas com fenómeno de subsidência*. Anais do VIII Congresso Brasileiro de Geologia de Engenharia, Rio de Janeiro, Vol I, pp. 23-31, 1996.
- Pejon, O. J. e Zuquette, L. V. *Importância de estudos geológico-geotécnicos para a disposição de rejeitos urbanos*. II Simpósio sobre Barragens de Rejeitos e Disposição de Resíduos, CBGB, Rio de Janeiro, pp. 367-377, 1991.
- Seara, J. L. e Granda, A. *Interpretation of IP time domain/resistivity soundings for delineating sea-water intrusions in some coastal areas of the Northeast of Spain*. Geoexploration 24 (2), pp. 153-168, 1987.
- Sumner, J. S. *Principles of Induced Polarization for Geophysical Exploration*. Elsevier Scientific Publishing Co., Amsterdam, 227 p., 1976.
- Telford, W. M.; Geldart, L. P.; Sheriff, R. E. e Keys, D. A. *Applied Geophysics*. Cambridge University Press, 860 p., 1990.
- Vogelsang, D. *Environmental Geophysics. A practical guide*. Springer-Verlag, Berlim, 172 p., 1995.
- Worthington, P. F. *Hydrogeophysical equivalence of water salinity, porosity and conduction in arenaceous aquifers*. Ground Water 14 (4), pp. 224-232, 1976.
- Zuquette, L. V.; Pejon, O. J.; Sinelli, O. e Gandolfi, N. *Methodology of specific engineering geological mapping for selection of sites for waste disposal*. 7th International IAEG Congress, Lisboa, Portugal, pp. 2481-2489, 1994.