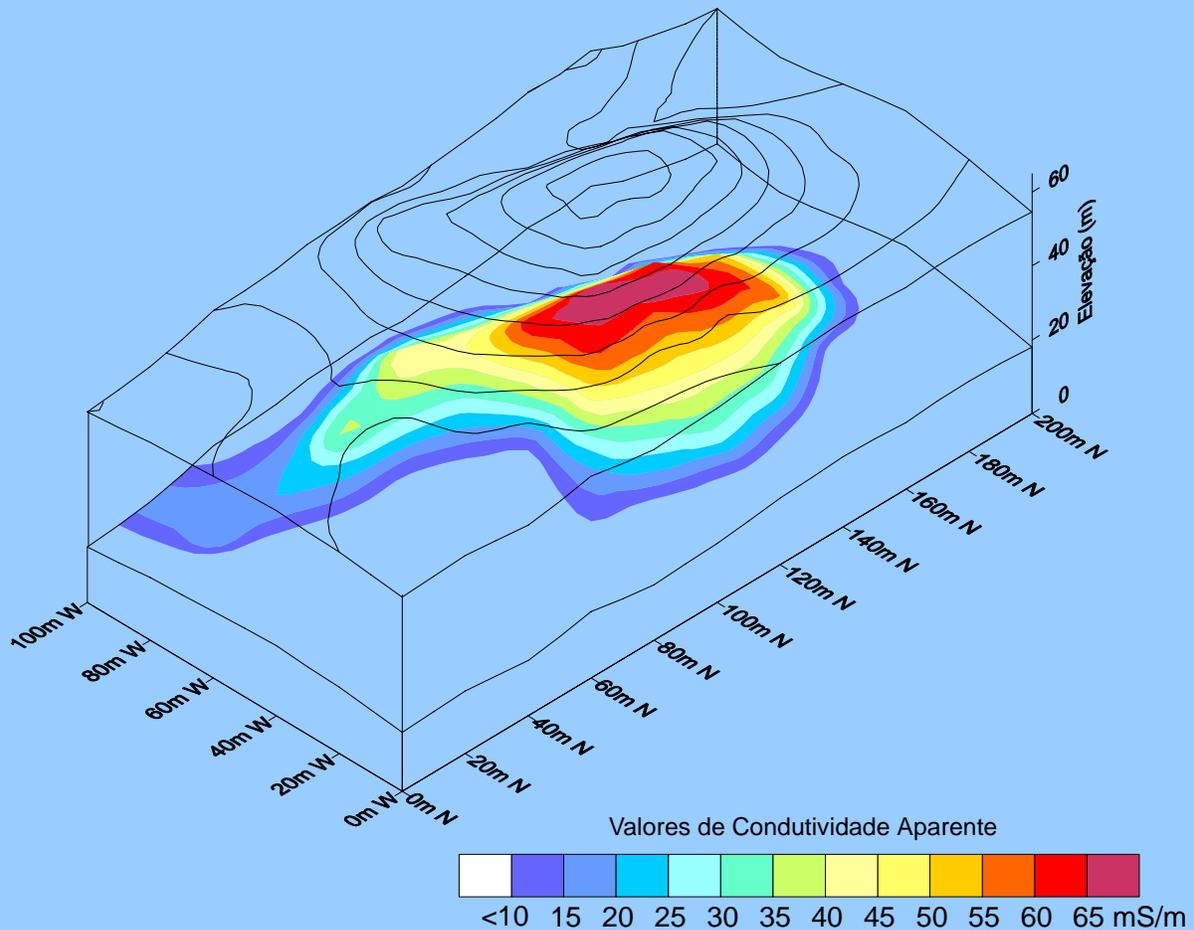




A geofísica como ferramenta para detectar e mapear contaminação

Material Básico – principais métodos geofísicos e aplicações

VAGNER ROBERTO ELIS
Departamento de Geofísica – IAG / USP



Introdução

O quadro atual e preocupante do problema da poluição de solos e águas subterrâneas tem estimulado os profissionais ligados às Ciências da Terra a pesquisar novos caminhos 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 caminhos pode ser enquadrado o uso de técnicas geofísicas.

A natureza não invasiva dos métodos geofísicos (não afeta e não destrói camadas selantes naturais ou artificiais), aliada ao baixo custo operacional e rapidez e facilidade de aplicação dos ensaios, torna-os particularmente adequados para aplicação no estudo de tais problemas. Uma justificativa ainda mais forte para a aplicação da geofísica, além das citadas acima, é que algumas técnicas fornecem dados contínuos sobre o local estudado, podendo, portanto, reduzir muito a necessidade de dados diretos e específicos, assim como permitem uma análise temporal e espacial mais detalhada.

Metas da utilização de geofísica em áreas poluídas

De uma forma geral a utilização de geofísica na caracterização de uma área afetada por substâncias poluentes consiste na obtenção de informações a respeito da detecção e mapeamento da extensão da área afetada, profundidade da zona saturada, direção do fluxo subterrâneo e profundidade substrato rochoso inalterado. Em alguns casos informações mais específicas podem ser importantes, como velocidade de fluxo, presença de fraturas e fluxo na zona saturada, avaliação de interação entre os poluentes e o meio físico, detecção de tipos específicos de materiais em áreas de disposição de resíduos, definição da espessura e estrutura de depósitos de resíduos.

O fator determinante na escolha do método geofísico adequado ao estudo de um local com problema de poluição ambiental refere-se ao tipo de informação necessária para avaliação do problema. Dessa forma, é importante saber que método é capaz ou mais apropriado para atingir o objetivo desejado. Por exemplo, no caso da necessidade de encontrar tambores metálicos (preenchidos com resíduos perigosos) enterrados um método adequado é a magnetometria. Por outro lado, para identificação e mapeamento de pluma de contaminação gerada em aterro sanitário os métodos da eletrorresistividade e eletromagnético indutivo são apropriados.

Vogelsang (1995) resume as possibilidades de aplicação dos métodos geofísicos em estudos ambientais na obtenção de informações sobre características geológicas, estrutura do aterro ou local de disposição e detecção e mapeamento da pluma. Essas possibilidades são apresentadas na tabela 1, classificadas de acordo com o potencial de utilização de cada método.

Tabela 1 – Aplicações da Geofísica Ambiental (adaptado de Vogelsang, 1995)

Métodos	Área de aplicação			
	Geologia	Aterro	Plumas	Observações
Magnético	(+)	(+)	-	Prof. Penetração limitada
Mapeamento geoeletrico	(+)	+	(+)	Influência de canos, etc.
Sondagem geoeletrica	+	+	+	Influência de canos, etc.
Polarização induzida	(+)	(+)	(+)	Pesquisa necessária
Potencial Espontâneo	(+)	(+)	(+)	Pesquisa necessária
Métodos eletromagnéticos	+	+	+	EM, VLF, TDEM
Geo Radar	(+)	+	(+)	Necessário terreno seco
Sísmica de refração	+	(+)	-	–
Sísmica de reflexão	+	-	-	Custo alto

+ aplicável, (+) aplicação limitada, - não aplicável

Embora essa tabela seja bastante útil para uma primeira análise da utilização dos métodos geofísicos em estudos ambientais, é importante lembrar que cada caso específico deve ser estudado para avaliar as reais possibilidades de aplicação. Por exemplo, o autor observa que no caso de aplicação do Geo Radar é necessário que o terreno esteja seco; nesse caso, o termo mais preciso seria *desejável*, uma vez que a presença de água não impossibilita a aplicação do método (são conhecidos trabalhos sobre lâmina d'água).

Métodos geofísicos aplicados

a) Eletroresistividade

Esse método geofísico emprega uma corrente elétrica artificial que é introduzida no terreno através de dois eletrodos (denominados de A e B), com o objetivo de medir o potencial gerado em outros dois eletrodos (denominados de M e N) nas proximidades do

fluxo de corrente, permitindo assim calcular a resistividade real ou aparente em subsuperfície. Para esse dispositivo de quatro eletrodos a resistividade é assumida como constante e pode ser calculada através da expressão:

$$\rho = K \cdot \frac{\Delta V}{I} \quad \text{onde:}$$

ρ = resistividade elétrica (ohm.m)

K = fator geométrico (m)

ΔV = diferença de potencial entre os eletrodos M e N (mV)

I = intensidade de corrente que passa entre os eletrodos A e B (mA)

O fator K depende da geometria do arranjo de eletrodos na superfície e pode ser calculado através da fórmula geral:

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

O parâmetro resistividade é o inverso da condutividade elétrica, e depende da natureza e estado físico do material. A resistividade elétrica (e seu inverso, a condutividade elétrica) relacionam-se aos mecanismos de propagação de corrente elétrica nos materiais, sendo que condutividade em solos e rochas pode ser devida a presença de minerais metálicos e grafita (condutores) em sua matriz, o que é denominado de condutividade eletrônica, ou devido ao deslocamento de íons dissolvidos na água contida nos poros e fissuras dos solos e rochas, o que é denominado de condutividade eletrolítica.

Em geral, a condutividade é eletrolítica, pois apenas em casos específicos os minerais condutores ocorrem em rochas em quantidades suficientes para aumentar sua condutividade global. A resistividade dos solos e rochas que possuem condutividade eletrolítica é afetada principalmente por quatro fatores:

- composição mineralógica;
- porosidade;

- teor em água;
- quantidade e natureza dos sais dissolvidos.

Dentre esses fatores, os mais importantes são, sem dúvida, a quantidade de água contida e a salinidade dessa água. O aumento do valor desses fatores, teor de umidade e quantidade de sais dissolvidos, leva a uma diminuição dos valores de resistividade. Essa condição é que permite a imensa possibilidade de aplicação do método em estudos ambientais e hidrogeológicos. No caso específico de áreas de disposição de resíduos, de uma forma geral ocorre a formação de líquidos com alta concentração de sais, o que faz com que a área afetada pela poluição seja caracterizada por valores de resistividade bastante baixos.

Os equipamentos utilizados consistem basicamente de uma fonte controlada para emissão de corrente elétrica e medidores para a corrente e a diferença de potencial geradas. A potência da fonte pode variar de centenas de watts até alguns kilowatts. O circuito emissor pode medir valores entre 5 e 500 mA, e o potencial normalmente lido no circuito receptor varia entre 10 mV a 20 V. Esses equipamentos podem trabalhar com corrente contínua ou corrente alternada de baixa frequência, preferivelmente menor que 60 Hz (Telford et al., 1990). Na figura 8 é apresentado um exemplo de equipamento de resistividade que consiste de um sistema de emissão e recepção montados em uma única unidade, que é o resistímetro francês marca Iris, modelo Syscal R2.

Dentro do método da eletrorresistividade existem várias técnicas de aplicação dos ensaios em campo. São divididas basicamente em técnicas de sondagem elétrica e caminhamento elétrico, dentro das quais existe uma grande variedade de configurações possíveis de eletrodos, o que confere ao método grande versatilidade. Normalmente, os ensaios de sondagem elétrica são aplicados quando é desejada uma informação pontual com observação da variação vertical do parâmetro físico, e o caminhamento é aplicado quando o interesse é pelo estudo da variação lateral da resistividade em profundidade teoricamente constante. Um esquema do ensaio de SEV é apresentado na figura 9. É importante lembrar que como nos ensaios de campo deve-se atentar para o fato de que como é amostrada, através de um maior espaçamento entre os eletrodos, uma sucessão de camadas com diferentes valores de resistividade, a resistividade determinada pelo quadripolo AMNB na

superfície será aparente. O valor encontrado será então influenciado pelas resistividades de todas as camadas investigadas.



Figura 8 - Equipamento para ensaios de resistividade Iris Syscal R2.

O arranjo de campo mais utilizado para os ensaios de sondagem elétrica vertical é o denominado Schlumberger que utiliza quatro eletrodos, sendo 2 para injetar a corrente (A e B) e 2 para a leitura de diferença de potencial (M e N), todos dispostos no terreno de acordo com um mesmo alinhamento. O ponto de atribuição do ensaio é o centro geométrico do arranjo. A principal característica desse arranjo é que a distância MN deve ser bastante pequena em relação a AB, procurando sempre satisfazer a relação $MN \leq AB/5$ (Figura 10). Na prática, quando o sinal ΔV medido torna-se muito fraco, aumenta-se a distância MN, isto é, adota-se um primeiro intervalo MN e realiza-se várias medidas com diferentes AB, depois aumenta-se MN que se conserva constante para outra série de deslocamentos de AB e assim por diante, evitando deslocar ao mesmo tempo os eletrodos de corrente e de potencial e mantendo a relação $MN \leq AB/5$. Esta manobra recebe a denominação de “embreagem” e permite uma checagem da qualidade dos dados obtidos durante o processo de campo.

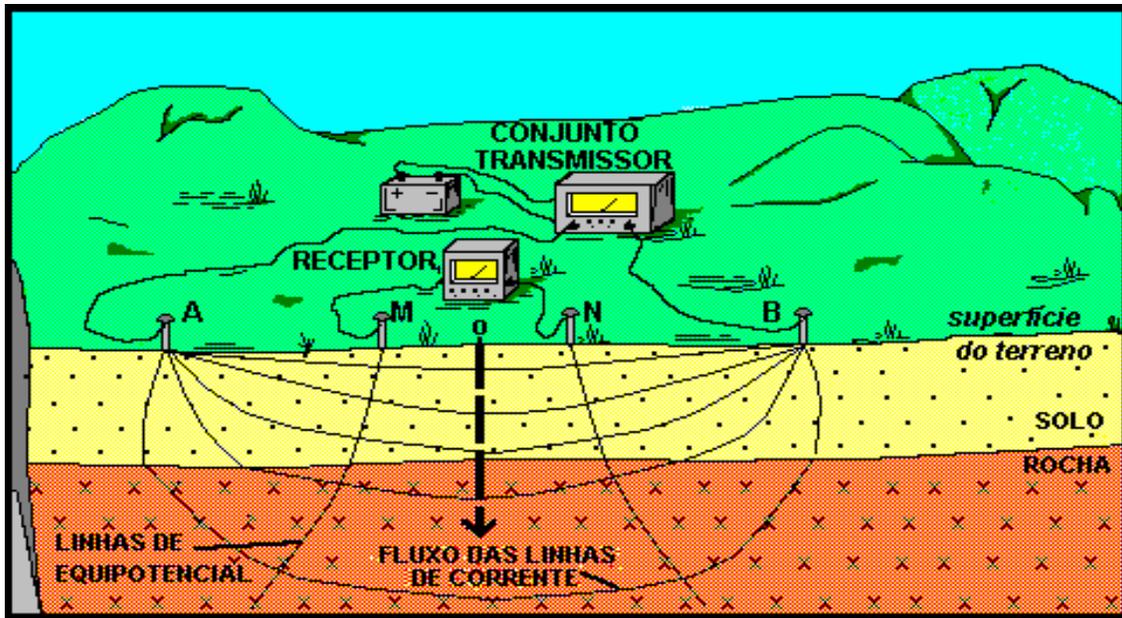


Figura 9 - Esquema de sondagem elétrica (Braga, 1999).

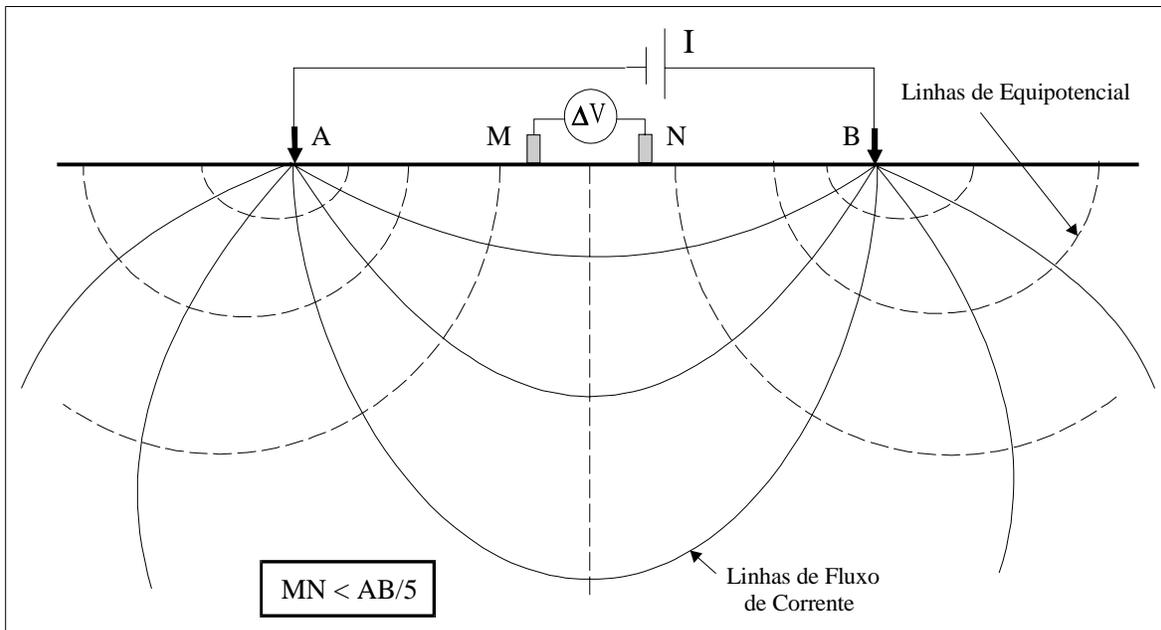
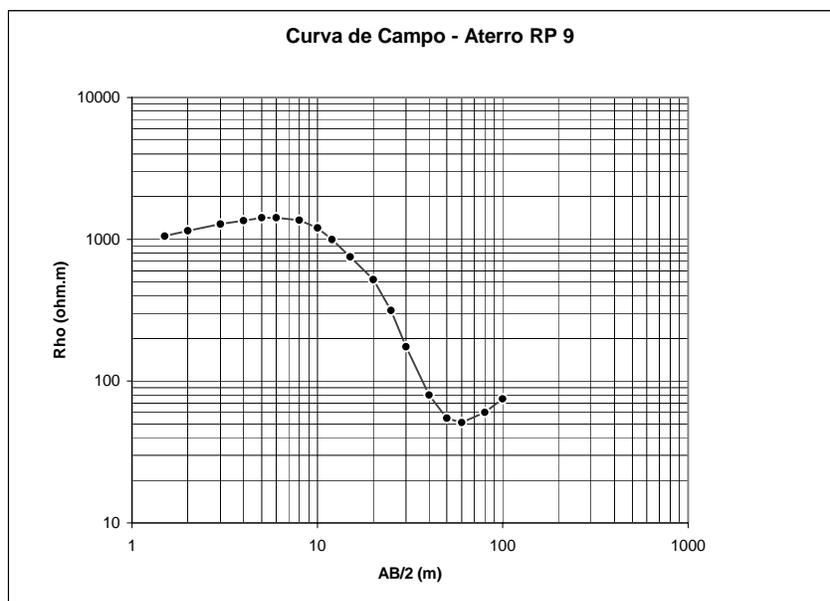


Figura 10 – Esquema de campo para o arranjo Schlumberger.

Os valores de resistividade aparente obtidos são plotados em relação aos valores da distância $AB/2$, fornecendo a curva de resistividade aparente, a qual é passível de

interpretação quantitativa. Na figura 11 é apresentada uma curva de sondagem elétrica e sua interpretação.



MODELO GEOELÉTRICO INTERPRETADO			
Camada	Espessura	Resistividade	Interpretação
1	1,0 m	926 ohm.m	Solo superficial
2	5,6 m	1776 ohm.m	Solo seco
3	8,5 m	191 ohm.m	Solo acima da zona saturada
4	18,5 m	16 ohm.m	Zona saturada (solo/saprolito)
5		631 ohm.m	Basalto

Figura 11 – Curva de campo e modelo geoeletrico interpretado.

O arranjo de campo que vem sendo mais utilizado para a técnica de caminhamento em estudos ambientais é o dispositivo dipolo-dipolo, cujo esquema de campo é mostrado na figura 12. Nesse dispositivo, os eletrodos AB de injeção de corrente e MN de potencial são dispostos segundo um mesmo perfil e o arranjo é definido pelos espaçamentos $x=AB=MN$. A profundidade de investigação cresce com o espaçamento (R), e teoricamente corresponde a $R/2$. Normalmente, as medidas são efetuadas em várias profundidades de investigação, isto é $n = 1, 2, 3, 4$ e 5 , atribuídas a intersecção das linhas que partem do centro de AB e MN com ângulos de 45° (Figura 13). A cada ponto de medida os dipolos são deslocados de

uma distância igual a X , os dados obtidos são plotados nas posições $n = 1, 2, 3, 4$ e 5 , e interpolados, gerando uma seção de resistividade aparente, como ilustrado na Figura 14.

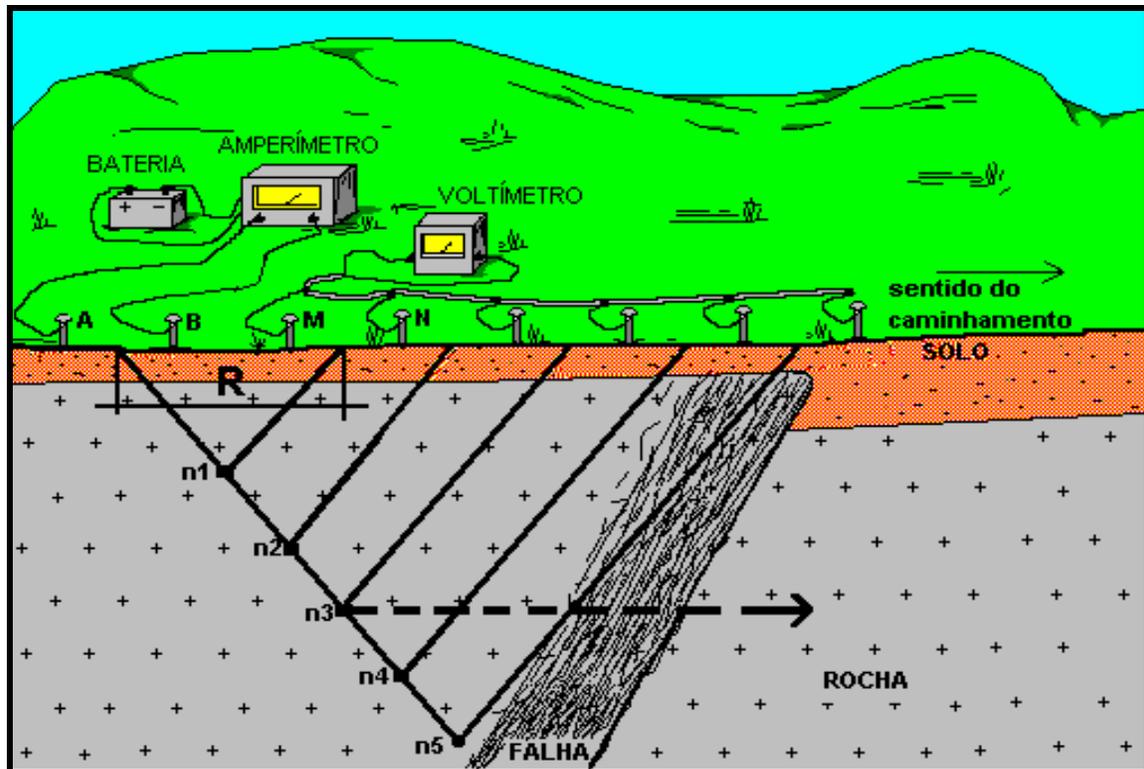


Figura 12 - Técnica de caminhamento elétrico arranjo dipolo-dipolo, (Braga, 1999).

O fator geométrico K para o arranjo dipolo-dipolo pode ser calculado pela fórmula:

$$K = 2\pi Gx, \quad \text{onde}$$

$$G = \frac{1}{\left(\frac{1}{n}\right) - \left(\frac{2}{n+1}\right) + \left(\frac{1}{n+2}\right)}$$

Nas seções obtidas podem ser observadas as variações de resistividade aparente para uma ou mais profundidades. Essas seções permitem uma interpretação qualitativa das variações laterais de resistividade, que podem estar relacionadas a contatos geológicos,

níveis de alteração mais profundos, zonas de intenso fraturamento ou pluma de contaminação de aquíferos.

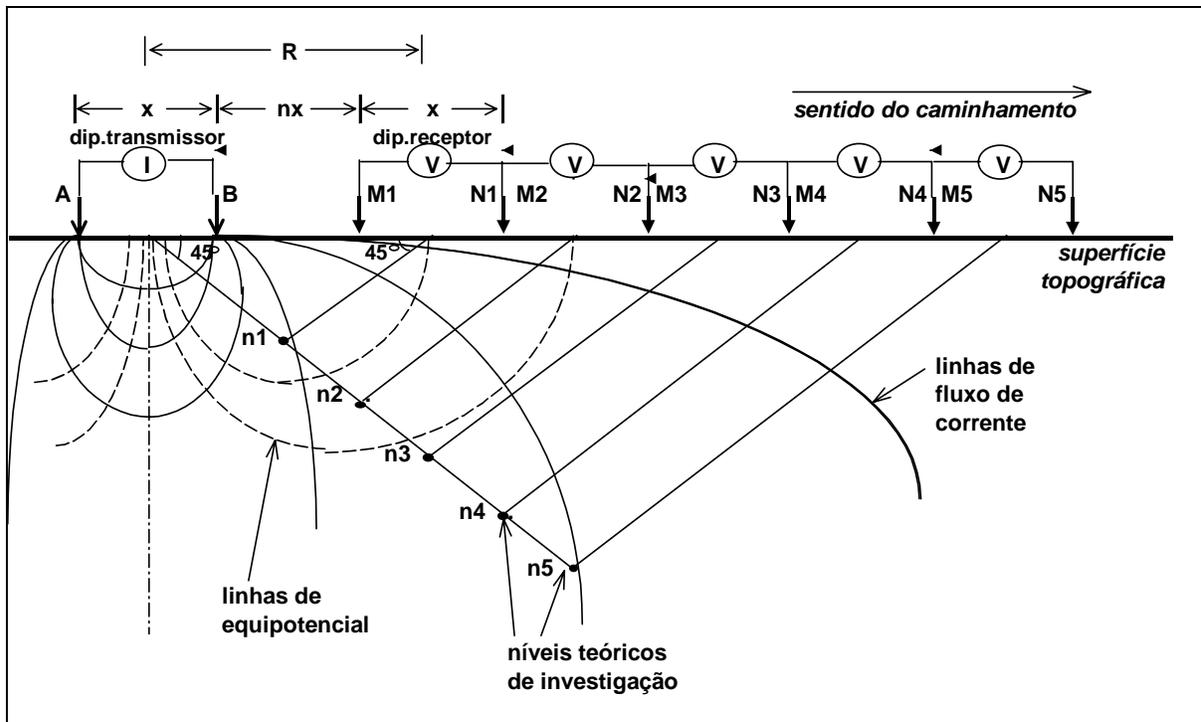


Figura 13 – Arranjo dipolo-dipolo.

Seção de resistividade aparente (ohm.m) - Linha C3

0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
	1187	49	20	70	465	104	43	18	356	11549	17691	
	83	45	70	40	53	110	157	256	1017	21101		
		170	622	57	6	55	912	219	132	1279		
			1696	339	38	24	294	1104	603	377		
				1055	66	59	45	415	3132	152		

Figura 14 – Forma de plotagem dos dados para construção da seção de resistividade aparente.

Até pouco tempo atrás, somente a técnica de sondagem elétrica vertical, dentro dos métodos elétricos, tinha disponíveis “softwares” para interpretação quantitativa dos dados

de campo. Nos últimos anos, técnicas de inversão têm se tornado populares na interpretação de dados de pseudoseções de resistividade (Ross et al., 1990; Sasaki, 1994), possibilitando a identificação de corpos e estruturas geológicas com mais detalhe.

Exemplos de aplicação do método da eletrorresistividade

1. Determinação da profundidade da zona saturada e direção de fluxo e estudo de perfil natural de solo

A realização de ensaios de sondagem elétrica vertical possibilita a obtenção de informações importantes na caracterização de áreas com problemas de poluição. A distribuição dos diferentes tipos de materiais no perfil (diversas camadas de solo e topo do substrato rochoso) e a profundidade da zona saturada, importantes para a caracterização de determinado local, pode ser obtido com sondagens elétricas. Um exemplo é apresentado na figura 15, que mostra a interpretação de uma sondagem elétrica realizada para auxiliar a caracterização de uma área utilizada para disposição de resíduos de processo industrial para extração de pectina de laranja. Nesse exemplo, podem ser identificados vários níveis da transição solo-rocha, a zona saturada e a profundidade do topo do substrato rochoso, caracterização no local por diabásio. É importante lembrar que esse ensaio foi realizado fora da área de influência da poluição.

A partir dos resultados obtidos para a profundidade da zona saturada através de um conjunto de sondagens elétricas verticais realizadas em um local é possível a construção de mapa de isolinhas de cotas do nível d'água, o qual permite a visualização da direção e sentido do fluxo subterrâneo. Um exemplo de mapa de fluxo obtido dessa forma é apresentado na figura 16. Esse mapa mostra o fluxo subterrâneo na área do aterro sanitário em atividade da cidade de Ribeirão Preto – SP, que foi definido com a realização de 10 sondagens elétricas no local. Dado de um poço existente próximo a SEV1 indicava uma profundidade de cerca de 19 metros para o nível d'água, em 1988. O valor de profundidade da zona saturada dado pela sondagem elétrica, em julho de 1995, foi de 17,5 metros. É importante lembrar que em estudos geofísicos, a existência de dados diretos é de grande ajuda na interpretação, ajudando a diminuir a incerteza do modelo.

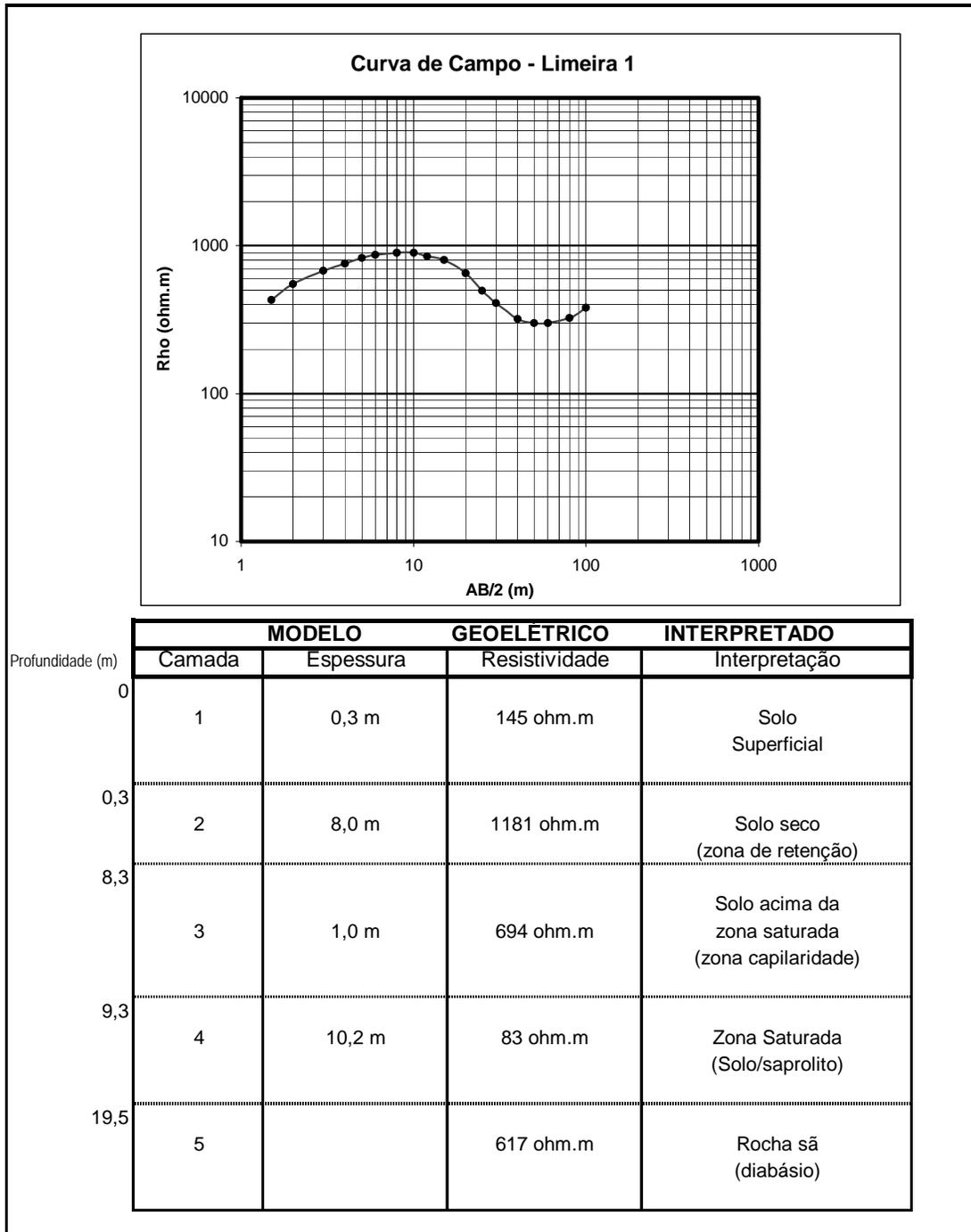


Figura 15 – Informações sobre as várias camadas da transição solo-rocha, profundidade da zona saturada e profundidade do substrato rochoso obtido com ensaio de sondagem elétrica vertical em área de disposição de resíduos industriais.

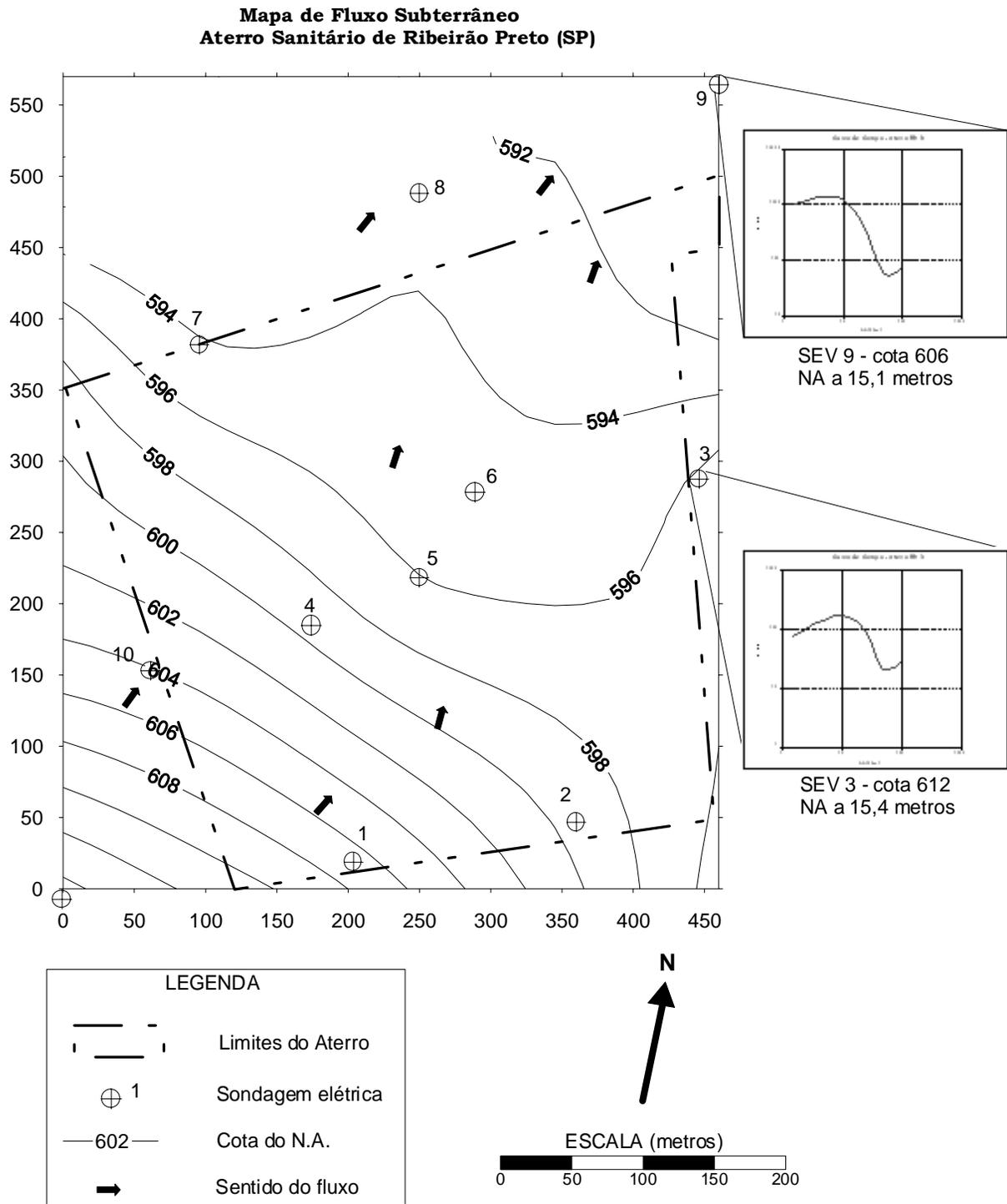


Figura 16 – Mapa de fluxo subterrâneo construído com dados obtidos a partir de ensaios de sondagem elétrica vertical.

2. Mapeamento de locais preenchidos com resíduos e determinação da estrutura de aterro sanitário

O mapeamento de locais preenchidos por resíduos pode ser realizado com a execução de vários pontos de sondagem elétrica, ou de forma contínua, com caminhamento elétrico. As SEVs são mais adequadas para a definição do perfil vertical (espessura da camada de resíduos e base do depósito) ao passo que o caminhamento elétrico possibilita a delimitação da área ocupada pelos resíduos. Metodologias mais modernas e sofisticadas de interpretação de dados têm possibilitado ao caminhamento elétrico uma modelagem 2D, que mostra tanto as variações laterais como verticais dos materiais no perfil.

Na figura 17 é apresentado o resultado obtido com SEV na determinação do perfil vertical dentro de área preenchida com resíduos urbanos em um lixão desativado em Ribeirão Preto – SP. No perfil geoeletrico interpretado podem ser individualizados o material de cobertura do aterro, a camada de resíduos embebida em chorume com baixo valor de resistividade e a base do aterro, caracterizada pelo aumento dos valores de resistividade causado pela presença de sedimentos arenosos.

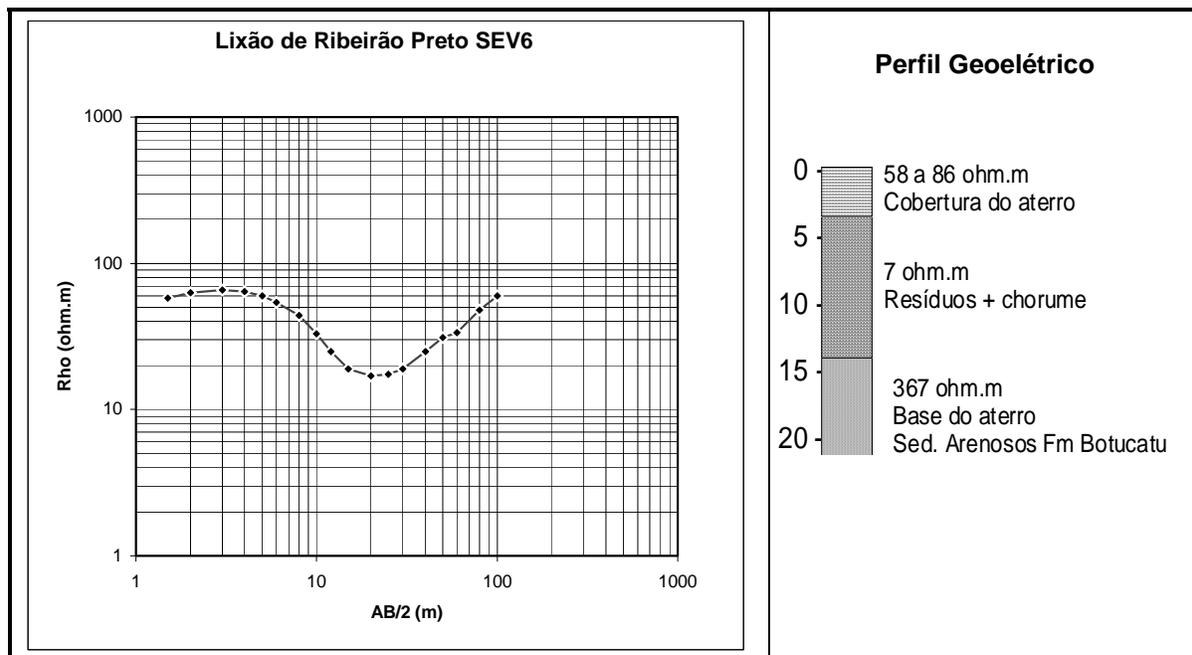


Figura 17 – Resultado de sondagem elétrica na definição da espessura de camada de resíduos sólidos urbanos.

A técnica de caminhamento elétrico, principalmente com os arranjos de eletrodos que possibilitam a investigação de vários níveis teóricos, tem sido utilizada com bons resultados na determinação da área preenchida com resíduos. O arranjo dipolo-dipolo possibilita a investigação de vários níveis (normalmente 5) tem sido bastante utilizado no estudo de áreas de disposição de resíduos. Embora a seção de resistividade aparente já possibilite a visualização da área de influência dos resíduos, as novas técnicas de interpretação têm permitido a modelagem 2D, onde corpos e camadas podem ser individualizados. Um exemplo de utilização de caminhamento elétrico dipolo-dipolo na investigação de áreas de disposição de resíduos é apresentado por Ross et al. (1990). Ensaio realizado em uma lagoa utilizada para disposição de resíduos líquidos industriais, entulhos e outros resíduos sólidos permitiram a definição da base da área preenchida e a possível zona de influência do resíduo líquido, caracterizada por valores baixos de resistividade. Os resultados obtidos em uma seção são apresentados na figura 18, onde pode ser notada uma boa correlação entre os valores de resistividade e a posição histórica da lagoa.

Em áreas de disposição de resíduos sólidos urbanos também vem sendo aplicado caminhamento elétrico dipolo-dipolo com resultados bastante satisfatórios. A modelagem 2D tem permitido identificar vários níveis e corpos no perfil. Na figura 19 é apresentada uma seção modelada de ensaio realizado em área de disposição de resíduos sólidos urbanos da cidade de Poços de Caldas – MG. As camadas de solo (634 a 1200 ohm.m), a posição da zona saturada (150 ohm.m), o topo do substrato rochoso (784 ohm.m), a área ocupada pelos resíduos (5,8 ohm.m) e contaminação pela entrada de chorume dentro da zona saturada (18 ohm.m) são identificados na seção (convém salientar que para chegar a esse modelo foi de grande importância dados de sondagens elétricas realizadas no local). Pode ser notada na figura como os resíduos apresentam baixos valores de resistividade e como a entrada de chorume faz com que os valores de resistividade da zona saturada diminuam. Na própria seção de resistividade aparente nota-se a passagem da zona de material natural (valores de resistividade aparente maiores que 200 ohm.m) para a zona de influência dos resíduos, onde os valores caem a até 5 ohm.m. Esse caso representa uma situação totalmente inadequada sob o aspecto de disposição de resíduos, com a zona saturada praticamente em contato com a base da cava.

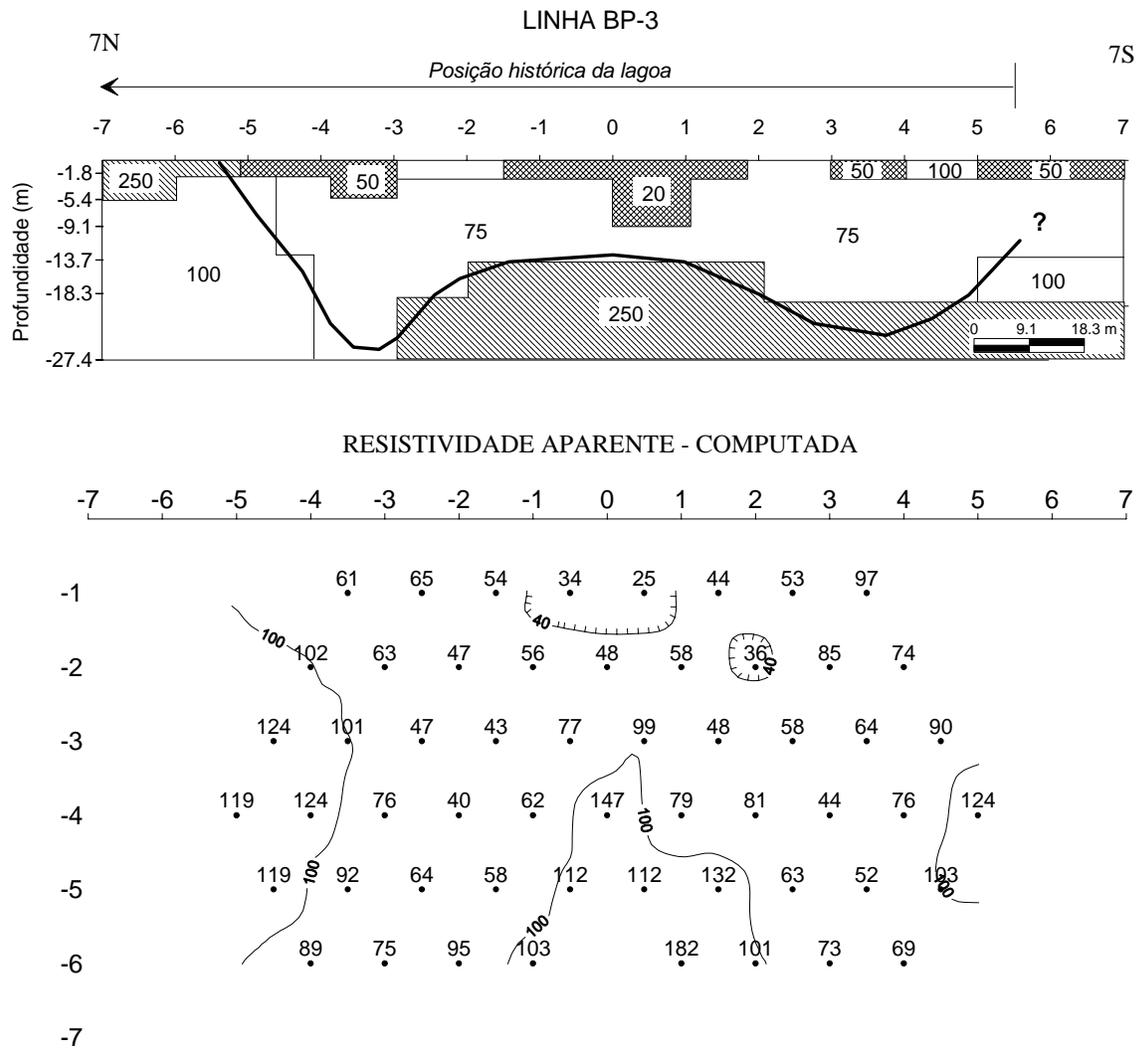


Figura 18 - Resultados de caminhamento elétrico dipolo-dipolo obtidos por Ross et al. (1990) em uma antiga lagoa de resíduos (sólidos e líquidos). São apresentados o modelo interpretado e os valores computados de resistividade aparente obtidos. A base da área preenchida com resíduos é indicada pelo traço espesso.

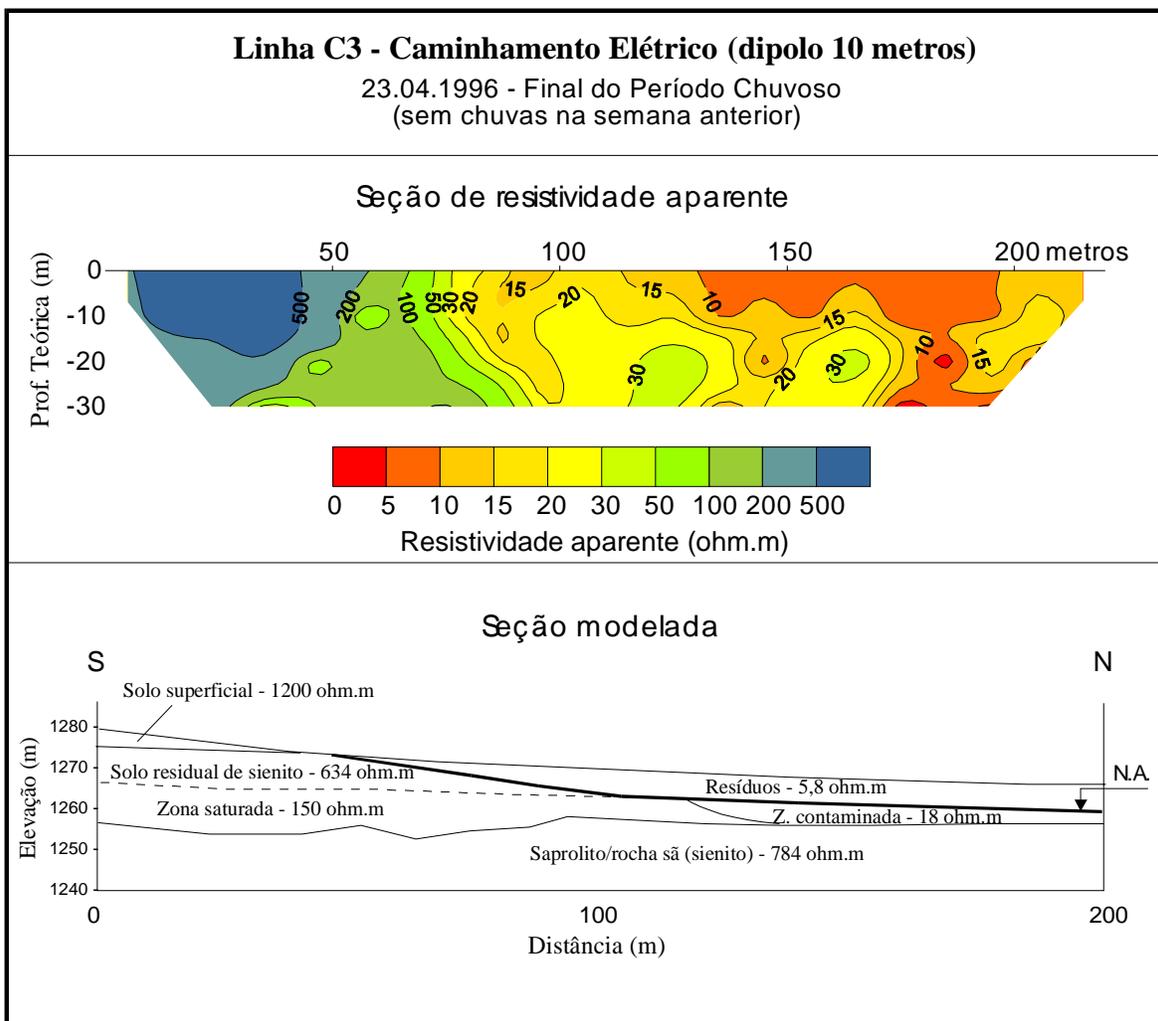


Figura 19 – Seção de resistividade aparente e modelo 2D de área de disposição de resíduos em Poços de Caldas – MG.

3. Detecção e mapeamento de pluma de contaminação

As técnicas de sondagem elétrica e caminhamento elétrico podem ser aplicadas para detectar e mapear o formato e extensão de plumas de contaminação. A aplicação dessas técnicas é feita da mesma forma que para o mapeamento de locais preenchidos por resíduos, ou seja, com a execução de vários pontos de sondagem elétrica, ou de forma contínua, com caminhamento elétrico.

Um exemplo de aplicação sondagens elétricas no estudo de contaminação gerada por lagoas de resíduos líquidos industriais (incluindo solventes orgânicos e ácidos contendo

metais pesados) é apresentado na figura 20 (Stierman & Ruedesili, 1988). Nas lagoas foram dispostos cerca de 140 milhões de litros de efluentes, que além de infiltração em episódios de descarga superficial, também atingiram um aquífero aluvial a jusante do local através de percolação pelos sedimentos e fraturas no embasamento. Os resultados das sondagens elétricas foram muito bons, pois mostraram claramente uma zona de baixa resistividade, onde foi posteriormente perfurado um poço de monitoramento (LC-1) que detectou contaminação. Apenas como um comentário, pode-se questionar por que houve uma diferença sensível entre o chamado embasamento geoeletrico e o topo do granito inalterado dado pelos poços existentes. Talvez o denominado granito duro nos poços tenha, em função do próprio processo de desenvolvimento da transição solo-rocha, uma porção superior um pouco mais fraturada, que com a presença de água confunde-se na interpretação das SEVs com o granito decomposto.

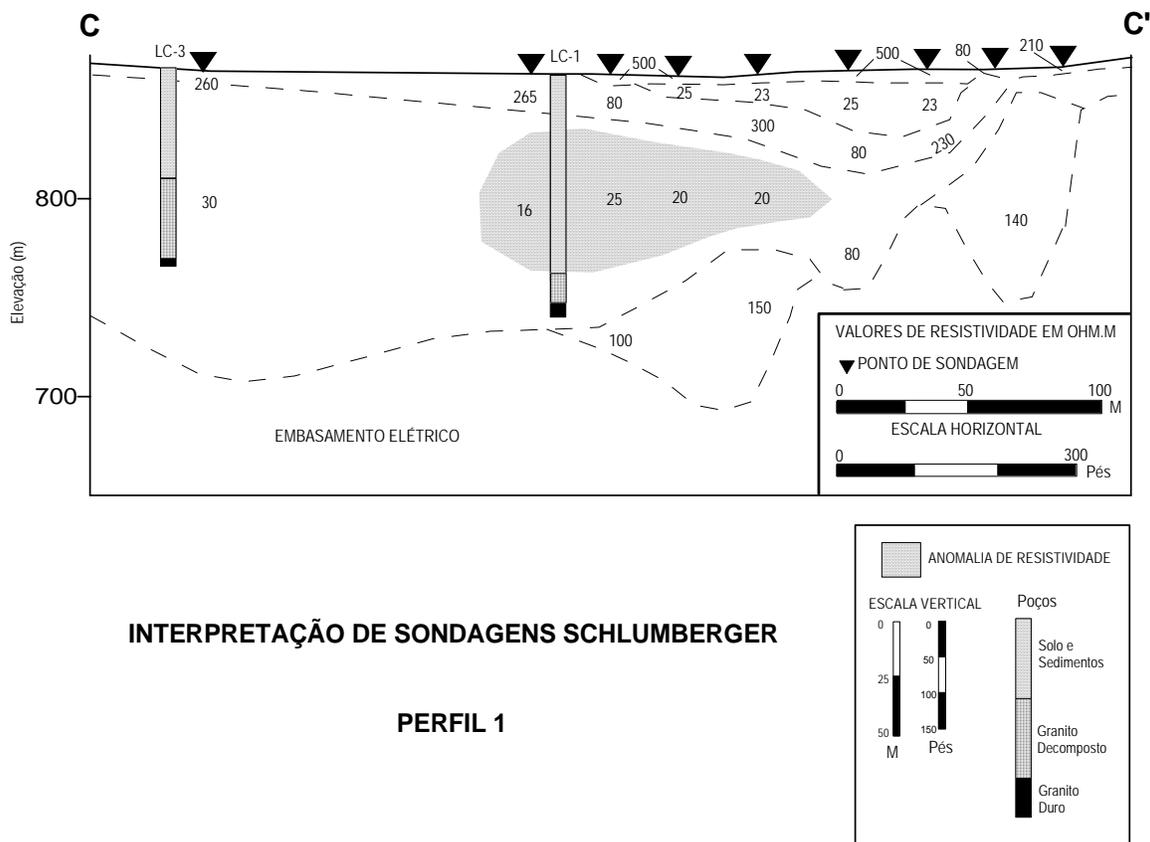


Figura 20 - Resultados de SEVs aplicadas no estudo de contaminação gerada por efluentes industriais (Stierman & Ruedesili, 1988).

4. Monitoramento da contaminação

Ensaio de sondagem ou caminhamento elétrico podem ser realizados em períodos diferentes, observando-se os mesmos pontos de amostragem, para acompanhar o comportamento e/ou desenvolvimento de poluição. Os ensaios de sondagem eram utilizados no início das pesquisas em geofísica ambiental. Os ensaios de caminhamento, por permitir uma amostragem contínua do local estudado, mostram-se mais apropriados. Um caso de aplicação de caminhamento elétrico nesse tipo de estudo é na observação das variações que acontecem dentro de áreas de disposição de resíduos urbanos em função da menor ou maior quantidade de chuvas no local. Na figura 21 são apresentados os resultados obtidos em uma área de disposição de resíduos urbanos de Poços de Caldas para duas épocas diferentes. Na figura pode ser notada claramente a influência da infiltração das águas pluviais na área ocupada pelos resíduos (porção mais condutora entre a posição 100 metros e o final da seção). No período chuvoso ocorre uma maior penetração de água nos resíduos, que interage com os resíduos gerando uma quantidade maior de chorume, o que ocasiona a diminuição nos valores de resistividade. Isso mostra que os períodos chuvosos são os mais críticos para a contaminação das águas subterrâneas, pois o aumento da carga contaminante resulta em um risco maior desses líquidos atingirem a zona saturada.

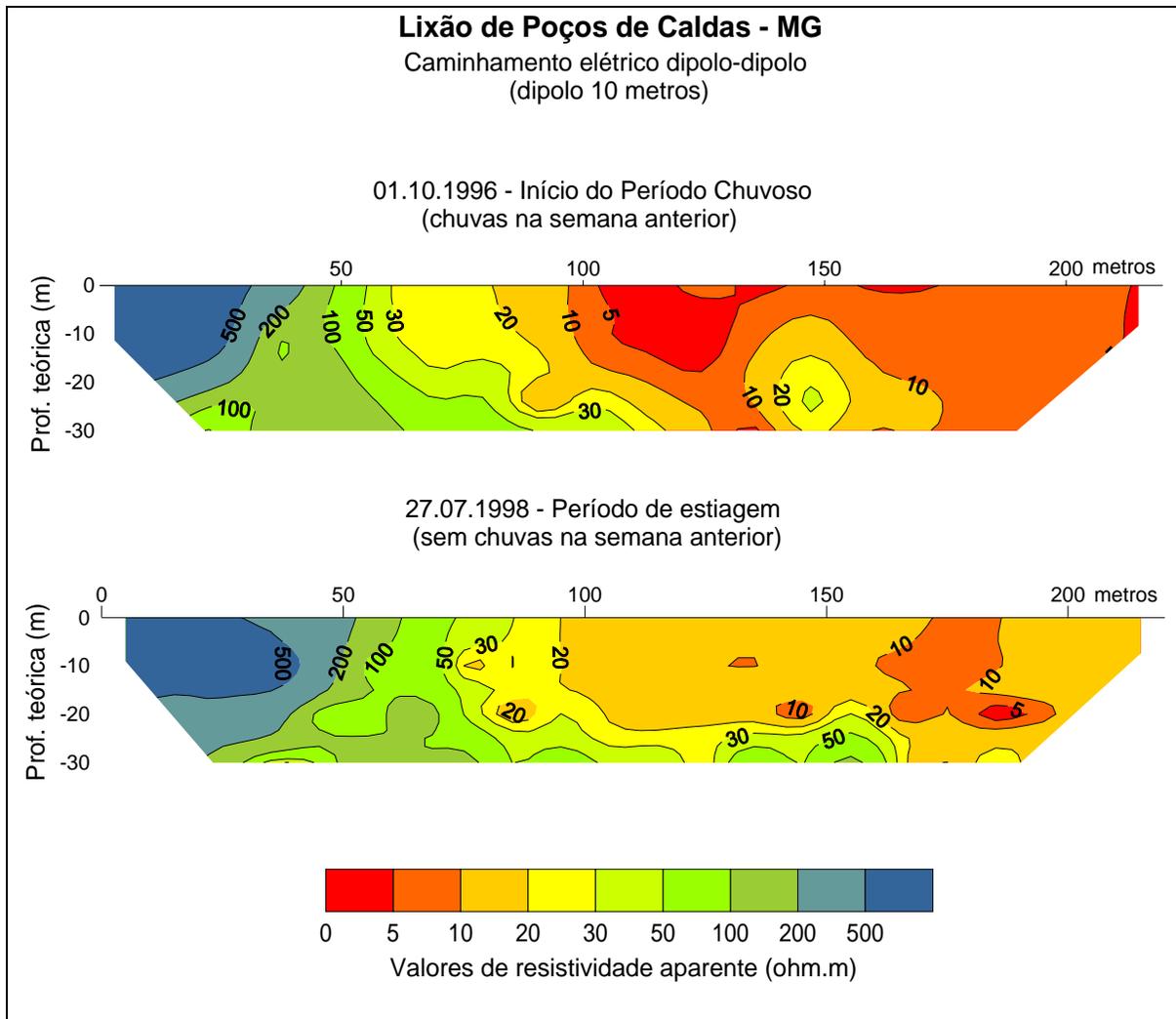


Figura 21 - Resultados de caminhamento dipolo-dipolo realizados no Lixão de Poços de Caldas em dois períodos pluviométricos distintos, mostrando a influência da entrada de águas pluviais na zona ocupada pelos resíduos.

b) Métodos eletromagnéticos

Os métodos eletromagnéticos envolvem a propagação de campos eletromagnéticos de baixa frequência e baseiam-se nos fenômenos físicos de eletricidade e magnetismo. Quando uma corrente elétrica passa por um fio, é gerado um campo magnético nas vizinhanças desse fio. Consequentemente, quando se estabelece uma corrente AC, por exemplo, num fio colocado sobre a superfície do terreno, fluem correntes elétricas nos condutores subsuperficiais. Esse processo, conhecido como indução eletromagnética, é representado na Figura 22, com as seguintes etapas:

1. A corrente AC fluindo na bobina cria um campo eletromagnético primário nas proximidades da bobina.
2. O campo magnético primário causa o fluxo de correntes secundárias (*eddy currents*) em qualquer condutor presente.
3. As correntes secundárias, ao fluírem pelo condutor criam um novo campo, o campo magnético secundário, que traz consigo informações sobre o condutor.

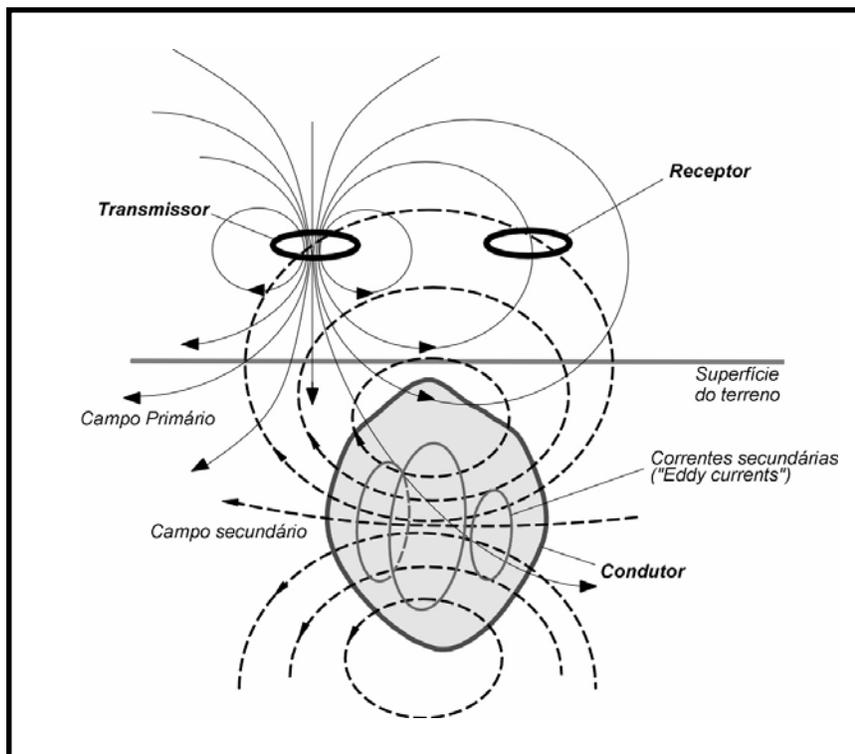


Figura 22 - Indução Eletromagnética.

O campo secundário altera o primário e como consequência disso tem o campo resultante, que nada mais é do que uma composição do primário com o secundário. O campo resultante, , assim como o secundário, traz informações sobre o condutor.

Os equipamentos EM contam com um sistema de transmissão e outro de recepção, que serão tratados a seguir.

Do sistema de transmissão faz parte um gerador-alternador ou um oscilador transistorizado. Alguns equipamentos trabalham em mais de uma frequência (em geral, só duas), o que é muito vantajoso, pois permite a distinção entre condutores subaflorantes daqueles mais profundos. Ligada a fonte de alimentação existe uma bobina ou um cabo longo aterrado. As bobinas podem ter núcleo de ar ou de ferrite.

Do sistema de recepção faz parte uma outra bobina, inteiramente portátil, composta de muitas espiras de fio fino, que pode ter núcleo de ar ou de ferrite e cujo sinal segue para um amplificador. Essa bobina é sintonizada a frequência da fonte.

Existem vários métodos EM, classificados de acordo com o parâmetro que é determinado pelo equipamento: métodos que medem a inclinação do campo resultante, métodos que medem as componentes do campo e métodos que medem diretamente a condutividade ou resistividade elétrica. Nesse último grupo estão os métodos mais utilizados atualmente - o Eletromagnético Indutivo e Eletromagnético Domínio do Tempo. O Eletromagnético Indutivo caracteriza-se pelo uso de equipamentos de operação muito simples e rápida, fatores que explicam sua extensa aplicação em estudos ambientais; o Eletromagnético Domínio do Tempo por contar com equipamentos mais sofisticados e custo mais alto, além do fato de ser uma metodologia relativamente nova para estudos ambientais, não é difundido como o anterior. Uma outra técnica bastante recente e muito promissora em casos específicos de estudos ambientais, o radar de penetração no solo, pode também ser considerada dentro dos métodos eletromagnéticos.

Método Eletromagnético Indutivo

Os equipamentos utilizados nesse método podem ser denominados genericamente de condutímetro. O condutímetro é composto de duas bobinas (emissão e recepção). A bobina transmissora emite um campo magnético primário H_p , que induz, em subsuperfície, correntes elétricas, que geram um campo secundário H_s , como visto anteriormente. A

combinação destes dois campos é medida pela receptora. Sob certas condições, definidas tecnicamente como “operação de baixa indução”, admite-se que a relação entre os módulos dos dois campos seja dada por $H_s = k.H_p$, onde k depende da frequência do campo, da permeabilidade magnética do material no vácuo, do espaçamento entre as bobinas e da condutividade elétrica do meio. O equipamento é construído de forma a permitir a leitura direta da condutividade em miliSiemens por metro. Os equipamentos mais consagrados nesse método são o EM-31 e o EM-34, fabricados no Canadá. São equipamentos construídos para investigar as profundidades pré-determinadas de 3 e 6 metros, dependendo da orientação das bobinas (EM-31) e de 7,5 a 60 metros, dependendo do comprimento do cabo de referência e da orientação das bobinas (EM-34).

Os ensaios de campo são geralmente caminhamentos, que, devido a praticidade de operação e transporte dos equipamentos, são realizados com muita rapidez. Como as profundidades de investigação são pré-determinadas, os equipamentos são bastante limitados para a execução de sondagens.

Os dados de condutividade podem ser plotados em perfis, em função da distância, e um conjunto de perfis permite a confecção de mapas. A interpretação desses dados é qualitativa, porém existem, em desenvolvimento, softwares para quantificação desses dados.

O método eletromagnético indutivo, através dos equipamentos EM-31 e EM-34 (Geonics Ltda), de fabricação canadense, passou a ser extensamente aplicado em estudos de detecção e monitoramento da poluição gerada por resíduos industriais e urbanos, a partir da década de 80. Na figura 23 é mostrado o equipamento EM-34.

Método Eletromagnético Domínio do Tempo (TDEM, TEM)

A diferença fundamental entre o método eletromagnético domínio do tempo (Time-domain electromagnetics - TDEM ou Transient electromagnetics - TEM) em relação aos outros é justamente o fato dele operar no domínio do tempo, ao passo que todos os outros operam no domínio da frequência. Nesse tipo de equipamento, uma bobina de transmissão (cujas dimensões dependerão da profundidade de investigação) é acionada com uma corrente alternada, que estabelece um campo magnético estático no terreno. Quando a corrente é rapidamente cortada o campo primário é extinto e a força eletromotriz induzida

no terreno causa um fluxo de correntes secundárias no solo e nas proximidades de condutores subsuperficiais. Essas correntes decaem com o tempo, mostrando um decaimento do campo magnético na superfície, o qual, uma vez que é gerado durante o período em que o campo primário está cortado, pode ser medido facilmente para detectar corpos condutores ou medir a condutividade do terreno. A Figura 24 mostra como ocorre esse processo através das formas de onda dos campos envolvidos.



Figura 23 - Equipamento EM-34 em trabalho de campo.

Os equipamentos são compostos de um sistema de transmissão (um transmissor ligado a uma bobina pequena ou um “loop” quadrado de 20 a 150 m de lado) e um sistema de recepção (um receptor ligado a uma bobina). Na figura 25 é mostrado o equipamento PROTEM, composto de receptor *Protem Receiver* e do transmissor *Protem TEM47*. De acordo com Mcneil (1990) são utilizados basicamente dois arranjos de campo: o primeiro é denominado de modo Slingram ou “loop-loop”, onde duas pequenas bobinas (transmissora e receptora) são movidas juntas na linha de ensaio, tal como no método eletromagnético indutivo. O segundo arranjo é o modo central loop de sondagem, em que a bobina de

recepção fica posicionada no centro de um loop quadrado estendido no terreno. Essas duas configurações de campo para sistemas EM domínio do tempo são mostradas na Figura 26.

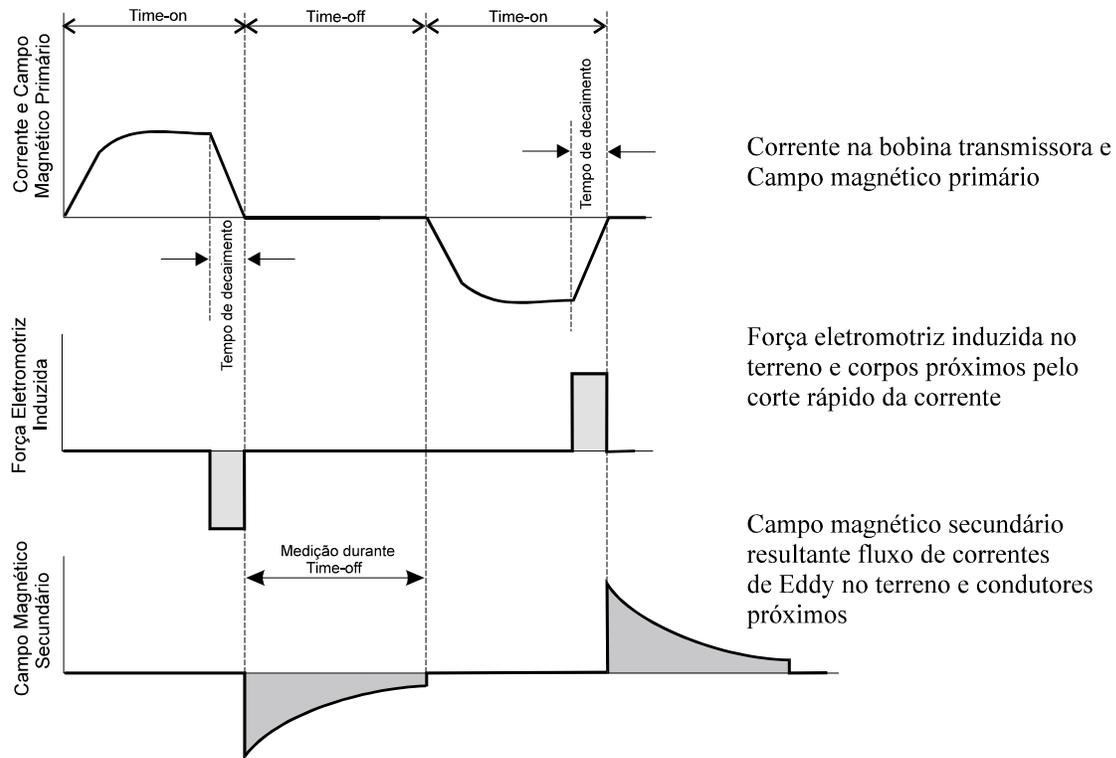


Figura 24 - Formas de ondas dos campos gerados no método eletromagnético domínio do tempo.



Receptor *Protem Receiver*

Transmissor *Protem TEM47*

Figura 25 - Equipamento PROTEM para ensaios EM Domínio do Tempo.

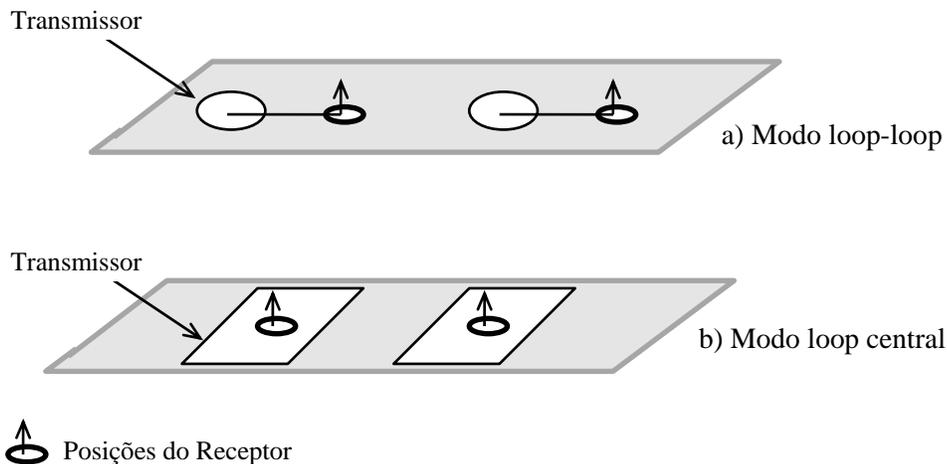


Figura 26 - Arranjos transmissor-receptor mais utilizados.

Exemplos de aplicação de métodos eletromagnéticos

1. Determinação de materiais existentes no perfil vertical

Da mesma forma como pode ser feito através de SEVs, ensaios de sondagem EM domínio do tempo possibilitam a obtenção de sobre a distribuição dos diferentes tipos de materiais no perfil (diversas camadas de solo e topo do substrato rochoso) e a profundidade da zona saturada, importantes para a caracterização de locais com problema de poluição. Um exemplo de determinação do perfil estratigráfico é apresentado por Hoekstra & Blohm, (1991). Esses autores mostram uma sondagem TEM utilizada para determinar a espessura de derrames basálticos. O resultado da sondagem realizada é apresentado na Figura 27, onde pode ser observada a presença de um derrame superior mais maciço, com valor de resistividade de 180 ohm.m, um derrame com maior número de vesículas, caracterizado por uma diminuição na resistividade para cerca de 15 ohm.m e sedimentos tufáceos com resistividade inferior a 10 ohm.m.

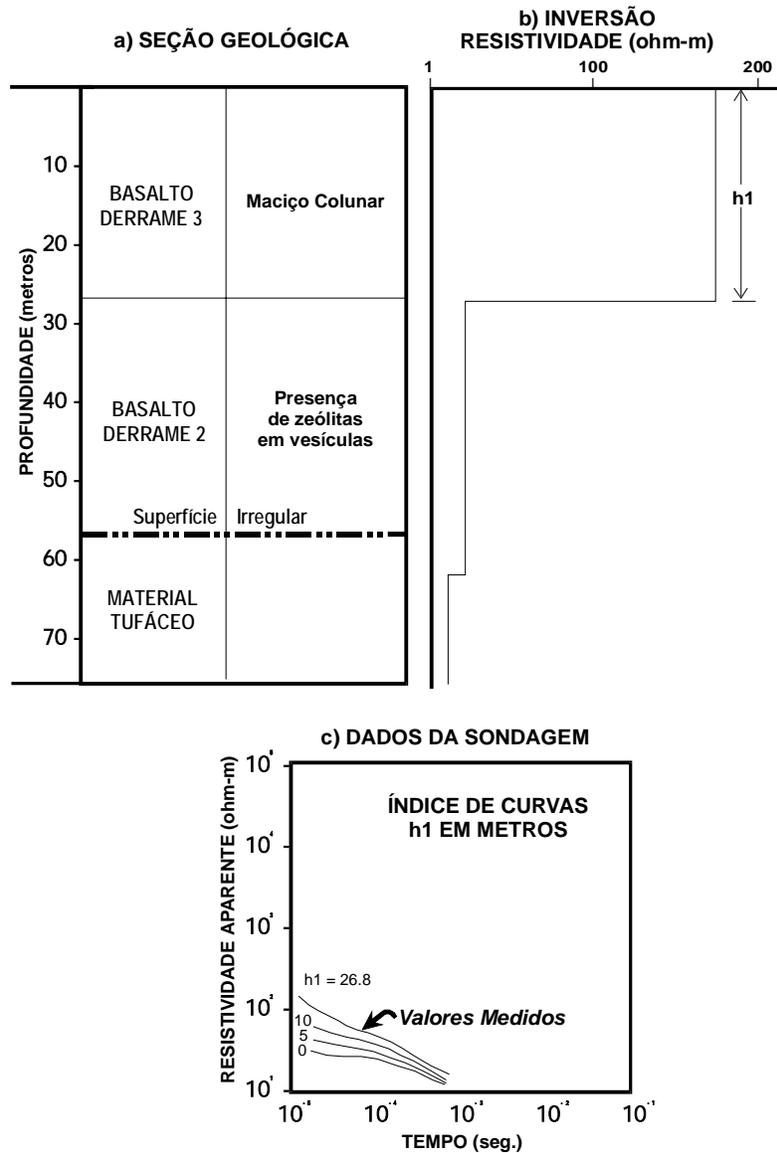


Figura 27 - Resultados de inversão de sondagem TEM na determinação da espessura de derrames de basalto. (Adaptado de Hoekstra & Blohm, 1990).

2. Detecção e mapeamento de contaminação

Como citado anteriormente, a partir da década de 80 o método eletromagnético indutivo passou a ser extensamente aplicado em estudos de detecção da poluição gerada por resíduos industriais e urbanos. Os equipamentos EM-31 e EM-34, que são os mais conhecidos e utilizados dentro do método eletromagnético indutivo, medem diretamente a condutividade do terreno em profundidades teóricas pré-estabelecidas. Dessa forma, como

na maioria dos casos a presença de poluentes causa um aumento na condutividade elétrica, esses podem ser rapidamente detectados e mapeados. De acordo com McNeil (1990), uma adição de 25 ppm de material na água subterrânea causa um aumento da condutividade em aproximadamente 1 mS/m. Convém lembrar que em casos de poluição por compostos orgânicos essa regra não vale, pois estes não causam aumento de condutividade no local.

Em contaminação gerada a partir de aterros sanitários o método eletromagnético indutivo mostra-se como uma ferramenta rápida e de baixo custo que possibilita um mapeamento da área de influência dos poluentes. Um exemplo é apresentado na figura 28, onde a utilização de EM-34 no mapeamento da contaminação gerada pelo aterro controlado de Rio Claro-SP é mostrado (Tandel, 1998). Uma série de medidas realizadas no local para a profundidade de 30 metros mostra uma zona condutora (valores maiores que 21 mSm/m) na parte nordeste do aterro que relaciona-se a presença dos resíduos e chorume. Uma outra zona condutora na parte sudoeste da área possivelmente caracteriza uma pluma de contaminação desenvolvendo-se dentro da zona saturada.

Um outro caso de mapeamento de poluição é apresentado por Hoekstra & Blohm (1990), que aplicaram sondagens EM domínio do tempo no mapeamento de intrusão de água salgada na baía de Monterey, E.U.A.. Na região ocorrem um aquífero livre comprometido por contaminação de fertilizantes e uma série de 3 aquíferos confinados separados por camadas argilosas, localizados a aproximadamente 60, 130 e 300 metros de profundidade. A inversão dos dados geofísicos permitiu a construção de seções perpendiculares a linha de costa, onde foi notado um aumento progressivo dos valores de resistividades dos aquíferos continente adentro, mostrando uma diminuição da salinidade. Na figura 29 é apresentada uma seção interpretada que mostra as relações entre os dois aquíferos confinados superiores e a intrusão salina. De acordo com os autores, as resistividades obtidas puderam ser correlacionados com a concentração de cloreto, de forma que para os aquíferos uma resistividade de 8 ohm.m correspondia a uma concentração de 500 ppm de cloreto. Esse valor é usado como base para separação da interface água doce/salgada na região.

Aterro Controlado de Rio Claro - SP

Mapa de Condutividade Aparente
(EM-34 - profundidade 30 metros)

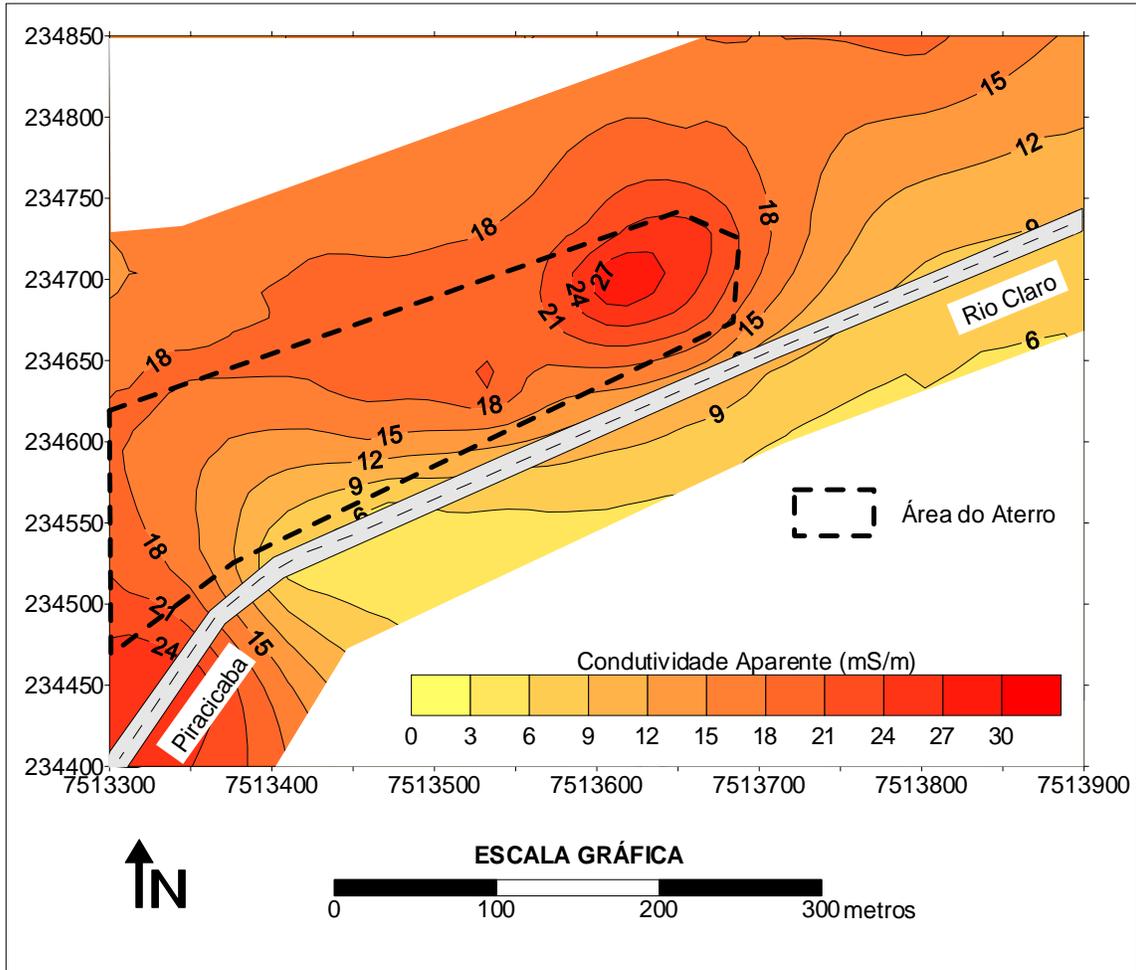


Figura 28 - Mapa de condutividade aparente (EM-34 profundidade 30 metros) do Aterro Controlado de Rio Claro-SP.

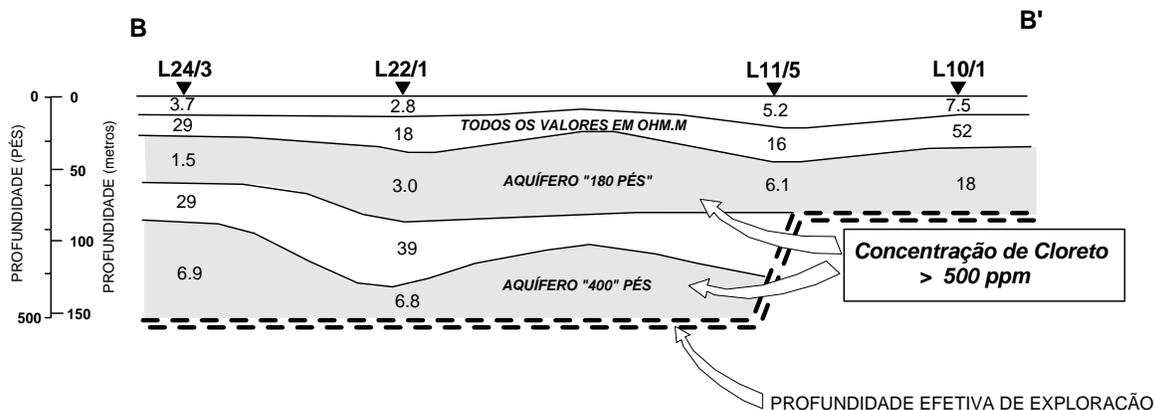


Figura 29 - Seção interpretada de resistividade obtida através do método EM domínio do tempo em área de intrusão salina em aquíferos costeiros (Hoekstra & Blohm, 1990). A seção tem cerca de 50 milhas de extensão (aproximadamente 80 quilômetros).

3. Monitoramento de pluma de poluição

Os equipamentos EM-31 e EM-34, em função da rapidez, facilidade e baixo custo da aplicação dos ensaios de campo, têm se destacado no monitoramento de plumas de poluição. Costa & Ferlin (1993), realizaram um acompanhamento da evolução da pluma de contaminação durante o período de um ano em depósitos de lixo. Através da diferença entre os valores de condutividade obtidos nesse período, foi possível observar claramente que a pluma está em expansão, mostrando aumento dos valores de condutividade com o tempo.

Bibliografia

AQUINO, W.F.; GANDOLFO, O. C. B. & BOTELHO, M.A.B. - 1998a - Identificação de cunha salina através do uso de Geo-radar (GPR). *Anais do II Encontro de Geotecnia e Meio Ambiente e II Workshop de Geofísica Aplicada*, Rio Claro – SP. CDROM, trabalho Aquino2.doc.

AQUINO, W.F.; DEHAINI, J. & MENDES J.M.B. - 1998b - Geo-Radar Para a Detecção de Contaminação por Hidrocarboneto. *Anais do II Encontro de Geotecnia e Meio*

Ambiente e II Workshop de Geofísica Aplicada, Rio Claro – SP. CDROM, trabalho Aquino4.doc.

BENSON, R.C.; GLACCUM, R.A. & NOEL, M.R. - 1982 - *Geophysical techniques for sensing buried wastes and waste migration*. U.S. Environmental Protection Agency, Las Vegas, Nevada, 236p.

BRAGA, A .C.O. – 1997 - Métodos geoeletricos aplicados na caracterização geológica e geotécnica – formações Rio Claro e Corumbataí, no Município de Rio Claro – SP. Tese de Doutorado, Instituto de Geociências e Ciências Exatas - UNESP, Rio Claro - SP, 173 p.

BRAGA, A .C.O. – 1999 - Métodos de Prospecção em Hidrogeologia. Apostila Interna do Curso de Geologia, Instituto de Geociências e Ciências Exatas - UNESP, Rio Claro - SP.

CORWIN, R.F. - 1990 - The self-potential method for environmental and engineering applications. *Geotechnical and Environmental Geophysics (Investigations in Geophysics n. 5), Vol.I*, Society of Exploration Geophysics, pp. 127-145.

COSTA, A.F.U. & FERLIN, C.A. - 1993 - Aplicação prática de métodos elétricos na detecção e monitoramento da contaminação de águas subterrâneas. *Anais do II Congresso Internacional da Sociedade Brasileira de Geofísica*, Rio de Janeiro-RJ, pp. 1210-1212.

DAVIS, J.L & ANANN, A.P. - 1989 - Ground Penetrating Radar for high resolution mapping of soil and rock stratigraphy. *Geophysical Prospecting* 37 (5), pp. 531-552

ELIS, V.R. - 1993 - *A Aplicação de Geofísica para Análise do Meio Físico. Importância para elaboração de Mapeamento Geotécnico*. Dissertação de Mestrado, Rio Claro-SP, Instituto de Geociências e Ciências Exatas - UNESP, 120p. (inédita).

- ELIS, V.R. & ZUQUETTE, L.V. - 1996 - Caminhamento elétrico dipolo-dipolo - uma técnica eficiente na investigação de depósitos de resíduos. *Anais do VIII Congresso Brasileiro de Geologia de Engenharia, Rio de Janeiro, Vol I*, pp. 39-48.
- ELIS, V.R. & ZUQUETTE, L.V. - 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, São Paulo (SP), Vol 1*, pp. 417-420.
- ELLERT, N.; ROSS, S.; MENDES, J.M.B. & MARTIN, E. - 1990 - Mapeamento Geofísico do Lixão de São Carlos. *Anais do VI Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas, Porto Alegre-RS*, pp. 82-88.
- HOEKSTRA, P. & BLOHM, M.W. - 1990 - Case histories of time-domain electromagnetic soundings in environmental geophysics. *Geotechnical and Environmental Geophysics (Investigations in Geophysics n. 5), Vol.I*, Society of Exploration Geophysics, pp.1-15.
- HYOUNG-SOO, K. & YEONGHWA, K. - 1997 - Geoelectrical Monitoring in Nanji Waste Landfill. *Anais do V Congresso Internacional da Sociedade Brasileira de Geofísica, São Paulo (SP), Vol 1*, pp. 494-498.
- INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS DO ESTADO DE SÃO PAULO - IPT - 1988 - *Métodos Geoeletricos*. Apostila interna, IPT, São Paulo - SP, 70 p.
- MAGALHÃES, F.S.; AZEVEDO, A.A.; BIRELLI, C.A. & BLANCO, R.G. - 1996 - Estudos geotécnicos e geofísicos em áreas com fenômeno de subsidência. *Anais do VIII Congresso Brasileiro de Geologia de Engenharia, Rio de Janeiro, Vol I*, pp. 23-31.

- MALAGUTTI FILHO, W. - 1992 - *Utilização de técnicas geofísicas na caracterização de solos e rochas com aplicações na Geologia de Planejamento Urbano*. Tese de Doutorado, Rio Claro-SP, Instituto de Geociências e Ciências Exatas - UNESP, 2 volumes. (inédita).
- MALAGUTTI FILHO, W; JOSÉ, C.; BRAGA, A.C.O.; ELIS, V.R.; TANDEL, R.Y. & PORSANI, J.L. - 1997 - Aplicação Integrada de Técnicas Geofísicas no Aterro Sanitário de Rio Claro-SP - Resultados Preliminares. *Anais do V Congresso Internacional da Sociedade Brasileira de Geofísica, Vol. 1*, pp 422-424.
- McNEIL, J.D. - 1990 - Use of electromagnetic methods for groundwater studies. *Geotechnical and Environmental Geophysics (Investigations in Geophysics n. 5), Vol.I*, Society of Exploration Geophysics, pp. 191-217.
- McNEW, E.R. & ARAV, S. - 1994 - Surface geophysical surveys of the fresh water-salt water interface in a coastal area of Long Island, New York. *Ground Water* 38 (4), pp. 615-626.
- ORELLANA, E. - 1972 - *Prospeccion Geoelectrica en Corriente Continua*. Ed. Paraninfo, Madrid, 523p.
- PALMER, D.F. & WEISSGARBER, S.L. - 1988 - Geophysical survey of the Stumpy Basin Landslide, Ohio. *Bulletin of the Association of Engineering Geophysics*, 25 (3), pp. 363-370.
- ROSS, H.P.; MACKELPRANG, C.E. & WRIGHT, P.M. - 1990 - Dipole-dipole electrical resistivity surveys at waste disposal study sites in Northern Utah *Geotechnical and Environmental Geophysics (Investigations in Geophysics n. 5), Vol.I*, Society of Exploration Geophysics, pp. 145-152.

- SASAKI, Y. - 1994 - 3-D resistivity inversion using the finite element method. *Geophysics* 59 (1), pp. 1839-1848.
- SEARA, J.L. & GRANDA, A. - 1987 - 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.
- STIERMAN, D.J. & RUEDISILI, L.C. - 1988 - Integrating geophysical and hydrogeological data: an efficient approach to remedial investigations of contaminated ground water. *Ground Water Contamination - Field Methods*. ASTM, Baltimore, pp. 43-57.
- SUMNER, J.S. – 1976 – *Principles of Induced Polarization for Geophysical Exploration*. Elsevier Scientific Publishing Co., Amsterdam, 227p.
- TANDEL, R. Y. (1998). *Contribuição ao estudo da poluição provocada no aquífero freático e no solo pelo aterro controlado da cidade de rio claro, SP*. Tese de Doutorado, São Paulo - SP, Instituto de Geociências - Universidade de São Paulo.151p.
- TELFORD, W.M.; GELDART, L.P.; SHERIFF, R.E. & KEYS, D.A. - 1990 - *Applied Geophysics*. Cambridge University Press, 860 p.
- VOGELSANG, D. – 1995 – *Environmental Geophysics. A practical guide*. Springer-Verlag, Berlin, 172p.
- WARD, S.H. - 1990 - Resistivity and Induced Polarization Methods. *Geotechnical and Environmental Geophysics, Volume 1: Review and Tutorial*. Society of Exploration Geophysics, Tulsa, OK, pp. 147-189.

WHITELEY, R.J. & JEWEL, C. - 1982 - Geophysical techniques in contaminated land assessments - do they deliver? *Exploration Geophysics* 23 (4), pp. 557-566.

ZENG, X. & McMECHAN, G.A. - 1997 - GPR characterization of buried tanks and pipes. *Geophysical Prospecting* 62 (3), pp. 797-806.