



## Aplicação da eletroresistividade no monitoramento ambiental de áreas urbanas

Márcio A. Zago\* Lucas H. Santos e Lurimar S. Batista UNIT, Brasil

Copyright 2005, SBGf - Sociedade Brasileira de Geofísica

This paper was prepared for presentation at the 9<sup>th</sup> International Congress of the Brazilian Geophysical Society held in Salvador, Brazil, 11-14 September 2005.

The Technical Committee of the 9th International Congress of the Brazilian Geophysical Society reviewed contents of this paper. Ideas and concepts of the text are authors' responsibility and do not necessarily represent any position of the SBGf, its officers, or members. Electronic reproduction or storage of any part of this paper for commercial purposes without the written consent of the Brazilian Geophysical Society is prohibited.

### Abstract

**The information derived from the geophysical surveys are useful for the location of the monitoring wells, as also they supply to estimates of area and volume the activities of removal and contaminated ground remediation. Moreover, they are applied to reduce the risk of perforation of embedded tanks I contend residues, or of ducts and drain galleries. The eletroresistivity method consists of injecting electric through contacts right-handers with the ground and measuring the difference of potential caused for these electric chains. This work presents the application of the method of the eletroresistivity of surface in the ambient monitoring of an urban area around the quarter of the Farolândia, Aracaju, Sergipe, Brazil.**

### Introdução

No diagnóstico ambiental de áreas contaminadas, a realização de levantamentos geofísicos tem por objetivo básico a identificação da presença da contaminação subterrânea, além da definição das feições geológicas e hidrogeológicas dos locais investigados. As características do meio geológico, além da natureza da contaminação, podem determinar o comportamento dos contaminantes em subsuperfície. Nesse contexto, a interpretação dos dados geofísicos pode contribuir para a obtenção de informações sobre a litologia, estratigrafia, profundidade do nível d'água, profundidade do embasamento, presença de falhas ou fraturas, existência de aquíferos importantes, caminhos preferenciais de propagação subterrânea e outras feições geológicas de interesse.

Na avaliação da presença da contaminação em profundidade, o emprego dos métodos geofísicos está voltado, especificamente, à localização de valas contendo resíduos, investigação da contaminação disseminada no solo e nas águas subterrâneas, detecção de tanques e tanques enterrados e determinação de vazamentos em tanques ou dutos. A aplicação de dois ou mais métodos geofísicos distintos aumenta a precisão das interpretações, sendo que a natureza dos contaminantes e a geologia local são os fatores decisivos na seleção das técnicas geofísicas a serem utilizadas.

Os desvios significativos do padrão normal das medidas geofísicas, que são as anomalias, podem, do ponto de vista ambiental, apontar a presença de contaminantes em subsuperfície. A interpretação das anomalias é fundamental, pois pode indicar a intensidade da contaminação presente, proporcionando, assim, dados importantes para as atividades de diagnóstico, monitoramento da propagação dos contaminantes e acompanhamento da recuperação de uma área contaminada. Dessa forma, as informações derivadas dos levantamentos geofísicos são úteis para a locação dos poços de monitoramento, como também podem fornecer estimativas de área e volume para as atividades de remoção e remediação de solos contaminados. Além disso, podem ser aplicadas para reduzir o risco de perfuração de tanques e tanques enterrados contendo resíduos, ou de dutos e galerias subterrâneas.

Existe uma variedade de métodos geofísicos que podem ser utilizados nos estudos ambientais, porém os principais e mais adequados métodos, que comumente são aplicados à investigação da contaminação do solo e da água subterrânea, são o geo-radar, o eletromagnético indutivo, magnetometria e a eletroresistividade.

A vantagem desses métodos em relação a outros métodos geofísicos consiste basicamente na capacidade de detecção direta da contaminação subterrânea e a caracterização da geologia e hidrogeologia das áreas em estudo.

Os métodos geofísicos de superfície mais empregados para solucionar questões relativas à proteção da água subterrânea e à detecção de poluentes em subsuperfície são os fundamentados nas características elétricas do substrato, mais especificamente na resistividade elétrica (*Mazac et al. 1987*). Frequentemente, o método da resistividade elétrica é utilizado em associação com outros métodos geofísicos, para melhor caracterizar o local em estudo (*Mazac et al. 1989*).

A passagem de corrente elétrica através das rochas deve-se à presença de minerais condutores, ou à existência de soluções iônicas nos espaços intersticiais. A condutividade exclusivamente metálica é rara e, portanto a resistividade dos solos e das rochas é predominantemente controlada pelo conteúdo de água intersticial (*Benson et al. 1982*). A resistividade dos solos e das rochas normalmente diminui quando aumenta o conteúdo de umidade ou quando aumenta o volume de sólidos dissolvidos na água intersticial. As rochas e os solos argilosos tendem a ser menos resistivo que seus equivalentes arenosos devido a cátions que podem estar adsorvidos na superfície dos cristais de argila, e que atuam como condutores de eletricidade (*Benson et al. 1982*).

O método da resistividade elétrica requer que uma corrente elétrica seja injetada no solo por meio de um par de eletrodos fixados à superfície do terreno. A diferença de potencial que se forma no solo é medida utilizando-se um segundo par de eletrodos. A resistividade subsuperficial pode ser calculada conhecendo-se a geometria da disposição dos eletrodos, a corrente elétrica injetada e a voltagem medida (Benson et al. 1982, Fetter 1994).

Barker (1981) propôs a utilização de vários eletrodos, conectados de maneira simultânea e independente ao equipamento de medida. Este procedimento permitiria reduzir o tempo e o pessoal envolvidos na execução de uma perfilagem elétrica horizontal. Um cabo especial, com núcleo constituído por outros cabos, mais fino e devidamente isolado, poderia ser utilizado para conectar os vários eletrodos ao equipamento de medida. Um sistema de comutação serviria de interface entre o cabo com os eletrodos e o equipamento de medição. Este comutador permitiria ativar e desativar determinados pares de eletrodos, formando arranjos com diferentes espaçamentos, o que equivaleria ao deslocamento manual de apenas quatro eletrodos sobre o terreno. Griffiths & Turnbull (1985) e Griffiths et al. (1990) relatam a construção e a utilização de equipamentos conforme os descritos por Barker (1981). Tais equipamentos foram construídos de modo a simular o deslocamento de um arranjo do tipo Wenner sobre o terreno, com diferentes espaçamentos.

Ainda segundo Barker (1981), o conceito de um cabo de eletrodos com as características anteriormente descritas data da década de 1950. Outro conceito que data da década de 1950 é o da pseudo-seção elétrica. Uma pseudo-seção elétrica corresponde a um corte, ou perfil, vertical da subsuperfície, construídos a partir de vários pontos, regularmente distribuídos neste perfil verticais e obtidos por meio de perfilagens elétricas com diferentes espaçamentos, e conseqüentemente, a diferentes profundidades.

Os estudos que buscam uma correlação entre a resistividade elétrica e o fluxo de água na zona não saturada, de modo geral, concluem que terrenos mais resistivos apresentam maior permeabilidade. Outra conclusão em relação à zona não saturada é a de que variações laterais da umidade na superfície do solo podem ser definidas por meio de perfilagens elétricas horizontais. Contudo, não se pode determinar, de forma genérica, por exemplo, qual a menor variação de umidade passível de ser detectada através de medidas de resistividade elétrica (Kelly 1985, Kean et al. 1987).

As dificuldades para correlacionar a resistividade elétrica e o conteúdo de umidade devem-se principalmente à grande variação de textura e de estrutura do solo, dois dos parâmetros fundamentais para classificá-lo. A textura é definida pelas proporções relativas de partículas com granulação argila (< 0,002mm), silte (0,002 até 0,02mm), e areia (0,02 até 2,0mm). A estrutura é o arranjo espacial que os aglomerados de partículas do solo formam, com a redução da umidade. A estrutura exerce uma influência

direta sobre a porosidade do solo (Frohlich & Parke 1989, Vieira et al. 1988).

## Fundamentos Teóricos

A corrente elétrica  $I$  (ampere, A) num condutor pequeno, fino e linear de secção transversal uniforme é dada pela lei de Ohm;

$$I = \frac{dV}{R} \quad (1)$$

onde  $dV$  é a diferença de potencial (volts, V) entre as extremidades do condutor e  $R(\text{ohm}, \Omega)$  é a resistência do condutor. O sinal de menos significa o fato do fluxo da corrente ser do maior para o menor potencial, isto é na direção oposta ao incremento do potencial (o gradiente).  $R$  é diretamente proporcional ao comprimento  $dL(\text{m})$  do condutor e inversamente a secção transversal  $s(\text{m}^2)$  então;

$$R = \rho \frac{dL}{s} \quad (2)$$

onde a constante de proporcionalidade  $\rho$  é a resistividade ( $\Omega \cdot \text{m}$ ) do material do condutor. A partir das duas equações acima se pode concluir que;

$$\frac{I}{s} = - \frac{dV}{\rho \cdot dL} \quad (3)$$

O lado esquerdo da equação (3) é a densidade de corrente  $J$  (corrente por unidade de área na seção transversal,  $\text{A m}^{-2}$ ), enquanto  $-dV/dL$  no lado direito é o campo elétrico  $E$  ( $\text{V m}^{-1}$ ) na direção do vetor de densidade de corrente. Desta forma;

$$J = \frac{E}{\rho} \quad (4)$$

$$E = \rho \cdot J \quad (5)$$

Considerando um eletrodo pontual de corrente numa superfície homogênea e isotrópica, que se estende até o infinito em direção ao interior da terra possuindo resistividade  $\rho$ . Pode-se imaginar uma interface semi-esférica de raio  $r$  e espessura  $dr$  em torno do eletrodo. Por simetria, a corrente em qualquer ponto desta interface será a mesma ao longo do raio. Se a corrente total que passa pelo eletrodo para o solo é  $I$  e o potencial decai de  $Dv$  através da interface, podemos escrever;

$$Dv = - \frac{I \rho dr}{2\pi r^2} \quad (6)$$

Integrando-se a equação (6), obtém-se a expressão para o potencial elétrico a uma distancia  $r$  criado por uma fonte pontual de corrente;

$$V = \frac{I\rho}{2\pi} - \frac{I}{r} + C \quad (7)$$

Onde C é uma constante arbitrária (Parasnis, 1997). Se V é escolhido de forma a valer zero em  $r = \infty$ , então  $C = 0$  e obtém-se a expressão;

$$V = \frac{I\rho}{2\pi} - \frac{I}{r} \quad (8)$$

A equação (8) fornece a relação fundamental para todos os trabalhos de prospecção elétrica realizados na superfície (Ward, 1990). Na prática existem dois eletrodos na superfície, um positivo, injetando corrente no solo, e outro negativo, coletando a corrente que retorna conforma ilustração {Figura 1}. O potencial total em qualquer ponto P será;

$$V = \frac{I\rho}{2\pi} \left( \frac{1}{r1} - \frac{1}{r2} \right) \quad (9)$$

onde o r1 e r2 são as distancias de P a partir dos dois eletrodos.

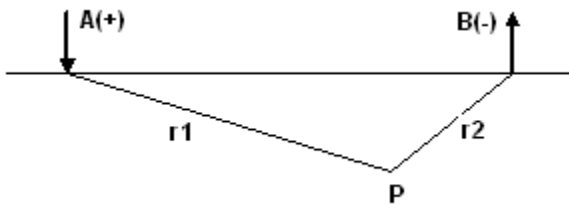


Figura 1 – Potencial em um ponto qualquer devido à emissão de corrente em dois eletrodos de corrente

Considerando a corrente fluindo de A para B, na figura 3, a diferença de potencial criada entre os eletrodos M e N pode ser calculada como segue;

$$\Delta V = VM - VN$$

$$\Delta V = \left( \frac{I\rho}{2\pi AM} - \frac{I\rho}{2\pi BM} \right) - \left( \frac{I\rho}{2\pi AN} - \frac{I\rho}{2\pi BN} \right) \quad (10)$$

Rearranjando obtém-se;

$$\Delta V = \frac{I\rho}{2\pi} \left( \frac{1}{AM} - \frac{1}{BM} - \frac{1}{AN} + \frac{1}{BN} \right) \quad (11)$$

Ao Isolarmos  $\rho$  que é a grandeza de interesse nos trabalhos de prospecção chega-se a seguinte expressão:

$$\rho = \frac{\Delta V}{I} = \left( \frac{2\pi}{\frac{1}{AM} - \frac{1}{BM} - \frac{1}{AN} + \frac{1}{BN}} \right) \quad (12)$$

A resistividade elétrica em cada ponto do terreno é determinada pelas equações, nas quais  $\rho$  é a resistividade elétrica calculada ( $\Omega.m$ ),  $I$  é a corrente elétrica aplicada na superfície do terreno (A),  $U$  é a diferença de potencial medida sobre o terreno (V), e a distância entre os eletrodos (m), que vai variar de acordo com o método de arranjo a ser usado.

### Metodologia

O método de eletrorresistividade consiste em injetar corrente elétrica com o resistivímetro, através de contatos diretos com o solo e medir a diferença de potencial causada por estas correntes elétricas. A injeção de correntes e a medida da diferença de potencial são realizadas através de eletrodos metálicos em contato direto com o solo (aterrados). Quando os valores da corrente e do potencial são registrados é possível se estimar a resistividade dos materiais da subsuperfície.

A intenção de utilizar esta metodologia é de apresentar resultados relacionados às condições da subsuperfície da área estabelecida, pois se estes forem satisfatórios poderão ser usados para identificar possíveis locais de perfurações no solo para utilização e monitoramento destes recursos hídricos.

O desenvolvimento do trabalho de campo inicia-se pela escolha do local exato do centro da linha AMNB; neste local coloca-se uma estaca identificando o número da sondagem.

Ao aumentar a distância entre os eletrodos de corrente A e B, o volume total da subsuperfície incluída na medida também aumenta, permitindo alcançar camadas cada vez mais profundas.

Os resultados de medições sucessivas estão ligados com a variação das resistividades aparentes. Os dados destes parâmetros físicos serão representados, em uma tabela, por meio de curvas bilogarítmicas em função das distancias entre os eletrodos correspondentes. A utilização destas curvas para representação e interpretação dos dados de campo, se dá por que as variações das estruturas geoeletricas representativas são realçadas, além de reduzirem os cálculos teóricos para o traçado da curvas modelos, usadas na interpretação.

A finalidade da interpretação é determinar a distribuição espacial dos parâmetros físicos no subsolo, partindo dos dados das curvas de campo observados na superfície do terreno e buscar o significado geológico de tais parâmetros. A definição do modelo final não é simples ajustes das curvas de campo com modelos teóricos, efetuados por meio de programas existentes para computadores, sem levar em consideração uma análise morfológica das curvas de campo e a geologia da área.

A interpretação “automática” pode levar a erros graves na definição do modelo geoeletrico, resultando em uma descrença da técnica e ate em prejuízos financeiros para o usuário. Como por exemplo, o estudo que será feito para viabilização de perfuração de poços de

monitoramento da contaminação do entorno da comunidade, pois se o estudo não for feito com cautela, pode-se furar poços em locais com pouca probabilidade de se encontrar a água.

São apresentadas faixas de variações mais freqüentes nos valores de resistividade e cargabilidade para alguns tipos de sedimentos e rochas. Estes valores é que vão nos indicar quais os melhores locais para futuras perfurações dos poços artesianos para utilização no local.

O estudo não indica um reservatório de água, mais sim, um tipo de rocha, que por ser porosa, pode armazenar uma grande quantidade de água em sua estrutura, e assim justificar a melhor probabilidade de perfuração naquele local ou região específica determinada pelas medições e cálculos obtidos em campo.

A área a ser analisada foi definida e estaqueada, com as estações: 0, 1, 2, 3, 4 e 5. Em cada estação mediu-se a diferença de potencial em AB/2 iguais a 1,5; 3; 5; 7; 10; 15; 17; 20; 25 e 30 metros de abertura, mantendo MN nas quatro primeiras medidas igual a 0,8 metros e nas cinco últimas igual a 3 metros. Estas aberturas foram feitas no sentido transversal ao perfil escolhido, identificando com o método de “escama de peixe”, que facilita a aplicação em campo dando maior agilidade na execução do trabalho de campo, como mostra a Figura 2.



Figura 2: Área de medições. (Novembro/2004)

## Resultados

Os resultados obtidos no campo foram anotados em tabelas e posteriormente usados para o cálculo da resistividade aparente. Estes resultados colhidos foram convertidos em gráficos que determinam o perfil do terreno, o que nos indica água e possivelmente salobra, devido análise sensorial feita em amostra de água que está sendo retirada de um poço artesiano próximo, para utilização em construções feitas nas redondezas.

A Figura 3 apresenta a relação entre a resistividade aparente e AB/2, na estação nº 0. A partir de 12 metros de profundidade, observa-se que a região estruturada

contém materiais de resistividade acima de  $10^3 \Omega \cdot m$ . A presença de um material, provavelmente argiloso, com grande concentração de água em seus poros.

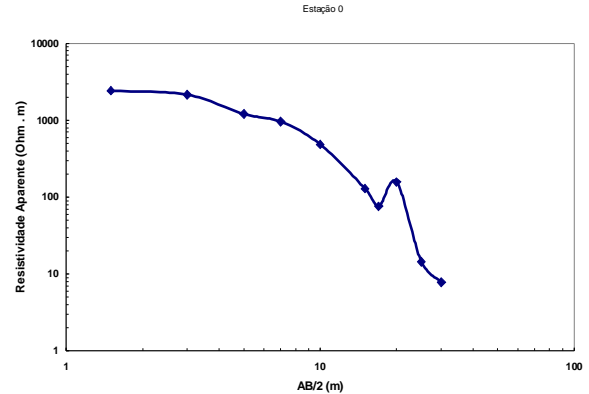


Figura 3: Sondagem elétrica vertical na estação 0.

Na estação 5, os dados levantados apresentam praticamente as mesmas características, Figura 4. É apresentada uma variação da resistividade aparente nos primeiros metros de profundidade, devido à presença de um tipo de material mais denso observado também na superfície.

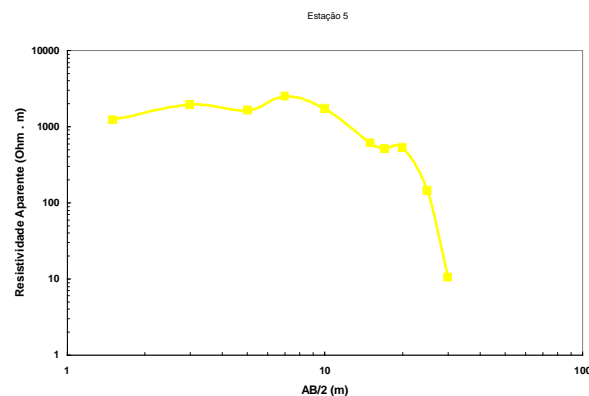


Figura 4: Sondagem elétrica vertical na estação 5.

A Figura 5 apresenta a pseudo-seção de resistividade aparente de todas as estações. Observa-se que na profundidade entre 10 e 35 metros, são encontrados tipos litológicos de grande densidade e de alta resistividade e próximo à superfície.

Individualmente, os minerais são razoavelmente consistentes em suas características elétricas, mas num agregado, como ocorre na natureza, a variação total de suas resistividades é muito maior. Portanto, na interpretação dos dados de resistividade dos materiais no subsolo, obtidas a partir da superfície do terreno, é fundamental, tanto a experiência do interprete como o conhecimento geológico da área estudada, não podendo realizar esta associação de forma puramente automática.

As resistividades dos solos, quando saturados permitem a identificação e caracterização dos diferentes tipos de materiais geológicos localizados em subsuperfície.

Entretanto, quando os solos encontram-se secos, porção localizada acima do nível freático, seus valores são considerados atípicos, apresentando uma ampla faixa de variação não identificando os materiais em subsuperfície em termos litológicos. As variações das resistividades, neste caso, refletem apenas as pequenas variações de saturação normalmente existentes.

Pela análise mais detalhada dos perfis, pode-se afirmar que à aproximadamente 15 metros da superfície tem-se um tipo de material de condutividade elevada, o que provavelmente há presença de água salobra.

### Conclusão

O diagnóstico ambiental da área estudada, realizada após o levantamento geofísico, identificou uma grande quantidade de água, isso só vêm a comprovar estudos anteriores da morfologia da área. Neste local existe fragmento de formação de dunas e áreas de restinga.

Foi constatado no local que esta água está sendo utilizada também na construção civil, o que pode acelerar o processo de corrosão em ferragens e alterações nas propriedades físicas do concreto e das estruturas.

Esta é uma área de recarga natural do lençol freático que pode ser pavimentada em sua totalidade, visto que existe uma grande especulação imobiliária no local, deixando pequenas áreas de absorção de águas pluviais. Outros problemas ambientais já podem ser observados, pois a

água que não é absorvida esta sendo desviada para as vias públicas que dão acesso a área, causando entupimento do sistema de escoamento de água pluvial e também alagamentos destas vias.

### Referência

BARKER R. D. 1981. **The offset system of electrical resistivity sounding and its use with multicore cable.** *Geophysical Prospecting*. 29:128-143.

BENSON R., Glaccum R. A., Noel M. R. 1982. **Geophysical Techniques for Sensing Buried Vfores and Waste Migration.** Dublin, National Ground Water Association, 236 p.

GRIFFITHS D. H. & Turnbull J. 1985. **A multi-electrode array for resistivity surveying.** *First Break*. 3:16-20.

GRIFFITHS D. H., Turnbull, J., Olayinka A. 1.1990. **Two-dimensional resistivity mapping with a computer-controlled array.** *First Break*. S: 121-129.

KELLY W. E. 1985. **Electrical resistivity for estimating ground-water recharge.** *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*. 111:177-180.

MAZAC O., Kelly W. E., Landa, 1.1987. **Surface geoelectrics for groundwater pollution and protection studies.** *Journal of Hydrology*. 93:277-294.

MAZAC O., Landa L, Kelly W. E. 1989. **Surface geoelectrics for the study of ground water pollution; survey design.** *Journal of Hydrology*. 111:163-176.

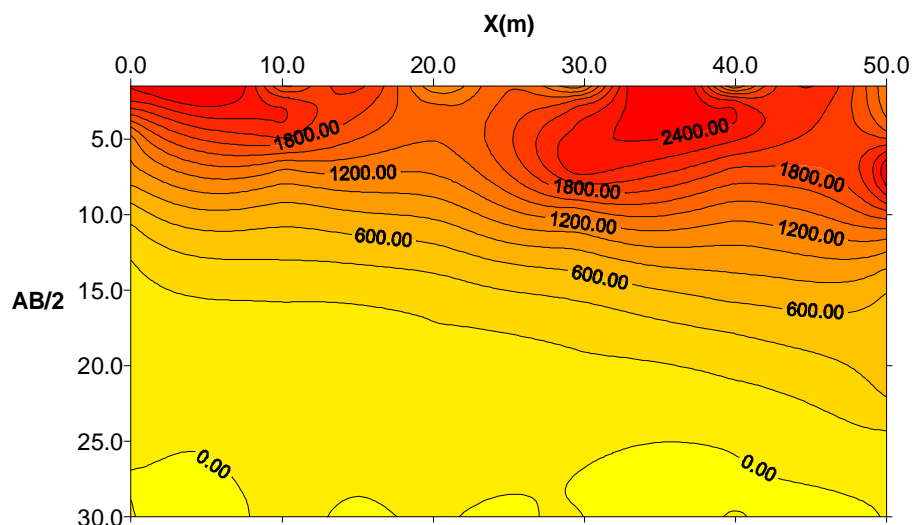


Figura 5: Pseudo-seção de resistividade aparente.