



Monitoramento temporal da pluma de contaminação em aterro controlado, na cidade de Rio Claro (SP), por meio do método da eletrorresistividade

José Ricardo Melges Bortolin*, Pós-Graduação em Geociências e Meio Ambiente, IGCE/UNESP, Brazil

Walter Malagutti Filho, Depto. de Geologia Aplicada, IGCE/UNESP, Brazil

Copyright 2009, SBGf - Sociedade Brasileira de Geofísica

This paper was prepared for presentation during the 11th International Congress of the Brazilian Geophysical Society held in Salvador, Brazil, August 24-28, 2009.

Contents of this paper were reviewed by the Technical Committee of the 11th International Congress of the Brazilian Geophysical Society 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

This work presents the partial results of a research developed at Rio Claro (SP) in a controlled landfill, it was based on the electroresistivity method, aiming the temporal monitoring of contamination plume under the landfill, and identifying the occurrence of possible seasonal variations of the local values of resistivity related to the plume alteration in the same year. Three electroresistivity profiling were performed with Dipole-Dipole array, they started how one line of reference and two lines of investigation. The investigation lines were carried out in 1999 and repeated in 2008, in similar way and the same locations previously determined. Both in 1999 and in 2008 were took place the geophysical tests in two distinct climatic periods: the season of the drought and after the rains. The electroresistivity data were processed in Res2Dinv software and sections of apparent resistivity were compared among themselves. They identified changes in the values of apparent resistivity during the interval between the accomplishments of the two sets of geophysical tests. Also there was significant variation in the values of apparent resistivity as a function of moisture in the soil, determined by different climatic periods.

Introdução

Áreas destinadas à disposição de resíduos sólidos urbanos oferecem risco iminente de contaminação ambiental quando não são devidamente preparadas para essa finalidade. Exemplo disso são os lixões e aterros controlados, os quais representam 52,8% dos locais de destinação de todo o lixo gerado no Brasil (IBGE, 2000).

A infiltração do percolato, gerado nesses locais, em camadas do subsolo pode comprometer a produção de alimentos que, porventura, sejam cultivados em áreas adjacentes, bem como a qualidade de águas subterrâneas, tornando-as impróprias para o consumo. Daí a importância de estudos que possam identificar possível contaminação, em especial aqueles usando técnicas geofísicas.

Porém, não basta somente determinar a existência de contaminantes em subsuperfície. É desejável que se faça um acompanhamento da situação monitorando temporalmente o local, por meio da repetição dos ensaios, a fim de se comparar os resultados.

Com a realização do monitoramento temporal é possível compreender plenamente o comportamento do contaminante, além de permitir um melhor planejamento para a remediação do problema.

Diante desse contexto, esse artigo apresenta os resultados preliminares de uma pesquisa, baseada no Método da Eletrorresistividade, com dois objetivos principais: (1) efetuar um monitoramento temporal da pluma de contaminação no aterro controlado do município de Rio Claro (SP) e (2) verificar a ocorrência de possíveis variações sazonais dos valores de resistividade locais, relacionáveis à mudança da pluma.

No ano de 1999, foram executados ensaios geofísicos com o Método da Eletrorresistividade no aterro controlado de Rio Claro (SP), visando entre outros, o posicionamento subsuperficial da pluma de contaminação (Moura, 2002; Moura e Malagutti Filho, 2003).

Em 2008, esses ensaios foram repetidos de forma análoga e nos mesmos locais determinados anteriormente, a fim de que os resultados fossem comparados entre si.

Para verificar possíveis variações sazonais dos valores de resistividade os ensaios geofísicos foram realizados, tanto em 1999 como em 2008, em dois períodos climáticos distintos: o primeiro na época da estiagem e o segundo logo após as chuvas.

Caracterização da área de Estudos

O aterro controlado de Rio Claro (SP) localiza-se ao sul do município, na altura do km 2, às margens da Rodovia Fausto Santomauro (SP 127), a qual liga o município a Piracicaba, na faixa de sentido Rio Claro-Piracicaba, e possui uma área de 44.242,16 m² (Tandel, 1998) (Figura 1).

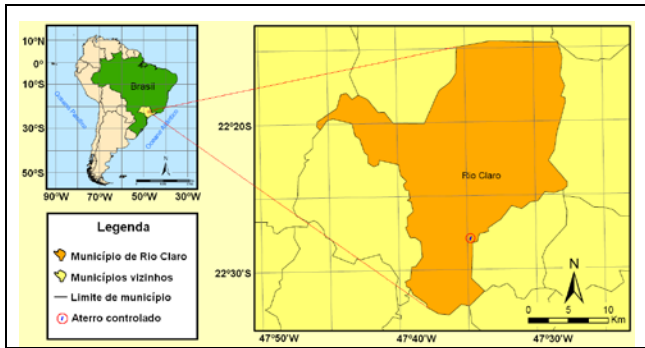


Figura 1: Mapa de localização do município de Rio Claro (SP) e do aterro controlado.

Em termos geológicos, a cidade de Rio Claro (SP) encontra-se no setor paulista do flanco nordeste da Bacia Sedimentar do Paraná, representada por rochas sedimentares e vulcânicas das eras Paleozóica, Mesozóica e Cenozóica. De acordo com Cottas (1983) e Zaine (1994), as unidades litoestratigráficas que afloram na região do aterro são:

- **Formação Corumbataí**, constituída por argilitos, siltitos e folhelhos, com intercalações de arenitos de granulometria fina, leitos carbonáticos e coquinas até o topo da formação. Sua espessura na região de Rio Claro (SP) não ultrapassa os 130m;

- **Formação Rio Claro**, assentada discordantemente sobre rochas da Formação Corumbataí. Apresenta fraca litificação e profunda alteração pedogenética, espesso solo arenoso (8 a 12m) e arenitos, variando de areia fina a grossa, intercaladas com camadas de conglomerados e de sedimentos argilosos. Possui espessura média entre 25 e 30m e máxima de 40m.

A base do aterro encontra-se na Formação Rio Claro e a cava de resíduos apresenta forma de vale.

Princípios físicos

A resistividade elétrica (ρ) é um parâmetro intrínseco dos materiais, que se relaciona à dificuldade encontrada por uma corrente elétrica para se propagar em um meio, e depende, entre outras coisas, da natureza e do estado físico do corpo considerado.

Em linhas gerais, a resistividade elétrica em um meio geológico pode ser calculada através da Equação (1):

$$\rho = \frac{\Delta V}{I} K \quad (1)$$

onde I é a corrente elétrica injetada no solo através dos eletrodos de corrente **A** e **B**, ΔV representa o potencial medido entre os eletrodos **M** e **N** e K é um fator geométrico dependente da distância entre os eletrodos.

Entretanto, a Equação (1) é válida para um meio geológico homogêneo e isotrópico, que na prática dificilmente se verifica. Desse modo, ao se efetuar a

medida da resistividade elétrica em um meio geológico comum o valor obtido será uma resistividade fictícia ρ_a , dependente da resistividade de cada camada geológica atravessada, denominada de **resistividade aparente**. Essa grandeza, cuja unidade de medida também é o $ohm.m (\Omega.m)$ é tomada como base para a interpretação (Orellana, 1972).

Arranjo Dipolo-Dipolo

Assim como nos ensaios realizados por Moura (2002), optou-se por aplicar o Método da Eletroresistividade utilizando a técnica do Imageamento Elétrico (IE) com arranjo Dipolo-Dipolo (Figura 2), no intuito de reproduzir as mesmas condições da primeira pesquisa.

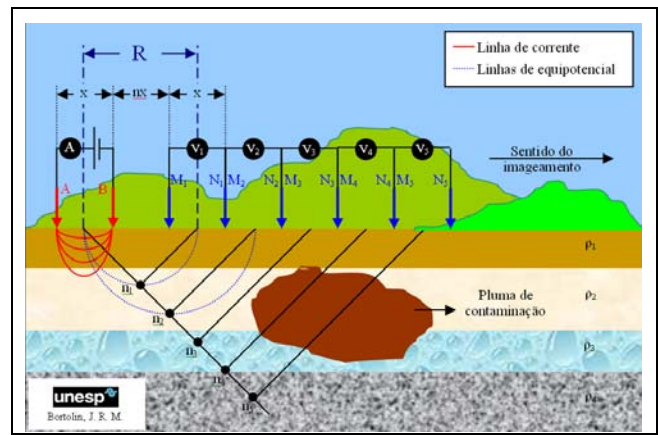


Figura 2: Técnica do Imageamento Elétrico com arranjo Dipolo-Dipolo.

Nesse arranjo, os eletrodos de corrente **A** e **B**, e os eletrodos de potencial **M** e **N** são dispostos sobre um mesmo perfil no campo e o espaçamento entre os eletrodos obedece à relação $x=AB=MN$.

A profundidade teórica de investigação (Z) aumenta conforme a distância de separação dos eletrodos de potencial e de corrente (R), e é dada por $Z=R/2$.

Os pontos de investigação são atribuídos ao encontro dos segmentos de reta, partindo do centro geométrico de **AB** e **MN**, com inclinação de 45° em relação à superfície.

O fator geométrico (K) para o arranjo Dipolo-Dipolo é dado pela expressão:

$$K_{DD} = 2\pi x \frac{1}{\left(\frac{1}{n} - \frac{2}{n+1} + \frac{1}{n+2}\right)} \quad (2)$$

Na expressão (2), o coeficiente n representa o nível de investigação e pode assumir somente valores inteiros, isto é, $n=1,2,3,\dots$

Resultados

A Figura 3 exibe um croqui da área de estudos com a localização das linhas de Imageamento Elétrico executadas no local.

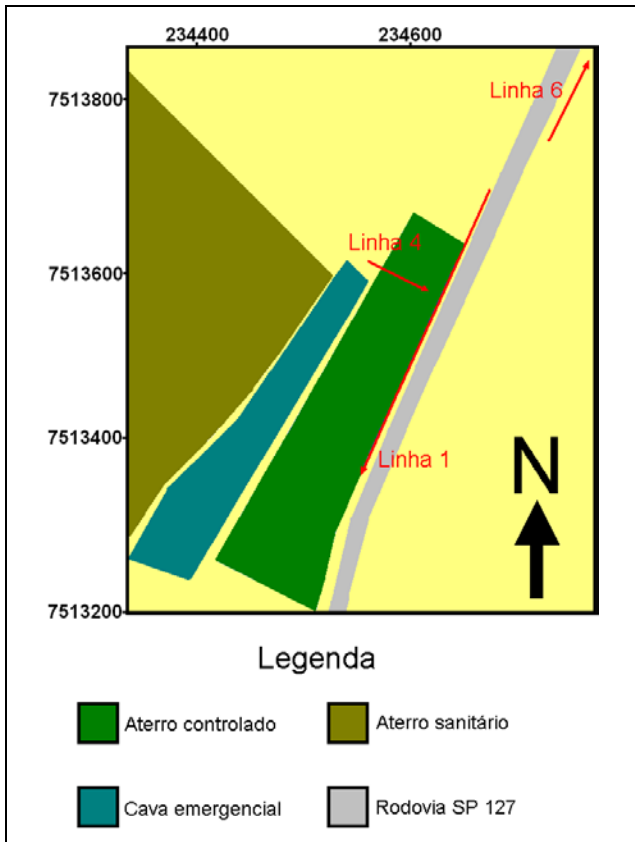


Figura 3: Ensaios geofísicos executados no aterro controlado.

Foram executadas duas linhas de Imageamento Elétrico, denominadas Linha 1 e Linha 4 (e suas respectivas repetições em períodos climáticos distintos, Linha 1-2 e Linha 4-2), ambas utilizando o arranjo Dipolo-Dipolo com 5 níveis de investigação (Figura 2). A Linha 1 possui 320m de extensão e espaçamento de dipolo de 10m; a Linha 4 possui 90m de extensão e espaçamento de dipolo de 5m.

Uma terceira linha foi executada em local a montante do aterro, de modo a fornecer valores de referência de ambiente sem contaminação pelo percolado. Esse ensaio, denominado Linha 6, possui 100m de extensão, espaçamento de dipolo de 10m e 5 níveis de investigação.

A aquisição dos dados no ano de 1999 foi feita utilizando-se um resistivímetro SCINTREX IPR-12 e, em 2008, com um resistivímetro ABEM TERRAMETER SAS 4000 e um resistivímetro BISON 2390.

Os dados de eletrorresistividade obtidos em 1999 e 2008 foram processados com o software Res2Dinv v.3.4, da Geotomo Software (2002), e as seções de resistividade

aparente foram comparadas qualitativa e quantitativamente entre si.

Linha de referência – Linha 6

Com base na seção da Linha 6 – linha de referência – (Figura 4) observou-se que a faixa de variação dos valores de resistividade aparente em ambiente próximo ao aterro controlado (sedimentos predominantemente arenosos), porém isento de contaminação por chorume, ocorre entre $140\Omega.m$ e $30000\Omega.m$. Assim, definiu-se que valores menores ou iguais a $300\Omega.m$ indicam provável contaminação.

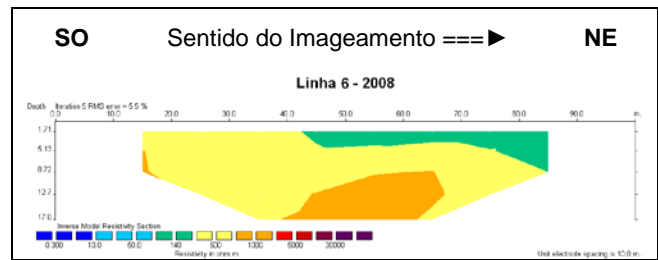


Figura 4: Seção de resistividade aparente da Linha 6 (linha de referência).

Monitoramento Temporal – Linha 1

As zonas de baixa resistividade aparente ($50\Omega.m$) encontradas, principalmente, em profundidades superiores a 12m na seção da Linha 1 de 1999 (Figura 5, acima), foram interpretadas por Moura (2002) como sedimentos arenosos da Formação Rio Claro contaminados pelo percolado.

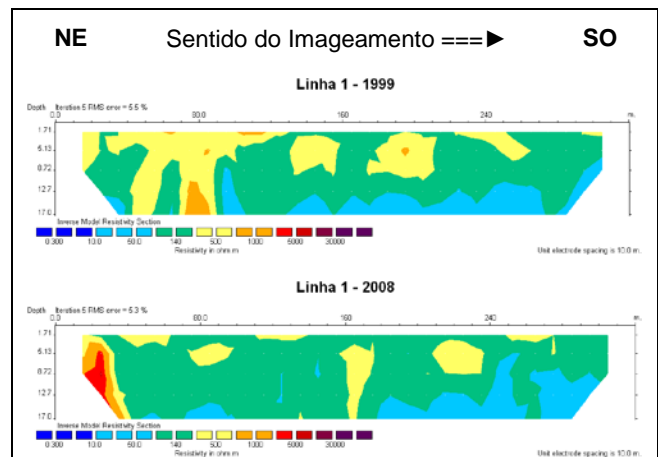


Figura 5: Acima: seção da Linha 1 executada em 1999 no período de estiagem; abaixo: seção da Linha 1 executada em 2008 no período de estiagem.

Também na seção da Linha 1 de 2008 (Figura 5, abaixo) verificam-se tais zonas de baixa resistividade, porém

concentradas a partir da estaca de 180m e em profundidades menores (cerca de 5m).

Essas diferenças verificadas na localização das zonas de baixa resistividade podem sugerir o transporte do percolado pelo lençol freático para a direção **SO**, já que o fluxo subterrâneo local verificado por Tandel (1998) e Moura (2002) é para sudoeste, assim como a orientação dessa linha.

No extremo esquerdo da seção da Linha 1 de 2008 verifica-se um incremento nos valores de resistividade aparente, atingindo valores típicos de sedimentos arenosos da Formação Rio Claro (Braga, 1997), o qual pode indicar uma tendência de recuperação natural da área antes contaminada.

Monitoramento Temporal – Linha 4

Nas duas seções da Linha 4 (Figura 6) é possível distinguir um dos limites laterais da cava de resíduos, caracterizado por valores de resistividade aparente maiores ou iguais a 140Ω.m.

A diferença de valores entre as duas seções verificada nessa região pode refletir a situação do aterro que, em 1999, encontrava-se em fase final de operação: a produção de chorume acentuada e a conseqüente diminuição da resistividade elétrica na lateral da cava pela infiltração do percolado. No ano de 2008, com o aterro desativado há, pelo menos, 7 anos, verificam-se valores significativamente maiores, os quais podem ser associados com uma queda da geração e conseqüente diminuição da infiltração do percolado na lateral da cava de resíduos, ocasionando a elevação dos valores de resistividade elétrica locais.

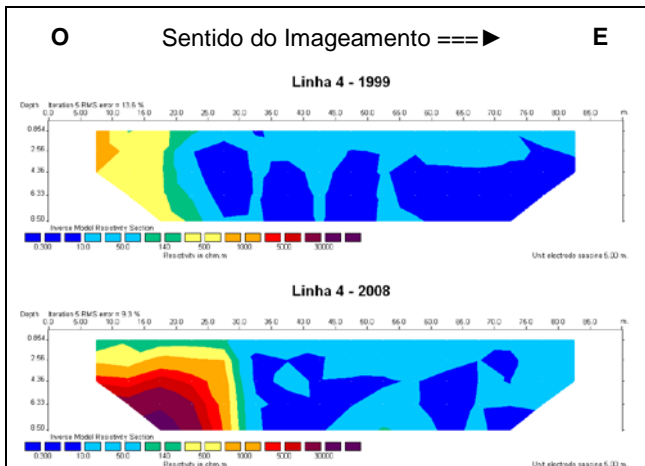


Figura 6: Acima: seção da Linha 4 executada em 1999 no período de estiagem; abaixo: seção da Linha 4 executada em 2008 no período de estiagem.

Na região compreendida pelos resíduos ($\rho_a \leq 50 \Omega.m$), existe um ligeiro aumento nos valores de resistividade da seção de 2008 em relação à seção de 1999. Esse

incremento também pode estar associado à diminuição da produção de chorume pelos resíduos aí presentes.

Variações Sazonais – Linha 1

Nas seções referentes ao ano de 1999, é notável a queda dos valores de resistividade no período de chuvas (Figura 7, acima) em relação ao período de estiagem (Figura 7, abaixo). Essas diferenças são mais perceptíveis na região entre as estacas 0m e 130m, onde os valores atingiam o máximo de 1000Ω.m no período de estiagem e, no período das chuvas, não ultrapassam os 500Ω.m, apresentando média próxima a 140Ω.m.

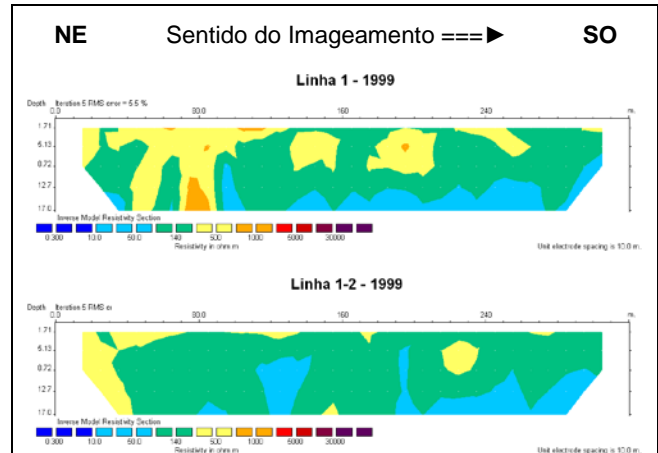


Figura 7: Acima: seção da Linha 1 executada em 1999 no período de estiagem; abaixo: seção da repetição da Linha 1 executada em 1999 no período de chuvas.

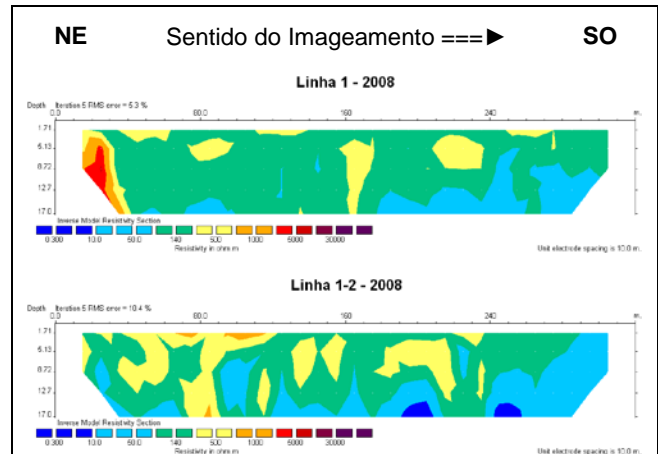


Figura 8: Acima: seção da Linha 1 executada em 2008 no período de estiagem; abaixo: seção da repetição da Linha 1 executada em 2008 no período de chuvas.

Também nas seções do ano de 2008 percebem-se diferenças nos valores de resistividade obtidos em períodos climáticos distintos. Enquanto que no período de estiagem (Figura 8, acima) os valores de resistividade aparente atingem o máximo de 5000Ω.m e mínimo de

50 Ω .m, no período de chuvas (Figura 8, abaixo) os extremos são de 100 Ω .m e 0,3 Ω .m, respectivamente, o que representa uma queda de 80% do valor máximo e 99,4% do valor mínimo.

Variações Sazonais – Linha 4

De um modo geral, nas seções da Linha 4 do ano de 1999 (Figura 9), não houve variação significativa dos valores de resistividade aparente, mantendo-se o máximo em 100 Ω .m e mínimo em 0,3 Ω .m. Na região que corresponde à lateral da cava de resíduos, nota-se ligeira variação na distribuição das resistividades aparentes, enquanto que na porção da seção correspondente aos resíduos, a variação na distribuição das resistividades aparentes é mais marcante.

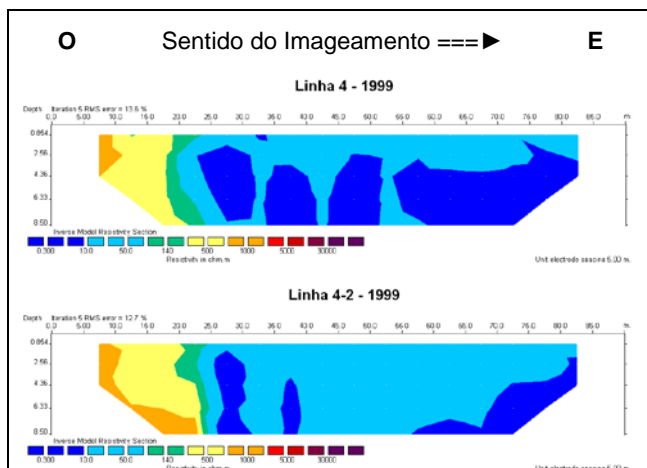


Figura 9: Acima: seção da Linha 4 executada em 1999 no período de estiagem; abaixo: seção da repetição da Linha 4 executada em 1999 no período de chuvas.

Nas seções da Linha 4 de 2008 (Figura 10), assim como verificado no ano de 1999, os valores máximos e mínimos de resistividade aparente não sofreram alterações expressivas, mantendo-se aproximadamente constantes, na faixa entre 0,3 Ω .m e 30000 Ω .m.

As condições climáticas distintas nos períodos em que os dados foram coletados refletem-se, novamente, como alterações na distribuição das resistividades aparentes nas seções.

No período de estiagem, na região que corresponde à lateral da cava, a resistividade aparente cresce com o aumento da profundidade, apresentando isolinhas bem definidas. No período de chuvas, o aumento da resistividade aparente em profundidades maiores é significativamente reduzido.

Na região correspondente aos resíduos, as variações na distribuição das resistividades aparentes são mais perceptíveis, ocorrendo, inclusive, uma zona de 50m na região que corresponde à lateral da cava, e que pode tratar-se de infiltração do percolado ocasionada pelo aumento do teor de água em subsuperfície.

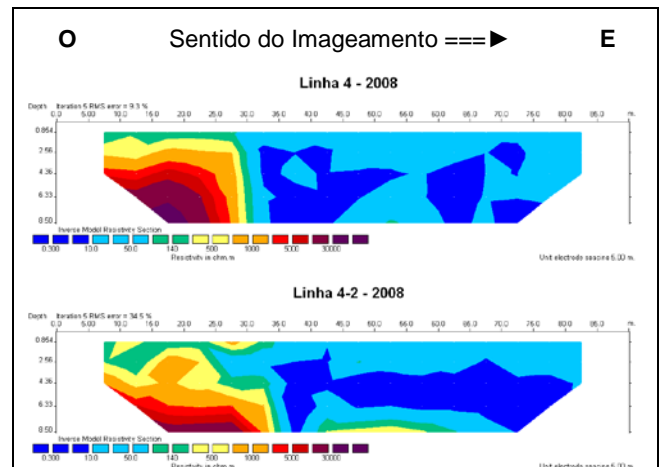


Figura 10: Acima: seção da Linha 4 executada em 2008 no período de estiagem; abaixo: seção da repetição da Linha 4 executada em 2008 no período de chuvas.

Conclusões

Através da comparação das seções obtidas nos diferentes anos pode-se notar que existem alterações dos valores de resistividade aparente ocorridas no intervalo entre a realização das duas séries de ensaios geofísicos.

A elevação dos valores de resistividade aparente pode representar um reflexo da diminuição da produção de chorume pelos resíduos presentes no local. Isso quer dizer que a resistividade aparente de um local contaminado por chorume é inversamente proporcional ao volume de chorume presente no local.

As alterações dos valores de resistividade aparente podem indicar, ainda que discretamente, a existência de uma tendência de recuperação natural do ambiente, retornando aos valores de ambiente sem contaminação.

Assim como relatado por Tandel (1998), também verificou-se variações significativas nos valores de resistividade aparente em função da umidade presente no solo, determinada por períodos de chuvas e estiagem.

Agradecimentos

Ao CNPq, Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico, financiador desta pesquisa, e ao técnico Francisco Manuel Garcia Barrera e todos os amigos que colaboraram nos trabalhos de campo: José, Luís, Demétrio, César, Fabrício, Sueli e Daniel.

Referências

BRAGA, A. C. O. **Métodos geoeletricos aplicados na caracterização geológica e geotécnica – Formações Rio Claro e Corumbataí, no município de Rio Claro – SP.** 169f. Tese (Doutorado em Geociências e Meio

Ambiente) – Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista. 1997.

COTTAS, L. R. **Estudos Geológico-Geotécnicos aplicados ao planejamento urbano de Rio Claro-SP.** 1983. 171f. Tese (Doutorado em Geologia) – Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo. 1983.

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, 2000. **Pesquisa Nacional de Saneamento Básico – 2000.** Disponível em: <<http://www.ibge.gov.br/home/estatistica/populacao/condicaoodevida/pnsb/pnsb.pdf>>. Acesso em: 27 nov. 2008.

MOURA, H. P. **Emprego da eletrorresistividade e da polarização induzida na caracterização geolétrica de áreas de disposição de resíduos sólidos urbanos.** 2002. 231f. Tese (Doutorado em Geociências) – Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista, São Paulo, 2002.

MOURA, H. P.; MALAGUTTI FILHO, W. Métodos de eletrorresistividade e de polarização induzida aplicados na área de disposição de resíduos urbanos: Aterro Controlado de Rio Claro-SP. **Revista Geociências**, São Paulo, v. 22, n. Especial, p. 129-139, 2003.

ORELLANA, E.. **Prospeccion Geoelectrica en Corriente Continua.** Madrid, España: Paraninfo, 1972. 523p.

TANDEL, Y. R. **Contribuição ao estudo da poluição provocada no aquífero freático e no solo pelo aterro controlado da cidade de Rio Claro, SP.** 1998. 144f. Tese (Doutorado em Geologia) – Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo. 1998.

ZAINE, J. E. **Geologia da Formação Rio Claro na folha Rio Claro (SP).** 1994. 90 f. Dissertação (Mestrado em Geociências) – Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista, Rio Claro, 1994.