

# VARIAÇÃO TEMPORAL DA RESISTIVIDADE ELÉTRICA EM CONTAMINAÇÃO POR GASOLINA

Antonio Celso de Oliveira BRAGA <sup>1</sup>, César Augusto MOREIRA <sup>2</sup>,  
Maira Tozzi CARDINALI <sup>3</sup>

- (1) Departamento de Geologia Aplicada, Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista, UNESP/Campus Rio Claro. Avenida 24-A, 1515 – Bela Vista. CEP 13506-900. Rio Claro, SP.  
Endereço eletrônico: acobraga@rc.unesp.br
- (2) Universidade Federal do Pampa, Campus de Caçapava do Sul. Avenida Pedro Anunciação, s/n. CEP 96570-000. Caçapava do Sul, RS. Endereço eletrônico: cesargeologia@yahoo.com.br
- (3) Pós-Graduação em Geociências em Meio, Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista, UNESP/Campus Rio Claro. Avenida 24-A, 1515 – Bela Vista. CEP 13506-900. Rio Claro, SP.  
Endereço eletrônico: cesargeologia@yahoo.com.br

Introdução  
Caracterização Geoeletrica de Hidrocarbonetos no Ambiente Geológico  
Método  
Apresentação e Discussão dos Resultados  
Conclusões  
Referências Bibliográficas

**RESUMO** – A definição de modelos e parâmetros de base para aplicação de ferramentas de investigação de ambientes com elevada complexidade é uma premissa básica a quaisquer ciências. A Geofísica é uma ciência com sólida base teórica e aplicações em áreas diversificadas das ciências geológicas, astronômicas, meteorológicas, dentre muitas outras. Sua aplicação em estudos ambientais é algo relativamente recente e que necessita de pesquisas aprofundadas. Compreender o comportamento de contaminantes residentes num ambiente dinâmico e complexo como o geológico, requer estudos em escala laboratorial, sob controle de fatores sazonalmente variáveis. Este trabalho simula um vazamento de gasolina em solo, sob condições e em escala de laboratório, com o objetivo de monitorar o comportamento temporal do hidrocarboneto sob a ótica de variação do parâmetro físico resistividade elétrica. Os resultados indicam aumento da resistividade em períodos recentes a contaminação, seguido por estabilidade nos valores e finalmente, queda e tendência de retorno às condições naturais.

**Palavras-chave:** hidrocarboneto, gasolina, resistividade, atenuação natural, monitoramento.

**ABSTRACT** – *A.C. de O. Braga, C.A. Moreira, M.T. Cardinali - Temporal variation of electrical resistivity in contamination for gasoline.* The definition of models and base parameters for application of investigation tools in environment with high complexity are a basic premise to any sciences. The geophysics is a science with solid theoretical base and applications in diversified areas of the sciences geological, astronomical, meteorological, among many others. Its application in environmental studies is relatively recent and needs further research. To understand the behavior of resident contaminants in a dynamic and complex environment as the geological, it requests studies in scale laboratorial, under control of factors seasonality variable. This work simulates a leak of gasoline in soil, under conditions and in laboratory scale, with the objective of monitoring the temporary behavior of the hydrocarbon under the optics of variation of the parameter physical electric resistivity. The results indicate increase of the resistivity in recent periods the contamination, followed for stability in the values and finally fall and return tendency to the natural conditions.

**Keywords:** hydrocarbon, gasoline, resistivity, natural attenuation, monitoring.

## INTRODUÇÃO

O crescente consumo dos derivados de petróleo e a conseqüente necessidade de aumento da estocagem e distribuição desses produtos geram um aumento relevante nos casos de vazamentos de oleodutos, caminhões tanques, tanques subterrâneos, dentre outros. Diante desta constatação, é imprescindível o conhecimento das interações entre os derivados de petróleo e o meio físico em subsuperfície.

São aplicadas atualmente diferentes técnicas de investigação visando detectar e quantificar contaminações e solo e rochas, como: sondagem direta para

leitura gases voláteis (VOC), análises químicas de hidrocarbonetos totais de petróleo (TPH) em solo e/ou água subterrânea, elaboração de malhas de sondagem para obtenção de dados sobre compostos voláteis, além da crescente aplicação de métodos geofísicos.

A utilização de métodos geofísicos constitui uma importante ferramenta de apoio aos estudos ambientais, representando um significativo avanço científico. Esses métodos são utilizados principalmente nas fases de prevenção, para caracterização geológica e identificação de áreas vulneráveis – elevada permeabilidade;

avaliação preliminar e diagnóstica, caracterização de áreas contaminadas; monitoramento, avaliação temporal dos contaminantes para controle de fluxo, redução dos teores e possíveis alterações físico-químicas resultantes da dispersão, diluição e degradação dos compostos.

A residência de determinados tipos contaminantes como compostos inorgânicos provenientes de aterros de resíduos sólidos (chorume) ou compostos orgânicos derivados de petróleo (gasolina), alteram significativamente os valores naturais dos principais parâmetros físicos dos materiais geológicos. Alguns destes parâmetros são passíveis de medição pelo instrumental

geofísico e, conseqüentes alterações pela presença de compostos contaminantes, permitem a caracterização de áreas anômala.

Este trabalho visa avaliar a variação temporal do parâmetro físico resistividade elétrica num experimento em escala de laboratório, constituído por tanque com solo areno-argiloso contaminado por gasolina. O estudo do comportamento deste derivado de petróleo em escala laboratorial visa produzir subsídios técnicos para melhor compreensão de resultados de caracterização geoeletrica em estudos casos reais de áreas contaminadas por gasolina, que muitas vezes apresentam resultados conflitantes.

## CARACTERIZAÇÃO GEOELÉTRICA DE HIDROCARBONETOS NO AMBIENTE GEOLÓGICO

A grande maioria dos autores correlaciona a redução nos valores de resistividade em meios contaminados por hidrocarbonetos à atividade de biodegradação da matéria orgânica por organismos vivos, como bactérias aeróbicas e anaeróbicas (Sauck et al., 2000; Atekwana et al., 2000; Werkema et al., 2003; Atekwana et al., 2004; Vega et al., 2003)

Segundo Atekwana et al. (2000), locais onde ocorre uma significativa alteração química do hidrocarboneto, com transição da assinatura geoeletrica de resistiva para condutiva, e afirmam ser possível que a biodegradação do contaminante influencie na alteração do parâmetro físico.

A partir da aplicação do método de Eletroresistividade para análise da atividade de biodegradação em local contaminado por hidrocarbonetos, Werkema et al. (2003) destacam a presença de grandes quantidades de bactérias degradadoras de óleo diesel em áreas com baixos valores de resistividade elétrica. Os autores sugerem que a magnitude do parâmetro físico representa uma medida indireta da atividade biológica.

A aplicação combinada da técnica de Caminhamento Elétrico e Sondagem Elétrica Vertical em Lima et al. (1995), descreve intervalos de baixa resistividade com áreas de concentração de contaminantes provenientes de um aterro de resíduos líquidos derivados de petróleo.

Por meio da análise de seções de Radar de Penetração no Solo (GPR) adquiridas em 1998 e 2003, Moreira & Dourado (2007) relacionam a impedância à penetração da onda eletromagnética com o aumento da condutividade elétrica na zona não saturada do solo de uma área contaminada por derivados de petróleo. Este aumento de condutividade é atribuído a liberação de íons no ambiente por ação de ácidos orgânicos provenientes da degradação de hidrocarbonetos.

A caracterização geoeletrica de áreas contaminadas por derivados de petróleo sugere anomalias tanto de elevada resistividade como de baixa resistividade. Esta aparente incongruência pode ser esclarecida por meio da correlação do tempo de residência dos contaminantes no solo e tempo de exposição a processos de degradação (Moreira et al., 2006). Alguns trabalhos sugerem que a biodegradação de compostos de fase líquida leve não aquosa (LNAPL), pode mudar as propriedades geoquímicas do aquífero de forma acentuada, podendo resultar em alterações significativas nos valores de resistividade elétrica e na propagação de ondas eletromagnéticas (Sauck, 2000; Atekwana et al., 2000). Estudos em escala de laboratório sugerem que a biodegradação de LNAPL sob condições aeróbicas e anaeróbicas podem mudar de forma substancial as condições biogeoquímicas do aquífero impactado, resultando em reduções drásticas de resistividade elétrica (Cassidy, et al., 2001).

Atenuação Natural compreende um trabalho de remediação que inclui uma variedade de processos físicos, químicos e biológicos que, dentro de condições favoráveis, permite a redução de massa, toxicidade, mobilidade, volume ou concentrações de contaminantes no solo ou água subterrânea sem intervenção humana (EPA, 2004). Este processo é importante para a degradação de derivados de petróleo por organismos encontrados em quase todos os ambientes.

Vários compostos LNAPL como benzeno, tolueno, etilbenzeno e xileno, constituintes da gasolina, podem ser biodegradados sob condições ambientais (EPA, 1998). Contudo, este processo natural pode ser limitado pela falta de nutrientes, receptores de elétrons ou ambos (Thomas & Ward, 1989). Em muitos locais o processo de biodegradação é limitado a zonas

periféricas da pluma contaminante, pois a presença dos compostos em elevadas concentrações torna o ambi-

ente hostil a proliferação de microorganismos (Wilson & Jones, 1993; Rabus & Heider, 1998) (Figura 1).

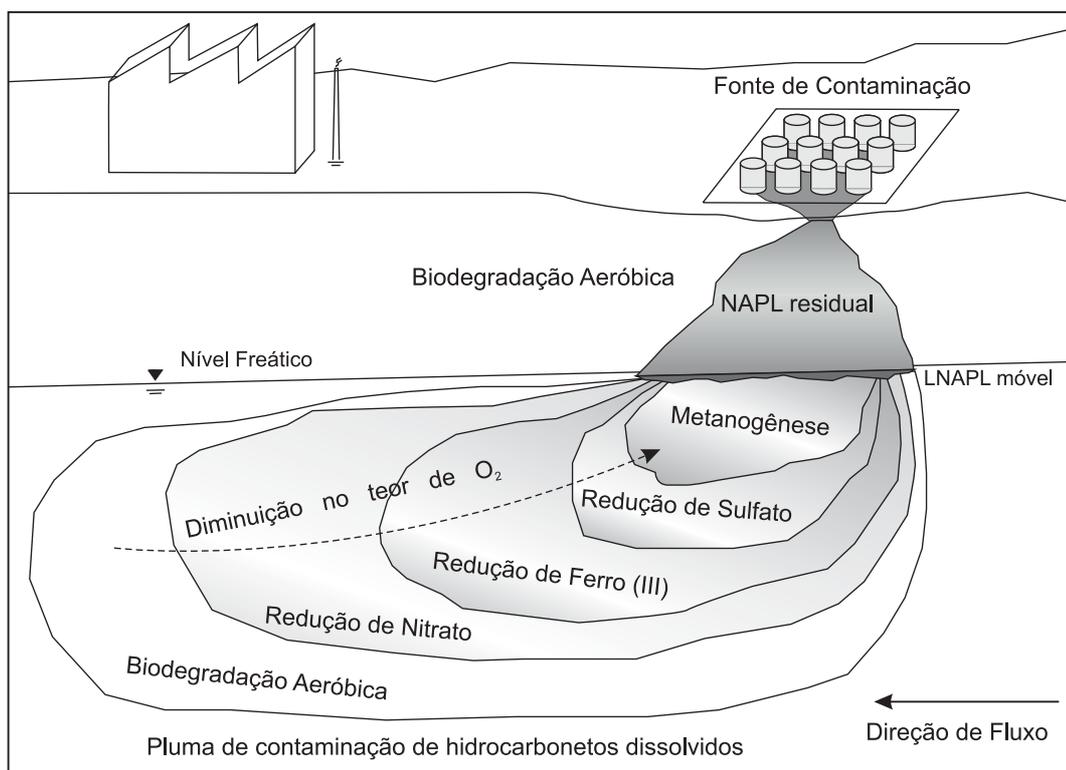


FIGURA 1. Zonas de degradação de hidrocarbonetos (adaptado de Rabus & Heider, 1998).

## MÉTODO

Com o objetivo de avaliar o comportamento do parâmetro físico resistividade elétrica no solo após um vazamento de gasolina, foi elaborado um experimento em laboratório de modo a reproduzir o ambiente geológico.

Este experimento consistiu na adição de solo areno-argiloso extraído da Formação Rio Claro, num tanque de vidro com 100 cm de comprimento, 40 cm

de largura e 25 cm de altura (Figura 2). O solo foi analisado previamente por meio de peneiramento e análise granulométrica conjunta, que permitiu classificá-lo como arenoso de granulação fina a média com matriz siltosa.

No trabalho de Braga & Cardinali (2005), são testados diversos tanques e espaçamentos para a técnica de caminhamento elétrico em escala reduzida.

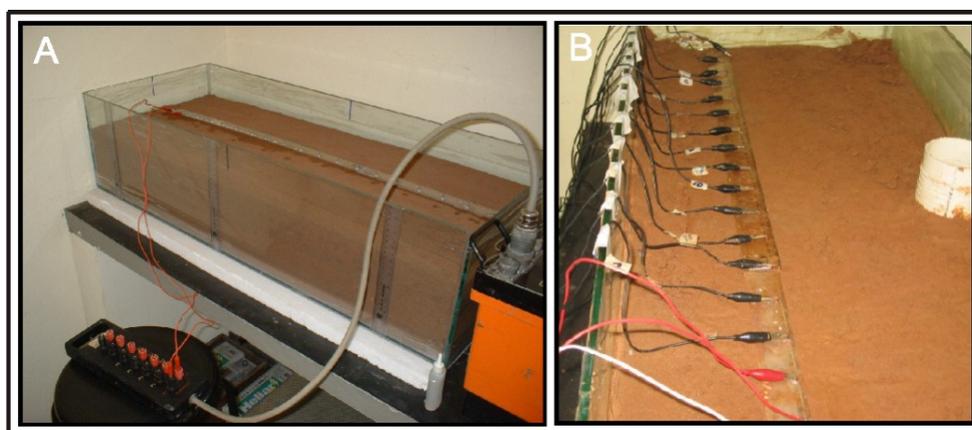


FIGURA 2. (A) Vista do tanque utilizado no experimento; (B) Arranjo de eletrodos e poço de injeção de gasolina.

A proposta elaborada pelos autores supracitados é utilizada no presente trabalho, que consiste na aplicação da técnica de caminhamento elétrico em arranjo dipolo-dipolo para 8 níveis de investigação em profundidade. Foram dispostos 17 eletrodos em linha e fixados numa régua a cada 5 cm, num total de 90 cm de comprimento (Figura 2). Os eletrodos foram confeccionados em cobre e apresentam 2 cm de comprimento com 0,2 cm de espessura.

A injeção de gasolina foi realizada por meio de um poço instalado no tanque, com ranhuras em toda sua extensão e locado na lateral da linha de aquisição (Figura 2). Foi adicionado água destilada ao tanque, até o estabelecimento de uma coluna d'água com 15

cm de altura, para simulação de nível freático.

Posteriormente, foram adicionados 2 litros de gasolina, adquire em posto de combustível, com o mesmo teor de álcool adicionado para consumo em veículos automotores.

Os dados foram processados no programa RES2DINV (Loke & Barker, 1996), onde foram geradas pseudo-seções e modelos de inversão em seções com distância e profundidade. Este trabalho apresenta apenas as pseudo-seções em escala linear de resistividade, com apresentação da profundidade teórica ou máxima de investigação, dado a fidelidade em representar o comportamento do contaminante no ambiente estudado.

## APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Estabelecidos os requisitos previamente descritos, foi realizada uma linha de caminhamento elétrico para definição das condições naturais do material, ou seja, anteriores a contaminação. Esta linha, denominada CE-01, apresenta três horizontes principais paralelos e estratificados, que descrevem a zona não saturada (Alta resistividade, entre  $90\Omega\text{m}$  e  $200\Omega\text{m}$ ), franja capilar (resistividade intermediária, entre  $40\Omega\text{m}$  e  $90\Omega\text{m}$ ) e zona saturada (baixa resistividade, entre  $3\Omega\text{m}$  e  $40\Omega\text{m}$ ) (Figura 3). O nível freático é definido no contato entre a franja capilar e a zona saturada.

Após a injeção de gasolina, foram realizadas leituras sucessivas de resistividade após 30m, 48h, 168h, 264h, 408h, 672h, 792h, 1512h, 1824h e 2328h (Figura 4).

A projeção lateral do poço de injeção de gasolina é realçada por traço em vermelho, na posição 0,45 m nas pseudo-seções realizadas após a contaminação.

Seguido à injeção de gasolina, foram realizadas leituras sucessivas de resistividade após 30m, 48h, 168h,

264h, 408h, 672h, 792h, 1512h, 1824h e 2328h, também apresentados sob a forma de pseudo-seções (Figura 4).

A projeção lateral do poço de injeção de gasolina é realçada por traço em vermelho, na posição 45m nas pseudo-seções realizadas após a contaminação.

A pseudo-seção realizada 30 minutos após a injeção de gasolina indica aumentos pontuais de resistividade na zona saturada e na zona não saturada, com aparente perturbação dos horizontes anteriormente planos, com valores máximos de  $350\Omega\text{m}$  e  $122\Omega\text{m}$ , respectivamente (Figura 4).

Após 48 horas é notável o aumento da resistividade em todos os horizontes, com extremos de  $488\Omega\text{m}$  para a zona não saturada,  $135\Omega\text{m}$  para a franja capilar e  $150\Omega\text{m}$  para a zona saturada.

A seção realizada após 168 horas apresenta redução nos valores resistividade em todos os horizontes, com extremos de  $285\Omega\text{m}$  para a zona não saturada,  $166\Omega\text{m}$  para a franja capilar e  $66\Omega\text{m}$  para a zona saturada (Figura 5).

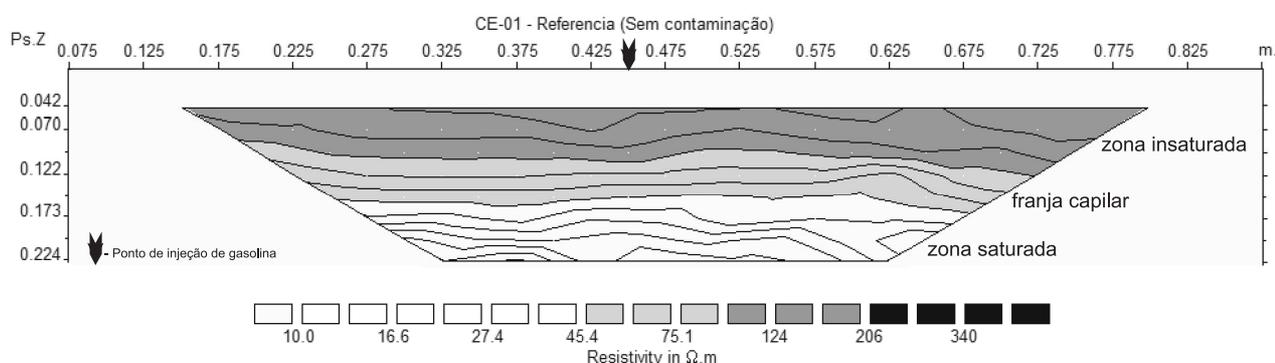


FIGURA 3. Linha CE-01, com níveis de saturação do experimento.

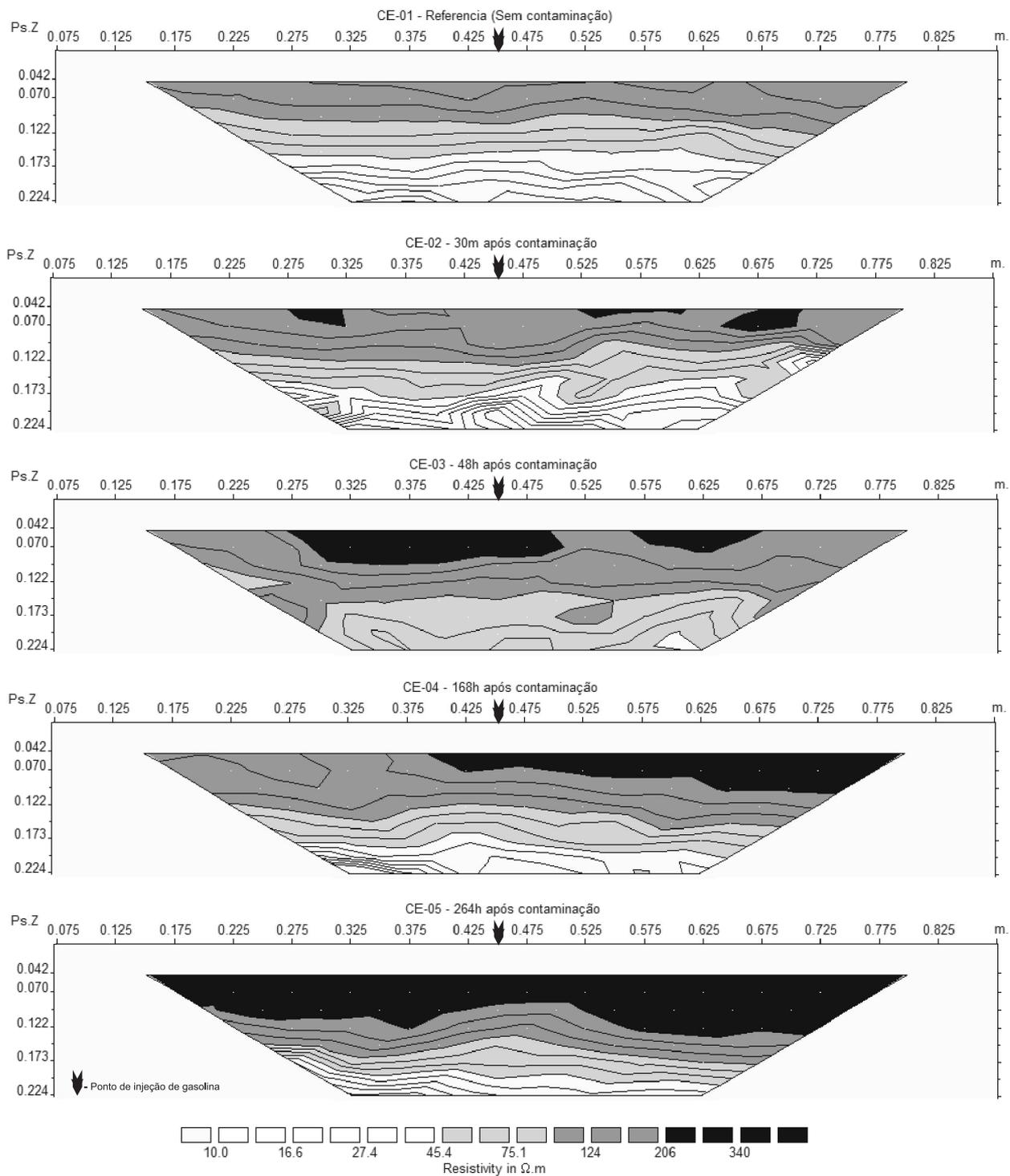
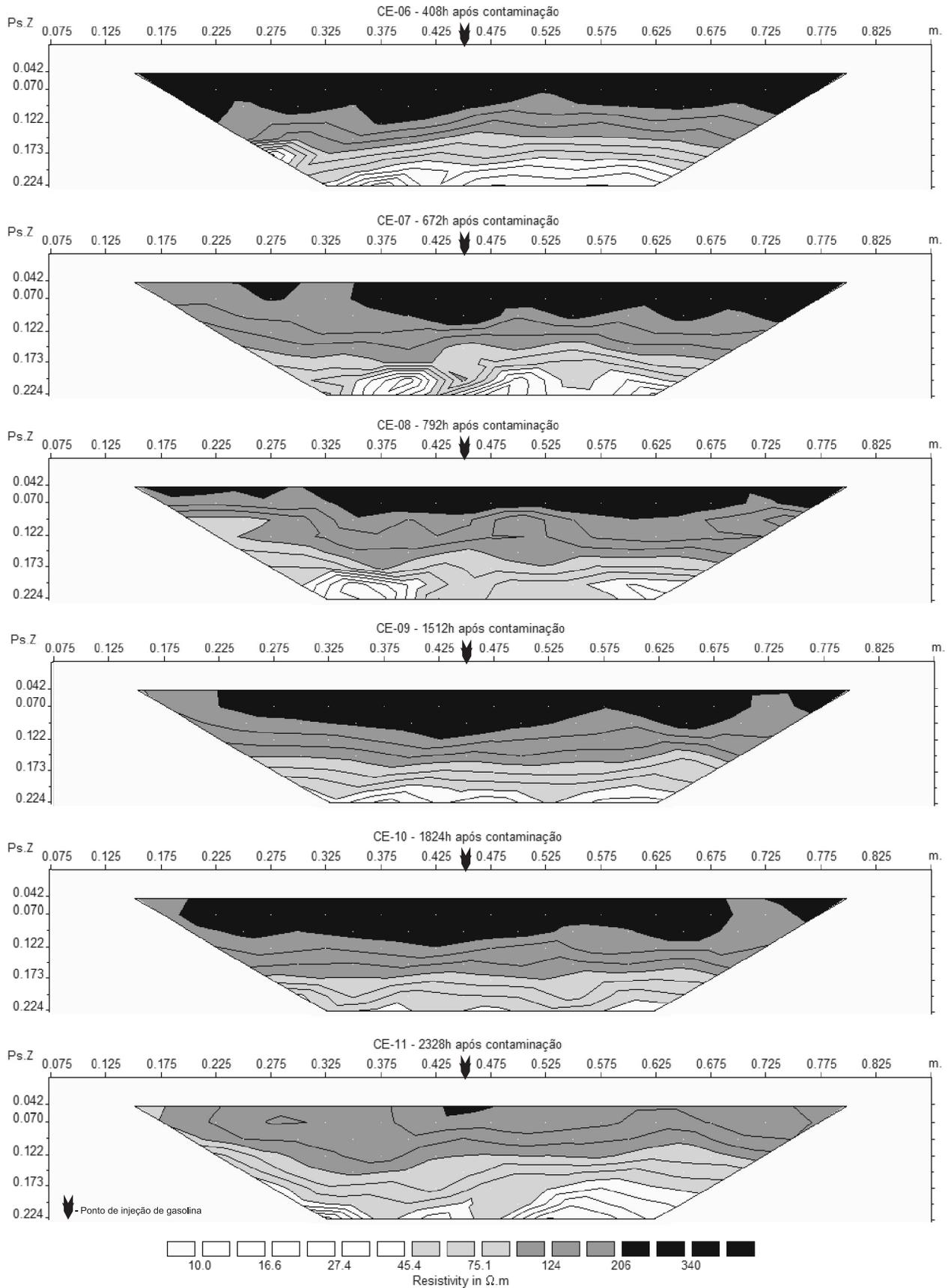


FIGURA 4. Pseudo-seções de resistividade aparente para o período entre 0 h e 408 h após a contaminação.



**FIGURA 5.** Pseudo-seções de resistividade aparente para o período entre 408 h e 2328 h após a contaminação.

As seções realizadas após 264h e 408h apresentaram características semelhantes, com tendência de redefinição dos horizontes de saturação, valores médios bastantes elevados para a zona não saturada, e valores relativamente elevados para os demais horizontes.

Esta tendência também é apresentada nas seções realizadas após 672h, 792h, 1512h e 1824h. Nestes casos, ocorre uma pequena elevação nos valores médios de resistividade para a zona saturada.

Os valores obtidos após 2328h de contaminação indicam a tendência de retorno aos valores medidos no experimento sem contaminação, com resistividade relativamente mais elevada apenas para a zona não saturada.

Foi realizada uma análise estatística da resistividade aparente apresentada nos 2º, 4º, 6º e 8º níveis geoeletricos, para avaliação de variações ao longo do período de ensaios, por meio da média dos valores de cada nível geoeletrico em cada período de medição (Quadro 1).

É possível identificar aumento de resistividade em todos os níveis geoeletricos após a injeção de gasolina,

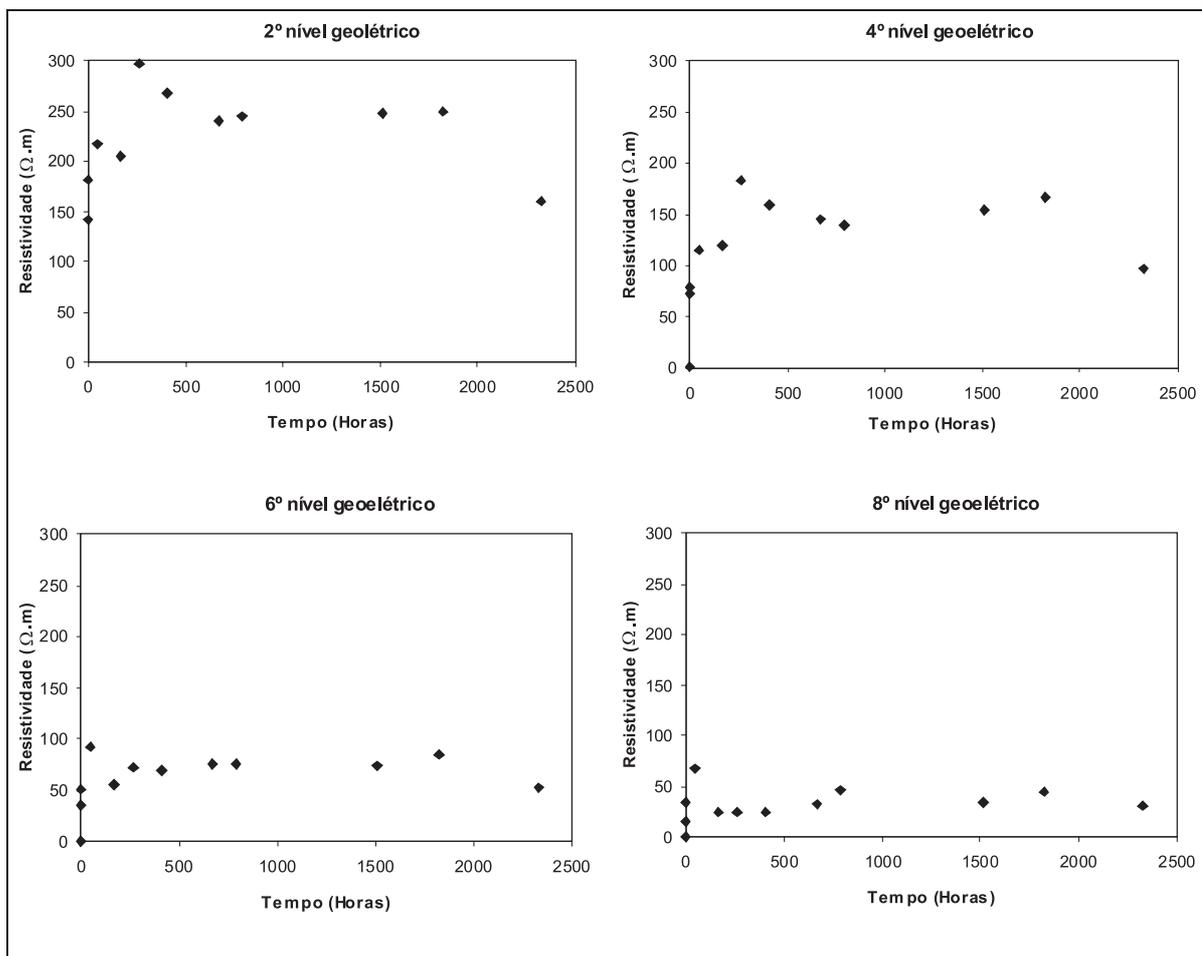
de forma mais acentuada para nos 2º e 4º níveis geoeletricos e em menor intensidade nos demais níveis (Quadro 1). Esta tendência pode ser associada tanto ao caráter resistivo do contaminante e seu elevado contraste quando presente na zona não saturada e franja capilar, quanto a sua concentração como fase flutuante no nível freático, e a baixa solubilidade em água.

Outra característica apresentada em todos os níveis geoeletricos é a tendência de redução da resistividade após 1824h. Os valores medidos após 2328h de contaminação são próximos aos valores do ambiente não contaminado em quase todos os casos.

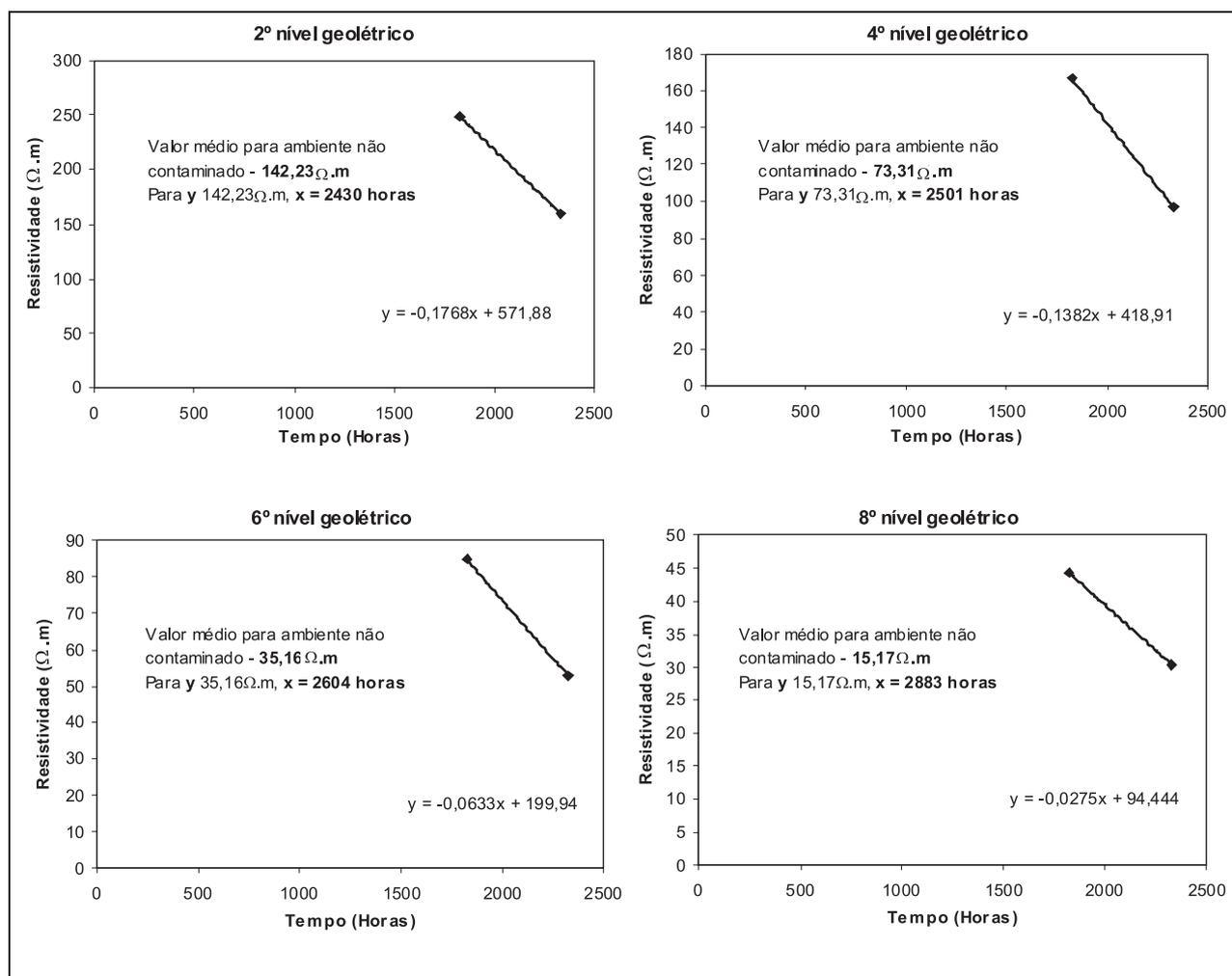
Para verificação desta tendência e estimativa do tempo necessário para retorno aos valores naturais de resistividade, foram estabelecidas linhas de tendência e respectivas equações de reta apenas para a média dos valores de 1824h e 2328h (Quadro 2).

Os resultados indicam serem necessárias 2430h, 2501h, 2604h e 2883h respectivos ao 2º, 4º, 6º e 8º níveis geoeletricos, para retorno aos valores naturais de resistividade.

**QUADRO 1.** Média dos valores de resistividade por nível geoeletrico, obtidos durante os diversos intervalos de tempo medidos.



**QUADRO 2.** Linhas de tendência, equações de reta e tempo previsto para retorno da resistividade aos valores naturais.



## CONCLUSÕES

A variação no parâmetro resistividade elétrica apresentada ao longo período de experimento pode estar relacionada ao grau de degradação da gasolina.

Ocorreu aumento de resistividade imediatamente após contaminação, resultando em valores máximos após 264h para a zona não saturada e após 48h para a franja capilar e zona saturada. Tais diferenças podem estar relacionadas a processos distintos de percolação do contaminante nos horizontes de saturação.

A expulsão de ar contido nos poros da zona não saturada e seu preenchimento por gasolina aparentemente necessitam de um tempo relativamente maior, quando comparado à percolação do produto na franja capilar e zona saturada, onde ocorrem processos de diluição e dispersão em meio aquoso.

Estes valores extremos são sucedidos por queda relativa na resistividade e estabilização. O período de estabilização nos valores foi de 1560h para a zona não saturada e de 1776h para a franja capilar e zona saturada.

A partir 1824h até o ultimo ensaio a 2328h, ocorre queda nos valores. Como não houve injeções posteriores de gasolina, é esperado que a ação de processos de degradação atuantes na gasolina resulte no retorno aos valores naturais de resistividade no meio.

As linhas de tendência obtidas a partir das duas últimas medidas, relativas ao 2°, 4°, 6° e 8° níveis geológicos indicam períodos distintos para retorno aos valores naturais de resistividade.

Os resultados indicam uma relação crescente entre tempo de estabilidade e grau de saturação do solo. Os processos de atenuação ou degradação natural de compostos orgânicos são controlados principalmente pelo teor de oxigênio disponível para a ação de microorganismos.

O oxigênio consumido durante os processos de degradação nos horizontes secos ou de baixa umidade é renovado com relativa rapidez, devido a trocas gasosas com a atmosfera. Por outro lado, o oxigênio

consumido a partir da água é repostado por absorção atmosférica de forma mais lenta, resultando em processo de degradação relativamente lento.

As variações de resistividade descrita ao longo do experimento podem indicar a percolação e dispersão/diluição de gasolina no solo, respectivamente aos períodos de aumento e posterior queda e estabilidade dos valores de resistividade. Os processos de degradação

possivelmente tiveram início efetivo a partir de 1824h, quando começa haver queda nos valores de resistividade.

O tempo necessário para degradação da gasolina e retorno aos valores naturais de resistividade do ambiente, provavelmente está condicionado ao teor de oxigênio disponível, ou seja, ao grau de saturação/aeração do solo.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. ATEKWANA, E.A.; SAUCK, W.A.; WERKEMA JR, D.D. Investigations of geoelectrical signature at a hydrocarbon contaminated site. **Journal of Applied Geophysics**, n. 44, p. 167-180, 2000.
2. ATEKWANA, E.A.; WERKEMA JR., D.D.; ALLEN, J.P.; SMART, L.A.; DURIS, J.W.; ATEKWANA, E.A.; CASSIDY, D.P.; SAUCK, W.A.; ROSSBACK, S. Evidence for Microbial Enhanced Electrical Conductivity in Hydrocarbon – Contaminated Sediments. **Geophysical Research Letters**, v. 31, p. 1-4, 2004.
3. BRAGA, A.C.O. & CARDINALI, M.T. Aplicação da Resistividade e Cargabilidade em estudos de contaminação de sedimentos por derivados de hidrocarbonetos. **Revista Brasileira de Geofísica**, v. 23, n. 2, p. 181-190, 2005.
4. CASSIDY, D.P.; WERKEMA JR., D.D.; SAUCK, W.; ATEKWANA, E.; ROOSBACH, S.; DURIS, J. The Effects of LNAPL Biodegradation Products on Electrical Conductivity Measurements. **Journal of Environmental and Engineering Geophysics**, v. 6, p. 47-52, 2001.
5. EPA - UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. **Technical Protocol for evaluating natural attenuation of chlorinated solvents in ground water**. Washington DC, epa/600/r-98/128, 1998.
6. EPA - UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. **Use of monitored natural attenuation at superfund, RCRA corrective action, and Underground Storage Tank sites**. Office of Solid Waste and Emergency Response, Directive 9200, p. 4-17, Chapter IX, Monitored Natural Attenuation, Final Version, 2004. Disponível em <http://www.epa.gov>. Acessado em jun2004.
7. LIMA, O.A.L.; SATO, H.K.; PORSANI, M.J. Imaging industrial contaminant plumes with resistivity techniques. **Journal Applied Geophysics**, n. 34, p. 93-108, 1995.
8. LOKE, M.H. & BARKER, R.D. Rapid least-squares inversion of apparent resistivity pseudosections by quasi-Newton method. **Geophysical Prospecting**, n. 44, p. 131-152, 1996.
9. MOREIRA, C.A. & DOURADO, J.C. Monitoramento da Atenuação Natural de pluma de contaminação pelo método de Radar de Penetração no Solo (GPR). **Revista Brasileira de Geofísica**, v. 25, n. 4, p. 389-398, 2007.
10. MOREIRA, C.A.; DOURADO, J.C.; BRAGA, A.C.O. Aplicação da técnica de caminhamento elétrico em área contaminada por derivados de petróleo. **Revista Brasileira de Geofísica**, v. 24, n. 4, p. 1-10, 2006.
11. RABUS, R. & HEIDER, J. Initial reactions of anaerobic metabolism of alkylbenzenes in denitrifying and sulfate-reducing bacteria. **Archives in Microbiology**, v. 170, p. 377-394, 1998.
12. SAUCK, W.A. A model for the resistivity structure of LNAPL plumes and their environs in sandy sediments. **Applied Geophysics**, n. 44, p. 151-165, 2000.
13. THOMAS, J.M. & WARD, C.H. In situ bioremediation of organic contaminants in the subsurface. **Environmental Science and Technology**, n. 23, p. 760-766, 1989.
14. VEGA, M.; OSELLA, A.A.; LASCANO, E. Joint inversion of Wenner and dipole-dipole data to study a gasoline-contaminated soil. **Journal of Applied Geophysics**, Amsterdam, v. 54, n. 1, p. 97-109, 2003.
15. WERKEMA JR., D.D.; ATEKWANA, E.A.; ENDRES, A.L.; SAUCK, W.A.; CASSIDY, D.P. Investigating the geoelectrical response of hydrocarbon contamination undergoing biodegradation. **Geophysical Research Letters**, v. 30, n. 12, p. 1647-1654, 2003.
16. WILSON, S.C. & JONES, K.C. Bioremediation of soils contaminated with Polynuclear Aromatic Hydrocarbons (PAHs): a review. **Environmental Pollution**, v. 81, p. 229-249, 1993.

*Manuscrito Recebido em: 13 de outubro de 2008  
Revisado e Aceito em: 23 de janeiro de 2009*

