



Variação temporal da resistividade elétrica em contaminação por gasolina

Leonardo Zani Castello, César Augusto Moreira, Antônio Celso de Oliveira Braga, Maíra Tozzi Cardinali, Instituto de Geociências e Ciências Exatas, IGCE/UNESP - Campus de Rio Claro.

Copyright 2008, SBGf - Sociedade Brasileira de Geofísica

Este texto foi preparado para a apresentação no III Simpósio Brasileiro de Geofísica, Belém, 26 a 28 de novembro de 2008. Seu conteúdo foi revisado pelo Comitê Técnico do III SimBGf, mas não necessariamente representa a opinião da SBGf ou de seus associados. É proibida a reprodução total ou parcial deste material para propósitos comerciais sem prévia autorização da SBGf.

Resumo

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 que será alterado por uma contaminação induzida de gasolina. O estudo do comportamento deste derivado de petróleo em escala laboratorial visa produzir subsídios técnicos para melhor compreensão de resultados acerca da caracterização geoeletrica em estudos de casos em áreas contaminadas pelos mesmos tipos contaminantes, e que, não raro apresentam resultados conflitantes.

Introdução

O crescente consumo dos derivados de petróleo e, conseqüentemente, a necessidade de se aumentar à estocagem e a distribuição desses produtos, geraram um aumento relevante nos casos de vazamentos de tanques subterrâneos para armazenamento de combustíveis, o que torna imprescindível o conhecimento das interações entre esses possíveis contaminantes e o meio físico.

Visando detectar e quantificar tais vazamentos, são aplicados atualmente, diferentes técnicas de investigação como: sondagem direta com análise química de hidrocarbonetos totais de petróleo (TPH) em solo e/ou água subterrânea, elaboração de malhas de sondagem para obtenção de dados sobre compostos voláteis (VOCs), além 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 em subsuperfície, como compostos inorgânicos como o chorume proveniente de aterros de resíduos sólidos ou

compostos orgânicos derivados de petróleo como gasolina e organoclorados, altera significativamente os valores naturais dos principais parâmetros físicos dos materiais geológicos. Estes parâmetros são passíveis de medição pelo instrumental geofísico e, conseqüentes alterações pela presença de compostos contaminantes, permitem a caracterização de anomalias em relação aos parâmetros físicos.

Caracterização geoeletrica 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; Vena et al. 2003)

Segundo Atekwana et al., 2000, locais onde ocorre uma significativa alteração química do hidrocarboneto, existe uma mudança na assinatura geoeletrica de resistiva para condutiva e afirmam que é possível que a existência dessa zona condutiva possa ser devida, em parte, pela biodegradação do contaminante.

A partir da aplicação do método de eletrorresistividade para análise da atividade de biodegradação em local contaminado por hidrocarbonetos por Werkema et al. (2003), são destacadas a presença de grandes quantidades de bactérias degradadoras de óleo diesel em áreas com de 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.

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. Alguns trabalhos sugerem que a biodegradação de compostos (LNAPL) pode mudar as propriedades geoquímicas do aquífero de forma acentuada, que podem chegar a alterações significativas em medidas de resistividade 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 de fase líquida leve não aquosa (LNAPL), entre eles os benzeno, tolueno, etilbenzeno e xileno, que constituem a gasolina, podem ser biodegradados sob condições ambientais (EPA, 1998). Contudo, este processo natural pode ser limitado pela falta de nutrientes, elétrons receptores ou ambos (Thomas & Ward, 1989). Em muitos locais, o processo de biodegradação fica limitado a zonas periféricas da pluma contaminante, pois a presença de contaminante em elevadas concentrações torna o ambiente hostil a proliferação de microorganismos (Wilson & Jones, 1993; Rabus & Heider, 1998) (Figura 1).

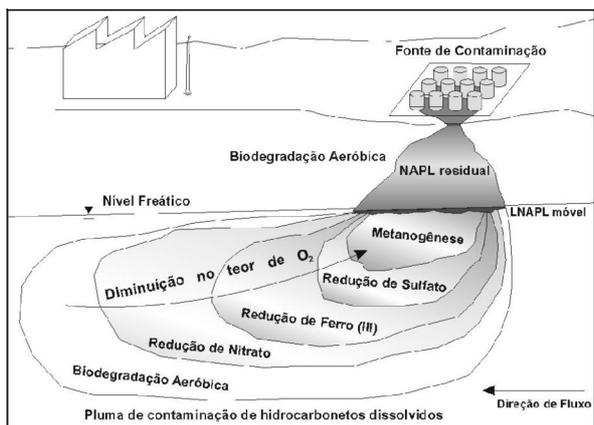


Figura 1 - Zonas de degradação de hidrocarbonetos (adaptado de Rabus & Heider, 1998)

Metodologia de Pesquisa

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

O experimento consiste na adição de solo areno-argiloso pertencente à 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 do como arenoso de granulação fina a média, com matriz siltosa.

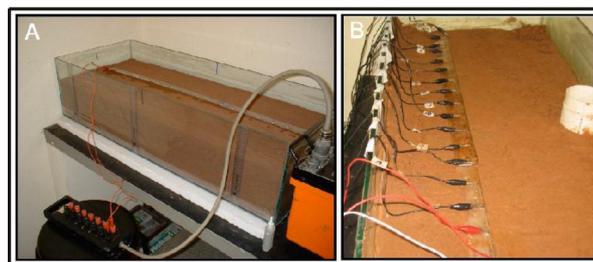


Figura 2 - Vista do tanque utilizado no experimento (A). Arranjo de eletrodos e poço de injeção de gasolina (B)

Em trabalho de Braga & Cardinali (2005), foram testados diversos tanques e espaçamentos para a aplicação da técnica de caminhamento elétrico em escala reduzida.

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 5cm, num total de 90cm de comprimento (Figura 2). Os eletrodos foram confeccionados em cobre e apresentam 2cm de comprimento 0,2cm de espessura.

A injeção de gasolina foi realizada por meio de um poço instalado no tanque, ranhurado em toda sua extensão e locado na lateral da linha de aquisição (Figura 2). Posteriormente foi adicionada água destilada no tanque, até o estabelecimento de uma coluna d'água com 15cm de altura, para simulação de nível freático, também foram adicionados dois litros de gasolina vendida em postos de combustíveis, que contem álcool etílico em sua composição. A injeção de gasolina foi realizada por meio de um poço instalado no tanque, ranhurado em toda sua extensão e locado na lateral da linha de aquisição (Figura 2).

Os valores de resistividade foram interpolados através do programa Surfer 8 por meio do método de krigagem, resultando em pseudo seções (Figura 3). Cada pseudo-seção foi interpretada de maneira qualitativa, pois apresentam apenas a profundidade teórica de investigação.

Análise e Interpretação 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 90Ωm e 200Ωm), franja capilar (resistividade intermediária, entre 40Ωm e 90Ωm) e zona saturada (baixa resistividade, entre 3Ωm e 40Ωm) (Figura 3). O nível freático é definido no contato entre a franja capilar e a zona saturada.

Após 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 3).

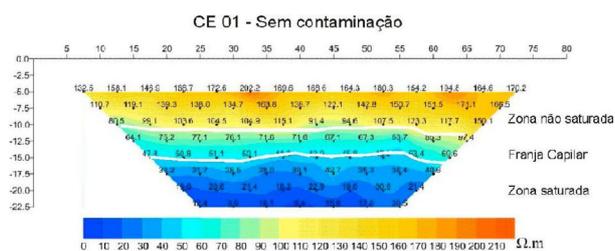


Figura 2 - Linha CE-01, com níveis de saturação do experimento.

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 contaminação indica aumentos pontuais de resistividade na zona saturada e não saturada, com aparente perturbação dos horizontes anteriormente planos, com valores máximos de $350\Omega m$ e $122\Omega m$ respectivamente (Figura 3).

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

A seção realizada após 168 horas apresenta redução nos valores resistividade em todos os horizontes, com extremos de $285\Omega m$ para a zona não saturada, $166\Omega m$ para franja capilar e $66\Omega m$ para a zona saturada (Figura 3).

As seções que foram realizadas após 264 horas e 408 horas apresentam 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 verificada nas seções realizadas após 672 horas, 792 horas, 1512 horas e 1824 horas. Nestes casos, ocorre uma pequena elevação nos valores médios de resistividade para a zona saturada.

Os valores obtidos após 2328 horas da 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 (Figura 4).

Outra característica apresentada em todos os níveis geoeletricos é a tendência de redução da resistividade após 1824h, pois os valores medidos 2328h após a

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 do ambiente contaminado, foram estabelecidas linhas de tendência e respectivas equações de reta apenas para a média dos valores de 1824h e 2328h (Figura 5).

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

Discussão e 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 para os horizontes de saturação.

A expulsão de ar contido nos poros da zona não saturada e seu preenchimento por gasolina aparentemente necessita de um tempo relativamente maior, quando comparado a 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 franja capilar e zona saturada.

A partir 1824h até o ultimo ensaio a 2328h, ocorre queda nos valores. Como não houve novas injeções 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, para o 2º, 4º, 6º e 8º níveis geoeletricos indicam períodos distintos para retorno aos valores naturais de resistividade (Figura 5).

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 na desaceleração nos processos de degradação.

As variações de resistividade descrita ao longo do tempo 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 podem ter início a partir de 1824h, quando começa haver queda nos valores de resistividade. O tempo necessário para retorno aos valores naturais de resistividade possivelmente estão associados ao teor de oxigênio disponível, que por sua vez estão condicionados ao grau de saturação do solo.

Os resultados indicam uma relação crescente entre tempo de estabilidade e grau de saturação do solo. Os processos de atenuação 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 na desaceleração nos processos de degradação.

As variações de resistividade descrita ao longo do tempo 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 podem ter início a partir de 1824h, quando começa haver queda nos valores de resistividade. O tempo necessário para retorno aos valores naturais de resistividade possivelmente estão associados ao teor de oxigênio disponível, que por sua vez estão condicionados ao grau de saturação do solo.

Agradecimentos

Os autores agradecem também ao técnico Francisco Manuel Garcia Barrera, do Departamento de Geologia Aplicada, UNESP – Rio Claro, pelo auxílio nas aquisições dos dados.

Referências Bibliográficas

Atekwana F A Sauck W A Werkema Jr D D 2000. Investigations of geoelectrical signature at a hydrocarbon contaminated site. *Journal of Applied Geophysics*, nº 44: 167-180.

Atekwana F 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., 2004. Evidence for Microbial Enhanced Electrical Conductivity in Hydrocarbon – Contaminated Sediments. *Geophysical Research Letters*. Vol. 31.

Cassidy D P Werkema Jr D D Sauck W A, Atekwana, E.A., Rossback, S.; Duris, J., 2001. The Effects of LNAPL Biodegradation Products on Electrical Conductivity Measurements. *Journal of Environmental and Engineering Geophysics*. Vol. 6: 47-52.

EPA - United States Environmental Protection Agency. , 1998. Technical Protocol for evaluating natural attenuation of chlorinated solvents in ground water. Washington DC, epa/600: 98-128.

EPA - United States Environmental Protection Agency, 2004. Use of monitored natural attenuation at superfund, RCRA corrective action, and Underground Storage Tank Sites. Office of Solid Waste and Emergency Response, Directive 9200, 9: 4 - 17.

Lima, O. A. L., Sato, H. K., Porsani, M. J., 1995. Imaging industrial contaminant plumes with resistivity techniques. *Journal Applied Geophysics*, nº 34: 93-108.

Rabus, R. & Heider, J., 1998. Initial reactions of anaerobic metabolism of alkylbenzenes in denitrifying and ... | 170: 377 – 394.

Sauck, W. A., 2000. A model for the resistivity structure of LNAPL plumes and their environs in sandy sediments. *Applied Geophysics*, nº 44: 151-165.

Vega, M., Osella, A.A., Lascano, E., 2003. Joint inversion of Wenner and dipole-dipole data to study a gasoline-contaminated soil. *Journal of Applied Geophysics*, Amsterdam, vol. 54: 97-109.

Werkema Jr., D.D., Atekwana, E.A., Endres, A.L., Sauck, W.A., Cassidy, D.P., 2003. Investigating the geoelectrical response of hydrocarbon contamination undergoing biodegradation. *Geophysical Research Letters*. Vol. 30, nº12.

Wilson, S. C. & Jones, K. C., 1993. Bioremediation of soils contaminated with Polynuclear Aromatic Hydrocarbons (PAHs): a review. *Environmental Pollution*, vol. 81: 229-249.

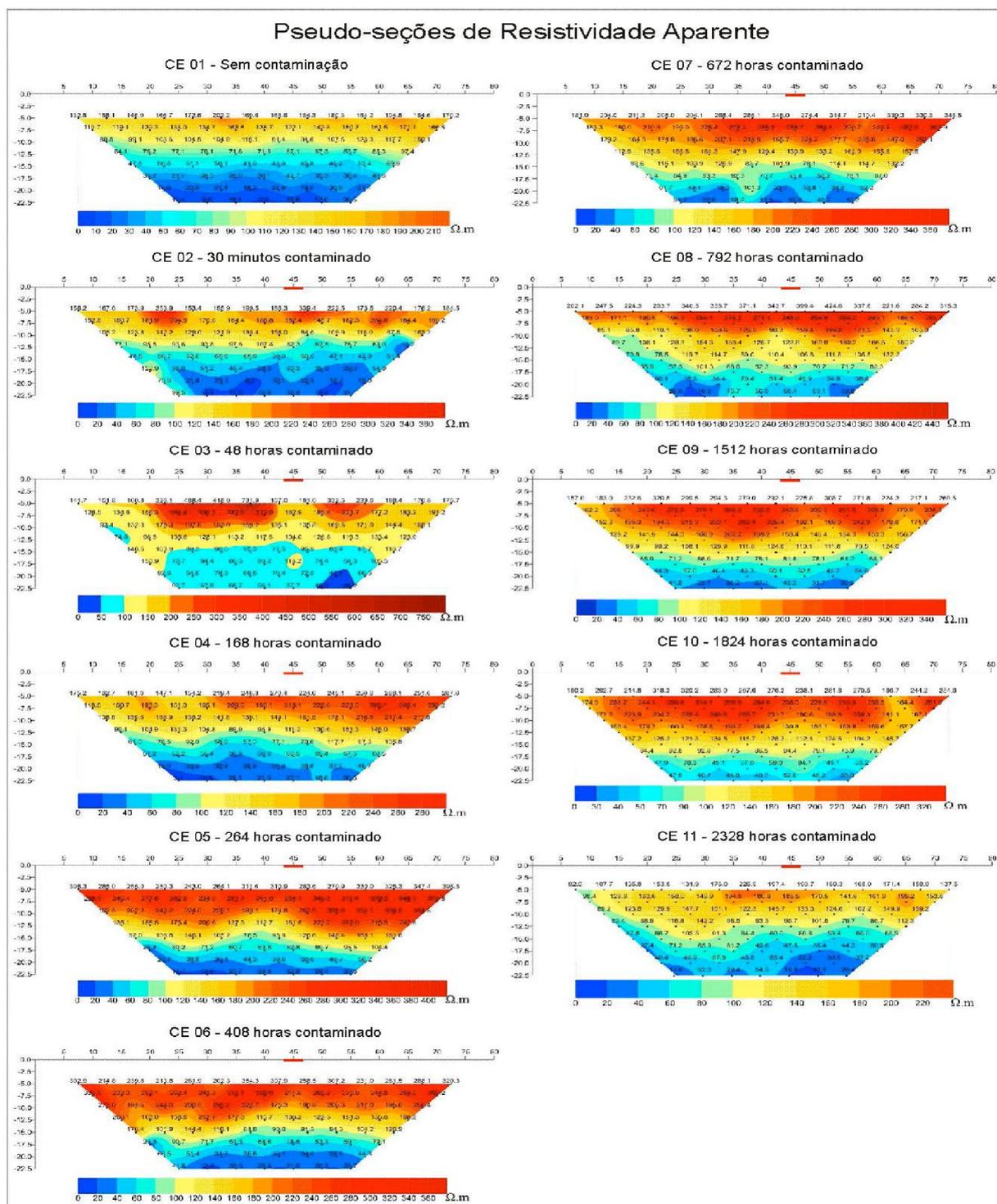


Figura 3 – Pseudo-seções de resistividade aparente

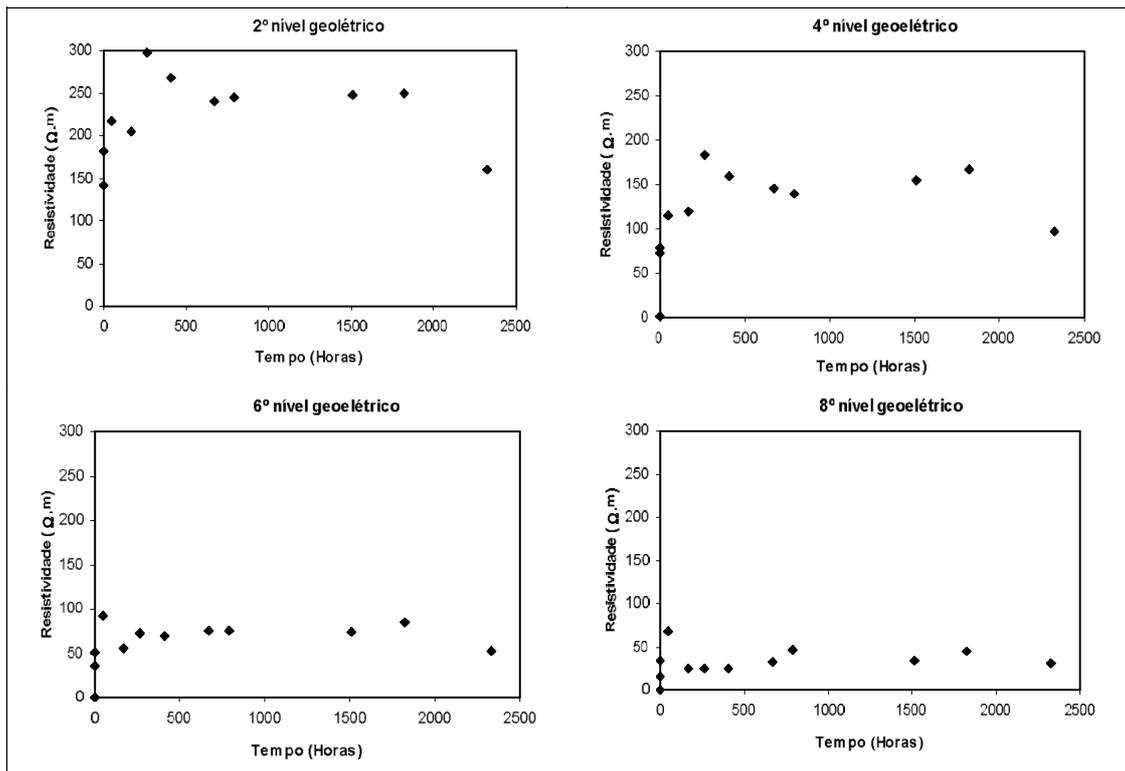


Figura 4 – Média da resistividade por nível geológico, obtidos durante os diversos intervalos de tempo medidos

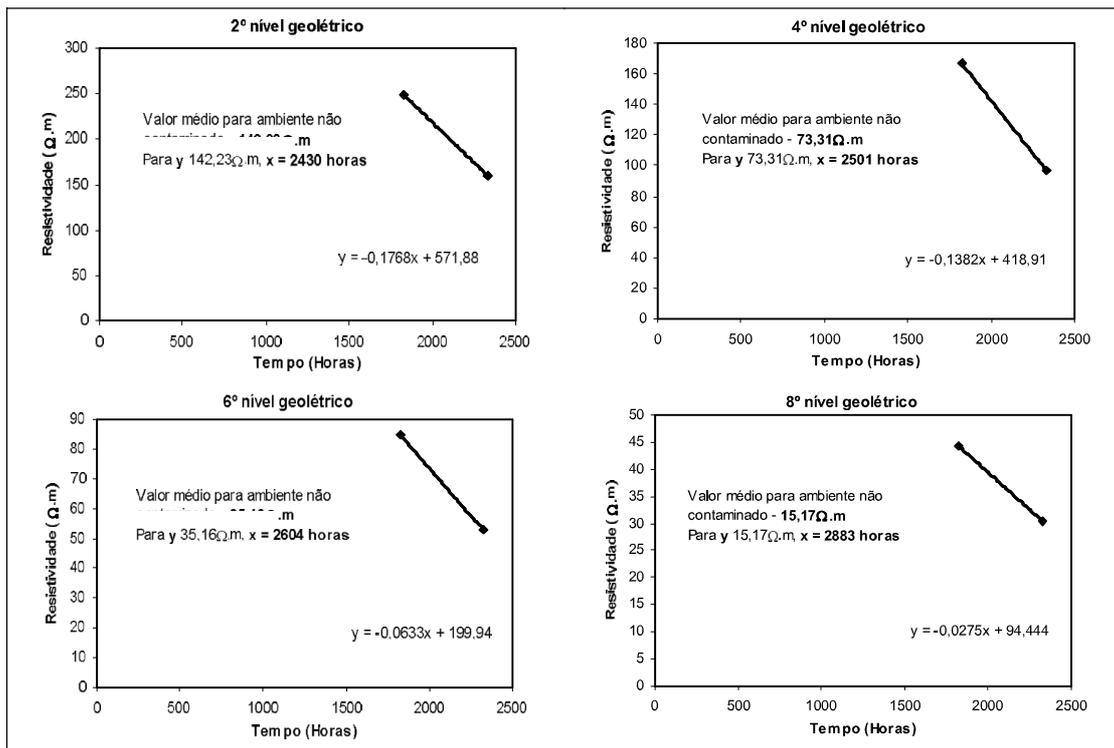


Figura 5 – Linhas de tendência, equações de reta e tempo previsto para retorno da resistividade aos valores naturais