



Estudo sobre relação entre a resistividade elétrica e fatores que causam sua alteração em meios contaminados por hidrocarbonetos e churume

Gianna Caroline Maciel Miura*, IAG/USP, Alexandre Bondioli*, IAG/USP, Andréa Teixeira Ustra, IAG/USP, Francisco Yukio Hiodo, IAG/USP and Vagner Roberto Elis, IAG/USP.

Copyright 2013, SBGf - Sociedade Brasileira de Geofísica

This paper was prepared for presentation during the 13th International Congress of the Brazilian Geophysical Society held in Rio de Janeiro, Brazil, August 26-29, 2013.

Contents of this paper were reviewed by the Technical Committee of the 13th 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

A hydrocarbon contaminated area and an urban sanitary landfill were investigated using DC-resistivity method. Soil samples were collected from both areas, based on the geophysical survey. Electrical resistivity of each sample was measured in laboratory. Microbial population was also measured in the hydrocarbon contaminated area's samples, with the objective to correlate the geophysical signature with the occurrence of biodegradation. The results show that biodegradation could be occurring and therefore, contributing to the recorded conductive anomaly. Moisture content could also be impacting the resistivity measurements. An experiment with varying contaminant concentration flow was conducted with the samples collected at the landfill, aiming to study the contaminant effect on the electrical response. The results show that changes in the electrical model could be due to variations in clay content. However, resistivity tends to be insensitive to lithology variations on highly contaminated areas.

Introdução

Atualmente uma das grandes preocupações mundiais são os impactos ambientais causados por atividades industriais e agrícolas, disposição de resíduos sólidos (industriais, domésticos e hospitalares), de esgoto, de resíduos radioativos, e vazamentos de materiais contaminantes. Essas fontes de contaminação do solo e águas subterrâneas geralmente apresentam altas concentrações de metais pesados, nutrientes e substâncias orgânicas que podem impor risco à saúde da população e do ambiente natural.

Os problemas relacionados à forma de disposição dos resíduos devem-se à migração dos contaminantes para o meio ambiente local e consequente contaminação dos solos e águas subterrâneas. De uma forma geral, a utilização da geofísica na caracterização de uma área contaminada consiste na detecção e mapeamento da extensão da área afetada e informações sobre a profundidade da zona saturada, direção do fluxo subterrâneo e profundidade do substrato rochoso inalterado. Os métodos geoeletricos, nos quais se incluem os métodos da eletrorresistividade (ER),

polarização induzida (IP) e potencial espontâneo (SP) têm sido cada vez mais utilizados em estudos ambientais. As técnicas geoeletricas de imageamento podem ser aplicadas na identificação, mapeamento e delineamento dos contaminantes, controle de qualidade da imobilização do contaminante, e monitoramento em longo prazo.

Esse trabalho tem como finalidade estudar o comportamento da resistividade em duas diferentes áreas contaminadas. Uma indústria química contaminada por hidrocarbonetos derivados de petróleo, na região metropolitana de São Paulo - SP e um aterro de resíduos sólidos urbanos, em Bauru - SP.

Área de estudo e Metodologia

O aterro de resíduos sólidos urbanos de Bauru opera desde 1993. Na área ocorrem arenitos do Grupo Bauru, representado pelas Formações Adamantina e Marília. O solo superficial do aterro possui textura de areia fina a média argilosa e é constituído por camadas de areia fina, silto-argilosa, seguido por solo composto por areia argilosa. Abaixo é encontrado o solo de alteração de arenito sobre a rocha inalterada. O ensaio geofísico foi conduzido à jusante do fluxo subterrâneo, chegando bem próximo à primeira camada de resíduos (recoberta de solo). O nível d'água no local está em torno de 9 m de profundidade (Ustra et al., 2012).



Figura 1: Área do aterro de resíduos sólidos urbanos de Bauru com localização da malha 3D e dos pontos de amostragem B1 e B2.

A indústria química exerce atividades relacionadas à fabricação de tintas, envolvendo a manipulação de hidrocarbonetos e organoclorados. O ensaio geofísico foi conduzido em uma região onde uma quantidade não estimada de contaminantes atingiu o solo por derramamentos acidentais em áreas de solo não impermeabilizadas.

A área fica próxima da represa de Guarapiranga, que está inserida no grupo Açungui, Complexo Pilar, caracterizado pela presença de um conjunto de xistos, com intercalações subordinadas de filitos, quartzitos, calcossilicáticas e metassilitos (Salles, 1999).

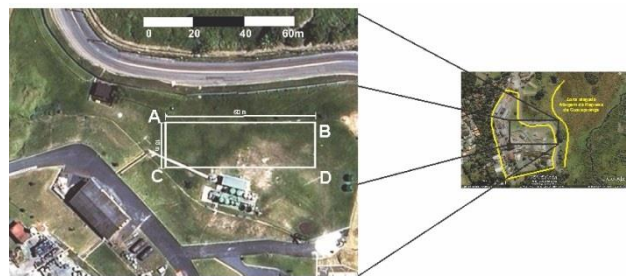


Figura 2: Área da indústria química, com localização da área de estudo.

Em ambas as áreas, o método de eletrorresistividade foi utilizado para determinar a distribuição de resistividade em subsuperfície, afetada fundamentalmente pela composição mineralógica, porosidade, e principalmente o teor em água e a quantidade e natureza dos sais dissolvidos, assim como pela presença direta dos contaminantes. Os dados foram adquiridos com o equipamento EIRec Pro (Iris Instruments), um resistivímetro que possui 10 canais de aquisição. O levantamento consistiu em linhas paralelas de caminhamento elétrico, utilizando-se o arranjo dipolo-dipolo com o espaçamento entre os eletrodos de 5 metros na área do aterro e 3 metros na área da indústria. A distância entre cada linha também foi de 5 metros na área do aterro e 3 metros na área da indústria.

A interpretação quantitativa dos resultados consistiu na inversão dos valores de resistividade aparente pelo método dos mínimos quadrados com vínculo de suavização, realizada pelo software comercial RES3DINV (Geotomo Software, 2001).

Baseado nos modelos de resistividade obtidos para cada uma das áreas foram selecionados locais para a coleta de amostras de solo, até a profundidade de 4 metros.

A fim de determinar a resistividade das amostras coletadas, realizou-se um experimento em laboratório, cujo aparato experimental é mostrado na Figura 3. Nesse experimento, o equipamento de campo Syscal R2 foi alimentado por uma fonte de tensão, trabalhando como um “chaveador” de corrente, conectado em série a um multímetro e aos eletrodos de corrente. O mesmo equipamento utilizado em campo (EIRec Pro), foi utilizado para as leituras de potencial.

Para garantir bom contato elétrico, as amostras da indústria química foram saturadas por uma solução de NaCl (320 ppm=500 μ S/cm), e a mesma solução foi utilizada para preencher o espaço entre os eletrodos de corrente e potencial, nas extremidades do porta-amostra.

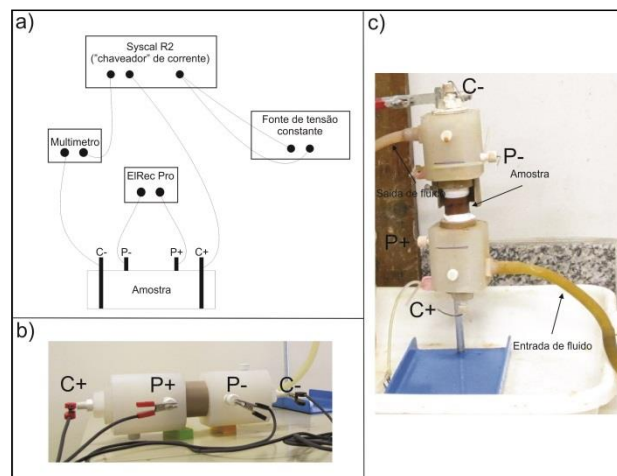


Figura 3: a) aparato experimental utilizado para a medição da resistividade das amostras coletadas, b) porta amostra e c) esquema de saturação e passagem de fluxo na amostra.

As amostras do aterro foram também submetidas ao fluxo de soluções de diferentes concentrações de choroume (líquido proveniente da degradação dos resíduos) originário do próprio aterro. Nesse procedimento, um volume aproximadamente duas vezes maior que o das amostras foi percolado através das mesmas, com o objetivo de substituir completamente o líquido nos poros. As medidas de resistividade nas amostras do aterro foram realizadas sequencialmente com as seguintes concentrações de choroume em água deionizada: 0%, 25%, 0%, 1,5% e 5%. As soluções isentas de choroume tiveram NaCl adicionados (7,638 g/L, $\sigma_f = 0,14$ S/m), devido a alta resistência elétrica da água deionizada, o que observou-se afetar a qualidade das medidas.

Resultados

Contaminação por compostos orgânicos

Os resultados do levantamento geofísico realizado, para a profundidade de 2 metros, são apresentados na Figura 4. Podemos observar uma região de baixa resistividade ($\rho < 100$ ohm.m), onde encontramos o ponto S2, outra com altas resistividades ($\rho > 500$ ohm.m), onde encontramos os pontos S3 e S5, e ainda uma região com resistividades intermediárias ($100 < \rho < 500$ ohm.m), onde temos os pontos S1 e S4.

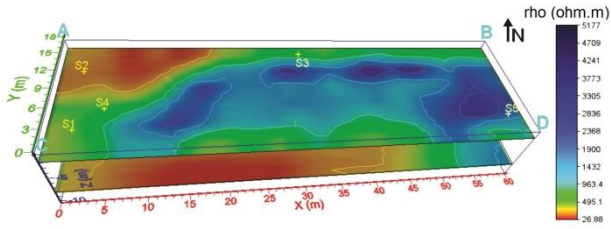


Figura 4: Modelo de resistividade na profundidade de 2 m, da área da indústria química investigada, com a localização dos pontos de amostragem.

A Tabela 1 apresenta o teor de argila e a população microbiana de cada amostra. O teor de argila varia entre 0,2% em S4 e 35% em S1. Entretanto, nenhum ponto de amostragem pode ser caracterizado como mais ou menos rico em argila, por esses dados. A população microbiana das amostras de S3 (10^1-10^3 UFC/100g de solo) é consistentemente menor do que as demais (10^3-10^6 UFC/100g de solo).

Tabela 1: Teor de argila e bactérias totais das amostras.

Amostra	Profundidade (m)	Teor de argila (%)	Bactérias Totais (UFC/100g)
S1	1	-	$8,68 \times 10^5$
S1	2	25	$1,99 \times 10^6$
S1	3	32	$3,45 \times 10^3$
S1	4	35	$4,28 \times 10^3$
S2	1	9	$8,44 \times 10^4$
S2	2	3	$1,6 \times 10^5$
S2	3	-	$1,03 \times 10^6$
S2	4	29	$9,26 \times 10^3$
S3	1	-	$6,42 \times 10^3$
S3	2	-	$3,38 \times 10^1$
S3	3	5	$4,93 \times 10^1$
S3	4	7	$1,23 \times 10^2$
S4	1	19	$1,17 \times 10^6$
S4	2	-	$3,07 \times 10^6$
S4	3	8	$5,75 \times 10^5$
S4	4	0,2	$8,63 \times 10^5$
S5	1	33	$1,3 \times 10^4$

A Figura 5 apresenta a resistividade elétrica das amostras, medidas em laboratório. Diferentemente dos resultados obtidos em campo, as amostras S1 a S4 apresentam valores próximos de ρ , com exceção de S3 e S5, nas profundidades de 4 e 2 m, respectivamente. Além disso, esses valores estão bem abaixo dos medidos em campo. Isso provavelmente ocorre devido ao processo de saturação das amostras, que no campo, encontravam-se na zona não saturada.

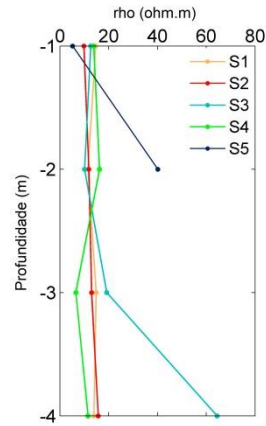


Figura 5: Variação da resistividade das amostras da indústria química, em função da profundidade.

Contaminação por compostos inorgânicos

O levantamento realizado na área do aterro levou à construção de um modelo de resistividade na profundidade de 10m, apresentado na Figura 6.

Nessa profundidade há valores inferiores a 100 ohm.m, que foram interpretados como a zona saturada. Observamos uma anomalia condutora com resistividade inferior a 20 ohm.m que se origina no aterro, se alonga no sentido do fluxo subterrâneo (leste-noroeste) e pode ser interpretada como uma pluma de contaminação.

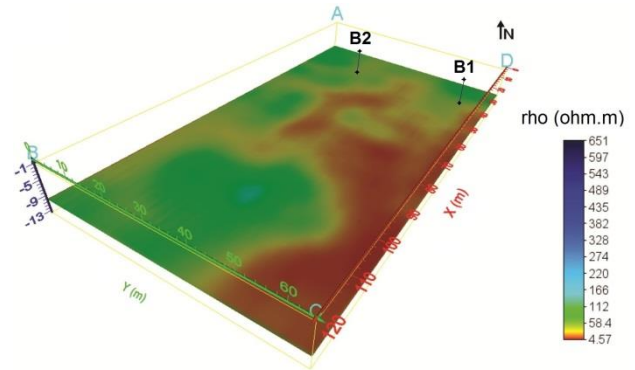


Figura 6: Modelo de resistividade na profundidade de 10 m, a jusante do aterro de resíduos sólidos urbanos de Bauru, com a localização dos pontos de amostragem.

As amostras foram submetidas à análise da porcentagem do teor de argila (obtida por pipetagem) e mineralogia da fração argilosa (obtida por difração de raios-X). Os resultados são apresentados na Tabela 2.

Tabela 2: Teores de argila para cada local de amostragem de solo e a mineralogia da fração argilosa.

Local	Teor de argila (%)	Mineralogia da fração argilosa
B1	15 a 20	Caulinita e Ilita
B2	25	Caulinita e Ilita

A condutividade σ das amostras B1 e B2 quando saturadas por uma solução de água deionizada e NaCl (concentração de aproximadamente 7,638 g/L e $\sigma_f = 0,138$ S/m), e quando saturadas por uma solução de água deionizada e choroume (concentrações de 0%, 1,5%, 5% e 25%), em função da profundidade é mostrada na Figura 7.

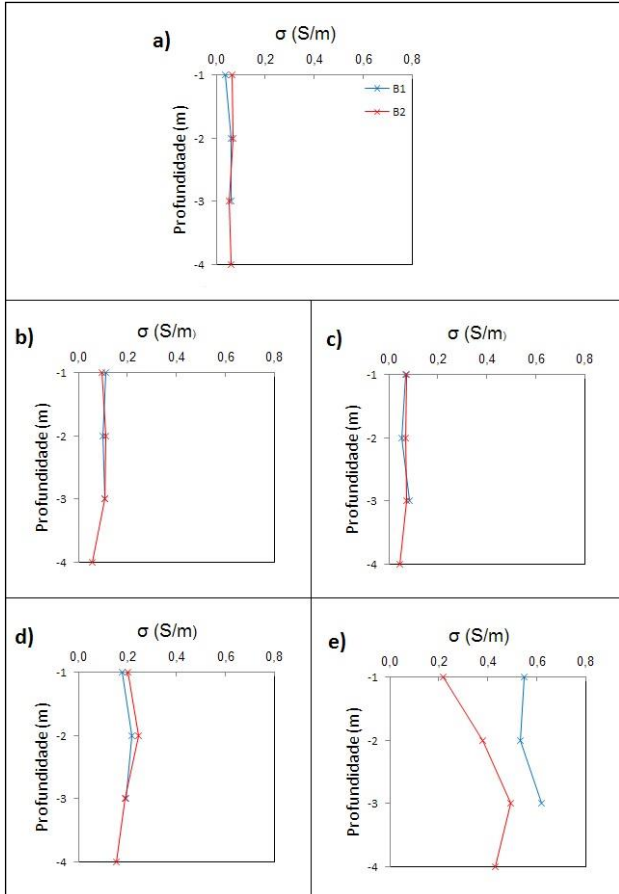


Figura 7: Variação da condutividade das amostras B1 e B2 saturadas pelas soluções com a) 0% de choroume (1ª saturação), b) 0% de choroume (2ª saturação), c) 1,5% de choroume, d) 5% de choroume, e) 25% de choroume, em função da profundidade.

A Figura 8 mostra a variação da condutividade σ das amostras com a condutividade do fluido de saturação σ_f , e a variação percentual de σ , entre B2 e B1 (calculado como $(B2/B1)*100$). As barras de erro indicam o desvio padrão das medidas, com máximo de 11%. A condutividade da amostra aumenta com a condutividade do fluido. Observa-se, além do aumento de σ com a concentração de choroume, que o aumento da concentração de choroume resulta em uma menor variação relativa entre as amostras B1 e B2.

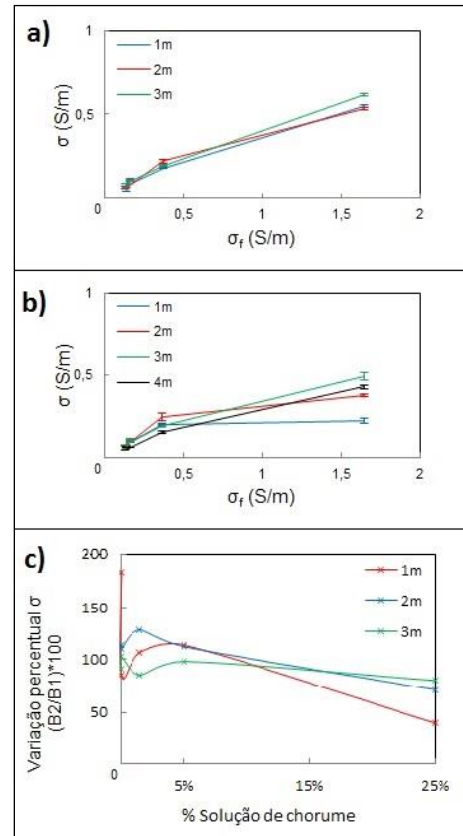


Figura 8: Condutividade das amostras do ponto a) B1 e b) B2, saturadas por diferentes concentrações de solução com choroume. c) variação percentual de σ ($B2/B1*100$).

Discussão de Resultados e Conclusões

Contaminação por compostos orgânicos

O levantamento de campo identificou uma anomalia geofísica representada por uma diminuição de resistividade. Os valores de ρ das amostras coletadas na área medidos em laboratório foram menores do que os valores medidos em campo. Além disso, as amostras apresentam, de modo geral, valores próximos de ρ . Essa mudança do comportamento das amostras pode ser atribuída ao efeito da saturação das amostras, o que sugere que diferenças do teor de umidade do solo possam explicar os contrastes de ρ observados em campo.

Análises diretas realizadas nas amostras mostram que o teor de argila não varia de forma consistente com a resposta geofísica (observada no laboratório e em campo), de modo que a distribuição desse parâmetro não pode explicar a anomalia observada em campo. A população microbiana por outro lado, é significativamente maior na zona da anomalia. A diminuição da resistividade pode ser resultado no aumento de sólidos totais dissolvidos no meio, subprodutos da atividade microbiana. Também pode contribuir para a diminuição da resistividade a redução da porosidade provocada pelo crescimento da população microbiana.

De acordo com Sauck (2000), a atividade microbiana gera como subprodutos, principalmente, ácidos orgânicos e carbônicos, que por sua vez provocam o intemperismo dos grãos, aumentando a concentração de sólidos totais dissolvidos e conseqüentemente a condutividade elétrica. A presença de células microbianas e ocorrência de biomineralização devem provocar a diminuição da porosidade do meio e sua condutividade hidráulica (e conseqüentemente teor de umidade), mudanças no fluxo subterrâneo, na área superficial e rugosidade dos grãos e na geometria dos poros (Atekwana, 2006). Todos esses fatores deverão impactar a assinatura elétrica registrada em uma área contaminada por hidrocarbonetos.

Contaminação por compostos inorgânicos

No modelo de resistividade identificamos a zona saturada (resistividades inferiores a 100 ohm.m) e a pluma de contaminação proveniente do aterro (resistividades inferiores a 20 ohm.m). Essa interpretação está de acordo com os dados de poços de monitoramento ao redor do aterro, que identificaram um aumento da concentração de íons cloreto no local (Ustra et al., 2012).

A condutividade das amostras medidas em laboratório são relativamente próximas. Entretanto, a variação de σ observada nas medidas com as amostras saturadas pela solução não contaminada (0% chorume) pode ser explicada por pequenas variações no teor de argila. Como esperado, a amostra B2, mais rica em argila em relação a B1, é mais condutora.

O experimento da variação da concentração de chorume mostra que, as amostras apresentaram comportamento semelhante, com o aumento da concentração de chorume (σ_f). Esse efeito era esperado, e se deve ao aumento dos sólidos totais dissolvidos, presentes em grande quantidade no chorume. Além disso, como exposto por Giordano et al. (2011) em estudo sobre técnicas para tratamento de chorume, o aumento de σ também se deve ao aumento da permeabilidade do solo por uma desestruturação das partículas coloidais da argila, devido às altas concentrações de íons sódio e cloretos no chorume. Essa interpretação está de acordo com a observação de que a os valores de σ variam menos entre B1 e B2, com a contaminação. Assim, variações litológicas de um meio contaminado, podem não ser perceptíveis pela eletrorresistividade em meios contaminados, dependendo da concentração de contaminante no solo. As diferenças observadas em cada profundidade podem ser devidas a diferenças de porosidade, cementação e composição entre as amostras.

A resistividade elétrica observada em estudos ambientais é afetada por propriedades que variam naturalmente em ambientes dinâmicos. A interpretação da assinatura geoeletrica em áreas contaminadas deve considerar de forma conjunta a contribuição das propriedades hidrogeológicas, geoquímicas e microbiológicas.

Referências

- ATEKWANA EA, WERKEMA DD, ATEKWANA EA. 2006. Biogeophysics: The Effects of microbial processes on geophysical properties of the shallow subsurface, NATO Science Series Applied Hydrogeophysics 10.1007/978-1-4020-4912-5_6 H. Vereecken et al. (eds.), 161-193.
- GEOTOMO SOFTWARE. 2012. RES3DINV ver 3.07, 117p.
- GIORDANO G, BARBOSA FILHO O, CARVALHO RJ. 2011. Processos físico-químicos para tratamento do chorume de aterros de resíduos sólidos urbanos. Tecnologias Ambientais - Volume 4, COAMB da Faculdade de Engenharia da Universidade do Estado do Rio de Janeiro, 178p.
- MINOZZO M, ELIS VR, USTRA AT, MISSAKI F. 2009. Aplicação de ensaios elétricos e eletromagnéticos em uma área industrial contaminada em São Paulo – Brasil – resultados preliminares. Anais do XI Congresso Internacional da Sociedade Brasileira de Geofísica. Salvador – BA, Brasil, 24-28 Agosto 2009.
- SALLES FAF. 1999. Avaliação de área contaminada por compostos orgânicos as margens da represa de Guarapiranga, no Município de São Paulo-SP. Dissertação de Mestrado - Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 110p.
- SAUCK W. 2000. A model for the resistivity structure of LNAPL plumes and their environs in sandy sediments. Journal of Applied Geophysics, 44, 151-165.
- USTRA AT, ELIS VR, MONDELLI G, ZUQUETTE LV, GIACHETI HL. 2012. Case study: a 3D resistivity and induced polarization imaging from downstream a waste disposal site in Brazil. Environmental and Earth Sciences, 66 (3), 763-772. DOI: 10.1007/s12665-011-1284-5.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao CNPq pelo financiamento da pesquisa. Os autores agradecem ao Departamento de Geofísica do IAG/USP pela sua estrutura de equipamentos de campo e para montagem do aparato experimental.