

Integração dos métodos elétricos e eletromagnéticos em contaminação por hidrocarboneto.

Barros, M.F.S.¹, Elis, V.R.¹, Ustra, A.¹, Tagnin, M.¹, Ferreira, D. A.¹, Moraes, C. S.¹, Barbosa, A. M.², Stangari, M.¹

¹ Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas – USP.

² Instituto de Pesquisas Tecnológicas; Dept de Engenharia Química – POLI/USP.

Copyright 2022, SBGf - Sociedade Brasileira de Geofísica

Este texto foi preparado para a apresentação no IX Simpósio Brasileiro de Geofísica, Curitiba, 04 a 06 de outubro de 2022. Seu conteúdo foi revisado pelo Comitê Técnico do IX 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

A utilização dos métodos elétricos na caracterização de áreas contaminadas é eficiente devido a rapidez na aquisição, natureza não invasiva e ampla cobertura. Este trabalho tem como objetivo imagear a contaminação por óleo de creosoto em uma área contaminada na cidade de São Paulo. Para isso foram utilizados os métodos Eletroresistividade e Eletromagnético Indutivo. Ambos os métodos identificaram zonas de alta resistividade que indicam a presença do contaminante. Contudo com o método elétrico foi possível obter perfis mais detalhados.

Introdução

A área de estudo localizada na Zona Oeste de São Paulo – SP (Figura 1), funcionou como uma usina de tratamento de madeira entre 1974 e 1997. Durante o período de funcionamento utilizava-se pentaclorofenato de sódio, arseniato de cobre cromatado (CCA) e óleo de creosoto, os compostos foram armazenados em tanques aéreos. Em 2011 o Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT) confirmou a contaminação do solo no local devido a vazamentos dos tanques (Freitas et al, 2015), assim como um grande derrame formado pelos anos de uso do óleo. O creosoto usado na preservação de madeiras é um óleo de cor escura e odor característico, derivado da destilação do alcatrão de hulha. Ferreira et al. (2019) e Netto et al, (2020) detectaram anomalias de resistividade indicando contaminação.

Em derrames de hidrocarbonetos espera-se um contraste de resistividade entre a zona impactada e o meio geológico. O processo de biodegradação altera as propriedades dos solos e das rochas modificando sua assinatura geofísica, observa-se alta resistividade dos hidrocarbonetos de fase livre, e transformações químicas das plumas ao longo do tempo que resultam em uma diminuição na resistividade devido ao intemperismo dos grãos, aumento na condutividade do fluido, acúmulo de células microbianas e produtos metabólicos (Atekwana et al., 2004, Atekwana e Atekwana, 2010, Orozco, 2021).

Ferreira, et al (2019) detectou em seu trabalho anomalias de alta resistividade que foram relacionadas à presença de óleo de creosoto, e regiões de baixa resistividade que indicam a exposição do contaminante ao processo de biodegradação.

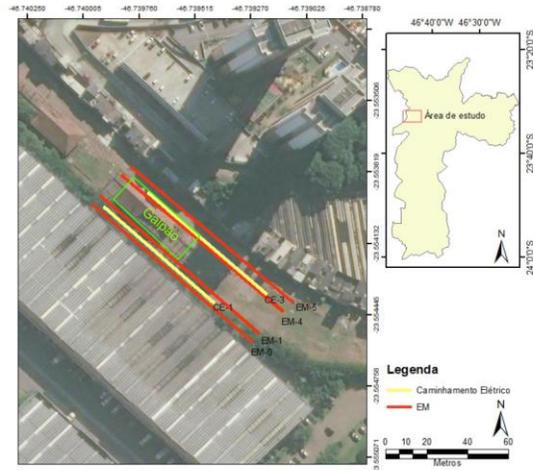


Figura 1. Localização da área de estudo na cidade de São Paulo e das linhas de geofísicas.

A geologia do local é caracterizada por depósitos aluvionares quaternários, sob os sedimentos aluvionares encontram-se depósitos terciários da Bacia São Paulo (Figura 2). A estratigrafia é composta por camadas de argila, areia e cascalho com grandodecrescência ascendente (Freitas et al., 2015). A profundidade média do nível de água na área de estudo é de aproximadamente 4m.

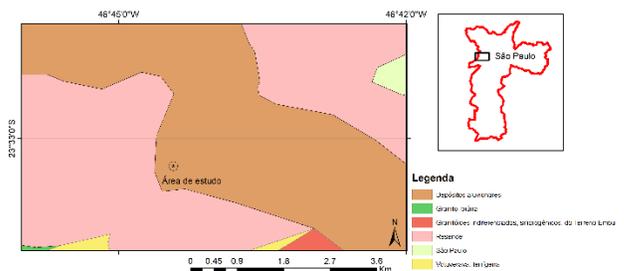


Figura 2. Mapa litológico da Região do bairro de Jaguaré – SP.

Metodologia

Eletroresistividade

Os métodos elétricos relacionam o fluxo de corrente elétrica em subsuperfície com a condutividade elétrica de rochas e solos. Estes métodos utilizam fenômenos puramente galvânicos, nos quais a corrente

pode ser introduzida no terreno através de eletrodos, denominados eletrodos A e B, e a diferença de potencial medida por um segundo par de eletrodos denominados M e N (Orellana, 1972).

A resistividade (ρ) é o inverso da condutividade e compreende a resistência oferecida por um material ao fluxo de corrente elétrica quando submetido a um campo elétrico externo. A resistividade elétrica depende de aspectos dos materiais geológicos como composição mineral, conteúdo de fluido, porosidade, salinidade, temperatura e grau de saturação de água (Loke, 2004). Para calcular a resistividade denominada aparente é utilizada a seguinte equação:

$$\rho = \frac{\Delta V}{I} k$$

Onde: ρ representa a resistividade elétrica em ohm.m, K é o fator geométrico que depende da disposição do arranjo, ΔV é a diferença de potencial entre os eletrodos M e N e I é a intensidade de corrente que passa entre os eletrodos A e B.

A condutividade pode ser utilizada para estimar a concentração de sais na água através da capacidade dos íons de conduzirem corrente elétrica. Quanto maior a concentração de íons na água, maior a condutividade e, portanto, menor a resistividade (Mirlean et al., 2000). A condução da corrente elétrica depende da natureza do material e seu estado físico. A condutividade pode ser do tipo eletrônica, quando a propagação é feita por elétrons móveis que envolvem os íons metálicos em materiais condutores e semi-condutores; ou do tipo eletrolítica, quando a condução de corrente elétrica se deve aos íons presentes na água contida nos poros e fissuras da rocha (Luiz e Silva, 1995).

O método da eletrorresistividade permite a aquisição de dados por técnicas de Caminhamento Elétrico (CE) e Sondagem Elétrica Vertical (SEV). Onde no CE, a investigação se dá pela variação da condutividade elétrica ao longo de uma seção horizontal e na SEV, esta investigação ocorre pontualmente, sobre um perfil vertical localizado no centro do arranjo.

A aplicação de métodos elétricos no estudo de contaminação também foi utilizada em trabalhos de Urish (1983), Meju (2000), Gallas et al. (2005) e Fachin (2007). Stollar (1975) e Kelly (1976), destacam a confiabilidade dos dados e o baixo custo do estudo.

Os métodos elétricos podem ser aplicados nas fases de investigação preliminar de áreas, onde é possível caracterizar a geologia e identificar áreas vulneráveis, e de investigação confirmatória, observando possíveis alterações do meio na presença de determinados contaminantes.

O levantamento foi realizado através do arranjo dipolo-dipolo com espaçamento de 2,5 m. Os dados foram invertidos através do *software Res2dInv* (Loke, 2004) onde também foram gerados os perfis.

Método Eletromagnético

O método eletromagnético utiliza da propagação de campos eletromagnéticos gerados por uma intensidade elétrica alternada e força de magnetização. A corrente elétrica gera os campos magnéticos primários através de uma bobina transmissora. O solo gera campos magnéticos secundários em resposta, que são detectados por uma bobina receptora (Kearey et al, 2009).

O campo secundário em geral é uma função complexa do espaçamento das bobinas (s), da frequência de operação (f) e da condutividade da subsuperfície (σ) (McNeill, 1980).

$$\frac{H_s}{H_p} = \frac{i\omega\mu_0\sigma s^2}{4}$$

Onde H_s e H_p são amplitudes dos campos secundários e primários, $\omega = 2\pi f$, f é frequência em hertz, μ_0 é a permeabilidade magnética do vácuo, σ é a condutividade dada em mho.m, s é o espaçamento entre as bobinas e $i = \sqrt{-1}$.

A razão H_s/H_p é proporcional à condutividade do solo σ . A condutividade aparente é obtida de forma direta pelo equipamento EM 34, através da expressão (McNeill, 1980):

$$\sigma_a = \frac{4}{(2\pi f)\mu_0 s^2} \left(\frac{H_s}{H_p} \right)$$

Os levantamentos eletromagnéticos podem ser realizados mais rapidamente que os levantamentos elétricos tradicionais pois não há necessidade de contato físico das bobinas com o solo (Kearey et al, 2009). As profundidades investigadas variam de acordo com a distância e posição das bobinas.



Figura 3. Levantamento eletromagnético realizado na área de estudo.

Neste trabalho foi utilizado o equipamento EM-34 com espaçamento de 10 metros entre as bobinas (Figura 3), o que corresponde a uma profundidade aproximada de 7.5m no dipolo horizontal e 15m no dipolo vertical (McNeill, 1980). Os dados adquiridos foram invertidos no *software EM2D* (Santos, 2004), e em seguida interpolados no programa *Surfer*.

Resultados

O levantamento eletromagnético consistiu em 5 linhas com espaçamento de 5 m entre elas. A linha 0 foi realizada em um lugar sem indícios de contaminação e foi utilizada como background. As linhas 1, 4 e 5, respectivamente, aproximam-se do local contaminado pelo óleo de creosoto.

Os caminhamentos elétricos foram realizados através do arranjo dipolo-dipolo com espaçamento de 2,5 m entre os eletrodos. A linha CE-0 foi executada no mesmo local da linha EM-0, a linha CE-3 no mesmo local que a linha EM-5, e a linha CE-2 entre os dois caminhamentos

Linha 0 – Background

O primeiro caminhamento (Fig. 4) realizado exibe um perfil com aproximadamente 7 m de profundidade. Duas áreas mais resistivas são encontradas no começo do perfil, em 22 m e novamente em 42 m, todas próximas a superfície.

O levantamento realizado com o método eletromagnético (Fig. 5) apresentou um perfil mais profundo que o método elétrico, chegando a aproximadamente 9m de profundidade. Anomalias de alta resistividade também foram localizadas próximas a superfície. Uma área mais resistiva entre 20 m e 50 m e depois no final do perfil.

Ao longo de ambos os perfis podemos notar pequenas anomalias de alta resistividade próximas a superfície. A profundidade do nível d'água é observada em aproximadamente 4 m de profundidade. Uma camada de material argiloso está localizada acima da zona saturada, portanto a zona saturada, que contém material arenoso, é mais resistiva que parte da zona não saturada.

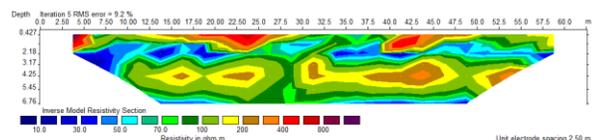


Figura 4. Caminhamento elétrico (CE-0)

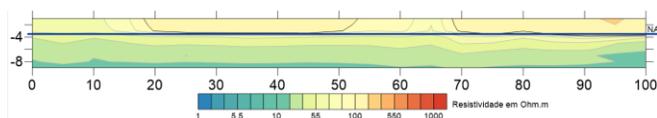


Figura 5. Levantamento eletromagnético (EM-0)

Linha 1

O perfil do levantamento eletromagnético da linha 1 (Fig. 6) mostra anomalias resistivas significativas na superfície, uma entre 5 e 25m m e outra próximo aos 50m. Áreas de baixa resistividade (menor que 10 Ohm.m) são adjacentes a regiões de alta resistividade. As resistividades altas na superfície coincidem com as áreas mais resistivas dos perfis EM-0 e CE-0, que distam 5 m do perfil EM-1.

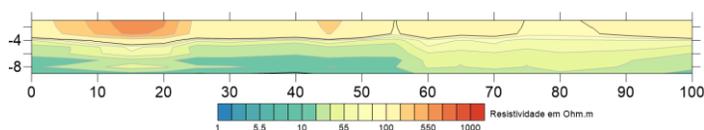


Figura 6. Levantamento eletromagnético (EM-1)

Linha 4

A linha 4 foi realizada próxima a antigas estruturas do local de armazenamento dos tanques. O perfil EM-4 (Fig. 7) exibe anomalias de alta resistividade do início ao meio do perfil chegando até 6m de profundidade, e no final do caminhamento em maiores profundidades.

Já o caminhamento elétrico CE-2 (Fig. 8) é localizado sobre a área do antigo galpão e apresenta uma grande anomalia no início do perfil próximo aos 5m de profundidade e pequenas anomalias na superfície ao longo do levantamento. O perfil CE-2 é de apenas 67,5m e não alcança a área mostrada no final do perfil EM-4. Novamente observa-se zonas de baixa resistividade nas proximidades das anomalias resistivas.

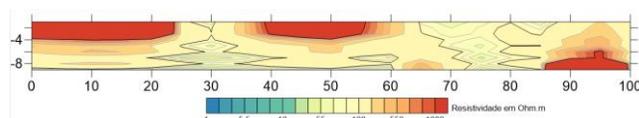


Figura 7. Levantamento eletromagnético (EM-4)

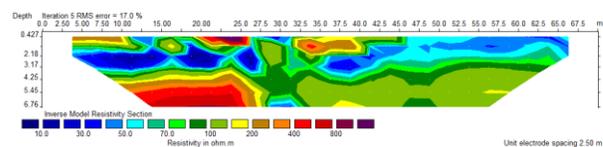


Figura 8. Caminhamento elétrico (CE-2)

Linha 5

A última linha (CE-3, Fig. 9) exibe altas resistividades no meio do perfil próximo a 5m de profundidade, portanto a anomalia está localizada em zona saturada, mostrando um comportamento de DNALP (*Dense non-aqueous phase liquid*) do contaminante. Áreas de baixa resistividades são encontradas nas adjacências das anomalias resistivas. O levantamento EM-5 (Fig. 10) também apresenta altas resistividades

entre 60 m e 70 m, mais próximos a superfície. Podemos observar que o método eletromagnético detecta muito bem o contaminante na zona não saturada, porém não o detecta na zona saturada.

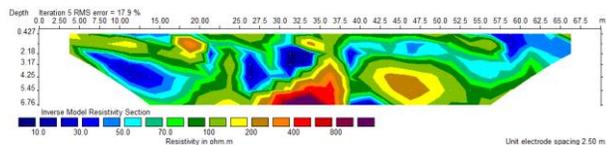


Figura 9. Caminhamento elétrico (CE-3)

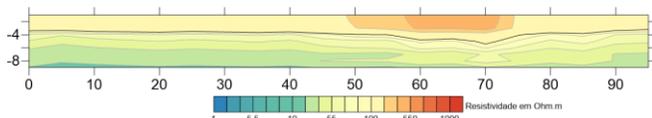


Figura 10. Levantamento eletromagnético (EM-5)

Discussão e Conclusões

O método elétrico da resistividade se mostrou eficiente na detecção de áreas contaminadas por hidrocarboneto, exibindo um nível maior de detalhe que o método eletromagnético, porém, o método eletromagnético não necessita da cravação de eletrodos no solo, o que torna a aquisição mais rápida. Entretanto, com o método eletromagnético não foi possível realizar levantamentos em áreas com pavimento, devido interferência e geração de ruídos.

Os perfis mostram anomalias de alta resistividades concordantes nos dois métodos, sinalizando contaminação por hidrocarbonetos. Através do levantamento elétrico observa-se que as anomalias de alta resistividade estão seguidas de áreas de baixa resistividade, o que sugere uma biodegradação do contaminante, e, portanto, um aumento de condutividade.

Agradecimentos

A CAPES (Projeto: 88887.616536/2021-00) e ao Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo.

Referências

Atekwana, E.A., Atekwana, E.A., 2010. Geophysical signatures of microbial activity at hydrocarbon contaminated sites: a review. *Surv. Geophys.* 31 (2), 247–283.

Atekwana, E.A., Atekwana, E. A., Werkema, D.D., Allen, J.P., Smart, L.A., Duris, J.W., Cassidy, D.P., Sauck, W.A., Rossbach, S., 2004. Evidence for microbial enhanced electrical conductivity in hydrocarbon-contaminated sediments. *Geophys. Res. Lett.* 31 (23).

Fachin, S. J. S., 2007. Ensaio geoeletricos 2D no antigo lixão de Ribeirão Preto – SP: avaliação de parâmetros de

aquisição e monitoramento ambiental do problema. Dissertação (mestrado). São Paulo: Instituto de Geociências, USP. Doi: 10.1590/S0102-261X2008000400018.

Ferreira, D. A., Elis, V. R., Ustra A. T. 2019. Assinatura geoeletrica de uma área contaminada por hidrocarbonetos. 16th International Congress of the Brazilian Geophysical Society held in Rio de Janeiro, Brazil.

Freitas, L. G., Gandolfo, O. C. B., Galli, V. L., Blanco, R. G., Barbosa, A. M. & Leite, D. C. 2015. Integração de Métodos Geofísicos com a sonda MIP para caracterização estratigráfica de uma área contaminada, 15o Congresso Brasileiro de Geologia e Engenharia Ambiental.

Gallas, J. D. F., Taioli, F., Silva, S. M. C. P., Coelho, O. G. W., Paim, S. G., 2005. Contaminação por chorume e sua detecção por resistividade. *Revista Brasileira de Geofísica.* Vol. 23.

Kearey, P., Brooks, M., Hill, I. 2009. *Geofísica de Exploração.* São Paulo: Oficina de Textos, 440 p.

Kelly, W. E., 1976. Geoelectric sounding for delineating groundwater contamination. *Ground Water*, [S.I.], v. 14, n.1.

Loke, M. H. 2004. A practical guide to 2-D and 3-D surveys. *Electrical imaging surveys for environmental and engineering studies.* 136p.

Luiz, J.G., Silva, L.M.C., 1995. *Geofísica de Prospecção.* Belém, UFPA, Cejup, 311 p.

McNeill, J.D., 1980. *Electrical conductivity of soil and rocks.* Geonics LTD.

Meju, M. A., 2000. Geoelectrical investigation of old/abandoned, covered landfill sites in urban areas: model development with a genetic diagnosis approach. *Journal of Applied Geophysics.* Vol 44. Doi: 10.1016/S0926-9851(00)00011-2

Mirlean, N., Vanz, A., Baisch, P., 2000. Níveis e origem da acidificação das chuvas na região de Rio Grande – RS. *Química Nova.* Vol. 23, n. 5.

Netto, L. G.; Barbosa, A. M.; Galli, V. L.; Pereira, J. P. S.; Gandolfo, O. C. B, Birelli, C. A. 2020. Application of invasive and non-invasive methods of geo-environmental investigation for determination of the contamination behavior by organic compounds. *Journal of Applied Geophysics* 178. 14 p.

Orellana, E. 1972. *Prospeccion geoeletrica em corrente continua.* Madrid: Ed. Paraninfo, Biblioteca Técnica Philips, 523 p.

Barros, M.F.S.¹, Elis, V.R.¹, Ustra, A.¹, Tagnin, M.¹, Ferreira, D. A.¹, Moraes, C. S.¹, Barbosa, A. M.², Stangari, M.¹

Orozco, A. F, Ciampi P., Katona, T., Censini M., Papini M. P., Deidda G. P., Cassiani G. 2021. Delineation of hydrocarbon contaminants with multi-frequency complex conductivity imaging. *Science of The Total Environment* V. 768.

Santos, A. M. S. 2004. 1-D laterally constrained inversion of EM34 profiling data. *Journal of Applied Geophysics* 56. 123-134.

Stollar, R. L., Roux, P. 1975. Earth resistivity surveys: a method for delineating groundwater contamination. *Ground Water*, [S.I.], v. 13, n. 2.

Urish, D. W., 1983. The Practical Application of Surface Electrical Resistivity to Detection of Ground-Water Pollution. *Groundwater*. Vol. 21. 2. Doi: 10.1111/j.1745-6584.1983.tb00711.x