



Localização e Delineamento de Pluma de Contaminação por Hidrocarbonetos através dos Métodos GPR e Tomografia Elétrica: Resultados Preliminares

Rodrigo Alves Ortega ^{1,*} & Jorge Luis Porsani ²

¹ IDS RADAR LTDA, Tel.: (11) 294 3300 - Email: r.ortega@idsradar.com.br

² IAG-USP – Departamento de Geofísica. Tel.: (11) 3091 4734 – Fax.: (11) 3091 5034 - E-mail: porsani@iag.usp.br

Copyright 2005, SBGf - Sociedade Brasileira de Geofísica

This paper was prepared for presentation at the 9th International Congress of the Brazilian Geophysical Society held in Salvador, Brazil, 11-14 September 2005.

Contents of this paper were reviewed by The Technical Committee of the 9th 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 geophysical investigation was accomplished in a train supplying station in São Paulo state, Brazil. The research aims are to locate and delineate a possible contamination plume from hydrocarbon (diesel oil). To reach these objectives, various GPR (Ground Penetrating Radar) profiles and electric dipole-dipole (Resistivity) surveys were performed. The preliminary results shown interesting features, where anomalous regions of high electric conductivity can be observed, corresponding to a shadow zone on GPR profiles. These regions are characterized for targets with potentials of contamination. The survey area won't be divulged because this research refers to a commercial project carried out by IDS-RADAR company.

Introdução

A crescente demanda de trabalhos e pesquisas relacionadas aos estudos do meio ambiente e o alto custo dispendido na recuperação de áreas contaminadas, aumentou sobremaneira o interesse do mercado pelas investigações geofísicas “não invasivas”, devidos aos baixos custos e a rapidez de execução dos levantamentos geofísicos (Reynolds, 1997).

Seguindo esta tendência, tornam-se cada vez mais comuns à utilização dos métodos geoeletricos aplicados aos estudos ambientais, devidos à sua eficácia quanto às assinaturas provenientes de plumas de contaminação, conforme constatado na literatura (Sauck et al., 1998a, b; Sauck, 1999; Werkema et al., 2000; Krüger, 2002; Castro & Castelo Branco, 2003; Porsani et al., 2004).

A área de estudos está localizada no Estado de São Paulo, e corresponde a um posto de abastecimento de locomotivas, onde encontra-se com pontos de contaminação originados por hidrocarbonetos, i.e., óleo diesel (derramados ou vazados). Neste trabalho, foram utilizados os métodos GPR-Ground Penetrating Radar e Eletrorresistividade, visando à localização e o delineamento de uma possível pluma de contaminação.

Os resultados obtidos, embora preliminares, permitiram imagear regiões anômalas de elevada condutividade elétrica relacionadas com regiões caracterizadas por zonas de sombra nos perfis GPR, i.e., de elevada atenuação do sinal, sugerindo regiões contaminadas por óleo diesel. Essas regiões coincidem com os locais contaminados, conforme constatado durante os levantamentos de campo. Furos de sondagens e análises de solos serão realizados nos locais indicados pelos métodos geofísicos, visando comprovar a presença de contaminantes. Os resultados poderão servir de guia para os futuros trabalhos de recuperação da área degradada.

Metodologia

GPR

O método GPR consiste em obter uma imagem de alta resolução da subsuperfície, através da transmissão e reflexão de ondas eletromagnéticas de altas frequências (10 - 2,5 GHz), visando localizar áreas contaminadas, estruturas sedimentológicas ou localizar objetos enterrados pelo homem (Davis & Annan, 1989; Daniels, 1996; Porsani, 1999), dentre outras.

O pulso eletromagnético é emitido no solo por uma antena transmissora, parte deste sinal transmitido é refletido devido aos contrastes nas propriedades elétricas dos materiais (condutividade elétrica, permissividade dielétrica e permeabilidade magnética) e recebido em uma outra antena denominada antena receptora (Figura 1).

Eletrorresistividade

O método da eletrorresistividade consiste em obter a resistividade elétrica do solo de subsuperfície a partir de medidas da diferença de potencial entre dois eletrodos, originada pela injeção de correntes em outros dois eletrodos (Reynolds, 1997). A resistividade aparente pode ser obtida a partir da seguinte expressão:

$$\rho_a = \frac{\Delta V}{I} K$$

sendo,

$$K = \pi \cdot n \cdot (n+1) \cdot (n+2) \cdot a$$

onde:

ρ_a - é a resistividade aparente da subsuperfície

K - é o fator geométrico que depende do espaçamento entre os eletrodos (AB e MN)

ΔV - é a diferença de potencial entre os eletrodos MN

I - é a corrente injetada pelos eletrodos AB

n - é o nível de investigação em profundidade

a - é a distância entre os eletrodos.

Existem várias técnicas de arranjos de eletrodos nas atividades de campo, dentre elas tem-se, pólo-polo, pólo-dipolo e dipolo-dipolo.

Em estudos ambientais, o arranjo dipolo-dipolo é um dos mais utilizados nos trabalhos de campo, devido a sua rapidez e praticidade (Reynolds, 1997). A sua principal utilidade consiste no mapeamento da variação lateral e em profundidade da condutividade elétrica do meio, podendo caracterizar plumas de contaminação.

Aquisição e Processamento dos Dados

As investigações geofísicas foram realizadas em duas áreas: área de Tanques e área de Abastecimento (Figura 2). Entretanto, neste artigo serão apresentados somente os resultados obtidos na área de abastecimento das locomotivas. A área do levantamento será mantida em sigilo, pois os resultados desta pesquisa referem-se a um projeto comercial executado pela empresa IDS-RADAR.

GPR

Para a aquisição dos dados foi utilizado um equipamento GPR multifrequencial italiano modelo RIS 2K/MF de fabricação IDS (com frequências de 200 e 600 MHz) de 8 canais, com diversos arranjos das antenas transmissora e receptora (monoestático, bistático e polarização cruzada) e uma antena monoestática de 100 MHz.

O levantamento com o GPR foi executado abrangendo uma área total de 3.063 m² englobando as duas áreas da pesquisa. Os dados foram adquiridos em linhas transversais e longitudinais, determinadas por uma linha de referência, previamente determinada, com pontos equidistantes a cada 2 metros. Para se obter melhor resolução horizontal do sinal, o espaçamento entre os traços foi de 2,5 cm.

O processamento dos dados foi realizado utilizando-se o *software* IDS Gred (IDS) e o Radan (GSSI). A finalidade deste refinamento é de melhorar a razão sinal/ruído, para gerar melhorias na visualização das anomalias de interesse, uma vez que a propagação do pulso do radar no subsolo sofre atenuações que, somadas a ruídos (naturais e artificiais), podem mascarar os sinais refletidos.

As principais etapas utilizadas no processamento dos dados foram: ajuste do tempo zero, filtros *notch* e passa-banda (vertical e horizontal), migração no domínio do

tempo, ganho linear e conversão tempo/profundidade. Para a conversão de tempo para profundidade foi utilizada a velocidade de propagação de 0,08 m/ns, baseada na medida do tempo da onda refletida sobre um alvo cuja profundidade era conhecida e na conseqüente conversão para a velocidade.

Eletrorresistividade

Os perfis de caminhamentos elétricos foram realizados utilizando-se o arranjo dipolo-dipolo, com espaçamento entre os eletrodos de 4 metros e 6 níveis de investigação. Esta técnica foi escolhida visando alcançar os objetivos desta pesquisa na busca de descontinuidades laterais e verticais no subsolo que pudessem ser atribuídos à contaminação do meio por derivados de hidrocarbonetos.

Foram definidas 5 linhas de Caminhamento Elétrico-CE na área dos tanques, sendo os CE's 1, 2 e 5 paralelos entre si, e perpendiculares aos CE's 3 e 4, totalizando uma área de 2.428 m². Na área do abastecimento foram definidas 3 linhas de CE, todas paralelas entre si, totalizando uma área de 1.786 m².

Os resultados obtidos referentes à diferença de potencial e a corrente para cada ponto de leitura, foram digitados em uma planilha eletrônica para a obtenção dos valores de resistividade aparente e através de um software interpolador foram gerados os perfis de cada linha de caminhamento elétrico.

Para a inversão 2D dos dados foi utilizado *software* RES2DINV (Loke, 1998). Este algoritmo subdivide a subsuperfície em um modelo 2D caracterizado por blocos retangulares (Figura 3). A resistividade elétrica é calculada para cada bloco, e a integração dos blocos permitirá gerar uma seção de resistividade aparente do modelo.

A resposta integrada do modelo de resistividade dos blocos 2D é comparada com os valores medidos de resistividade aparente. A medida do erro desta diferença, ou seja, o ajuste entre os dados reais e o modelo sintético visando a obtenção do melhor modelo é determinada pelo método dos mínimos quadrados.

Resultados Preliminares

A Figura 4a mostra o perfil GPR-1 obtido com a antena de 600 MHz na área de abastecimento. Neste perfil observam-se a presença de duas tubulações metálicas (oleodutos), caracterizados por refletores hiperbólicos "H" e duas regiões "C" e "D" onde ocorrem a ausência de sinal, também denominada de "*shadow zone*", correspondendo a uma forte atenuação do sinal eletromagnético. A Figura 4b mostra o perfil GPR-2 onde podem ser observadas três regiões anômalas "A", "B" e "C" com ausência de reflexões, indicando regiões potencialmente contaminadas por óleo diesel. Os perfis GPR-1 e -2 estão localizados na Figura 5a.

A atenuação do sinal do GPR pode estar relacionada com a presença de materiais mais condutivos. Segundo Sauck (1999), uma pluma contaminante, proveniente de derivados de hidrocarbonetos, pode ocorrer em duas

regiões distintas dentro da subsuperfície: a primeira na porção localizada na camada insaturada e a segunda na porção situada abaixo do nível d'água. Na camada insaturada, a pluma contaminante poderá estar presente sob as fases livre e residual, com os sedimentos impactados diretamente pelos hidrocarbonetos, e sob a fase vapor, que é composta por voláteis, presente tanto nos arredores quanto acima da fase livre. Na camada saturada, i.e., abaixo do nível d'água, a pluma contaminante poderá estar presente sob a forma de fase dissolvida, que é subdividida em duas porções: uma aeróbica, devido a entrada da água da chuva oxigenada, bem como do contato com a água subterrânea que também é rica em oxigênio; e a outra anaeróbica, dentro da pluma onde o oxigênio é rapidamente consumido, gerando um ambiente anóxico (i.e., sem oxigênio).

Após a ocorrência de um vazamento, inicialmente são observados valores elevados de resistividade, entretanto, a pluma contaminante (ou seja, o óleo diesel), tanto na fase dissolvida quanto na fase residual, poderá ser afetada por processos químicos, tais como, oxidação/redução, etc., bem como, por processos de biodegradação.

Segundo Sauck (1999), o processo de biodegradação produzirá ácidos orgânicos com alto poder de lixiviação dos sais presentes no solo. Este processo é gradualmente aumentado pela ação bacteriológica sobre o dióxido de carbono liberado após o consumo de oxigênio pelas bactérias presentes, o que também acarretará a geração de ácidos carbônicos no entorno da camada insaturada, resultando na lixiviação dos sais inorgânicos desta região.

Com isso um material resistivo, como é o caso do óleo diesel, quando encontrado em meio aeróbico e com a água (zona vadosa), acaba recebendo ataques de microorganismos que provocam a sua biodegradação, conseqüentemente gera a produção de sais TDS-Totais de Sólidos Dissolvidos que por sua vez diminuem a resistividade do contaminante. Em outras palavras, um contaminante resistivo poderá ser transformado, ao longo do tempo, em um contaminante condutivo após a ação da biodegradação. Esta é uma fascinante área da Geofísica, denominada de BioGeofísica (Knight, 2001).

A Figura 5a mostra um mapa de atenuação GPR indicando a localização dos perfis GPR e dos caminhamentos elétricos dipolares. Sobre o mapa, quatro regiões anômalas "A", "B", "C" e "D" foram identificadas, apresentando maior atenuação (indicada pela cor vermelha, correspondendo a uma elevada condutividade). Em toda a área do mapa, ocorrem tubulações que passam por estas regiões anômalas, que são provenientes dos tanques de armazenagem de óleo diesel. Estas anomalias também foram identificadas na tomografia GPR desde 0,5 até 6 m de profundidade, sendo denominadas de regiões anômalas "AA", "BB" e "CC". A Figura 5b mostra o resultado da tomografia GPR, ou *depth slice*, para 1,5 m de profundidade, com as três regiões anômalas interpretadas na própria figura. Note que, na tomografia a cor azul indica sinal fraco com baixa amplitude.

A Figura 6a mostra a pseudoseção de caminhamento elétrico dipolo-dipolo na área de abastecimento de óleo diesel e a Figura 6b mostra a seção geoeletrica obtida após a inversão 2D. Note na Figura 6b que as três regiões anômalas "A", "B" e "C" caracterizadas por baixos valores de resistividade elétrica são bastante nítidas. Estas três regiões anômalas apresentam uma excelente correlação com as *shadow zones*, caracterizadas pela ausência de sinal GPR (Figuras 4b). Além disso, estas regiões coincidem com as anomalias "A", "B" e "C" identificadas no mapa de atenuação (Figura 5a) e com as anomalias "AA", "BB" e "CC" identificadas na tomografia GPR (Figura 5b).

Provavelmente, estas regiões correspondem à pluma de contaminação por óleo diesel, e que a hipótese de biodegradação (Sauck, 1999) possa estar ocorrendo na área de estudos. Entretanto, estudos mais detalhados, tais como, furos de sondagens a trado e análise química do solo, serão desenvolvidos e fundamentais para a comprovação de tal hipótese.

Conclusões Preliminares

Os resultados preliminares de GPR e Eletrorresistividade apresentaram assinaturas geofísicas nítidas de três regiões anômalas coincidentes. Para as regiões anômalas, os perfis GPR mostraram ausência de reflexão, denominada de zona de sombra ou *shadow zone*; e as seções de caminhamento elétrico dipolar mostraram regiões de baixa resistividade (elevada condutividade). Provavelmente, as anomalias condutivas são devido à ação da biodegradação, e que podem estar relacionadas com a contaminação por hidrocarbonetos (óleo diesel).

Para comprovar a hipótese de biodegradação (Sauck, 1999), sob as regiões de anomalias condutivas identificadas nas áreas de abastecimento e dos tanques, serão realizadas sondagens a trado para a retirada de amostras, visando uma análise química para confirmar a existência ou não de produto derivado de origem orgânica, e checar a presença ou não de bactérias.

A integração dos resultados das sondagens a trado com as anomalias geofísicas (GPR e Eletrorresistividade) será fundamental para uma melhor caracterização geofísica e delimitação da pluma de contaminação na área de estudos. Os resultados servirão de guia para os futuros trabalhos de recuperação da área degradada.

Referências

- Castro, D.L. & Branco, R.M.G.C., 2003. 4D ground penetrating radar monitoring of a hydrocarbon leakage site in Fortaleza (Brazil) during its remediation process: a case history. *Journal of Applied Geophysics*, vol. 54, p. 127-144.
- Daniels, D.J., 1996. *Surface Penetrating Radar*. The Institution of Electrical Engineers, London, United Kingdom, 300 p.

Davis, J.L. & Annan, A.P., 1989. Ground penetrating radar for high resolution mapping of soil and rock stratigraphy. *Geophysical Prospecting*, vol. 37, p. 531-551.

Knight, R., 2001. Ground Penetrating Radar for Environmental Applications. *Annual Review Earth Planetary Science*, vol. 29, p. 229-255.

Krüger, M. M., 2002. Monitoramento de áreas contaminadas por hidrocarbonetos "Exemplo de uma área urbana em Curitiba – PR". Dissertação de Mestrado, Setor de Ciências da Terra, UFPR. 145 p.

Loke, M.H., 1998. RES2Dinv ver. 3.3. for Windows 3.1 and 95– Rapid 2D resistivity and IP inversion using the least-squares method. *Geotomo Software User's Manual*, Penang, Malaysia, 35p.

Loke, M.H., & Dahlin, T., 2001. A comparison of the Gauss-Newton and quasi-Newton methods in resistivity imaging inversion. *Journal of Applied Geophysics*, Vol. 49, p. 149-162.

Porsani, J.L., 1999. Ground Penetrating Radar (GPR): Proposta metodológica de emprego em estudos geológico-geotécnicos nas regiões de Rio Claro e Descalvado – SP. Tese de Doutorado, Instituto de Geociências e Ciências Exatas, UNESP, Campus de Rio Claro - SP, 145 p.

Reynolds, J.M. 1997. An Introduction to Applied and Environmental Geophysics. John Wiley & Sons, New York, NY, USA, 796 p.

Sauck, W.A.; Atekwana, E.A. and Nash, M.S., 1998a. High conductivities associated with LNAPL plume imaged by integrated geophysical techniques. *Journal of Environmental and Engineering Geophysics*, vol. 2, no. 3, p. 203-212.

Sauck, W.A.; Atekwana, E.A. and Werkema, D.D., 1998b. Investigations of geoelectrical at a hydrocarbon contaminated site. *Journal of applied Geophysics*, vol. 44, p. 167-180.

Sauck, W.A., 1999. A model for the resistivity structure of LNAPL plumes and their environs in sandy sediments. *Journal of applied Geophysics*, vol. 44, p. 151-165.

Werkema, Jr., D.D.; Atekwana, E.; Sauck, E.; Rossbach, S. and Duris, J., 2000. Vertical distribution of microbial abundances and apparent resistivity at LNAPL spill site. *Proceedings of the Symposium on the Application of Geophysics to Engineering and Environmental Problems (SAGGEP' 2000)*, vol. 2, p. 597-608.

Agradecimentos

À IDS-RADAR pelo fundamental apoio e infra-estrutura. Ao Departamento de Geofísica do IAG-USP pela oportunidade de realizar esta pesquisa.

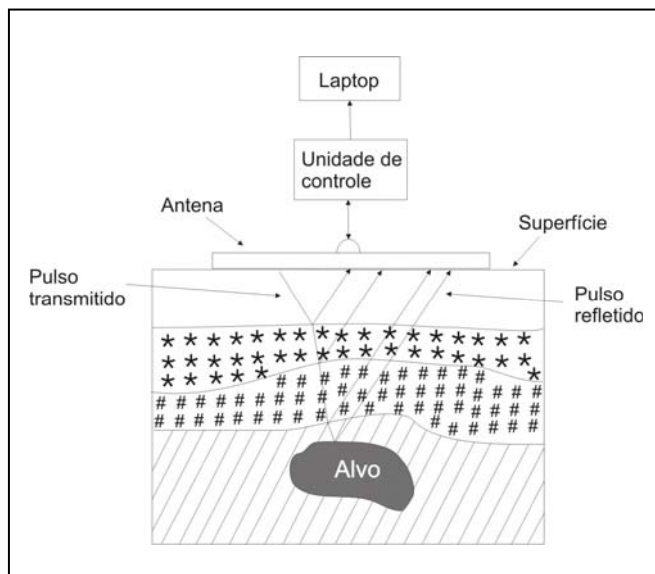


Figura 1. Princípio de funcionamento do GPR.



Figura 2. Área de abastecimento de locomotivas.

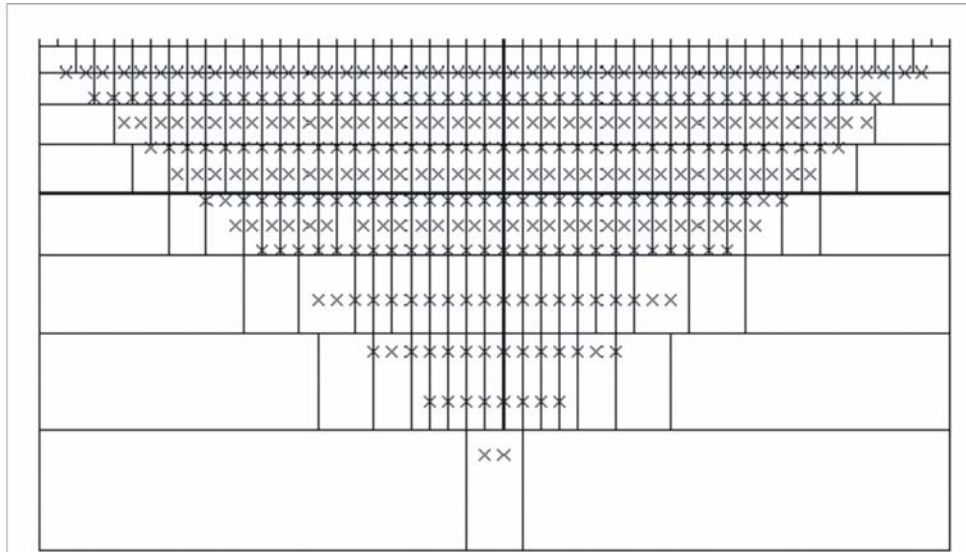


Figura 3. Modelo de blocos de resistividade aparente (quadrados) criado a partir dos dados medidos (x).

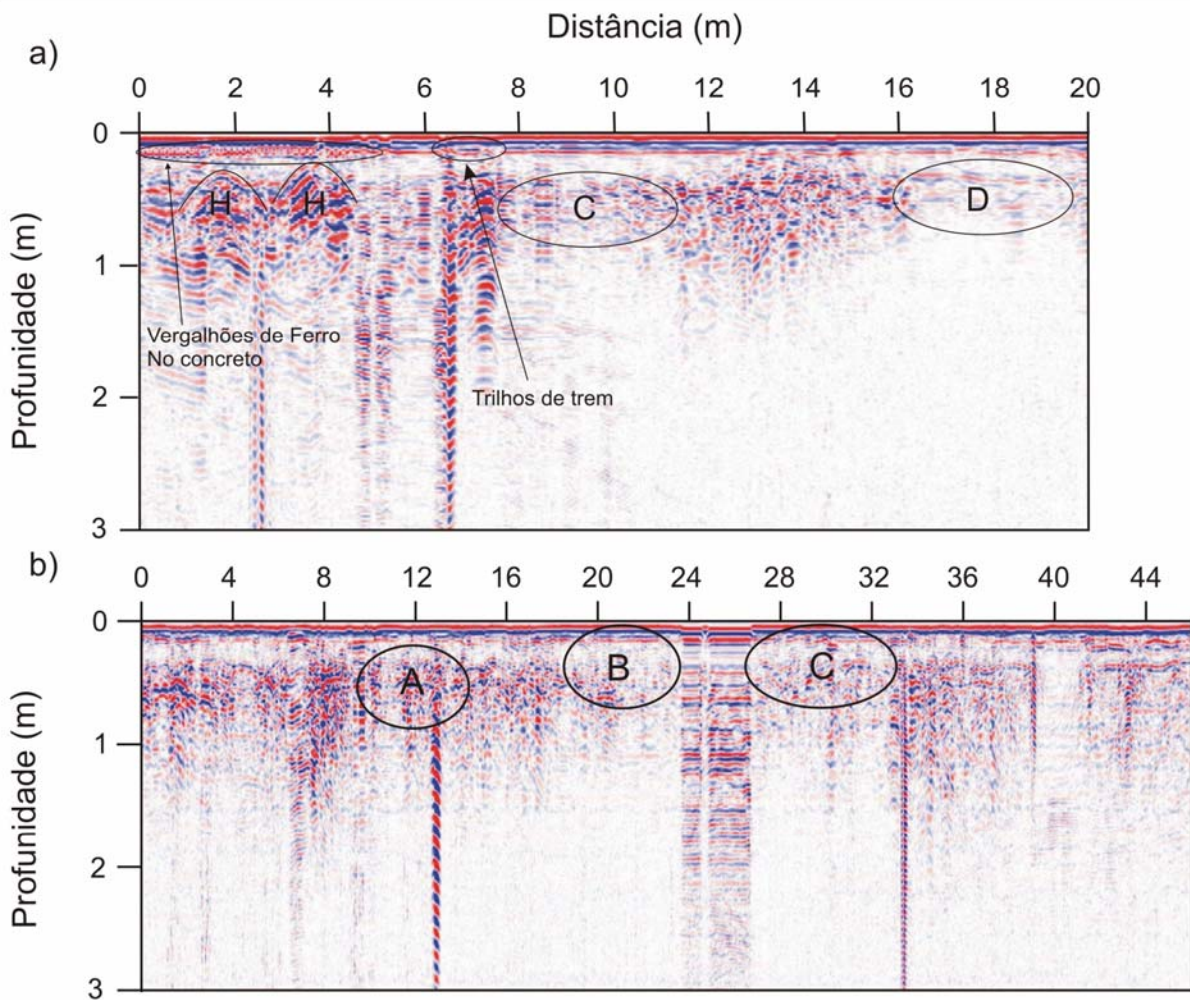


Figura 4. Perfis GPR de 600 MHz na região dos tanques de abastecimento, mostrando: a) tubulações metálicas, vergalhões de ferro no concreto, trilho de trem e zonas de contaminação, e b) três zonas de contaminação A, B e C.

