



Estudo GPR 4D de um Derrame de Óleo Isolante em Laboratório: Resultados

Preliminares

Luciana Bertolla ¹, Jorge Luís Porsani ²

¹ Pós-Graduação em Geofísica (IAG/USP). E-mail: bertolla@iag.usp.br

² Universidade de São Paulo. Departamento de Geofísica (IAG/USP). E-mail: porsani@iag.usp.br

Copyright 2011, SBGf - Sociedade Brasileira de Geofísica

This paper was prepared for presentation during the 12th International Congress of the Brazilian Geophysical Society held in Rio de Janeiro, Brazil, August 15-18, 2011.

Contents of this paper were reviewed by the Technical Committee of the 12th 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

In this article, GPR-4D results are shown for a controlled oil spill in laboratory. The objectives of this research were to analyze the performance and limitations of the GPR method to map contamination plumes and to monitor the migration of oil in time, during the controlled studies in laboratory. The studies simulated an oil spill highly polluting usually used in Transmission and Distribution Stations of Electric Energy. Two experiments were done: 1st) 15 liters of insulating oil were spilled on a masonry tank containing dry sandy soil and 2nd) 15 liters of insulating oil were spilled on a tank containing sandy soil saturated with water. 400MHz GPR profiles results showed that the contamination plume could be detected after 5 days of the oil spill for the 2nd experiment. The results were complemented with numerical simulations, which permit to give more confidence in interpreting of the results. Although preliminary, the results showed that the GPR method has a great potential for applications in environmental studies.

Introdução

Atualmente, o problema de contaminação do meio ambiente está preocupando os geocientistas do mundo todo. A disposição inadequada de resíduos sólidos ou o vazamento de derivados de hidrocarbonetos coloca em risco os recursos hídricos subterrâneos, o que tem gerado uma crescente demanda de pesquisas aplicadas à área de meio ambiente. As investigações não-invasivas e não-destrutivas têm atraído o interesse do mercado devido aos baixos custos e à rapidez na execução dos trabalhos. Seguindo essa tendência, torna-se cada vez mais freqüente a utilização de métodos geofísicos, tais como o método GPR - *Ground Penetrating Radar* visando estudos de contaminação do meio ambiente.

Muitos trabalhos de GPR têm sido realizados nos estudos de plumas de contaminação, porém o seu emprego para estudos ambientais em Estações de Transmissão e Distribuição - ETD's de energia elétrica é uma área ainda inexplorada, conforme constatado pela carência de publi-

cações científicas na literatura. Dentre os estudos realizados com o uso do GPR para fins de análise ambiental podem ser destacados os trabalhos de Sauck et al., (1998a, 1998b), Sauck (2000), Knight (2001), Castro & Branco (2003), Cassidy (2007), Oliveira et al. (2007), dentre outros.

O monitoramento ambiental das ETD's de energia elétrica é uma recente exigência da ANEEL - Agência Nacional de Energia Elétrica. O objetivo desse monitoramento é prevenir e remediar o vazamento de óleo dos transformadores para o subsolo o que provocaria a contaminação dos lençóis de água subterrânea e do meio ambiente nas proximidades das ETD's na qual colocaria em risco a vida das pessoas, da fauna e da flora da região. De acordo com a concessionária Bandeirante S.A., no Estado de São Paulo existem cerca de 60 ETD's, sendo que 13 delas possuem histórico de contaminação por vazamento de óleo isolante conhecido como óleo linear alquibenzeno ou óleo dodecilbenzeno, utilizado nos transformadores. Este mesmo óleo também é utilizado em cabos elétricos de alta tensão e é composto por uma mistura de derivados de hidrocarbonetos e óleos minerais com alto potencial de contaminação (Oliveira et al., 2007). Os vazamentos podem ser provocados durante o processo de troca do óleo dos transformadores ou por más condições de uso dos mesmos, causando o gotejamento do óleo ao longo de vários anos.

O monitoramento em laboratório de uma pluma de contaminação pode ajudar na avaliação de casos reais de contaminação ambiental. Uma vez que se tem o conhecimento do tipo de resposta obtida pelo método GPR na detecção da pluma e de seu comportamento em solos conhecidos é possível estimar a gravidade da contaminação, a extensão da pluma, os riscos que ela pode apresentar aos recursos hídricos locais. Neste sentido, através de uma análise integrada com dados geológicos, geofísicos e geoquímicos, poderá auxiliar no planejamento de medidas de remediação.

Os estudos consistiram em realizar medidas GPR em um tanque de medição de alvenaria, visando detectar a pluma contaminante e avaliar a migração desse óleo com o tempo. O tanque de medição para os estudos está localizado no laboratório do IEE - Instituto de Eletrotécnica e Energia na USP. Para os estudos do derrame de óleo, o tanque foi impermeabilizado e preenchido com solos típicos de ETD's. Dois experimentos foram realizados: no primeiro experimento o tanque estava preenchido com solo arenoso seco e no segundo com solo arenoso saturado em água.

Para a aquisição dos dados foi utilizada uma antena blindada de 400 MHz em uma situação controlada de laboratório, com solos e alvos conhecidos. Estudos de modelagem numérica 2D do derrame controlado de óleo também foi realizado, visando auxiliar identificação padrões de reflexão GPR para a pluma de contaminação e sua migração com o tempo. Esta pesquisa tem como objetivo avaliar se o método GPR é capaz de detectar óleo isolante no subsolo, através da simulação de um vazamento real em um solo arenoso seco e um solo arenoso saturado em água. Os trabalhos estão em desenvolvimento, e os resultados serão importantes para auxiliar nas futuras aplicações do GPR em estudos ambientais, por exemplo, no mapeamento de plumas de contaminação proveniente do derrame de óleo e no mapeamento de cabos elétricos no subsolo, tipicamente encontrados nas ETD's.

Aquisição, processamento e modelagem dos dados

A aquisição dos dados se deu em um tanque de alvenaria onde se simulou um derrame real de óleo, a fim de efetuar um monitoramento nas mudanças das propriedades físicas em função do tempo.

As dimensões do tanque foram: de 3m na direção X, 2m na direção Y e 1,4m na direção Z, e o local de derrame do óleo tem um tubo de PVC de diâmetro 0,3m e 0,24m de profundidade, sendo localizado 2m na direção X e 1m na direção Y onde foram derramados 15 litros de um óleo isolante cuja permissividade dielétrica relativa é de 2,25. A Fig. 1 mostra um croqui do tanque de medição.

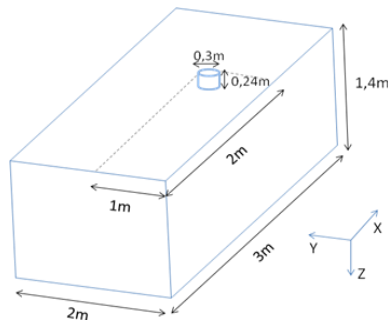


Fig. 1. Croqui do tanque de medição.

A obtenção dos dados foi feita em duas fases: a primeira contendo areia seca e a segunda fase contendo areia saturada em água. Na primeira fase foram colocados dois tubos guias, um na direção X com 0,8m de profundidade e na direção Y com 0,4m de profundidade, conforme mostrado na Fig. 2. Os dados foram obtidos em um período total de 21hs, sendo as duas primeiras horas realizadas medidas a cada 10 min. e uma medida após 21hs do derrame.

Na segunda fase foi colocado um tubo guia na direção Y com 0,4m de profundidade e também foi introduzido um fluxo de água em 0,9m de profundidade a fim de simular um lençol freático. As medições foram realizadas em um período total de 288hs (12dias), sendo as duas primeiras horas realizadas medidas a cada 10 min. e as seguintes medidas realizadas 48, 71, 120, 216 e 288hs após o derrame.

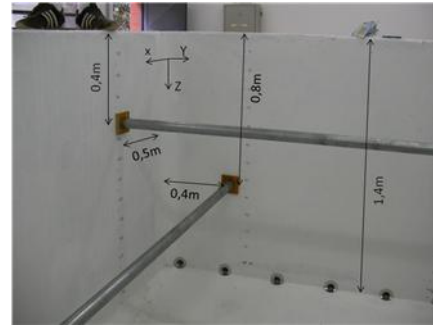


Fig. 2. Imagem dos dois canos guias presentes dentro do tanque de alvenaria na fase 1.

Para aquisição dos dados foi utilizada uma antena GPR de 400 MHz modelo SIR-3000 da empresa americana GSSI, acoplada a um trenó que se deslocava sobre um trilho guia de madeira, a fim de manter a repetibilidade dos dados. A Fig. 3 mostra a antena de 400MHz sobre o trilho de madeira, bem como o tanque contendo areia, e o tubo de PVC usado para o derrame de óleo.

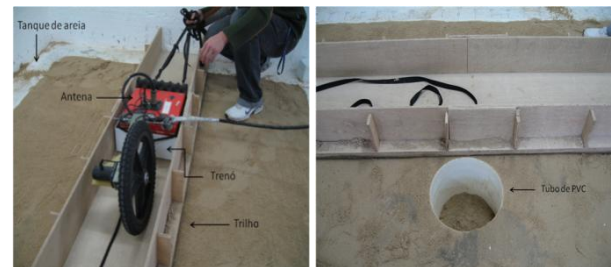


Fig. 3. (Esquerda) antena de 400MHz durante a aquisição dos dados. (Direita) tubo de PVC usado para o derrame de óleo.

O processamento dos dados foi feito utilizando-se o software Reflexw. As principais etapas usadas foram: correção do tempo zero, filtro de frequência passa banda, ganho exponencial variando com o tempo, remoção do *background* e conversão tempo/profundidade. A correção do tempo zero ajusta os traços à chegada da primeira onda (aérea). O filtro de frequência passa-banda possibilita a redução de ruídos de baixa e de alta frequência. Depois da passagem de filtro, o sinal foi amplificado com um ganho exponencial para compensar as perdas por atenuação. A remoção do *background* permite a exclusão de camadas horizontais. Para a conversão tempo em profundidade foi usada a velocidade de 0,173m/ns e 0,113m/ns nas fases 1 e 2 respectivamente. Neste trabalho são apresentados os resultados parciais mais significativos da pesquisa.

Para identificação do padrão de reflexão para a pluma de contaminação e sua migração com o tempo foi realizada a modelagem numérica 2D, utilizando o método numérico de Diferenças Finitas no Domínio do Tempo (FDTD). O método FDTD baseia-se na implementação de códigos matemáticos através de sucessivas aproximações numéricas, substituindo as equações diferenciais por diferenças finitas (Yee,1966). Desse modo as equações algébricas resolvem as equações de Maxwell. O modelo é discretizado em uma grade composta por um conjunto finito de pontos representada

por uma rede de nós, sendo que cada nó representa um vetor de campo com propriedades elétricas e magnéticas.

Para cada fase foram feitos 4 modelos, cada um apresentando posições intermediárias da pluma de óleo. No modelo foram definidos os valores das propriedades físicas: condutividade elétrica (σ), permissividade dielétrica (ϵ) e permeabilidade magnética (μ). Sendo os valores definidos de acordo com a literatura (Hammon *et al.*, 2000; Davis & Annan, 1989). Para a realização da modelagem foi utilizada uma frequência de 400MHz com fonte de onda plana.

Discussão dos resultados

Na fase 1 foram realizadas medidas até 21hs após o derrame de óleo por se tratar de um meio arenoso seco onde os poros intersticiais dos grãos não estão preenchidos com água, fazendo com que a migração do óleo até a base do tanque seja feita em um período menor do que quando comparado com a fase 2 em que os poros intersticiais estão saturados em água diminuindo a velocidade da migração e com isso elevando o tempo para a pluma de óleo encontrar o fundo do tanque.

A Fig. 4 mostra os resultados obtidos na fase 1, incluindo os dados reais (Fig. 4a) e as modelagens numéricas (Fig. 4b). Duas hipérbolas são identificadas, sendo a hipérbole localizada do lado esquerdo do perfil referente ao cano guia e a localizada do lado direito referente ao tubo de PVC, onde ocorreu o derrame de óleo, e um nítido refletor horizontal em 1,4m de profundidade que corresponde à base do tanque.

Note que não foi possível determinar a pluma de contaminação nos dados reais, o que provavelmente está relacionado ao baixo contraste entre as propriedades físicas do meio (areia seca, cte dielétrica = 3) e o óleo contaminante (cte dielétrica = 2,25). Os resultados da modelagem indicam que esta é uma importante ferramenta e que precisa ainda ser melhor estudada, visando corroborar com a interpretação dos dados reais.

A Fig. 5 mostra os resultados obtidos na fase 2, incluindo os dados reais (Fig. 5a) e as modelagem numéricas (Fig. 5b). As duas hipérbolas observadas correspondem ao cano guia e ao tubo de PVC, os dois refletores horizontais no dado real correspondem ao nível do fluxo de água (~0,9m) e a base do tanque (~1,4m), enquanto que no dado modelado observa-se somente o refletor que corresponde ao fluxo de água em ~0,9m.

Note que a partir de 120hs (5 dias) após o derrame de óleo observa-se uma nítida zona de sombra, i.e., zona com ausência de reflexão GPR relacionada com a migração do óleo contaminante. Este contraste foi maior na fase 2 devido a presença da água nos poros da areia, permitindo aumentar o contraste entre as propriedades físicas do meio (areia saturada e óleo), neste caso, facilitando o mapeamento da pluma. Este resultado também foi observado na modelagem, dando confiabilidade na interpretação.

Conclusões parciais

Na fase 1 não foi possível determinar a pluma de contaminação nos dados reais, o que deve-se ao baixo contraste das propriedades físicas entre o meio arenoso

seco e o óleo contaminante isolante. Por outro lado, na fase 2 foi possível determinar uma zona de sombra GPR a partir de 5 dias após o derrame de óleo, o que foi associado à pluma contaminante. Este fato foi devido ao maior contraste entre as propriedades físicas da areia saturada em água e o óleo isolante. Este resultado apresentou uma boa concordância com as simulações numéricas. Os resultados, embora preliminares, sugerem que o método GPR torna-se mais eficaz para a determinação da pluma de contaminação por óleo isolante se o terreno estiver saturado em água. Entretanto, este assunto precisa de mais estudos.

Agradecimentos

LB agradece a CAPES pela bolsa de Mestrado. JLP agradece ao CNPq pela bolsa de pesquisa (Processo 304415/2009-0). Ao IAG e IEE pela infra-estrutura para desenvolver as pesquisas. Aos pesquisadores Allan, Emerson e Cassiano e aos técnicos Ernande e Marcelo pela ajuda na aquisição e processamento dos dados.

Referências

- Cassidy, N.J., 2007. Evaluating LNAPL contamination using GPR signal attenuation analysis and dielectric property measurements: Practical implications for hydrological studies. *Journal of Contaminant Hydrology* 94, 49-75.
- Castro, D.L., Branco, R.M.G.C., 2003. 4D ground penetrating radar monitoring of a hydrocarbon leakage in Fortaleza (Brazil) during its remediation process: a case history. *Journal of Applied Geophysics* 54, 127-144.
- Davis, J.L. & Annan, A.P., 1989. Ground penetrating radar for high resolution mapping of soil and rock stratigraphy. *Geophysical Prospecting*, Vol.37, p531-551
- Hammon Iii, W.S., Mcmechan, G.A. & Zeng, X., 2000. Forensic GPR: finite-difference simulations of responses from buried human remains. *Journal of Applied Geophysics*, Vol. 45, p171-186.
- Knight, R., 2001. Ground Penetrating Radar for Environmental Applications. *Annual Review Earth Planetary Science* 29, 229-255.
- Oliveira, M.G., Porsani, J.L., Grimoni, J.A.B., 2007. Simulações numéricas GPR 2D para caracterizar vazamentos de óleo provenientes de cabos elétricos de alta tensão instalados no subsolo. 10th International Congress of the Brazilian Geophysical Society, Rio de Janeiro, cdrom.
- Sauck, W.A., Atekwana, E.A. & Nash, M.S., 1998a. High conductivities associated with LNAPL plume imaged by integrated geophysical techniques. *Journal of Environmental and Engineering Geophysics* 2(3), 203-212.
- Sauck, W.A., Atekwana, E.A. & Werkema, D.D., 1998b. Investigations of geoelectrical at a hydrocarbon contaminated site. *Journal of applied Geophysics* 44, 167-180.
- Sauck, W. A., 2000. A model for resistivity structure of LNAPL plumes and their environs in sandy sediments. *Journal of Applied Geophysics* 44, 151-165.
- Yee, K. S., 1996. Numerical solution of initial boundary value problems involving Maxwell's equations in isotropic media IEEETrans. *Antennas and Propagation*, vol. Ap-4, n.3,302-307.

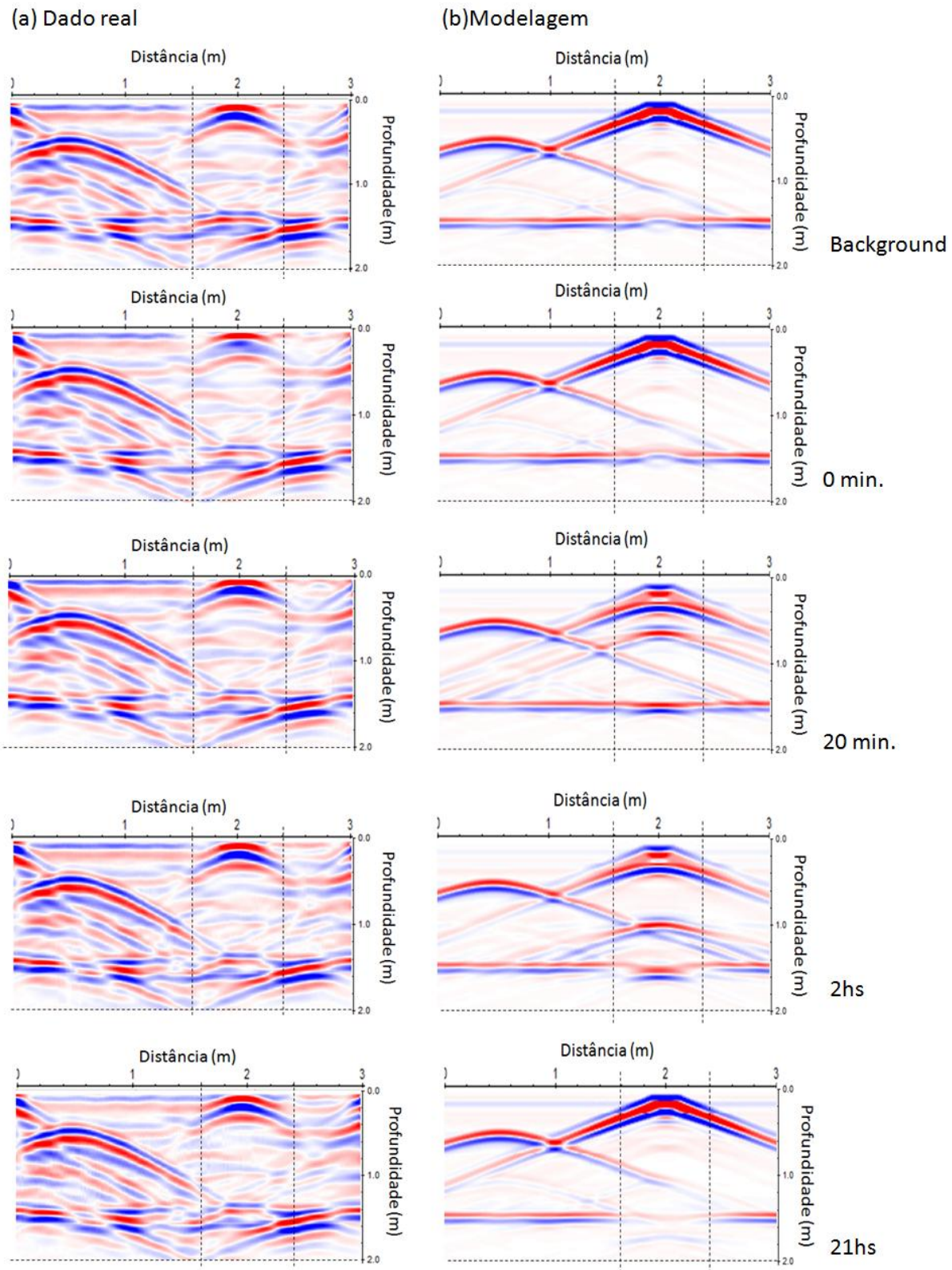
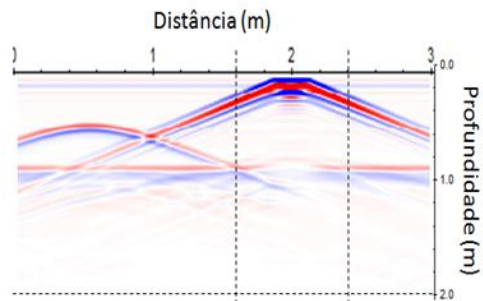
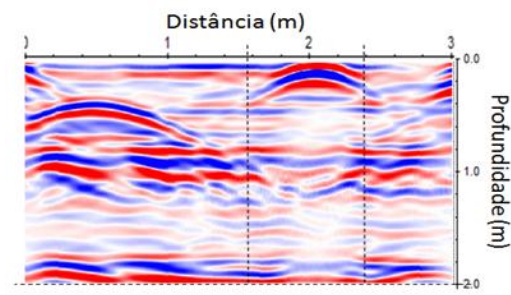


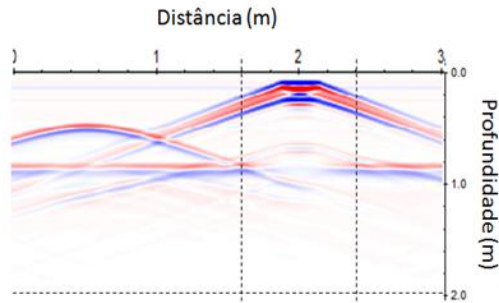
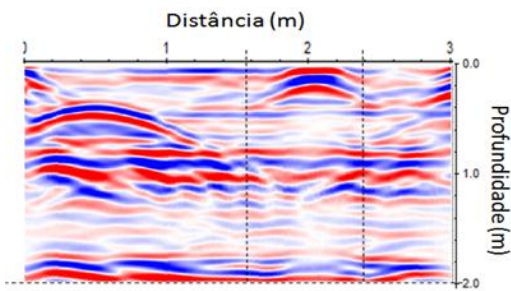
Fig. 4. Resultados da fase 1. a) Perfis GPR reais. b) Modelagem GPR.

(a) Dado Real

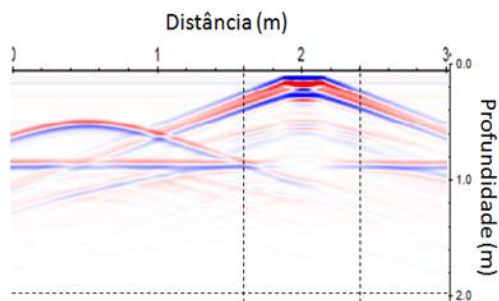
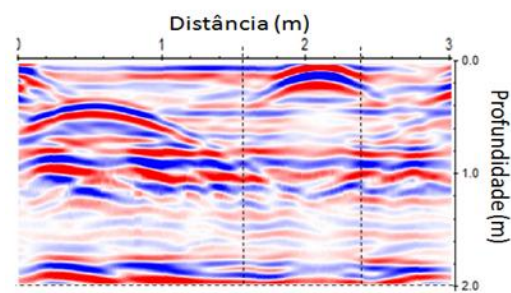
(b) Modelagem



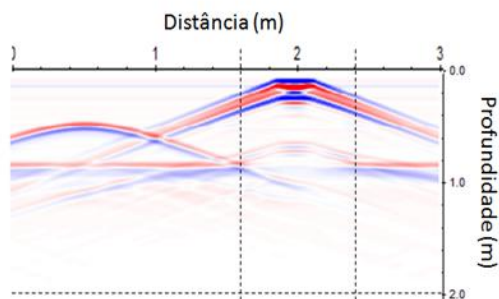
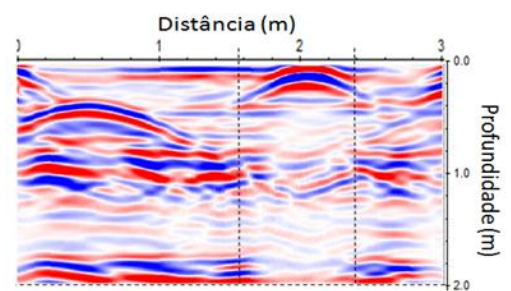
Background



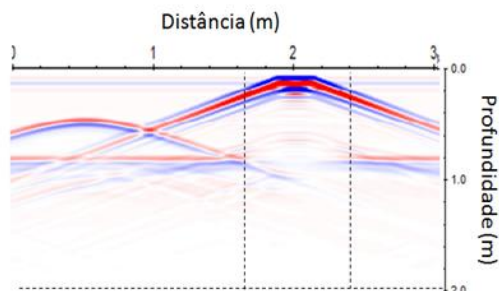
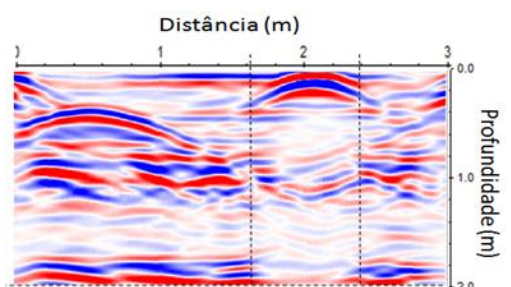
0 min.



2 hs



12hs (5dias)



288hs (120dias)

Fig. 5. Resultados da fase 2. a) Perfis GPR reais. b) Modelagem GPR.