



Simulações GPR 2D para caracterizar tambores plásticos a serem enterrados no sítio controlado do IAG-USP: resultados preliminares

* Selma Isabel Rodrigues¹ & Jorge Luís Porsani¹

¹ Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas (IAG-USP), Emails: selma@iag.usp.br & porsani@iag.usp.br

Copyright 2003, SBGF - Sociedade Brasileira de Geofísica

This paper was prepared for presentation at the 8th International Congress of The Brazilian Geophysical Society held in Rio de Janeiro, Brazil, 14-18 September 2003.

Contents of this paper were reviewed by The Technical Committee of The 8th International Congress of The Brazilian Geophysical Society and does 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

Numerical GPR simulations based in finite difference were done aiming to characterize PVC drums that will be buried in the Controlled Test Site of IAG-USP. The results for several drums configurations, which are filled with air, fresh water, half air/half salt water and salt water, reveal the potential for noninvasive diagnostic evaluations. The results showed a GPR typical reflection patterns and are an encouragement to continuity of the researches.

Introdução e Objetivos

Os estudos de modelagens sintéticas normalmente são realizados a partir de simulações numéricas computacionais do problema a ser investigado. Esses estudos são de grande importância para preverem os resultados a serem obtidos numa situação real de campo e também servem para caracterizar e comprovar a presença de estruturas ou alvos em subsuperfície.

Os principais métodos numéricos, normalmente utilizados em estudos de modelagem sintética aplicada aos problemas geofísicos, são: diferenças finitas, elementos finitos, equações integrais, etc (Ward & Hohmann, 1987). Neste artigo, as simulações 2D dos sinais GPR foram realizadas com antenas dipolares de 100 e 200MHz, visando caracterizar tambores plásticos contendo diferentes líquidos a serem enterrados no sítio controlado de geofísica rasa do IAG-USP (Porsani, 2002). Para alcançar estes objetivos, foi utilizado o software REFLEXW, o qual faz uso do método das diferenças finitas (Sandmeier, 1999).

As simulações GPR 2D correspondem a uma parte do projeto de pesquisa de mestrado intitulado "Caracterização GPR de tambores metálicos e plásticos rasos: estudo sobre o sítio controlado do IAG-USP" (Rodrigues, 2002). Esta pesquisa visa imagear os alvos, a serem enterrados a diferentes profundidades, através da utilização do método GPR-Ground Penetrating Radar. Os estudos serão conduzidos na área conhecida como "Sítio controlado de geofísica rasa do IAG-USP" que está sendo instalado no terreno do Instituto de Física no campus da Universidade de São Paulo – USP (Porsani, 2002). A análise conjunta das simulações GPR, da comparação entre as profundidades conhecidas dos

alvos a serem enterrados e as respostas dos perfis GPR, permitirão quantificar a margem de erros relacionada com a estimativa das geometrias e profundidades dos alvos, e assim avaliar o desempenho do método GPR em ambiente urbano, sob condições controladas de campo.

Para alcançar a meta proposta (Rodrigues, 2002), os dados GPR serão adquiridos "antes" e "depois" da instalação dos alvos em subsuperfície. Atualmente, os trabalhos de campo estão em andamento e, portanto, não serão apresentados neste artigo. É provável que alguns resultados reais tenham sido alcançados até a realização deste congresso. Caso isso se confirme, esperamos apresentá-los quando da realização do 8CISBGf-Rio 2003.

Neste artigo apresentaremos os resultados obtidos da modelagem GPR de tambores plásticos contendo líquidos com diferentes condutividades elétricas. Este estudo visa simular uma situação real do dia-a-dia, na qual diversos produtos contaminantes (resistivos ou condutivos) poderiam estar armazenados dentro de tambores plásticos em subsuperfície. Com esta finalidade, dois modelos sintéticos foram gerados. No primeiro modelo, procurou-se buscar padrões de reflexões GPR típicas para os quatro tambores colocados lado a lado, preenchidos com líquidos com diferentes propriedades elétricas, estando enterrados a uma mesma profundidade. No segundo modelo, os quatro tambores foram colocados em profundidades diferentes, visando simular a situação a ser instalada de fato no sítio controlado de geofísica rasa do IAG-USP.

Os resultados obtidos são um estímulo para a continuidade das pesquisas, e nos fornece elementos importantes com relação aos padrões de reflexão típica do GPR, nos proporcionando critérios para discernir os tambores plásticos vazios daqueles preenchidos, parcial ou totalmente, com diferentes líquidos.

Metodologia

O GPR é um método geofísico não destrutivo, de alta resolução, que permite obter uma imagem da subsuperfície rasa da Terra, utilizando reflexões de ondas eletromagnéticas em altas frequências (normalmente entre 10 - 1000MHz). Uma antena transmissora emite um pulso eletromagnético para dentro da Terra. Havendo contrastes nas propriedades elétricas em subsuperfície, parte do sinal é refletido, sendo recebido por uma antena receptora. Mais informações sobre a metodologia podem ser encontradas na literatura (Daniels, 1996; Porsani, 1999), dentre outras.

Neste artigo, a simulação da propagação da onda eletromagnética num modelo de camadas 2D é baseada na solução das equações de Maxwell através do método

das diferenças finitas (Sandmeier, 1999). Para as simulações dos perfis GPR foram usadas antenas dipolares de 100 e 200MHz, e polarização do campo elétrico-Ey. Normalmente, a componente Ey das antenas são posicionadas perpendiculares à direção do perfil, visando obter o máximo acoplamento entre os sinais transmitidos e recebidos (Porsani, 1999). Neste experimento o campo de ondas gerado foi simulado aplicando-se o conceito de refletor explosivo (“*exploding reflector*”), no qual as ondas são geradas simultaneamente a partir do refletor e enviadas para a superfície (Yilmaz, 1987). Este procedimento foi escolhido visando simular um perfil GPR *zero-offset* devido ao pequeno espaçamento entre as antenas transmissora e receptora. Por outro lado, sabemos que neste procedimento a onda eletromagnética tem apenas o tempo de ida e que, na realidade, no procedimento usado na aquisição GPR a onda tem um tempo duplo. Para que o tempo de ida simule um valor equivalente ao tempo duplo, a velocidade do meio é dividida por dois ($v/2$) na modelagem.

Uma vantagem de se utilizar este tipo de fonte é que a parte cinemática das reflexões primárias (i.e., a curvatura das hipérbolas dos tambores de plásticos) é corrigida, colapsando a energia para o ápice da hipérbole, sendo um procedimento comum na etapa de migração dos dados sísmicos e GPR. Uma outra vantagem é que o uso de uma fonte do tipo refletor explosivo não gera efeito de borda do modelo simulado, o qual é comum quando se usa uma fonte do tipo onda plana (Sandmeier, 1999).

Para obter o resultado das simulações GPR foi elaborado um modelo da camada contendo os alvos. As janelas de tempo foram determinadas a partir das frequências de 100 e 200MHz utilizadas nas simulações. Nestas modelagens, utilizamos um intervalo entre cada traço de 0.05m e o incremento no tempo foi de 0,0943ns.

Estudos Teóricos

Para iniciarmos as simulações, foram gerados dois modelos de camadas 2D, cada um contendo uma camada de solo, sendo caracterizado como o “background”. Nesta camada inserimos os tambores plásticos verticais simbolizados por retângulos (altura de 1,2m e diâmetro de 0,8m).

O primeiro modelo a ser estudado corresponde a uma linha de 30m de comprimento sendo que o topo dos alvos está situado a 0,5m de profundidade. Esta linha é caracterizada por quatro tambores plásticos verticais, equidistantes horizontalmente. A Tabela 1 mostra os diferentes conteúdos dentro dos tambores.

No. Tambor	Conteúdo	Porcentagem dos fluidos
1	Ar	100%
2	Água fresca	100%
3	Ar / Água salgada	50%
4	Água Salgada	100%

Tabela 1. Porcentagem dos conteúdos de cada tambor.

O segundo modelo estudado correspondente a uma das linhas que será instalada no sítio controlado do IAG. Nesta linha, foram dispostos oito tambores plásticos verticais ao longo de 30m de comprimento, sendo que um conjunto de quatro tambores foi colocado a 0,5m e o outro conjunto a 1m de profundidade em relação ao seu topo. Os conteúdos dos tambores são os mesmos apresentados na Tabela 1.

Para caracterizar os tambores plásticos com diferentes conteúdos, é preciso recorrer às propriedades elétricas dos materiais utilizados nos modelos. A Tabela 2 resume as propriedades elétricas dos materiais utilizados nas simulações GPR 2D, onde ϵ_r é a permissividade dielétrica relativa, σ é a condutividade em S/m e μ_r é a permeabilidade magnética relativa.

Material	ϵ_r	σ (S/m)	μ_r
Solo argiloso (<i>background</i>)	10	10^{-22}	1
Plástico	8	0	1
Ar	1	0	1
Água fresca	81	5×10^{-4}	1
Água salgada	81	3	1

Tabela 2. Propriedades elétricas dos materiais utilizados nas simulações GPR 2D.

Os modelos teóricos, tambores plásticos a serem enterrados com os diferentes conteúdos, foram idealizados visando simular estudos de contaminação em ambiente urbano. Cada tambor pode apresentar mais de um significado real, por exemplo:

1. Tambor plástico vazio – pode estar relacionado com um contaminante bastante resistivo, por exemplo, benzeno, DNAPL;
2. Tambor plástico preenchido com água salgada – pode estar relacionado com um contaminante bastante condutivo, por exemplo, resíduos químicos;
3. Tambor plástico preenchido com água fresca – pode estar relacionado com a água proveniente de reatores nucleares.

Discussão e Interpretação das Simulações

Os resultados das simulações GPR 2D para caracterizar os tambores plásticos preenchidos com diferentes conteúdos são apresentados a seguir. Na Figura 1a, o modelo sintético mostra os 4 tambores plásticos, igualmente espaçados, colocados à profundidade de 0,5m e caracterizados por diferentes conteúdos (ver Tabela 1). As Figuras 1b e 1c mostram os resultados das simulações obtidas com as antenas de 200 e 100 MHz, respectivamente.

No tambor 1, observa-se claramente um refletor hiperbólico (Figura 1b e 1c), interpretado como topo (interface solo argiloso/ar). A comprovação é feita pelo cálculo do tempo de percurso para o primeiro refletor hiperbólico ($T = 10,52$ ns). A base deste tambor não é

claramente identificada, pois o tempo de percurso para a reflexão da onda eletromagnética na sua base é de 18ns. Observe que existe uma sobreposição do 1º refletor (topo) com o 2º refletor (base), sendo de difícil distinção. Para comprovar a nossa análise, foi realizada a modelagem (não apresentada neste artigo) de um tanque vazio (com ar) com diâmetro de 3m e a 1m de profundidade. Os resultados mostraram claramente o topo e a base do tanque semelhante aos resultados obtidos por Zeng & McMechan (1997). Segundo esses autores, resultados de modelagens para tanques vazios com diferentes diâmetros tornam-se difíceis à caracterização de topo e base, quando os diâmetros são menores que 1,5m.

No tambor 2, na qual está preenchido com água fresca, observam-se claramente 2 fortes refletores hiperbólicos referentes ao topo ($T = 10,52\text{ns}$) e à base ($T = 83,24\text{ns}$) e com polaridades invertidas em relação ao tambor vazio (Figuras 1b e 1c). Com as antenas de 200 MHz (Figura 1b), o refletor correspondente à base não é claramente identificado, devido à atenuação da onda. Para comprovar que o segundo refletor (Figura 1c) era realmente devido à sua base e não devido a um “artefato” gerado pela interferência dos refletores vizinhos (tambores 1 e 3), foi simulado apenas um tambor preenchido com água fresca (Figura 2). As Figuras 2a e 2b mostram os resultados obtidos, confirmando, portanto, que o segundo refletor hiperbólico é devido à base do tambor com água. O atraso no tempo de reflexão na base do tambor preenchido com água fresca é devido à baixa velocidade do GPR na água.

No tambor 3, a identificação do topo da interface solo argiloso/ar é claramente identificada (Figuras 1b e 1c). Entretanto, a identificação do topo da água salgada não é clara, pelas mesmas razões explicadas anteriormente para a base do tambor com ar. Observa-se, neste caso, uma maior intensidade na amplitude do sinal, devido à alta condutividade da água salgada.

No tambor 4, na qual está cheio de água salgada, observa-se somente um forte refletor hiperbólico correspondente ao topo do tambor (Figuras 1b e 1c). Devido à alta constante dielétrica e elevada condutividade, a polaridade da reflexão do topo é invertida e a reflexão na sua base não pode ser vista devido à atenuação da onda eletromagnética.

Nas modelagens realizadas, notamos que quanto maior a frequência da antena maior a quantidade de múltiplas geradas. Este fato é devido ao menor comprimento de onda, além disso, corresponde a uma das desvantagens do uso da fonte “*exploding reflector*” quando há fortes contrastes nas propriedades físicas (Sandmeier, 1999).

Na Figura 3a, dois conjuntos de tambores estão colocados às profundidades de 0,5 e 1m, e visam simular a situação real a ser instalada no sítio controlado do IAG. Os resultados obtidos (Figuras 3b e 3c) mostraram que os tambores plásticos (vazio, cheio de água fresca, parcialmente preenchido com água salgada e cheio de água salgada) poderão ser caracterizados utilizando o método GPR.

Conclusões

As respostas das simulações numéricas de vários tanques plásticos com conteúdos e profundidades diferentes, baseada no método das diferenças finitas, revelaram o potencial de utilização do GPR como sendo um método não invasivo aplicado à caracterização do meio ambiente. Os estudos mostraram que os tambores plásticos a serem enterrados no “Sítio Controlado de Geofísica Rasa do IAG-USP” serão caracterizados com o método GPR, e servem como um ponto de partida para a escolha adequada das antenas apropriadas para a caracterização dos alvos. Os excelentes resultados preliminares obtidos servem de estímulos para a continuidade das pesquisas. Muitas outras potencialidades do GPR poderão ser avaliadas visando à caracterização da subsuperfície rasa com aplicações na geologia, sedimentologia, geotecnia, engenharia, arqueologia e no planejamento urbano.

Referências Bibliográficas

- Daniels, J.J., 1996.** Surface Penetrating Radar. The Institution of Electrical Engineers, London, United Kingdom, 300p.
- 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, 145p.
- Porsani, J.L., 2002.** Caracterização Geofísica de Alvos Rasos com Aplicações no Planejamento Urbano, Meio Ambiente e Arqueologia: Estudo Sobre o Sítio Controlado do IAG/USP. Projeto de Pesquisa. Processo FAPESP No. 02/07509-1, São Paulo - SP.
- Rodrigues, S.I., 2002.** Caracterização GPR de Tambores Metálicos e Plásticos Rasos: Estudo sobre o Sítio Controlado do IAG-USP. Projeto de Pesquisa de Mestrado, IAG-USP, São Paulo - SP.
- Sandmeier, 1999.** ReflexW Version 3.01. Program for Processing and Interpretation of reflection and transmission data.
- Yilmaz, O., 1987.** Seismic Data Processing. Tulsa: Society of Exploration Geophysics Press, 526p
- Zeng, X.; McMechan, G.A. 1997.** GPR characterization of buried tanks and pipes. Geophysics, vol. 62, 3, pp. 797-806.
- Ward, S.H.; Hohmann, G.W., 1987.** Electromagnetic theory for geophysical applications: Electromagnetic Methods in Applied Geophysics. Tulsa: Society of Exploration Geophysicists, ed. Misac N. Nabighian, v.1, n.3, p.131-311.

Agradecimentos

Ao Departamento de Geofísica do IAG-USP pela oportunidade de realizar esta pesquisa. À CAPES pela bolsa de pesquisa de mestrado. Aos colegas da geofísica, em particular ao Welitom R. Borges e Elizete Silva, pelas ajudas e proveitosas discussões acadêmicas.

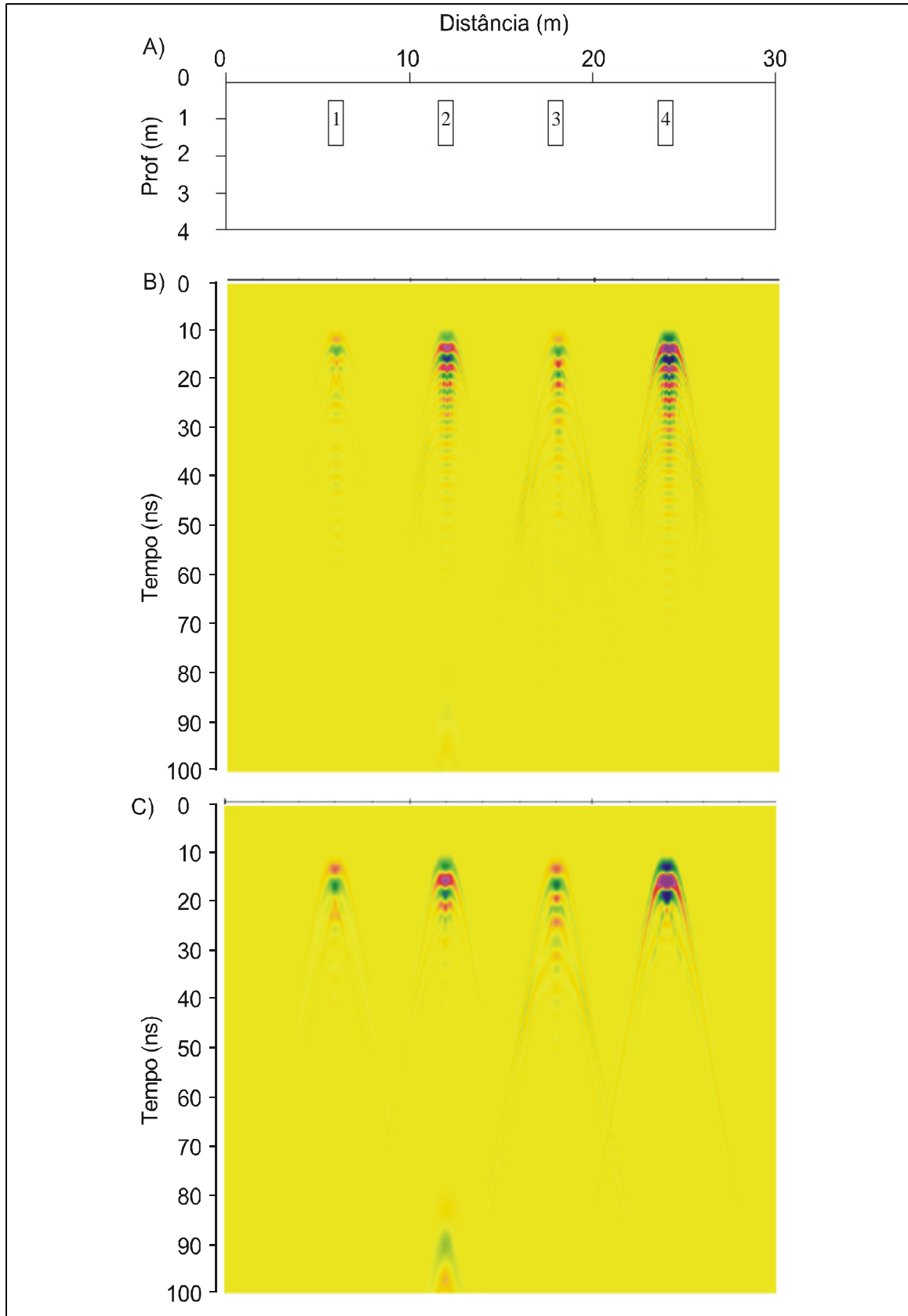


Figura 1. a) modelo sintético para quatro tambores plásticos (ver Tabela 1), b) simulação GPR para antenas de 200MHz e c) 100MHz.

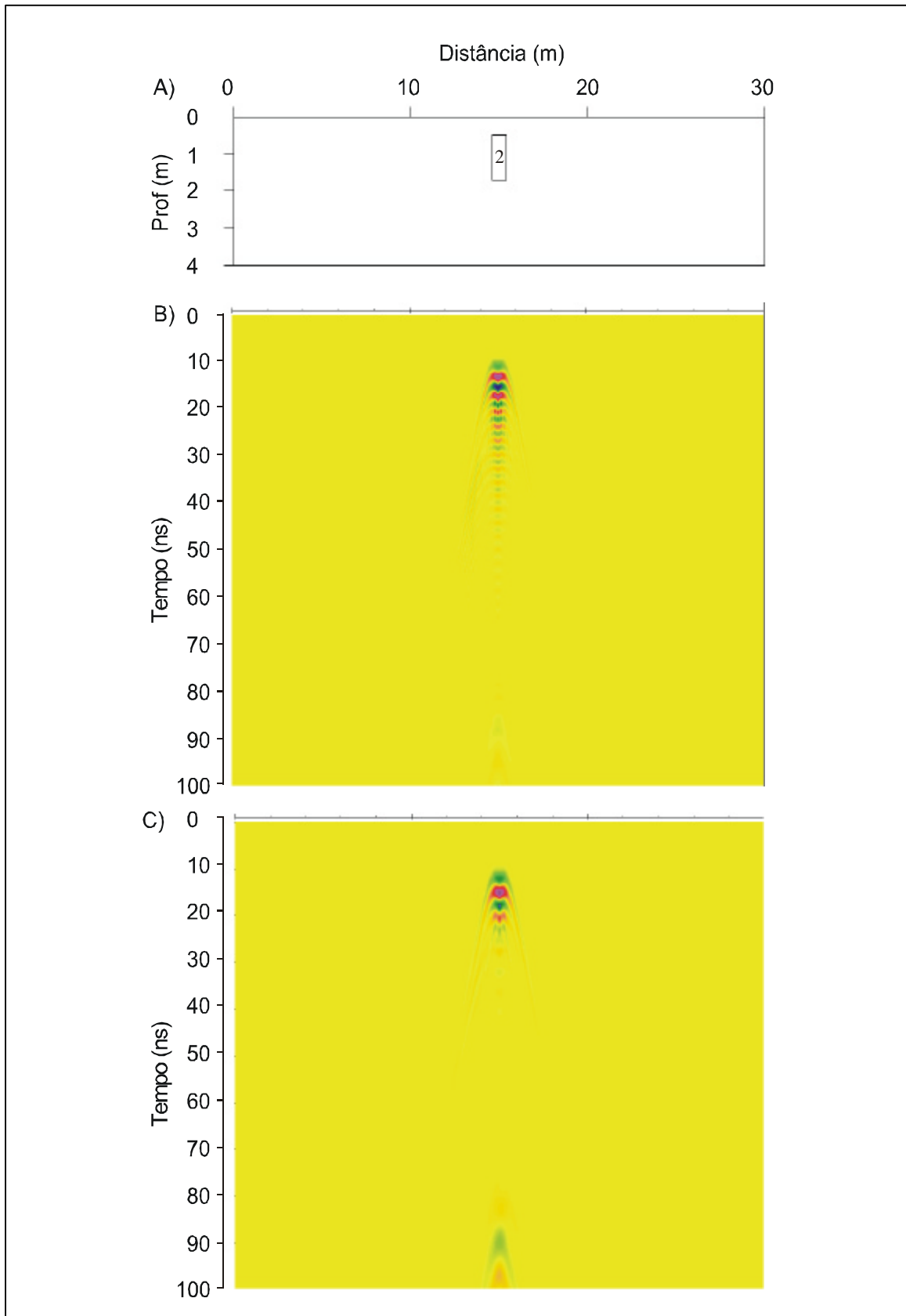


Figura 2. a) modelo sintético para um tambor plástico cheio de água fresca, b) simulação GPR para antenas de 200MHz e c) simulação GPR para antenas de 100MHz.

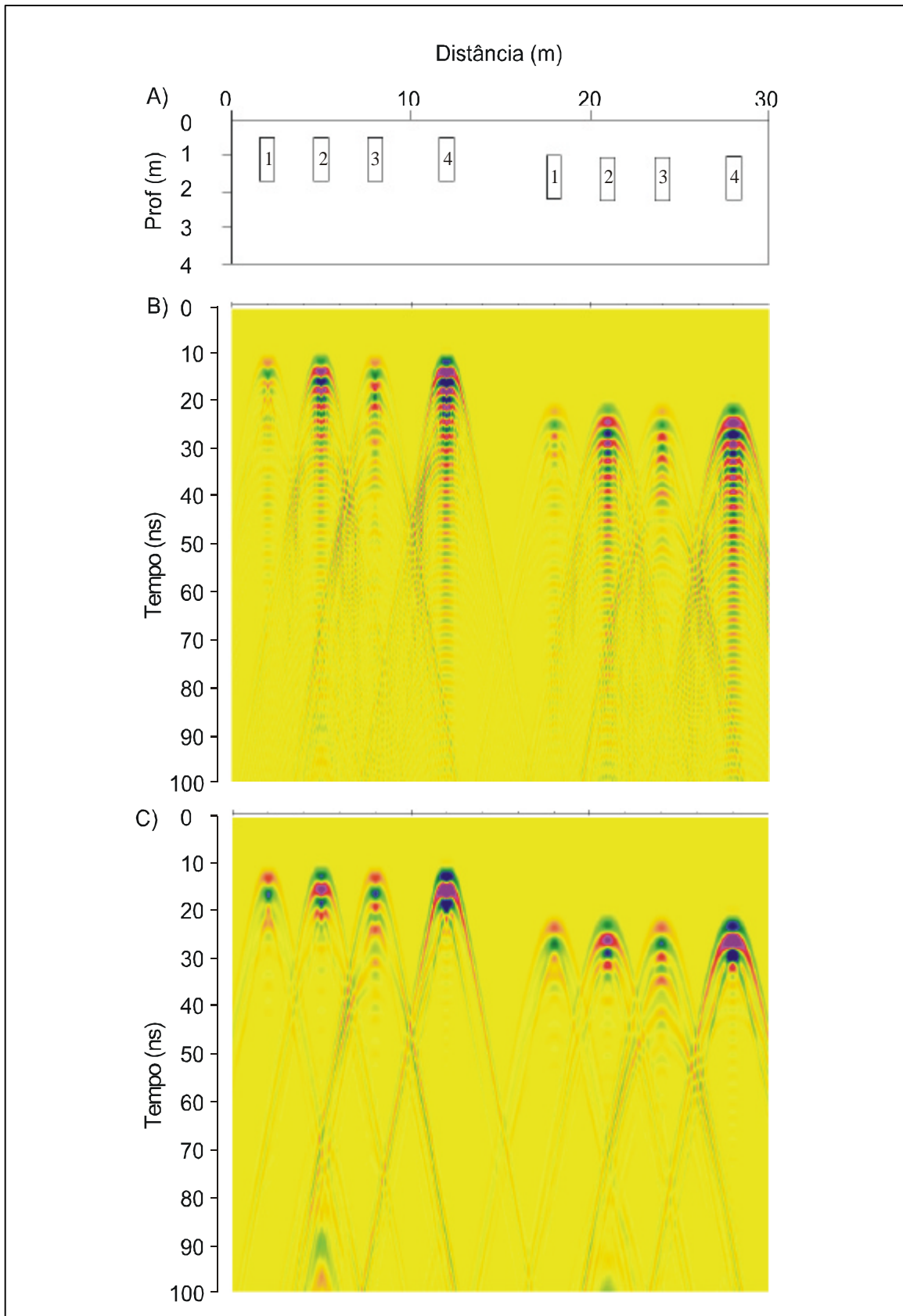


Figura 3. a) modelo sintético de uma linha do sítio controlado do IAG para oito tambores plásticos (ver Tabela 1), b) simulação GPR para antenas de 200MHz e c) 100MHz.