



Simulações Numéricas GPR para Arqueologia: Exemplos de Sambaquis e Urnas Funerárias

Selma Isabel Rodrigues^{1,*} & Jorge Luís Porsani²

¹ Pós Graduação em Geofísica – IAG/USP. Tel.: (11) 3091-2791. Fax: (11) 3091-5034. E-mail: selma@iag.usp.br

² Departamento de Geofísica – IAG/USP. 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

In this article, numerical simulation of GPR results are presented in order to detect human bones and funerary urns inside of carbonate shell layers (sambaquis), as well as to locate structures of dunes and water table. The results showed that human bones and funerary urns can be detected, however, they presented the same reflection pattern, not being possible to differentiate them. The structures of dunes and the water table also are identified, but depend on the electrical conductivity of sambaquis layer, which is underlying dunes. The obtained results are significant and will serve of base for future field works. Moreover, it shows the importance of numerical modeling as an auxiliary tool in interpretation of data, decreasing the uncertainties in interpretation process.

Keywords: GPR, 2D numerical simulation, archaeology, sambaquis, funerary urns, human bones, dunes, water table.

Introdução

O avanço tecnológico propiciou um aumento significativo de trabalhos geofísicos aplicados em estudos arqueológicos, sendo os métodos elétricos, magnéticos, sísmicos, gravimétricos, radiométricos, e mais recentemente, eletromagnéticos utilizados com sucesso na caracterização e delimitação regional de vestígios arqueológicos, otimizando tempo e custos gastos nas escavações. Vários estudos geofísicos têm sido realizados por meio da integração dos métodos com o intuito de se obter uma interpretação mais precisa (Arlsan et al., 1999; Komatina & Timotijevic, 1999). Dentre os métodos utilizados, o *Ground Penetrating Radar* – GPR, objetivo de análise no presente artigo, também se destaca como uma expressiva ferramenta nas aplicações arqueológicas, desde levantamentos bidimensionais e visualizações tridimensionais (Pipan et al., 1999, Watters, 2004) ao emprego de mapas *depth-slices* para a interpretação dos resultados (Conyers & Goodman, 1997).

No Brasil, o GPR tem sido utilizado de forma incipiente nas investigações arqueológicas de cultura cerâmica e de sambaquis fluviais. Roosevelt (1991) utilizou o GPR, métodos elétricos e magnéticos na localização de vestígios cerâmicos indicando a presença pretérita de povos indígenas na Ilha do Marajó.

Cezar et al. (2001) empregaram o método GPR nos sítios arqueológicos de Serrano e Morro Grande no Rio de Janeiro, e encontraram urnas funerárias enterradas em camadas de areia e argila. Os resultados foram correlacionados às escavações, permitindo que novos perfis adquiridos em áreas com características similares pudessem ser interpretados com maior segurança.

Schimmel et al. (2002), utilizaram os métodos GPR e magnético para caracterizar o sítio arqueológico de sambaqui fluvial de Capelinha, situado no Município de Cajati/SP. Com o GPR foi mapeada uma região descontínua representada pela ausência de refletores, coincidindo com a maior espessura de conchas de sambaquis, que de acordo com as escavações arqueológicas, apresentaram entre 1 e 1,5 m de espessura. Segundo os autores, a ausência da reflexão pode estar associada à presença de matéria orgânica misturada às conchas e pela alteração do próprio sambaqui, que aumentam a condutividade do meio e conseqüentemente, atenua o sinal do GPR.

Para que haja um aprimoramento dos métodos geofísicos auxiliando os estudos arqueológicos brasileiros, na qual existe uma carência de trabalho, é necessário que mais áreas sejam estudadas, incorporando novas técnicas de aquisição, processamento, interpretação e modelagens numéricas dos dados geofísicos. A análise de modelagens numéricas bidimensionais integradas aos dados reais, permite uma interpretação mais precisa, diminuindo as incertezas e tornando-a mais confiável.

Neste artigo, são apresentados alguns resultados de simulações numéricas realizadas com o método GPR visando auxiliar as pesquisas em sítios arqueológicos de sambaquis costeiros. Os modelos gerados simulam: configurações de sambaquis, tanto condutivos quanto resistivos; e ossadas humanas e urnas funerárias (vasos cerâmicos com ossadas) no interior de sambaquis. Além

disso, para dar maior abrangência das simulações GPR em arqueologia, outras situações foram simuladas, tais como, sambaquis ocultos por dunas, estruturação de dunas e a presença do nível freático.

Os sambaquis são caracterizados basicamente por amontoados de conchas carbonáticas. Estes sítios foram construídos por sociedades primitivas, que habitavam o litoral brasileiro durante o período pré-colonial. No interior dos sambaquis são encontrados freqüentemente vestígios de interesse arqueológico, tais como, restos alimentares (peixes, mariscos), ossadas humanas, materiais líticos, entre outros.

Neste artigo, os modelos arqueológicos gerados simulam situações passíveis de serem encontradas em campo. Os resultados mostraram que as simulações numéricas são importantes para preverem as respostas do método GPR, definir os melhores parâmetros de campo, e a viabilidade do GPR em futuros estudos de sítios arqueológicos de sambaquis costeiros situados na região sul do litoral de Santa Catarina.

Métodos

Ground Penetrating Radar (GPR)

O GPR é um método geofísico que se fundamenta na propagação e reflexão de ondas eletromagnéticas em altas freqüências (10 MHz a 2,5 GHz). Para se obter os dados de GPR as antenas transmissora e receptora são conduzidas ao longo de um perfil. A antena transmissora irradia pulsos eletromagnéticos para a subsuperfície e a receptora registra os sinais refletidos na interface entre os alvos que apresentam propriedades físicas contrastantes (permissividade dielétrica, condutividade elétrica e permeabilidade magnética). Esta energia refletida permite deduzir informações sobre alvos pontuais, estruturas inclinadas ou horizontais, de acordo com a forma do refletor. O registro das assinaturas geofísicas se dá em tempo duplo, ou seja, tempo de percurso da onda refletida, em nanosegundos (Davis & Annan, 1989).

Diferenças Finitas no Domínio do Tempo

As modelagens numéricas foram realizadas utilizando-se o software Reflexw (Sandmeier, 2004) e permitem verificar se as respostas geofísicas serão significativas para o sucesso da aplicação do GPR. Para estudar o comportamento da propagação e reflexão de campos eletromagnéticos foi utilizado o método numérico das Diferenças Finitas no Domínio do Tempo – FDTD (Yee, 1966).

O método FDTD baseia-se na implementação de códigos matemáticos computacionais através de aproximações numéricas sucessivas, substituindo as equações diferenciais por diferenças finitas. A substituição se dá pela expansão das equações diferenciais em Série de Taylor e truncamento ao nível da ordem de erro desejada, ou seja, na segunda ordem. Desta forma, as equações de Maxwell são resolvidas por equações algébricas. O modelo é discretizado em um *grid*

composto por um conjunto finito de pontos, representados pelos chamados *nós* da malha. Cada nó representa um vetor de campo com propriedades elétricas e magnéticas (Belém, 2001).

As modelagens numéricas foram desenvolvidas a partir da construção de dois modelos sintéticos para fins arqueológicos. Os pulsos eletromagnéticos foram gerados a partir de uma fonte de onda plana, simulando uma situação real de aquisição de dados, e o espaçamento entre os traços foi de 0,05 m. As simulações foram realizadas modificando a geometria dos sambaquis, tipo de solo, profundidade dos alvos e freqüência das antenas.

As Figuras 1a e 1b, modelo 1 e 2, respectivamente, ilustram dois tipos de configurações para os sambaquis (caracterizado por um mistura de solo e conchas carbonáticas) que podem ser encontrados em sítios arqueológicos. Ambos sambaquis estão dispostos dentro de uma camada de areia. A partir destes modelos, foram simuladas as respostas para os sambaquis condutivos, que são encontrados normalmente em sítios arqueológicos, conforme resultados obtidos por Schimmel et al. (2002). Também, foram simuladas respostas para um sambaqui resistivo hipotético. Na Tabela 1 são apresentadas as propriedades elétricas usadas na construção dos modelos 1 e 2, onde σ é a condutividade elétrica, expressa em S/m e ϵ_r é a permissividade dielétrica relativa, sendo constantes na direção z (eixo do tempo), adaptados de Hammon et al. (2000) e Davis & Annan (1989). A permeabilidade magnética relativa foi considerada igual a 1 para todos os materiais.

A Figura 2a mostra o modelo 3 que representa a caracterização interna dos sambaquis, constituído por uma camada de conchas carbonáticas e dentro dela, amontoados de ossadas humanas (alvos B, C e D) e urnas funerárias com ossadas humanas (alvos A e E). A partir deste modelo foram gerados três radargramas sintéticos para as freqüências de 100, 200 e 400 MHz. Na Tabela 2 são apresentadas as propriedades elétricas usadas na construção do modelo.

A Figura 3a mostra o modelo 4 que representa os sambaquis ocultos por dunas e o topo do nível freático. Este modelo é constituído por areia seca, solo com conchas carbonáticas, areia média, areia média úmida (franja capilar) e areia grossa saturada. As simulações numéricas foram realizadas para as freqüências de 50 e 100 MHz. As propriedades elétricas utilizadas nesta modelagem estão apresentadas na Tabela 2.

Tabela 1. Propriedades elétricas dos modelos 1 e 2.

| Materiais | ϵ_r | σ |
|--------------------|--------------|-----------|
| Sambaqui condutivo | 8 | 10^{-1} |
| Sambaqui resistivo | 7 | 10^{-3} |
| Areia | 6 | 10^{-4} |

Tabela 2. Propriedades elétricas do modelo 3.

| Materiais | ϵ_r | σ |
|------------------|--------------|--------------------|
| Solo com Conchas | 8 | 10^{-2} |
| Ossos | 13 | 10^{-1} |
| Urnas Funerárias | 5 | 2×10^{-3} |

Tabela 3. Propriedades elétricas do modelo 4.

| Materiais | ϵ_r | σ |
|-----------------------|--------------|--------------------|
| Solo com conchas | 7 | 10^{-3} |
| Areia seca | 5 | 10^{-5} |
| Areia média | 6 | 10^{-4} |
| Areia média úmida | 25 | 7×10^{-3} |
| Areia grossa saturada | 50 | 4×10^{-2} |

Resultados

A discussão dos resultados é realizada com base nas profundidades e configurações dos alvos; nas frequências das antenas; na composição dos materiais.

Modelos 1 e 2: configurações dos sambaquis

A Figura 1 mostra os radargramas sintéticos obtidos para os modelos 1 e 2, que simulam geometrias distintas para os sambaquis. Para ambas geometrias foram simuladas respostas para os sambaquis hipoteticamente resistivos (Figura 1c e 1d) e condutivos (Figuras 1e e 1f), com as antenas de 100 MHz e espaçamento entre os traços de 0,05 m.

Os sambaquis resistivos foram caracterizados por refletores gerados no topo e na base; e os sambaquis condutivos por refletores gerados no topo.

Os refletores relacionados aos sambaquis resistivos (Figura 1c e 1d) apresentam uma baixa amplitude no sinal se comparados aos gerados no topo dos sambaquis condutivos, todavia, apresenta uma maior profundidade de investigação, proporcionando uma caracterização do seu formato estrutural.

Os resultados mostram que quanto maior o contraste entre as propriedades físicas maior será a amplitude dos refletores (Figuras 1e e 1f), porém se o material apresentar uma condutividade elétrica elevada, o sinal será atenuado, impossibilitando que a estrutura seja delimitada em profundidade.

Modelo 3: sambaquis x ossada humana

A Figura 2 mostra os radargramas sintéticos obtidos para o modelo 1, na qual simulam ossadas humanas e urnas funerárias em diferentes profundidades colocadas dentro de uma camada de conchas carbonáticas. As simulações foram realizadas com as antenas de 100 MHz (Figura 2b), 200 MHz (Figura 2c) e 400 MHz (Figura 2d).

Conforme observado nas Figuras 2b e 2c, os refletores gerados no topo dos alvos mais rasos (A, B e D) são caracterizados por refletores hiperbólicos mais fortes do que os gerados no topo dos alvos mais profundos (C e E). Isto ocorre devido à atenuação do sinal no meio, pois a camada de conchas foi simulada com uma condutividade elevada, representando a presença de matéria orgânica e alteração do sambaqui.

Apesar da atenuação do sinal, os dois tipos de alvos foram bem caracterizados pelo GPR, devido o contraste entre as propriedades elétricas do solo e os vestígios arqueológicos, e pela pequena profundidade em que os alvos foram simulados.

Os resultados mostraram que, tanto as ossadas humanas quanto as urnas funerárias, puderam ser detectadas através das simulações GPR, sendo caracterizadas por nítidos refletores hiperbólicos. Entretanto, os resultados das simulações foram similares e mostraram que não é possível distinguir os dois alvos de interesse arqueológico. Nota-se que os alvos mais profundos tornam-se mais difíceis de serem identificados com as antenas de 400 MHz (Figura 2d).

Modelo 4: sambaquis x estruturas de dunas

A Figura 3 mostra os radargramas sintéticos obtidos para o modelo 2, que simula os sambaquis ocultos por dunas e o topo do nível freático. A Figura 3b mostra o resultado da simulação para a frequência de 50 MHz e a Figura 3c para 100 MHz.

Como observado em ambas figuras, a camada de sambaqui oculta pelas dunas, bem como o topo do nível freático, foram detectados. Todavia, com o aumento da frequência ocorre um melhor detalhamento vertical, este fato pode ser comprovado por meio dos resultados obtidos com a frequência de 100 MHz (Figura 3c), onde o nível freático (camada mais delgada) e a camada de areia grossa apresentam-se com maior distinção em relação aos resultados obtidos com a frequência de 50 MHz (Figura 3b).

Nota-se também, que a interface entre a base da camada de conchas carbonáticas (sambaquis) e a camada de areia média não foi identificada com clareza. Este fato está associado ao pequeno contraste entre as propriedades elétricas das duas camadas e pela atenuação do sinal provocada pela condutividade elétrica dos sambaquis.

Comparando os resultados obtidos nas simulações numéricas, observa-se que a atenuação é maior nos materiais mais condutivos. No modelo 3, que representa

os materiais condutivos (Figura 2), tornou-se difícil localizar com nitidez os alvos mais profundos, dispostos a 2 e 3 m de profundidade. Por outro lado, no modelo 4, que é constituído por camadas mais resistivas (Figura 3), as camadas mais profundas foram bem caracterizadas, tanto com as antenas de 50 como as de 100 MHz, onde a interface entre o nível freático e areia grossa é identificada com clareza.

Conclusões

As modelagens numéricas obtidas com o método GPR foram significativas e mostraram a sua importância em simulações arqueológicas.

Ambos modelos simplificados das configurações dos sambaquis foram bem caracterizados. Os sambaquis resistivos (hipotéticos) podem ser localizados pelo topo e base, e os condutivos, apenas pelo topo. Em contra partida, a amplitude dos refletores relacionados com os sambaquis condutivos é maior do que nos sambaquis resistivos.

Os resultados mostraram também, que é possível localizar vestígios arqueológicos, tais como, a presença de ossada humana e urnas funerárias. Entretanto, devido à similaridade nos padrões de reflexões, não é possível distinguir as fontes das anomalias.

Para a estruturação das dunas e na determinação do topo do lençol freático, os resultados mostraram que tanto as antenas de 50 quanto às de 100 MHz, permitiram identificar estas estruturas com nitidez. Além disso, as antenas de 100 MHz permitiram um melhor detalhamento das camadas mais finas e as antenas de 50 MHz proporcionaram uma maior profundidade de investigação. Entretanto, o usuário deve estar atento, pois a presença de materiais condutores poderá ser um fator limitante para o sucesso de sua aplicação.

Os resultados obtidos por meio das simulações numéricas são motivadores e auxiliarão as pesquisas futuras, no que se referem às etapas de aquisição de dados, pois mostraram que o GPR pode ser perfeitamente empregado em estudos de sítios arqueológicos, podendo prever as respostas esperadas, e poderá diminuir as incertezas na interpretação dos dados.

Referências

- Arlsan, E., Biella, G., Boniolo, G., Caporusso, D., Franco, R., Lozej, A. & Veronese, L., 1999.** Geophysical investigations of the Olonium Roman site Northern / Como Lake: *Journal of Applied Geophysics*, Vol. 41, p. 169-188.
- Belém, A.N., 2001.** Caracterização bidimensional de canais de rádio através de diferenças finitas no domínio do tempo. Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Eletronica, Escola de

Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais – MG, 124p.

- Cezar, G. da S.; da Rocha, P. L. F.; Buarque, A. & da Costa, A., 2001.** Two Brazilian archaeological sites investigated by GPR: Serrano and Morro Grande. *Journal of Applied Geophysics*, Vol. 47, p227–240.
- Conyers, L.B. & Goodman, D., 1997.** Ground penetrating radar: an introduction for archaeologists. Altamira Press – A Division of Rowman & Littlefield Publishers, Inc. Oxford, England, 232p.
- 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.
- Komatina, S. & Timotijevic, Z., 1999.** Some case studies of geophysical exploration of archaeological sites in Yugoslavia: *Journal of Applied Geophysics*, Vol. 41, p205-213.
- Pipan, M., Baradello, L., Forte, E., Prizzon, A & Finetti, I., 1999.** 2-D and 3-D processing and interpretation of multi-fold ground penetrating radar data: a case history from an archaeological site: *Journal of Applied Geophysics*, Vol. 41, p271-292.
- Roosevelt, A.C., 1991.** Moundbuilders of the Amazon: Geophysical archaeology on Marajó Island, Brazil. Academic Press.
- Sandmeier, K.J., 2004.** ReflexW Version 3.5. Program for processing of seismic, acoustic or electromagnetic reflection, refraction and transmission data. Manual do Software. Karlsruhe, Germany, 345p.
- Schimmel, P.B.; Porsani, J.L.; Figuti, L. & de Blasis, P., 2002.** Aplicação de métodos geofísicos em arqueologia: primeiros resultados obtidos no sambaqui fluvial capelinha, Cajati-SP, Brasil. *Revista Brasileira de Arqueologia, MAE/USP*, No '12, p43-54.
- Yee, K.S., 1966.** Numerical solution of initial boundary value problems involving Maxwell's equations in isotropic media. *IEEE Trans. Antennas and Propagation*, vol. Ap-4, n.3, 302-307.
- Watters, M.S., 2004.** GPR: A tool for archaeological management. In Tenth International Conference on Ground Penetrating Radar, 21-24 June, 2004, Delft, The Netherlands. cdrom.

Agradecimentos

A CAPES pela bolsa de doutorado e ao IAG/USP pela infra-estrutura para a realização desta pesquisa. Ao Doutorando Welitom Rodrigues Borges pelas proveitosas discussões.

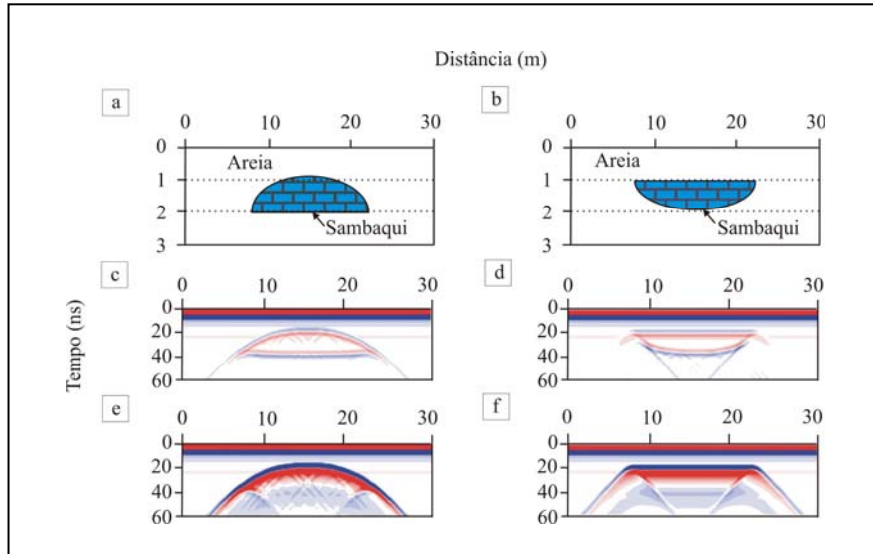


Figura 1. a) e b) Configurações dos sambaquis enterrados em uma camada de areia; c) e d) Resultados das simulações numéricas obtidas com as frequências de 100 MHz para os sambaquis resistivos; e) e f) sambaquis condutivos.

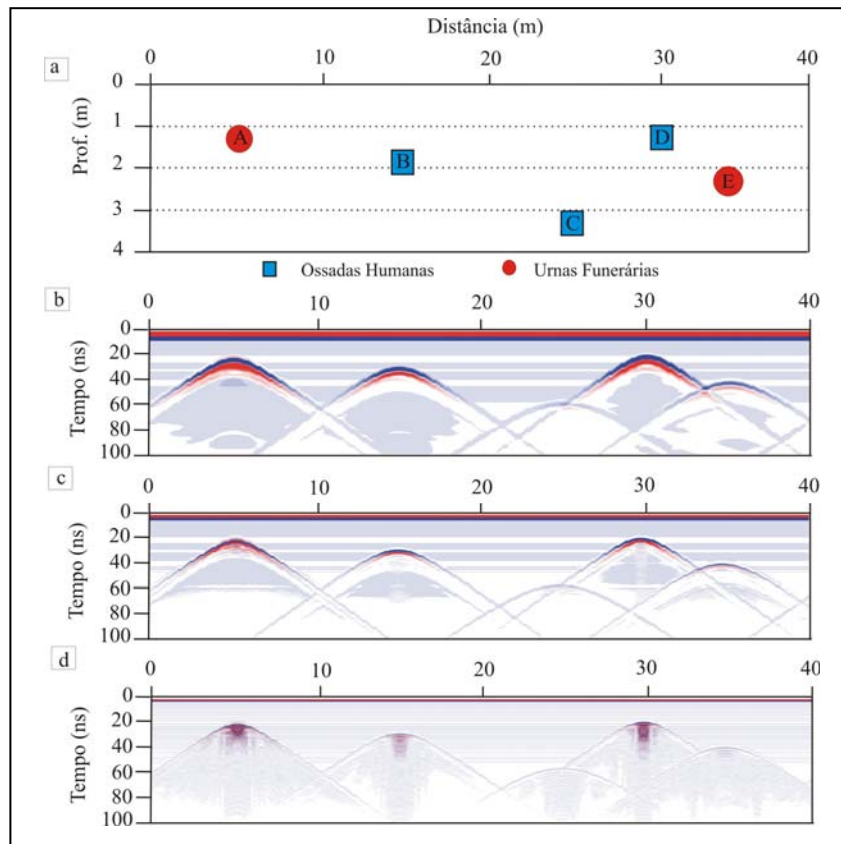


Figura 2. a) Modelo sintético dos sambaquis, b) resultados das simulações numéricas obtidas com as frequências de 100 MHz, c) 200 MHz e d) 400 MHz.

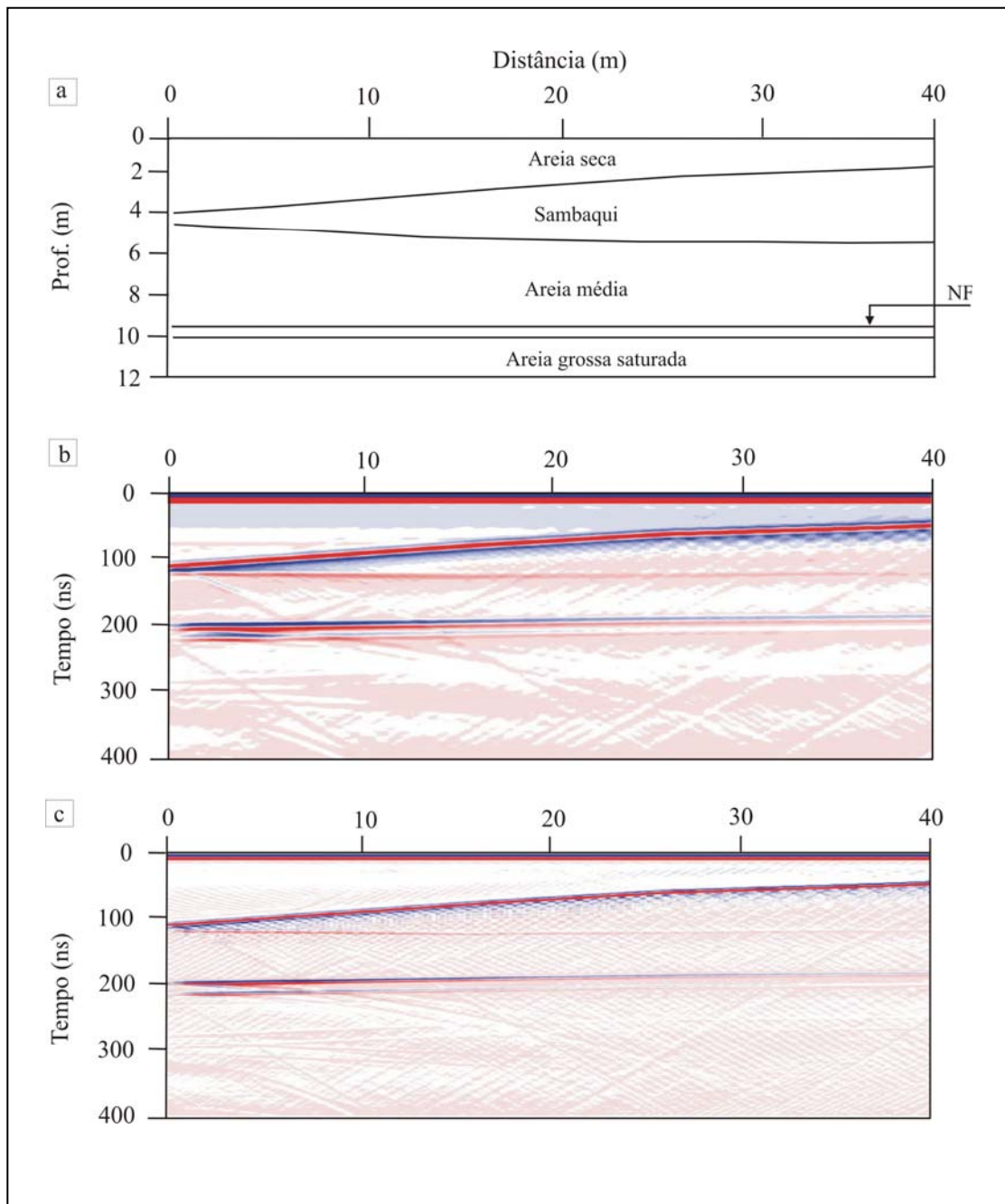


Figura 3. a) Modelo sintético de estrutura das dunas e topo do lençol freático, b) resultados das simulações numéricas obtidos com as frequências de 50 MHz e c) 100 MHz.