

MODELAGEM NUMÉRICA ESPECTRAL ASSOCIADA A MIGRAÇÕES PRÉ E PÓS EMPILHAMENTO PARA IMAGIAR AS ESTRUTURAS INTERNAS DE UM ARENITO ANÁLOGO DE RESERVATÓRIO DA FORMAÇÃO ÁGUA GRANDE, BACIA DO RECÔNCAVO (BA).

Odirlei Neumann, odirlei@cpgg.ufba.br

Marco A. Barsottelli Botelho, botelho@cpgg.ufba.br

Centro de Pesquisa em Geofísica e Geologia/ Inst. de Geociências/ Universidade Federal da Bahia

José Maria Carcione

Instituto Nazionale di Oceanografia e di Geofísica Sperimentale, OGS, Trieste, Italia

Resumo : O método geofísico eletromagnético designado por Radar de Penetração no Solo (GPR) é usado para investigar as estruturas internas de um afloramento de arenito pertencente à Formação Água Grande, na Bacia do Recôncavo. O arenito estudado é um afloramento representativo de uma das rochas reservatório de hidrocarbonetos da Bacia do Recôncavo, constituindo assim um chamado análogo de reservatório. A aquisição dos dados de GPR usou antenas de 200 MHz com a configuração de afastamento constante. O levantamento de uma série de 20 perfis sendo 12 paralelos entre si e os outros ortogonais a estes, nos permitem construir um modelo 3-D da distribuição espacial das fraturas e falhas deste corpo arenítico, o que poderá ser usado, posteriormente, em estudos sobre a permeabilidade da rocha. Com o objetivo de validarmos o modelo 2D em profundidade, interpretado a partir de uma seção de radar com afastamento constante, usamos o algoritmo de modelagem numérica pseudo-espectral empregando a aproximação 2-D da equação eletromagnética da onda, para gerarmos 11 famílias de tiro comum, ou WARR, as quais são processadas CMP, obtendo-se uma seção empilhada. Esta seção que é comparada com o radargrama real, em termos do posicionamento espacial das principais feições, havendo uma excelente concordância entre os principais refletores, os quais tem a forma sigmoidal. O segundo teste foi realizado aplicando a migração em profundidade do tipo Stolt/Dubrule, empregando um campo de velocidade constante de 0,13 m/ns, na seção empilhada sintética e comparando o resultado com o modelo inicial interpretado. Finalmente, aplicou-se uma migração antes do empilhamento do tipo Kirchoff nas famílias WARR, usando um campo de velocidades variável de 0,09 (argila das fraturas) e 0,13 m/ns na rocha. Ambos procedimentos envolvendo migração recuperaram corretamente a geometria do modelo inicial.

Palavras Chaves: GPR, Reservatórios Análogos, Modelagem Numérica, Método Pseudo- Espectral, Migração Pré e Pós Empilhamento, Processamento CDP.

Geologia da Área: O afloramento estudado, situado no km118 da BR-101, nas proximidades da cidade de Alagoinhas (BA), é formado por arenitos de granulação fina a média, bem selecionado ao longo das laminações, e parcialmente maciço. O trabalho de Medeiros e Ponte (1981) fornece maiores detalhes sobre a geologia do afloramento, o qual é classificado como pertencente à Formação Água Grande.

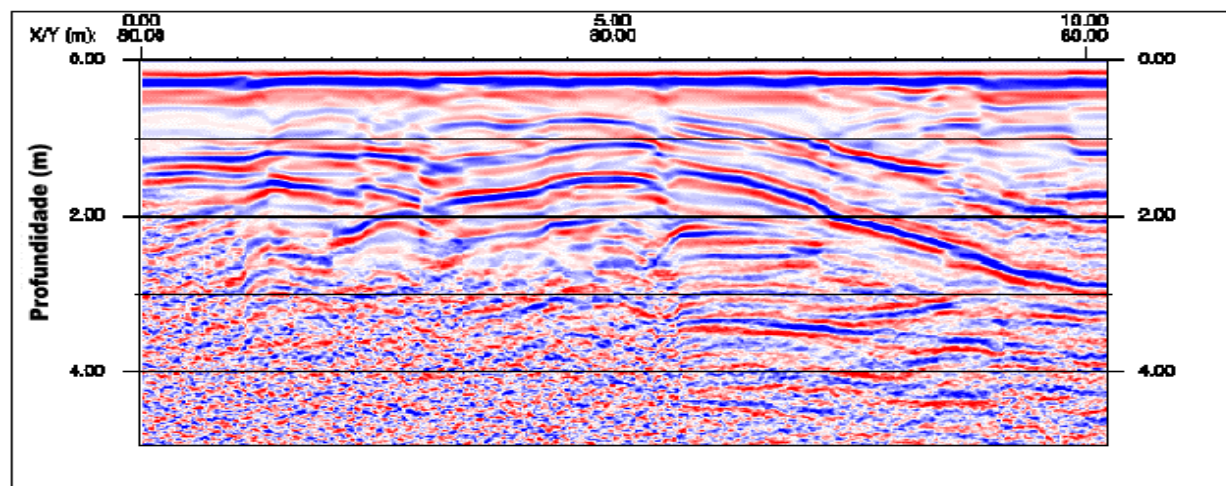


Figura 1. Radargrama adquirido sobre a formação Água Grande (rad422), utilizando antenas de 200 MHz, dx=7,0 mm, nt=512, dt=0,35 ns e 1459 traços.

As estruturas encontradas na Formação Água Grande sugerem um evento de afogamento do sistema fluvial, posto que existem arenitos mostrando formas sigmoidais, características de desembocaduras submersas. O radargrama da figura 01 revela refletores com a forma sigmoidal.

Aquisição dos Dados: Os dados foram registrados usando o equipamento SIR SYSTEM 2000 da GSSI conectado a uma antena de 200 MHz. O levantamento do foi realizado com antenas no modo transversalmente elétrico (TE) empregando afastamento constante. As seções foram registradas sobre o afloramento no sentido paralelo e perpendicular ao eixo da rodovia, o qual se estende por mais de 100 metros paralelo à rodovia. Um conjunto de dez (10) seções, espaçadas de 1,5 m entre si, com aproximadamente 10 metros de comprimento cada, foram levantadas perpendicularmente à rodovia com o objetivo de fornecer uma visão tridimensional da distribuição de estruturas no corpo arenítico. Vide McMechan et al (1997).

Modelagem Numérica : A modelagem numérica da onda eletromagnética consiste numa maneira prática e eficiente de simular matematicamente a propagação das ondas eletromagnéticas na sub-superfície complexa. Para tanto, o meio é representado em termos de suas propriedades físicas (permissividade dielétrica e condutividade elétrica), as quais são distribuídas sobre o modelo por meio de uma malha. Com esta metodologia podemos analisar a resposta de um modelo ao levantamento com antenas de diferentes frequências ou arranjos, e assim planejar as futuras aquisições de maneira rápida e eficaz; e principalmente, analisar a consistência da interpretação dos radargramas reais.

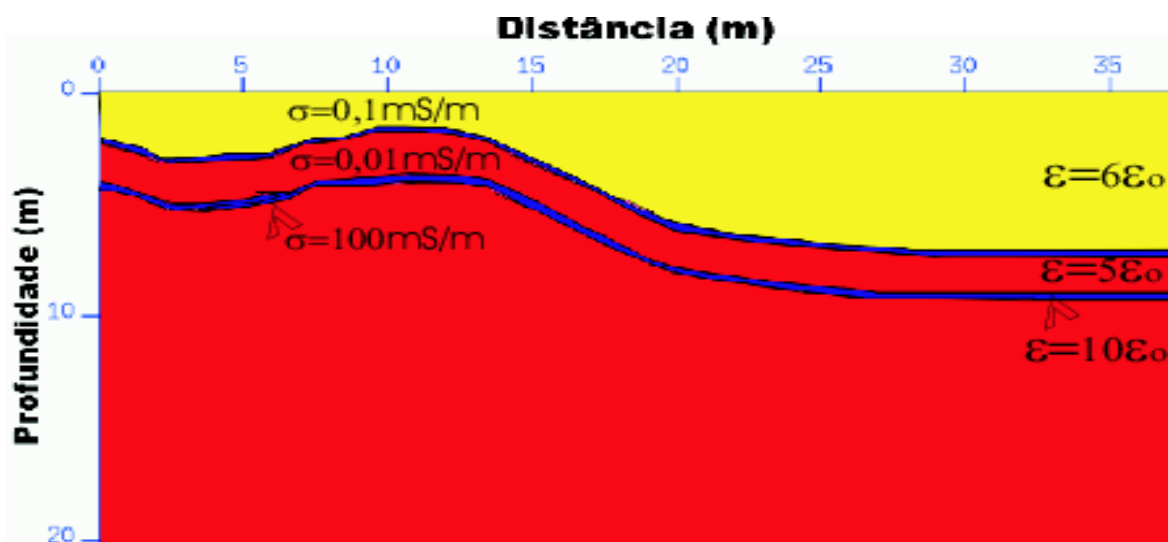


Figura 2. Modelo geológico criado a partir da interpretação dos radargramas reais, onde observamos interfaces com a forma de sigmoides

A modelagem direta usada neste trabalho é baseada nos trabalhos de Carcione (1996) e Carcione (1998), onde se utiliza uma aproximação bidimensional das Equações de Maxwell, considerando somente a propagação no plano (x,z) , onde x é a posição horizontal e z é a profundidade, e as propriedades físicas dos materiais constantes na direção y . A modelagem simula antenas que operam no modo TE, trabalhando somente com as componentes do campo elétrico e magnéticos E_y , H_x e H_z , as quais estão desacopladas das componentes E_x , E_z e H_y do modo transversalmente magnético. A solução numérica adotada emprega o Método das Diferenças Finitas, usando a construção de operadores com o método Runge-Kutta de quarta ordem para a solução das derivadas em tempo; e emprega o Método Pseudo-Espectral de Fourier para solucionar as derivadas espaciais. Este procedimento numérico, bem como a definição do padrão de radiação da fonte, sua inserção na malha, e as fronteiras de absorção adotadas são similares aos apresentados no trabalho de Carcione e Cavallini (1994), e também adotados em Carcione (1998).

O modelo simplificado gerado a partir da interpretação de alguns radargramas paralelos (rad420, rad421 e rad422), como o mostrado na figura 2, apresenta dois refletores curvos com forma sigmoidal. Este modelo

será usado para gerar onze (11) famílias WARR, os quais estão espaçados de 3,0 m, onde em cada coluna vertical da malha empregada será posicionado um receptor, perfazendo 375 receptores, com espaçamento (dx) de 0,1 m. O registro dos eventos fornecerá um radargrama com 220 amostras no tempo (nt) e taxa de amostragem no tempo (dt) de 0,1 ns.

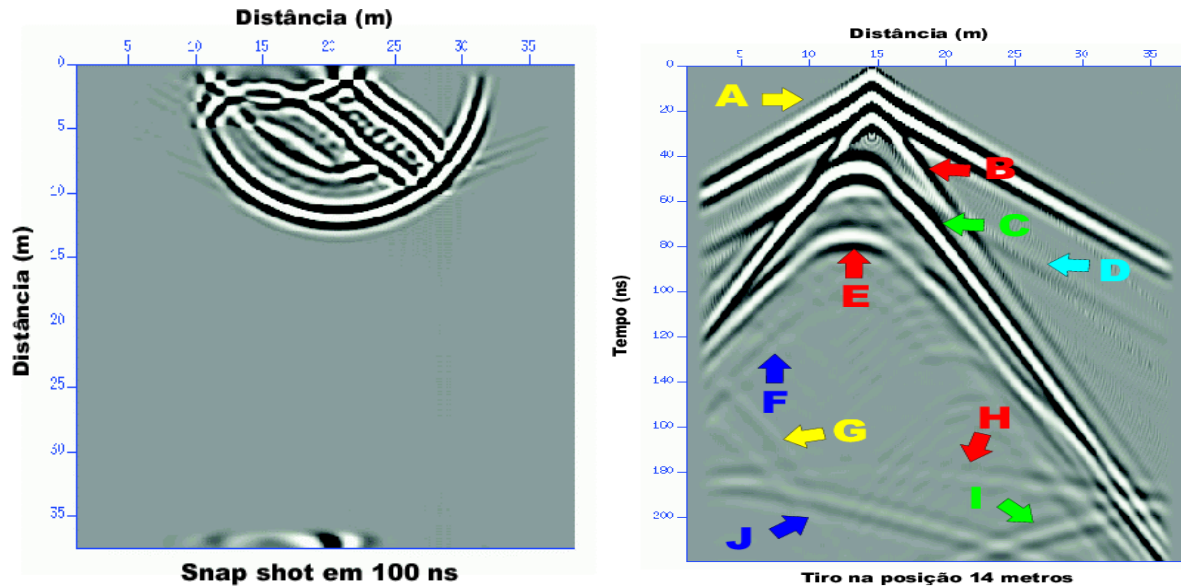


Figura 3. A esquerda (a) um Instantâneo em 100 ns (H_x), simulando o emprego de antenas de 200 MHz, $dt=0,1$ ns, $nt=220$ e 375 traços. A direita (b) temos um radargrama WARR com a fonte na posição 14 metros, com todos os eventos identificados.

A modelagem numérica da equação da onda eletromagnética nos permite a obtenção de instantâneos, onde podemos ver a propagação da frente de onda através do modelo em qualquer instante de tempo. A figura 3(a) mostra o instantâneo da componente H_x no instante de tempo de 100 ns. O radargrama WARR correspondente à fonte na posição 14 metros é mostrado na figura 3(b), onde todos os principais eventos são interpretados. Ou sejam: (A) Onda direta propagando pelo ar, (B) onda direta pelo solo, (C) reflexão no primeiro sigmóide, (D) Onda refratada na interface solo-ar, (E) reflexão no segundo sigmóide, (F) múltipla interna entre os dois refletores sigmoidais, e finalmente (G), (H), (I) e (J) que são ruídos provenientes da má absorção nas bordas do modelo, também designados como efeitos de borda.

O Processamento CMP : Os onze radargramas são organizados em famílias CMP, sobre as quais são realizadas análises de velocidades, que forneceram velocidades em torno de 0,13 m/ns, correções de NMO (*Normal Move Out*) e empilhamento, fornecendo a seção empilhada mostrada na figura 04.

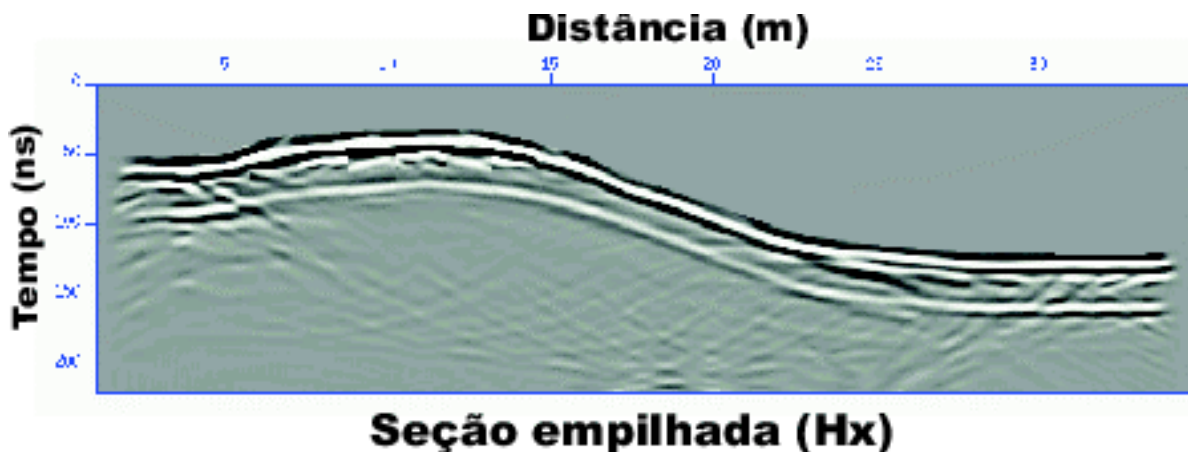


Figura 4. Seção empilhada (H_x), utilizando antenas de 200 MHz, $dt=0,1$ ns, $nt=280$ e 375 traços.

A seção empilhada é o equivalente de uma seção de afastamento nulo, o que é muito usado na sismica de reflexão, porém uma seção de radar afastamento constante, particularmente com frequências mais altas (200, 400 e 900 MHz) também é similar a uma seção de afastamento nulo, ou empilhada. Assim a similaridade entre a seção empilhada obtida a partir das famílias WARR sintéticas e a seção de GPR com afastamento constante real comprova a precisão do modelo interpretado.

Migrações Pós e Pré-empilhamento : Um teste clássico para confirmar a consistência do modelo de distribuição de velocidades usado em uma migração é a comparação deste modelo de entrada com o resultado da migração. Neste trabalho, aplicamos a migração em profundidade do tipo Stolt/Dubrulle na seção empilhada sintética, usando a velocidade constante de 0,13 m/ns, que é a velocidade obtida das análises de velocidade e corresponde à velocidade de propagação no arenito. Observem a excelente coincidência entre os refletores sigmoidais presentes no radargrama real de figura 01, no modelo da figura 02 e na seção migrada da figura 5. O que comprova a correta definição do modelo interpretado.

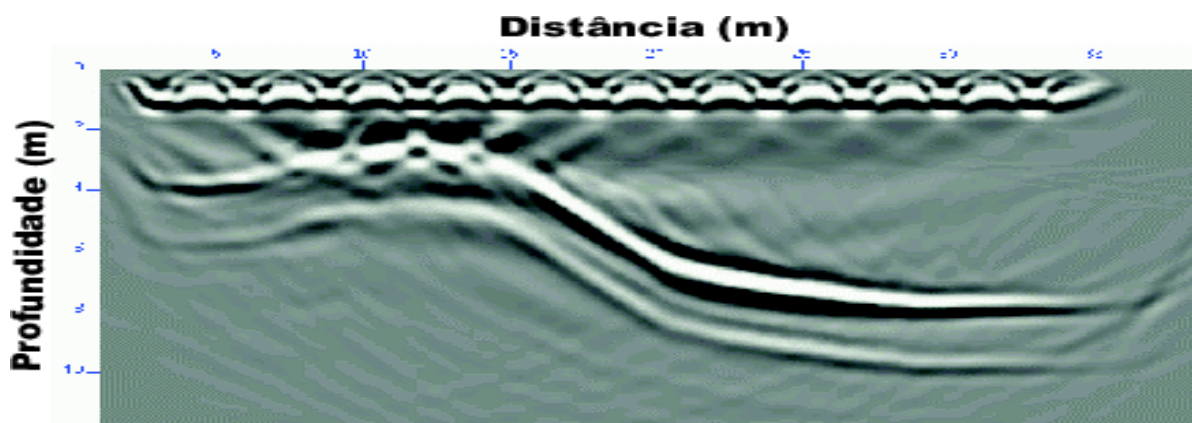
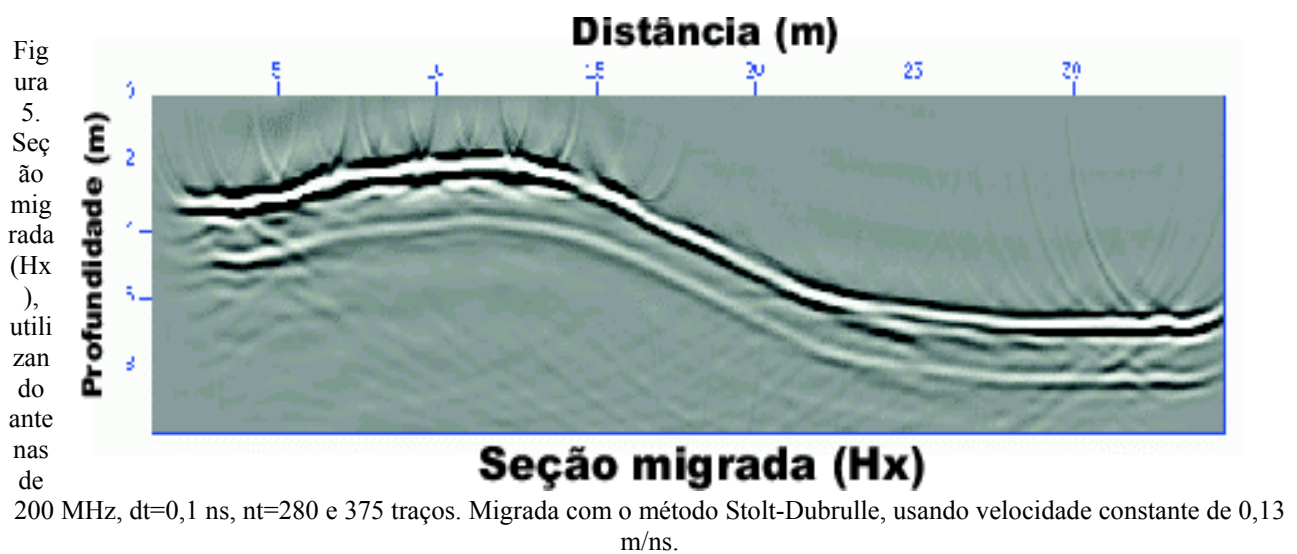


Figura 6. Seção migrada (Hx), utilizando antenas de 200 MHz, $dt=0,1$ ns, $nt=280$ e 375 traços. Migrada com o método Kirchhoff pré-empilhamento e um campo de velocidades variável (0,13 e 0,09 m/ns)

Vale observar que a seção migrada mostrada na figura 5 apresenta muitas hipérbolas de difração invertidas (os conhecidos sorrisos) devido ao fato de termos negligenciado durante o processo de migração as baixas velocidades (0,09 m/ns), correspondentes às argilas presentes nas finas fraturas com forma sigmoidal, consideradas durante a geração das famílias WARR. Finalmente, realizamos um terceiro teste de imageamento, aplicando uma migração do tipo Kirchhoff em cada família WARR, sendo que usamos um campo de velocidades variável (0,09 e 0,13 m/ns), e não negligenciamos as baixas velocidades das finas (0,10 m) camadas de argila que preenchem as fraturas sigmoidais do modelo interpretado. Os resultados da

migração pré-empilhamento das onze famílias WARR são agrupados, obedecendo a posição espacial de cada família, obtendo-se a seção em profundidade mostrada na figura 6. Analisando o resultado da figura 6, observamos que não há as difrações invertidas, uma vez que usamos o campo de velocidade completo sem negligenciar as baixas velocidades da interface. E também que o modelo perde qualidade nas bordas, pela falta de iluminação das famílias WARR, apresentando a porção inclinada ligeiramente mais curta. Entretanto, o modelo interpretado é bem recuperado, validando a interpretação inicial.

Conclusões :

O afloramento do arenito fluvial da Fm. Água Grande (situado no km-118 da BR-101), foi investigado com seções de afastamento constante, com antenas de 200 MHz, onde tornou-se possível estabelecer um modelo espacial do padrão de fraturas internas ao citado arenito. Observou-se que muitas fraturas se deram ao longo das estratificações sigmoidais, havendo ainda um padrão de falha normal que corta tais fraturas.

A modelagem eletromagnética foi usada com muito sucesso na simulação da propagação das ondas num modelo sintético 2-D obtido diretamente da interpretação de radargramas reais registrados sobre o afloramento arenítico da Formação Água Grande. A geração de famílias de tiro comum (WARR) sobre o modelo 2-D do arenito da Fm. Água grande permitiu testar três procedimentos de imageamento, buscando validar o modelo inicialmente estabelecido. O primeiro procedimento, utilizou o processamento CMP clássico e verificou-se que a seção sintética empilhada a partir das famílias WARR é similar ao radargrama de afastamento constante real, no que tange aos dois principais refletores sigmoidais. O segundo procedimento usou uma migração pós-empilhamento (Stolt/Dubrulle) com a velocidade constante de 0,13 m/ns, na seção empilhada; e o terceiro procedimento, utilizou a migração antes do empilhamento do tipo Kirchhoff, com campo de velocidades variáveis (0,09 e 0,013 m/ns), em cada família WARR, gerando uma seção em profundidade pelo somatório dos resultados de cada família, obedecendo seu posicionamento espacial. Os dois procedimentos envolvendo migração geraram seções em profundidade com geometria similar ao modelo interpretado, usado para realizar a modelagem, o que nos validou a interpretação inicial.

Após estes processos terem sido aplicado aos dados de GPR, construiu-se uma poderosa ferramenta para estudar as principais rochas reservatório de hidrocarbonetos presentes na Bacia do Recôncavo (Ba), em escala de afloramentos. Particularmente, estudar as características ou feições internas destas litologias, para com isto podermos, numa segunda etapa, realizar estudos para avaliar suas influências na permeabilidade dos reservatórios.

Por fim, fica claro que a metodologia de se aplicar o GPR para caracterizar os análogos de reservatório juntamente com a modelagem direta, nos dá uma boa estimativa do modelo estrutural interno dos análogos de reservatório, e conseqüentemente dos reservatórios. Assim sendo estes dados podem ser tratados para futuros estudos sobre a permeabilidade e compartimentalização dos referidos reservatórios.

Referências :

- Carcione, J. M. & Cavallini, F., 1994.** Modeling transverse electromagnetic waves in conducting anisotropic media by a spectral time-domain technique, In Terzuoli, A., II : 586-593.
- Carcione, J. M., 1996.** Ground-penetrating radar: Wave theory and numerical simulation in lossy anisotropic media. *Geophysics*, 61: 1664-1677.
- Carcione, J. M., 1998.** Radiation patterns for 2-D GPR forward modeling. *Geophysics*, 63: 424-430.
- McMechan, G. A., Gaynor, G.C. & Szerbiak, R.B. ,1997.** Use of ground-penetrating radar for 3-D stratigraphic characterization of clastic reservoir analogs. *IEE Proceedings*, 135(F,4): 380-390.
- Medeiros, R. A. & Ponte, F. C., 1981.** Roteiro geológico da Bacia do Recôncavo (Bahia), Petrobrás.