

Análise de Velocidade por Inversão de Tempo de Trânsito

Wildney W. S. Vieira, Lourenildo W. B. Leite e Fernando S. M. Nunes, UFPA

Copyright 2010, SBGf - Sociedade Brasileira de Geofísica Este texto foi preparado para a apresentação no IV Simpósio Brasileiro de Geofísica, Brasília, 14 a 17 de novembro de 2010. Seu conteúdo foi revisado pelo Comitê Técnico do IV SimBGf, mas não necessariamente representa a opinião da SBGf ou de seus associados. É proibida a reprodução total ou parcial deste material para propósitos comerciais sem prévia autorização da SBGf.

RESUMO

O objetivo deste trabalho é a análise de velocidade pela inversão de dados sísmicos de reflexão marcados em seções arranjo ponto-médio-comum (PMC). O modelo direto é descrito como uma distribuição de camadas homogêneas, isotrópicas, com interfaces plano-horizontais como refletores. A aplicação é voltada a bacias sedimentares em ambientes marinhos. O problema de inversão é não-linear, multivariado e resolvido por métodos de derivadas resultante da expansão em série de Taylor à primeira ordem. A marcação de eventos na seção tempo-distância é de fundamental importância no processo de inversão, e os pontos marcados constituem os dados de entrada juntamente com as informações a priori do modelo a ser ajustado. Os resultados em dados reais são consistentes com a análise de velocidade semblance.

INTRODUÇÃO

O arranjo PMC e o modelo de camadas plano-horizontais formam um conjunto básico para o processamento de dados sísmicos, e representam uma primeira justificativa para a investigação deste problema objetivando a análise de velocidade que é fundamental para o empilhamento e o imageamento. A aplicação deste trabalho é voltada a bacias sedimentares em ambientes marinhos para se obter uma distribuição de velocidades para a subsuperfície. O modelo é interpretado como sendo aplicado por partes limitadas pela abertura da configuração, e considerado como inicial em processos posteriores. A anisotropia devido à estratificação não é considerada nas equações do modelo direto (Alkhalifah and Tsvankin, 1995) (ver Figura 1).

A descrição das propriedades estatísticas do operador do tempo de trânsito é feito através da solução de um problema de otimização onde a função objeto de minimização é dada pela raiz quadrada da soma dos desvios ao quadrado entre o modelo do tempo de trânsito e os dados observados. O problema é classificado como ajuste de curvas não-linear multiparamétrico, e o método de otimização aplicado é o gradiente de segunda ordem.

O problema sísmico original é apresentado convenientemente na seguinte forma: Dado a seção sísmica observada $t^{obs}(x)$ no espaço D dos dados, deseja-se encontrar um modelo m no espaço M dos parâmetros cujo dados preditivos $t^{pre}(x; v, z)$ ajuste aos dados observados no sentido da norma-2.

A praticidade e a importância de usar um modelo formado por camadas homogêneas, plano-horizontais, com a finalidade de imagear bacias sedimentares e estruturas crostais tem sido argumentado por vários autores como, por exemplo, (Roksandic, 1978). (Hubral, 1976) estende o modelo 2D para 3D para dar um conceito geologicamente mais real. Em outros estudos, (Justice, 1986) aponta o problema de inversão para dados tempo-distância, e (Macdonald, 1986) enfatiza o problema de inversão sísmica levando em consideração a amplitude e o tempo.

O trabalho clássico de (Tarantola, 2005) usa, como um formalismo para o imageamento sísmico, princípios de processos estocásticos, enquanto (Parker, 1994) usa o formalismo do espaço vetorial de funções. Vários autores, entre eles (Lines, 1993), (Ross, 1994), (Rathor, 1997) destacam o problema de ambiguidade na estimativa da distribuição de velocidade com a profundidade a partir de dados tempo-distância na reflexão sísmica.

(Koren and Ravve, 2006) descrevem a inversão, aqui denominada Durbaum-Dix, sob a condição de vínculos para estimar a distribuição de velocidade intervalar $v = v_{int}$ no tempo, a partir de valores marcados de velocidade $v = v_{RMS}$ (que pode ser usada como velocidade de empilhamento) e do tempo-duplo de trânsito correspondente t_0 . A relação entre as velocidades v_{RMS} e v_{int} é escrita abaixo, e este par de equações é denominado de transformada Durbaum-Dix. Neste método, a velocidade intervalar é definida por $v_{int,n} = \Delta z_n / \Delta t_n$ (intervalo temporal $\Delta t = t_n - t_{n-1}$, e o correspondente intervalo em profundidade $\Delta z = z_n - z_{n-1}$) onde os subscritos n e $n - 1$ indicam, respectivamente, base e topo dos intervalos que não são necessariamente uniformes. O par de transformadas Durbaum-Dix, para o caso específico de pequenos afastamentos, é dado por:

$$v_{RMS,n} = \left[\sum_{i=1}^n v_i^2 \Delta t_i / \sum_{i=1}^n \Delta t_i \right]^{1/2} \longleftrightarrow (1)$$

$$v_{int,n} = \left[\frac{v_{RMS,n}^2 t_n - v_{RMS,n-1}^2 t_{n-1}}{t_n - t_{n-1}} \right]^{1/2}$$

Este par tem limitações sendo uma delas não levar em consideração o efeito do comprimento do pulso na convolução com a resposta do meio ao impulso para gerar o traço sísmico. Considerando o modelo convolucional

simples, as interfaces seriam representadas por funções Delta de Dirac (impulsos) com amplitude proporcional ao contraste de impedância. O par representa também um exemplo de inversão direta (propriamente dita), não-vinculada, explícita, na qual a velocidade instantânea (local na seção profundidade) é admitida constante por intervalo. É comum a descrição na literatura que a transformada Durbaum-Dix pode produzir valores não realísticos e oscilantes, até mesmo para variações pequenas de velocidade v_{RMS} .

MODELO DIRETO

A descrição de aspectos físicos e geométricos dos modelos para o cálculo teórico do tempo duplo de trânsito põe em destaque modelos de camadas plano-horizontais. Para o modelo clássico formado de camadas plano-horizontais (homogêneas e isotrópicas), com uma fonte pontual esfericamente simétrica, o espalhamento de energia obedece a uma descrição dependente do tempo duplo de trânsito vertical de cada camada, t_0 . Para o caso de afastamento qualquer, o tempo duplo de propagação, $t(p)$, é dado em função do parâmetro horizontal do raio, p , com i representando o índice da camada, v_i a velocidade, Δt_i o tempo simples de trânsito vertical, z_i a espessura e n o índice do refletor, como ilustrado na Figura 1. Considerando o caso de afastamento nulo, o tempo duplo de propagação, $t(p)$, em função do parâmetro horizontal do raio, é dado por:

$$t(p = 0) = 2 \sum_{i=1}^n \Delta t_i = 2 \sum_{i=1}^n \frac{z_i}{v_i}.$$

Para um afastamento arbitrário, o tempo duplo, $t(p)$, e o afastamento correspondente, $x(p)$, são calculados de forma independente e dados por:

$$t(p) = 2 \sum_{i=1}^n \frac{z_i}{v_i \sqrt{1 - p^2 v_i^2}} \quad e \quad x(p) = 2 \sum_{i=1}^n \frac{v_i p z_i}{\sqrt{1 - p^2 v_i^2}}, \quad (2)$$

onde $p = \sin \theta_0 / v_i$ é a vagarosidade, ou parâmetro horizontal do raio, e θ_0 é o ângulo de partida ($\theta \leq |\pi/2|$).

Na forma prática de trabalho se deseja que a equação temporal seja escrita em função do afastamento na forma geral $t = t(x)$, onde participam os parâmetros das camadas envolvidas (velocidade, v ; espessuras, z). Como consequência, a correção ao afastamento nulo utiliza a trajetória expressa pela lei hiperbólica que relaciona diretamente ao afastamento fonte-receptor (Sheriff and Geldart, 1982) segundo a equação:

$$t(x) = \sqrt{t_0^2 + \frac{x^2}{v_{RMS}^2}}. \quad (3)$$

Na equação (3), v_{RMS} é a velocidade média quadrática para o modelo de camadas plano-horizontais e t_0 é tempo

duplo:

$$v_{RMS} = \left[\frac{\sum_{i=1}^n v_i z_i}{\sum_{i=1}^n z_i} \right]^{1/2} \quad e \quad t_0 = 2 \sum_{i=1}^n \frac{z_i}{v_i}. \quad (4)$$

A Figura 1 ilustra o caso de camadas planas e os parâmetros envolvidos nestas equações.

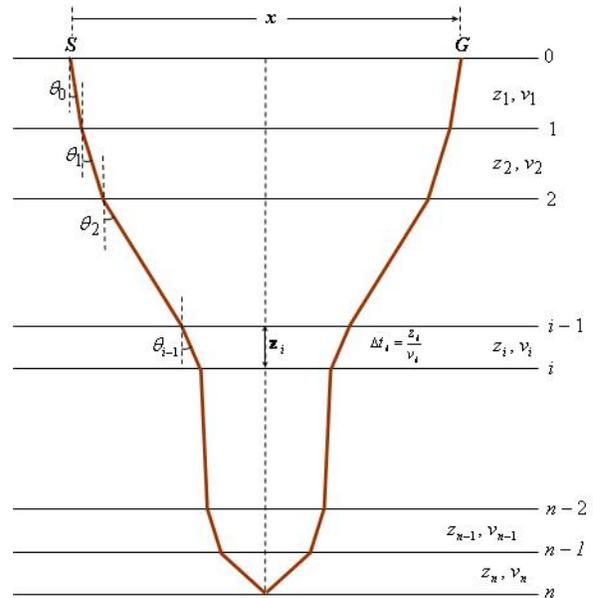


Figura 1: Modelo de camadas plano-horizontais, homogêneas, isotrópicas, onde estão indicados: a fonte (S), o sensor (G), a velocidade da camada i (v_i), a espessura da camada i (z_i); o tempo de trânsito vertical simples (Δt_i) e o ângulo de incidência vertical (θ_{i-1}). Está representado em traço vermelho um evento primário. Eventos que não obedecerem a este critério, ou geometria, são considerados como ruído coerente, como as múltiplas.

MODELO INVERSO

O método de otimização é o gradiente de segunda ordem, e a função medida de desajuste, $\phi(\mathbf{m})$, é expressa por:

$$\phi(\mathbf{m}) = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N [t_i^{obs} - t_i^{pre}(\mathbf{m})]^2}, \quad (5)$$

e o princípio da inversão é representado pela figura 2.

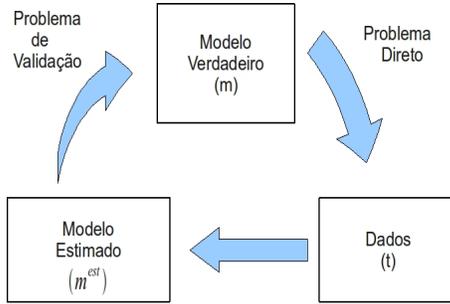


Figura 2: Representação canônica do princípio de inversão.

A expansão em série de Taylor multivariada é sobre a função que representa os dados e o modelo, $t(x; \mathbf{m})$, e em termos dos parâmetros \mathbf{m} . A série lineariza o problema para permitir uma solução a partir de uma posição conhecida \mathbf{m}_1 e de suas derivadas e tem a forma:

$$t(x; \mathbf{m}_2) \cong t(x; \mathbf{m}_1) + \sum_{j=1}^M \frac{\partial t}{\partial m_j}(x; \mathbf{m}_1) \Delta m_j. \quad (6)$$

O tempo observado representa a variável aleatória:

$$t(x; \mathbf{m}_2) = t^{obs}(x; \mathbf{m}_2 = real) = t^{obs}(x). \quad (7)$$

E o tempo preditivo representa o modelo teórico:

$$t(x; \mathbf{m}_1) = t^{pre}(x; \mathbf{m}_1 = modelo) = t^{pre}(x). \quad (8)$$

A partir destes se escreve que:

$$t^{obs}(x) - t^{pre}(x) = \sum_{j=1}^M \frac{\partial t^{pre}}{\partial m_j}(x; \mathbf{m}) \Delta m_j. \quad (9)$$

E na forma matricial:

$$\Delta \mathbf{t}(x; \mathbf{m}) = \mathbf{G}(x; \mathbf{m}) \Delta \mathbf{m}. \quad (10)$$

A equação (10) é a forma linearizada para a solução do problema não-linear, onde $\Delta \mathbf{t}(x; \mathbf{m})$, $(Nx1)$, é um vetor coluna que representa o desvio dos dados; $\Delta \mathbf{m}$, $(Mx1)$, é um vetor coluna que representa o desvio dos parâmetros; e $\mathbf{G}(x; \mathbf{m})$, (NxM) , é a matriz Jacobiana do problema que tem os dados ao longo das colunas e os parâmetros ao longo das linhas e é dada por:

$$G_{i,j} = \frac{\partial t^{pre}}{\partial m_j}(x; \mathbf{m}), \quad (i = 1, N; j = 1, M) \quad (11)$$

As derivadas da equação (11) representam as funções sensibilidade da otimização com relação aos parâmetros.

O problema é definido como sendo sobre-determinado (puro), uma vez que a quantidade de dados é considerada maior do que a de parâmetros a determinar, $(N > M)$, sendo resolvido uma reflexão de cada vez. O método de minimização é por derivadas na forma $\partial \phi(\mathbf{m}) / \partial \mathbf{m} = 0$, o que estabelece um mínimo local. A linearização do

problema de inversão estabelecido é dado pela equação $\mathbf{G} \Delta \mathbf{m} = \Delta \mathbf{t}$, e a solução é da seguinte forma:

$$\Delta \mathbf{m} = [\mathbf{G}^T \mathbf{G}]^{-1} \mathbf{G}^T \Delta \mathbf{t}. \quad (12)$$

A atualização dos parâmetros durante as iterações é dada por:

$$\mathbf{m}^{(k+1)} = \mathbf{m}^k + \gamma \Delta \mathbf{m} \quad (13)$$

onde γ é um fator de ponderação (atenuação ou amplificação) da solução encontrada $\Delta \mathbf{m}$, e k indica o número de iterações realizadas no processo de inversão.

RESULTADOS

Os dados reais são da Bacia Marinha Camamu, linha L5519, PMC 237. A linha é composta de 1098 pontos de tiro, com arranjo unilateral direito. O intervalo de amostragem é 4ms. O espaçamento entre os geofones é 13,34m com o primeiro geofone localizado a 300m da fonte. O espaçamento entre as fontes é de 26,68m.

A marcação de eventos na seção tempo-distância é de fundamental importância no processo de inversão, e os pontos marcados constituem os dados de entrada juntamente com as informações a priori do modelo a ser ajustado. A Figura 3 mostra a seção sísmica usada para a marcação de pontos, e os eventos selecionados como reflexões primárias. Sendo assim, a marcação deve, por princípio, evitar trechos que representem múltiplas, difrações e interseções. A Figura 4 representa a marcação realizada para 10 eventos.

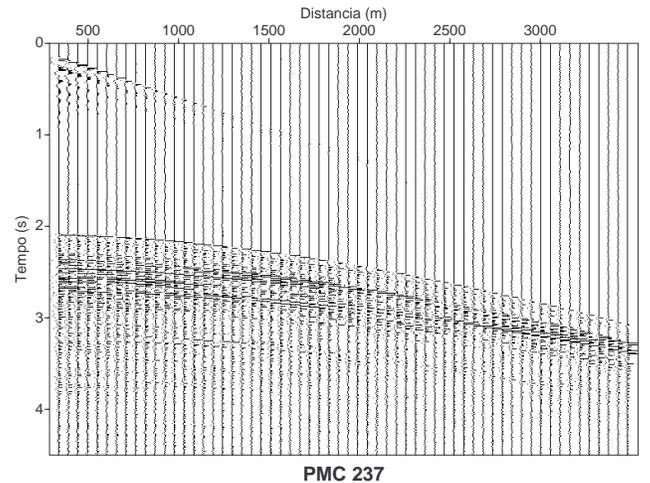


Figura 3: Seção selecionada para mostrar os resultados das etapas do processo de marcação de eventos e inversão. Observa-se na parte superior a onda direta e as ondas de superfície da água, e na parte inferior os eventos de reflexão.

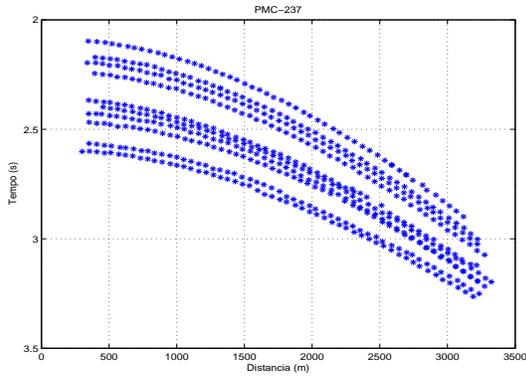


Figura 4: Dados observados selecionados da seção PMC-237 para mostrar os resultados das etapas do processo de inversão em 10 eventos refletores.

Os parâmetros de velocidade e espessura para o modelo inicial estão na Tabela 1 onde a distribuição é linear.

Tabela 1: Valores de velocidade e espessura do modelo inicial.

Camada	Velocidade (m/s)	Espessura (m)
1 ^a	1700	1550
2 ^a	1973	400
3 ^a	2036	450
4 ^a	2106	500
5 ^a	2183	550
6 ^a	2267	600
7 ^a	2358	650
8 ^a	2456	700
9 ^a	2561	750
10 ^a	2673	800

A Figura 5 representa o tempo de trânsito observado e o inicial. Observa-se que o tempo preditivo inicial está muito longe do tempo de trânsito observado.

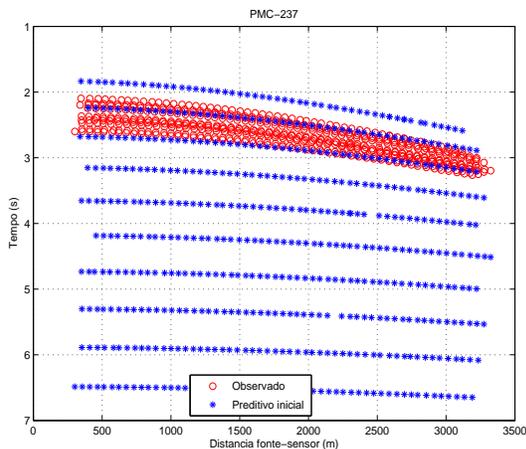


Figura 5: Tempo de trânsito observado e inicial.

As Figuras 6 e 7 representam as derivadas normalizadas e dadas em unidade de tempo para os 10 eventos calculados a partir da equação (11) no processo de inversão, onde se observa formas semelhantes, mas individualizado em relação aos valores na ordenada.

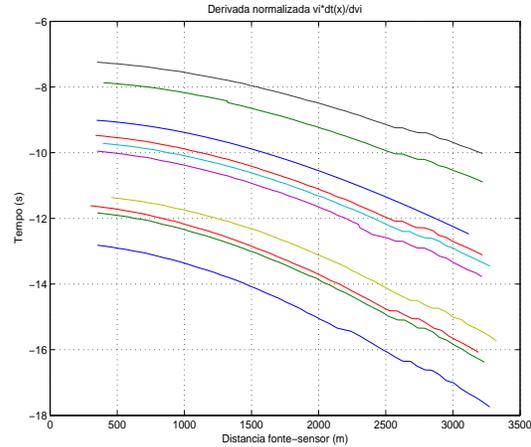


Figura 6: Forma das derivadas em relação à velocidade para 10 refletores.

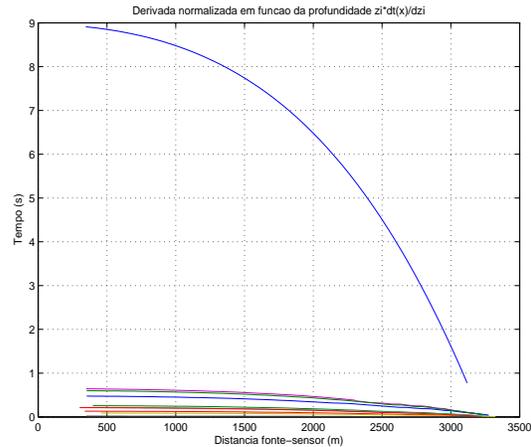


Figura 7: Forma das derivadas em relação à profundidade para 10 refletores.

As Figuras 8, 9 e 10 representam, respectivamente, a função objeto de minimização em relação ao número de iterações, a evolução do parâmetro de velocidade e espessura intervalares. O número máximo de iterações foi de 500, e a função objeto de minimização foi calculada de acordo com a equação (5). A condição de parada foi $\phi(m) < 0,0001$. O número de iterações que melhor ajusta o modelo foi a partir de 300.

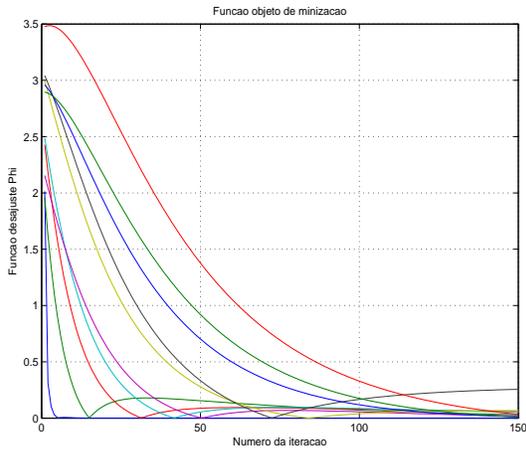


Figura 8: Forma da evolução da função objeto de minimização para os 10 refletores selecionados.

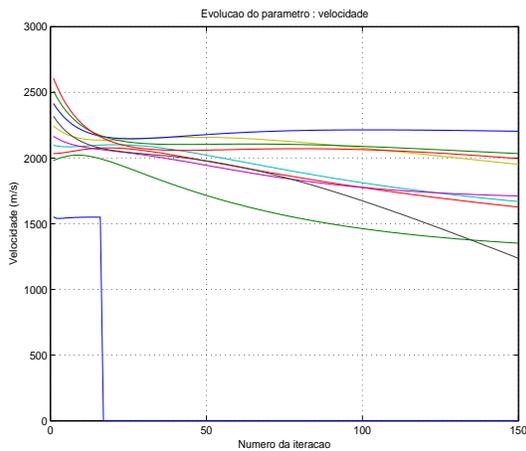


Figura 9: Forma da evolução da velocidade para os 10 refletores selecionados.

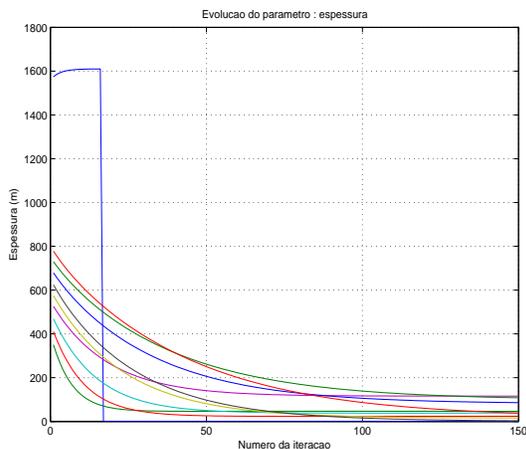


Figura 10: Forma da evolução da espessura para os 10 refletores selecionados.

A Figura 11 representa o ajuste tempo distância que resolve os parâmetros velocidade e espessura intervalares. Observa-se que os intervalos descritos são não uniformes e relacionados aos eventos refletivos marcados. A análise visual desta figura leva a considerar o ajuste como bom.

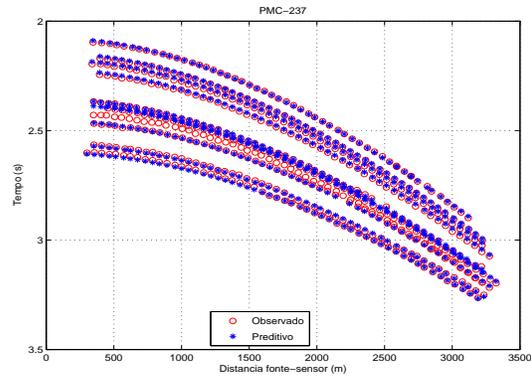


Figura 11: Tempo observado e preditivo para os 10 refletores selecionados.

A Tabela 2 resume os resultados para os 10 eventos de reflexão selecionados, onde se observa a coerência dos valores obtidos para a camada d'água. Neste sentido, é possível continuar na investigação mais completa da seção através da inclusão de informação a priori e na forma de vínculos explícitos e implícitos. Mesmo com o dado preditivo de partida muito distante do dado observado, a inversão consegue ajustar o modelo ao dado observado.

Tabela 2: Valores de velocidade e espessura estimada na inversão.

Camada	Velocidade (m/s)	Espessura (m)
1 ^a	1550	1610
2 ^a	1353	46
3 ^a	1629	24
4 ^a	1671	38
5 ^a	1712	115
6 ^a	1955	16
7 ^a	1246	3
8 ^a	2204	86
9 ^a	2035	108
10 ^a	1997	38

A Tabela 3 resume as velocidades RMS estimadas para os 10 eventos de reflexão selecionados como resultado da inversão.

Tabela 3: Velocidades RMS estimadas na inversão.

Camada	Velocidade RMS (m/s)
1 ^a	1500
2 ^a	1544
3 ^a	1545
4 ^a	1548
5 ^a	1558
6 ^a	1561
7 ^a	1560
8 ^a	1585
9 ^a	1606
10 ^a	1613

CONCLUSÕES

Foram várias as conclusões tiradas durante o processo de desenvolvimento do algoritmo de inversão aqui apresentado, e escrito em Matlab por conveniência de plotagem.

Inicialmente, esta inversão é dependente da forma de marcação dos eventos de reflexão para que haja rapidez no seu uso na análise de velocidade inicial para seções sísmicas na forma gráfica.

Em segundo lugar, os resultados obtidos mostram a necessidade de fortes informações a priori sobre o modelo em subsuperfície; isto é, para os valores de velocidade e espessura intervalares não-uniformes. O processo de inversão resolve os intervalos espessura-velocidade de cima para baixo, e de forma independente, mas conservando cada solução anterior.

Os parâmetros de controle para se obter uma solução plausível são: o número de iterações; o fator de atenuação/amplificação da solução matricial para o refletor; o modelo inicial; e o coeficiente de regularização da solução matricial.

É importante que se registre que o presente método baseado em seções PMC, é limitado por não resolver mergulhos geológicos, que é uma características básicas relacionadas a esta configuração. No entanto o modelo é fundamental do processamento NMO convencional.

Um próximo desenvolvimento relacionado a este trabalho é obter uma distribuição suave de velocidade em subsuperfície de forma automática baseado no semblance para servir como um primeiro modelo a ser atualizado através de processos de tomografia, ou mesmo inversão de campo total.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à PETROBRAS e à FINEP pelo apoio à pesquisa. Os autores W. Vieira e F. Nunes e agradecem, respectivamente, à CAPES e a ANP pela bolsa de estudos voltado ao mestrado. Este trabalho faz parte do INCT-GP.

INCT-GP



REFERÊNCIAS

- Alkhalifah, T., and Tsvankin, I., 1995, Velocity analysis of transversely isotropic media; **60**, 1550–1566.
- Hubral, P. H. W., 1976, Interval velocities from surface measurements in the three-dimensional plane layer case; **41**, no. 2, 233–242.
- Justice, H. J., 1986, Traveltime inversion for the flat-layer model; **51**, no. 10, 1904–1911.
- Koren, Z., and Ravve, I., 2006, Constrained dix inversion; **7**, no. 6, 113–130.
- Lines, L., 1993, Ambiguity in analysis of velocity and depth; **58**, no. 4, 596–597.
- Macdonald, C., 1986, Inverting seismic data using reflection travel times and amplitudes: Los Angeles: University of California.
- Parker, R. L., 1994, Geophysical inverse theory: Princeton University Press.
- Rathor, S. B., 1997, Velocity-depth ambiguity in the dipping reflector case; **62**, no. 5, 1583–1585.
- Roksandic, M. M., 1978, Seismic facies analysis concepts; **26**, 383–398.
- Ross, S. W., 1994, The velocity-depth ambiguity in seismic traveltimes data; **59**, no. 5, 830–843.
- Sheriff, R. E., and Geldart, L. P., 1982, Exploration seismology; volume 1 and 2 Cambridge: University Press.
- Tarantola, A., 2005, Inverse problem theory and methods for parameter estimation: SIAM.