



Imageamento Sísmico em Profundidade de uma Linha Sísmica da Bacia do Jequitinhonha utilizando Estereotomografia

Felipe Terra*, IGEO/UFBA e Petrobras

Jessé Costa, Faculdade de Geofísica/UFPA e INCT - Geofísica de Petróleo

Amin Bassrei, CPGG/IGEO/UFBA e INCT - Geofísica de Petróleo

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.

ABSTRACT

Seismic imaging in depth is very important in geologically complex areas, where the seismic velocity changes considerably. The knowledge of an reliable velocity model is necessary in order to have success in the step of seismic migration. And a reliable velocity model is a great challenge. Stereotomography is a fast and efficient tool that provides accurate velocity distributions. Also called slope tomography, it uses the slowness and picked traveltimes from reflections and diffractions. The available program was used on Marmousoft, which is a smooth version of the synthetic data called Marmousi. Also we applied this approach on real data from Jequitinhonha Basin, Brazil. This real data set of structural complexity demanded a high quality control of event selection for picking and also a high quality control of regularization parameter selection. The results for both the synthetic and real data have shown the computational feasibility and accuracy of this method.

INTRODUÇÃO

A determinação de macro-modelos de velocidade constitui uma etapa crucial para o imageamento sísmico do arcabouço estrutural em subsuperfície. Os métodos de imageamento em profundidade exigem um conhecimento acurado do campo de velocidades de propagação de ondas. No entanto, estabelecer um modelo em profundidade é uma tarefa dispendiosa e não trivial. Um exemplo comum é a construção do campo de velocidades em profundidade a partir de técnicas de análise de velocidade por migração que, além do alto custo computacional da migração, demanda tempo do processador para analisar as velocidades e definir os horizontes. Propomos,

então, utilizar a estereotomografia como um método tomográfico robusto para a estimativa de macro-modelos de velocidade, visando neste contexto o mínimo de intervenção humana e rapidez no processo.

O presente trabalho é baseado numa reformulação do trabalho original de Sword (1986) em uma formulação global da tomografia de inclinação (Billette and Lambaré, 1998). A estereotomografia é desenvolvida com base nas estruturas gerais da teoria do raio paraxial (Cerveny et al., 1977; Farra and Madariaga, 1987), formulação Hamiltoniana da teoria do raio (Farra and Madariaga, 1987; Lambaré et al., 1996), e na formulação geral do problema inverso (Tarantola, 1987).

Os métodos tomográficos de inclinação são caracterizados pelo fato de que, além dos tempos de trânsito, as inclinações dos eventos localmente coerentes são também utilizados pelo procedimento tomográfico. O *picking* destes dados foi realizado a partir de um algoritmo de seleção automática (Billette and Lambaré, 1998) e a inversão dos mesmos utilizando o algoritmo implementado por Costa et al. (2008). Com experiência nos aspectos práticos dos algoritmos, desenvolvida em aplicações no dado sintético Marmousoft, estendemos o método para aplicação em um dado real que consiste em uma linha 2D marítima da Bacia do Jequitinhonha, onde nos deparamos com dificuldades peculiares: condicionamento do dado atenuando as múltiplas e seleção do melhor conjunto de *picks* para a estimativa do campo de velocidades.

MÉTODO

Diferentemente da tomografia convencional, em adição ao *picking* dos tempos de trânsito o método requer a inclinação local associada aos eventos selecionados, simultaneamente nos traços de famílias de tiro-comum e de receptor-comum. O *picking* dos tempos de trânsito é bem conhecido e rotineiramente usado, ao contrário do *picking* das inclinações. Uma inclinação local à um dado tempo é obtida a partir de um painel de coerência (*semblance*) no domínio τ - p . Com um traço de referência, é feito um empilhamento local. Em cada tempo é calculado o empilhamento com diferentes valores de inclinação, gerando portanto o painel de *semblance* onde

são selecionados de forma automática os maiores valores de coerência de cada traço das famílias de fonte comum e receptor comum, onde são estimados respectivamente os valores P_{RX} e P_{SX} .

Os dados consistem em uma coleção discreta de posições de tiros e receptores (S e R, respectivamente), tempos de trânsito T_{RS} (tempo duplo) e inclinações locais dos eventos refletidos selecionados ($P_{SX} = \partial T_{RS}/\partial S$, $P_{RX} = \partial T_{SR}/\partial R$). Ou seja, o espaço de dados é dado pelo vetor

$$\mathbf{d} = \left[[(S, R, P_{SX}, P_{RX}, T_{SR})_i]_{i=1}^N \right]. \quad (1)$$

O evento é modelado como o resultado de uma difração única ou uma reflexão em algum lugar em profundidade. A estereotomografia caracteriza este evento por um par de segmentos de raios terminando em um mesmo ponto em profundidade. Os segmentos de raios são unidos em profundidade por definição (a incerteza experimental não é anexada neste), mas todas as condições de contorno são "relaxadas" e tornam-se variáveis (Billette and Lambaré, 1998), isto é, testadas contra os dados observados (*picks*). Na prática, dois raios são propagados para cima (até a superfície) em um modelo de velocidade a priori, de uma localização em profundidade a priori, com uma priori escolha dos ângulos de partida, e com os dois tempos de trânsito (relacionados aos dois raios) também a priori. Os pontos de chegada dos raios correspondem às localizações calculadas da fonte e do receptor. Os componentes horizontais dos parâmetros dos raios calculados nesses pontos fornecem as inclinações P_{SX} e P_{RX} , e a soma dos dois tempos de trânsito (correspondentes aos dois raios) a priori fornecem diretamente os eventos calculados de tempo de trânsito duplo. Se a velocidade do modelo a priori não está correto, estas posições, inclinações e tempo de trânsito calculados não ajustará aos correspondentes valores medidos nos dados. Neste caso, os desvios são conjuntamente interpretados em termos de erros na velocidade e no segmento de raio.

Sendo assim, o espaço do modelo é definido pelo vetor \mathbf{m} que inclui o campo de velocidade C e N pares de segmentos de raios:

$$\mathbf{m} = \left[[(X, \theta_S, \theta_R, T_S, T_R)_i]_{i=1}^N, [C_j]_{j=1}^J \right]. \quad (2)$$

Nesta equação, o par dos segmentos de raios é descrito por um ponto de partida comum X , dois ângulos de saída θ_S e θ_R , e dois tempos de trânsito T_S e T_R . É importante salientar que o número de parâmetros necessários para descrever o modelo \mathbf{m} aumenta com o número N de eventos picados. Para aplicações de grande dimensão, isto pode ser levado em conta para a implementação do método.

Para resolver o problema linear é necessário ter em mãos um primeiro modelo, e calcular os dados correspondentes a equação 1. O próximo passo é verificar o quão este modelo consegue aproximar (explicar) os dados observados \mathbf{d}^{obs} , e a partir dele calcular qual perturbação a

ser somada ao modelo de referência para obter melhores ajustes. Para tanto, são traçados os raios para estimar os dados calculados \mathbf{d}^{cal} . Verifica-se o ajuste entre os dados observados e os calculados

$$\delta \mathbf{d} = \mathbf{d}^{obs} - \mathbf{d}^{cal}. \quad (3)$$

O ajuste nos dados pode ser reescrito como um processo iterativo da forma

$$\mathbf{d}^{k+1} - \mathbf{d}^k = \left. \frac{\partial g}{\partial \mathbf{m}} \right|_{\mathbf{m}=\mathbf{m}^k} (\mathbf{m}^{k+1} - \mathbf{m}^k), \quad (4)$$

no qual k representa o número de iterações e $G^k = \partial g / \partial \mathbf{m}$ representa a aproximação para o problema direto em torno do modelo \mathbf{m}^k

$$\delta \mathbf{d}^k = G^k \delta \mathbf{m}^k. \quad (5)$$

O operador G^k é conhecido por conter as derivadas de Fréchet e consiste em uma matriz com as diferenciações dos dados em relação aos parâmetros. E para obter a perturbação dos parâmetros $\delta \mathbf{m}^k$ é necessário inverter a matriz. Sendo este, um caso complicado na geofísica, recorre-se a procedimentos matemáticos que calculam a inversa generalizada $G^{k,+}$ e que possibilitem a obtenção da perturbação dos parâmetros na equação

$$\delta \mathbf{m}^k = G^{k,+} \delta \mathbf{d}^k. \quad (6)$$

Depois de calculada a perturbação dos parâmetros por uma otimização local utilizando o método do conjugado gradiente LSQR (Paige and Saunders, 1982), o modelo de referência é atualizado

$$\mathbf{m}^{k+1} = \mathbf{m}^k + \delta \mathbf{m}^k. \quad (7)$$

Nesse processo iterativo, estima-se o novo dado calculado \mathbf{d}^{cal} para \mathbf{m}^{k+1} e, novamente, avalia-se o ajuste dos dados (como na equação 3). Caso a norma do ajuste $\|\delta \mathbf{d}^k\|$ não seja menor que um valor pré-determinado ou quando chegar ao número máximo de iterações, o sistema 6 é resolvido novamente para uma nova atualização dos parâmetros (equação 7).

Este esquema iterativo pode ser expresso como (Tartola, 1987)

$$\mathbf{m}^{k+1} = \mathbf{m}^k - \left[\left. \frac{\partial^2 \Phi}{\partial \mathbf{m}^2} \right|_{\mathbf{m}=\mathbf{m}^k} \right]^{-1} \left. \frac{\partial \Phi}{\partial \mathbf{m}} \right|_{\mathbf{m}=\mathbf{m}^k}, \quad (8)$$

onde a matriz $\partial^2 \Phi / \partial \mathbf{m}^2$ é chamada de matriz Hessiana. E, neste trabalho, utiliza-se uma função objetivo minimizada pela norma clássica l_2 implementada no algoritmo por Costa et al. (2008):

$$\begin{aligned} \Phi(\mathbf{m}) = & \|\mathbf{d}^{obs} - g(\mathbf{m})\|_2^2 + \lambda_{Lap}^2 \|(\mathbf{D}_1^2 + \mathbf{D}_1^2)(\mathbf{m} - \mathbf{m}_0)\|_2^2 \\ & + \lambda_{C1}^2 \|(\mathbf{D}_1^2(\mathbf{m} - \mathbf{m}_0))\|_2^2 + \lambda_{C3}^2 \|(\mathbf{D}_3^2(\mathbf{m} - \mathbf{m}_0))\|_2^2 \\ & + \lambda_{G1}^2 \|(\mathbf{D}_1(\mathbf{m} - \mathbf{m}_0))\|_2^2 + \lambda_{G3}^2 \|(\mathbf{D}_3(\mathbf{m} - \mathbf{m}_0))\|_2^2 \\ & + \lambda_R^2 \|(\mathbf{D}_R(\mathbf{m} - \mathbf{m}_0))\|_2^2 + \lambda_D^2 \|(\mathbf{m} - \mathbf{m}_0)\|_2^2, \end{aligned} \quad (9)$$

onde os fatores λ funcionam como multiplicadores de Lagrange que ponderam as contribuições das regularizações na função objetivo. O peso λ_D atua em todos

os parâmetros e tem como objetivo ponderar as atualizações destes e o peso λ_R controla o grau de suavização ao longo do refletor. Enquanto que o peso λ_{Lap} determina a suavização das curvaturas isotrópicas (Laplaciano), com também os pesos λ_{C1} , λ_{C3} , λ_{G1} e λ_{G3} determinam, respectivamente, a curvatura e o gradiente em relação às direções x_1 e x_3 .

EXEMPLO NUMÉRICO

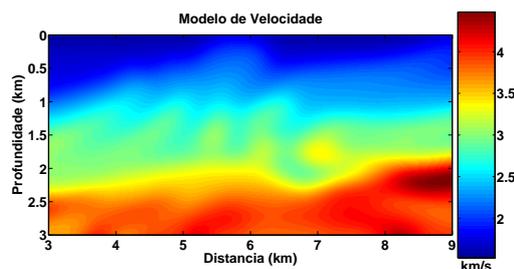
Avaliamos o método, inicialmente, utilizando o dado Marmousoft, adaptado por Billette and Lambaré (1998) do dado sintético 2D Marmousi utilizando modelagem de raios com aproximação de Born que provém um conjunto de dados livre de múltiplas e refrações. Além disso, o Marmousoft é uma combinação de um campo de velocidade suavizado e uma refletividade bastante complexa, como podemos observar nas Figuras 1a e 2a que são, respectivamente, o campo de velocidade exato e o resultado da migração pré-empilhamento em profundidade. Tudo isso implica em um dado ideal para avaliar a estereotomografia onde a etapa do *picking* não será influenciada pelas reflexões múltiplas e o dado em si foi originado a partir da modelagem de um campo suave de velocidades o que facilita a comparação com os modelos estimados que devido às conveniências numéricas são também campos suavizados.

A primeira etapa do processo foi coletar os *picks* utilizando a ferramenta de seleção automática, que nos forneceu um total de 5490 eventos localmente coerentes, contendo posições de fontes e receptores, estimativas de tempos de trânsito e componentes de vagarosidade horizontais (inclinações medidas nos eventos). A etapa seguinte, a inversão dos dados, é realizada inicialmente em uma malha *B-spline* esparsa, com 11×11 nós. Os nós são espaçados de 1 km lateralmente e de $0,5\text{ km}$ verticalmente. O resultado dessa inversão é o modelo inicial para a inversão final em uma malha *B-spline* densa, com 51×51 nós espaçados de $0,2\text{ km}$ lateralmente e $0,1\text{ km}$ verticalmente. Os modelos de velocidade são apresentados depois de alcançar o número máximo de 30 iterações e reamostrados numa malha 1001×601 onde os nós estão espaçados 10 m lateralmente e 5 m verticalmente para serem utilizados na migração. O melhor resultado obteve um erro RMS de $E_m = 1,67 \times 10^{-3}$ e desvios de 3 m para a posição, $0,003\text{ s/km}$ para a vagarosidade e $6 \times 10^{-4}\text{ s}$ para o tempo. As Figuras 1(b) e 2(b) ilustram o resultado e validam a eficácia do método.

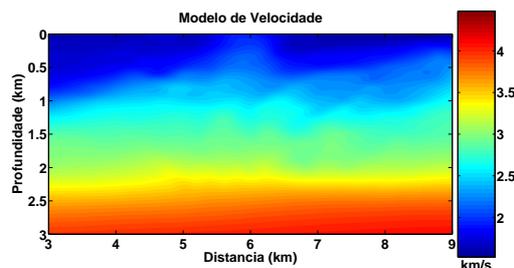
APLICAÇÃO EM DADO REAL

Dado

A linha sísmica utilizada é a 214-RL-0266 e fez parte de uma aquisição sísmica marinha 2D realizada na Bacia do Jequitinhonha, sul da Bahia, em frente à foz do Rio Jequitinhonha. Este dado foi cedido pela Petrobras para

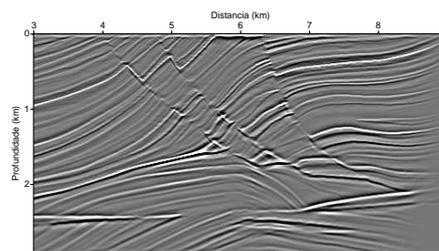


(a)

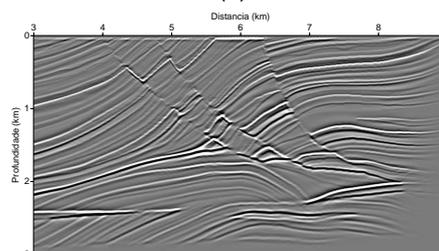


(b)

Figura 1: Modelo de velocidades (a) exato e (b) estimado.



(a)



(b)

Figura 2: Campo migrado com o modelo de velocidade (a) exato e (b) estimado.

o CPGG/UFBA e está no formato SEG-Y. Os parâmetros de aquisição deste dado estão descritos na Tabela 1.

Condicionamento do dado

Uma importante tarefa no processamento de dados sísm-

micos é a identificação e a subsequente supressão das reflexões múltiplas. A interferência da energia das múltiplas nos eventos primários resulta na representação distorcida da subsuperfície e introduz incertezas na interpretação. E na etapa de seleção dos eventos (essencialmente primários) na estereotomografia, é imprescindível que os eventos múltiplos estejam atenuados para não serem confundidos com os eventos primários. Assim, diferente do exemplo numérico apresentado, aplicamos métodos para atenuar as múltiplas, principalmente às relacionadas à superfície do fundo do mar. Após testes com diversos métodos, observamos que a melhor aplicação para o dado foi conjugar a deconvolução preditiva utilizando o algoritmo de Morf com o método SRME (do inglês *Surface-Related Multiple Elimination*). Os resultados podem ser observados na Figura 3.

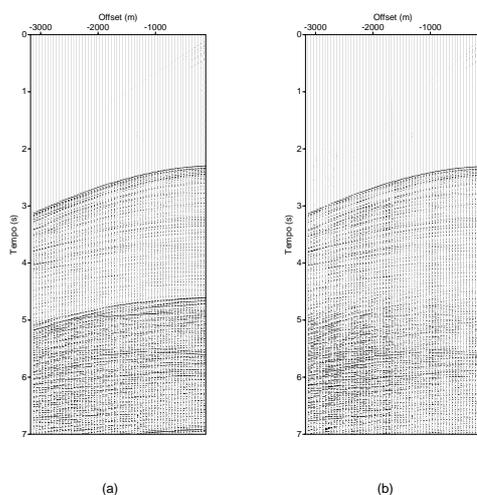


Figura 3: Comparação entre o dado de entrada (a) e dado com as múltiplas atenuadas pelos métodos Morf+SRME (b).

Aplicação da estereotomografia

A ferramenta de *picking* automático coletou cada conjunto de dados em menos de meia hora. O primeiro de-

Tabela 1: Parâmetros de aquisição da linha sísmica 214-RL-0266.

DESCRIÇÃO DOS PARÂMETROS	PARÂMETROS UTILIZADOS
Lanço (m)	0-150-3125
Intervalo entre receptores (m)	25
Intervalo entre tiros (m)	25
Número de tiros	1577
Número de canais	120
Intervalo de amostragem (ms)	4
Número amostras	1751
Tempo de registro (s)	7,00
Menor afastamento (m)	150
Maior afastamento (m)	3125

les é composto em torno de 16.000 eventos, ou seja, em média 16.000 pares de segmentos de raios e valores de vagarosidade, sendo o critério no *semblance* definido para 0.7. Como durante o processo de inversão alguns *picks* não foram bem ajustados na região mais profunda da seção (ver Figura 4c), o critério utilizado no *semblance* para o segundo conjunto foi de 0.8, acarretando em uma seleção em torno de 12.000 eventos.

Para as inversões estereotomográficas com a malha esparsa, o modelo inicial foi definido por um campo de velocidade homogêneo descrito por 100 nós (5km de espaçamento lateral de 1km de espaçamento vertical). Enquanto que, para a malha densa, o modelo utilizado para as inversões foi composto por 21×19 nós (2,5km de espaçamento lateral e 0,5km de espaçamento vertical) a partir de interpolação B-spline.

O modelo de velocidade final, mostrado nas Figuras 4a e c para o primeiro conjunto de *picks* e nas Figuras 4b e d para o segundo, foi obtido após 100 iterações não-lineares e foi descrito por um total de 4101×1001 nós e com uma amostra final de 10m lateralmente e 5m na vertical. O modelo estimado para o primeiro conjunto de *picks* possui erro RMS de $E_m = 4,07 \times 10^{-2}$ e desvios de 5m para a posição, 0,076s/km para a vagarosidade e 2×10^{-4} s para o tempo, enquanto que para o segundo o erro RMS foi de $E_m = 3,64 \times 10^{-3}$ e desvios de 4m, 0,068s/km e 1×10^{-4} s.

A distribuição espacial dos pontos de reflexão/difração foi relativamente boa, exceto na parte rasa, onde os *picks* não definem com clareza a continuidade dos refletores (ver Figuras 4c e d). Na parte mais profunda, por exemplo, é possível observar com nitidez a continuidade de alguns refletores inclusive a de um canal, como pode ser visto na Figura 4e.

Por fim, temos a seção migrada em profundidade utilizando o modelo de velocidade final da estereotomografia com menos *picks* anômalos (Figura 4b). O método de migração utilizado foi implementado por Amazonas et al. (2007) que utilizou migração por diferenças finitas usando aproximações de Padé complexas em dados pré-empilhados. Uma das imagens resultantes pode ser observada na Figura 5, confirmando a boa qualidade do campo de velocidade estimado pela estereotomografia principalmente na região do talude onde a cobertura de raios é relativamente alta e os *picks* demonstram um coerência maior, resultando consequentemente numa melhor estimativa da velocidade.

CONCLUSÕES

A Tomografia de inclinação formulada por Billette and Lambaré (1998) é bastante promissora para estimativa de macro-modelos de velocidade. De posse a uma eficiente ferramenta de *picking* automático e de um algoritmo robusto de inversão, foi possível estimar modelos suaves de velocidade para serem utilizados no imagea-

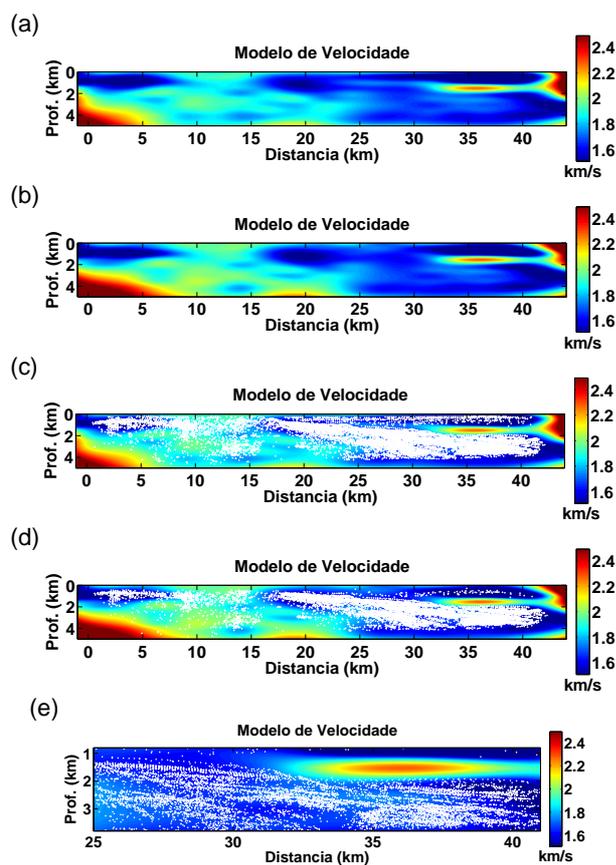


Figura 4: Modelo de velocidades estimados (a) e (b), com os *picks* (c) e (d) e com o zoom da região do talude (e).

mento em profundidade de dados pré-empilhados.

As duas aplicações do método que apresentamos foram realizadas em um período de tempo curto. A estereotomografia, assim chamada por Billette and Lambaré (1998), foi de simples manuseio e os procedimentos foram realizados com um mínimo de intervenção humana, resultando em modelos geologicamente plausíveis. Obviamente que, para a aplicação nos dados reais, por se tratar não somente de um dado antigo como também estruturalmente complexo, demandou-se tempo para o condicionamento com a atenuação das múltiplas, para o tratamento dos *picks* e para a exigente escolha dos regularizadores. O *picking* na estereotomografia é certamente o maior problema para a aplicação em dados reais. Nesta etapa, tornou-se necessária uma maior intervenção humana. A estratégia adotada foi, então, o rigoroso controle de qualidade dos *picks* não somente com base no controle de qualidade disponibilizado pela ferramenta de seleção automática, mas também a partir do resultado da inversão onde é possível observar os possíveis pontos espalhadores (*picks*) que não foram ajustados corretamente e que não permitiram uma estimativa correta da velocidade do meio.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a Frédéric Billette, Gilles Lambaré e a Pascal Podvin pela disponibilidade do programa de *picking* e dos dados Marmousoft, aos geofísicos da PETROBRAS Manoel Gontijo e Ricardo Cruz, que auxiliaram na etapa de atenuação de múltiplas, à FINEP pelo apoio à Rede CT-PETRO de Geofísica de Exploração - Rede 01 - Fase 3 - "Imageamento do Talude Continental", e ao LAGEP/CPGG/UFBA pela utilização dos recursos computacionais. Felipe Terra agradece ao CNPq e à ANP (PRH-08) pela bolsa de mestrado. Amin Bassrei e Jessé Costa agradecem ao CNPq pela bolsa de produtividade de pesquisa.

REFERÊNCIAS

- Amazonas, D. R., Costa, J. C., Schleicher, J., and Pestana, R., 2007, Wide-angle fd and ffd migration using complex padé approximations: *Geophysics*, **72**, S215–S220.
- Billette, F., and Lambaré, G., 1998, Velocity macro-model estimation from seismic reflection data by stereotomography: *Geophysical Journal International*, **135**, 671–690.
- Cerveny, V., Molotkov, I. A., and Psencik, I., 1977, *Ray theory in seismology*: Charles University Press, Praha.
- Costa, J. C., Silva, F. J. C., Gomes, E. N. S., Schleicher, J., Melo, A., and Amazonas, D., 2008, Regularization in slope tomography: *SEG Technical Program Expanded Abstracts*, **27**, no. 1, 3325–3329.
- Farra, V., and Madariaga, R., 1987, Seismic waveform modeling in heterogeneous media by ray perturbation theory: *Journal of Geophysical Research*, **92**, 3697–2712.
- Lambaré, G., Lucio, P. S., and Hanyga, A., 1996, Two-dimensional multivalued traveltimes and amplitude maps by uniform sampling of ray field: *Geophysical Journal International*, **125**, 584–598.
- Paige, C., and Saunders, M. A., 1982, Lsq: Sparse linear equations and least squares problems: *ACM Trans. Math. Soft.*, **8**, 43–71.
- Sword, C. H., 1986, Tomographic determination of interval velocities from picked reflection seismic data: 56th Annual SEG Meeting and Exposition, Society of Exploration Geophysicists, pages 657–660.
- Tarantola, A., 1987, *Inverse problem theory: Methods for data fitting and model parameter estimation*: Elsevier.

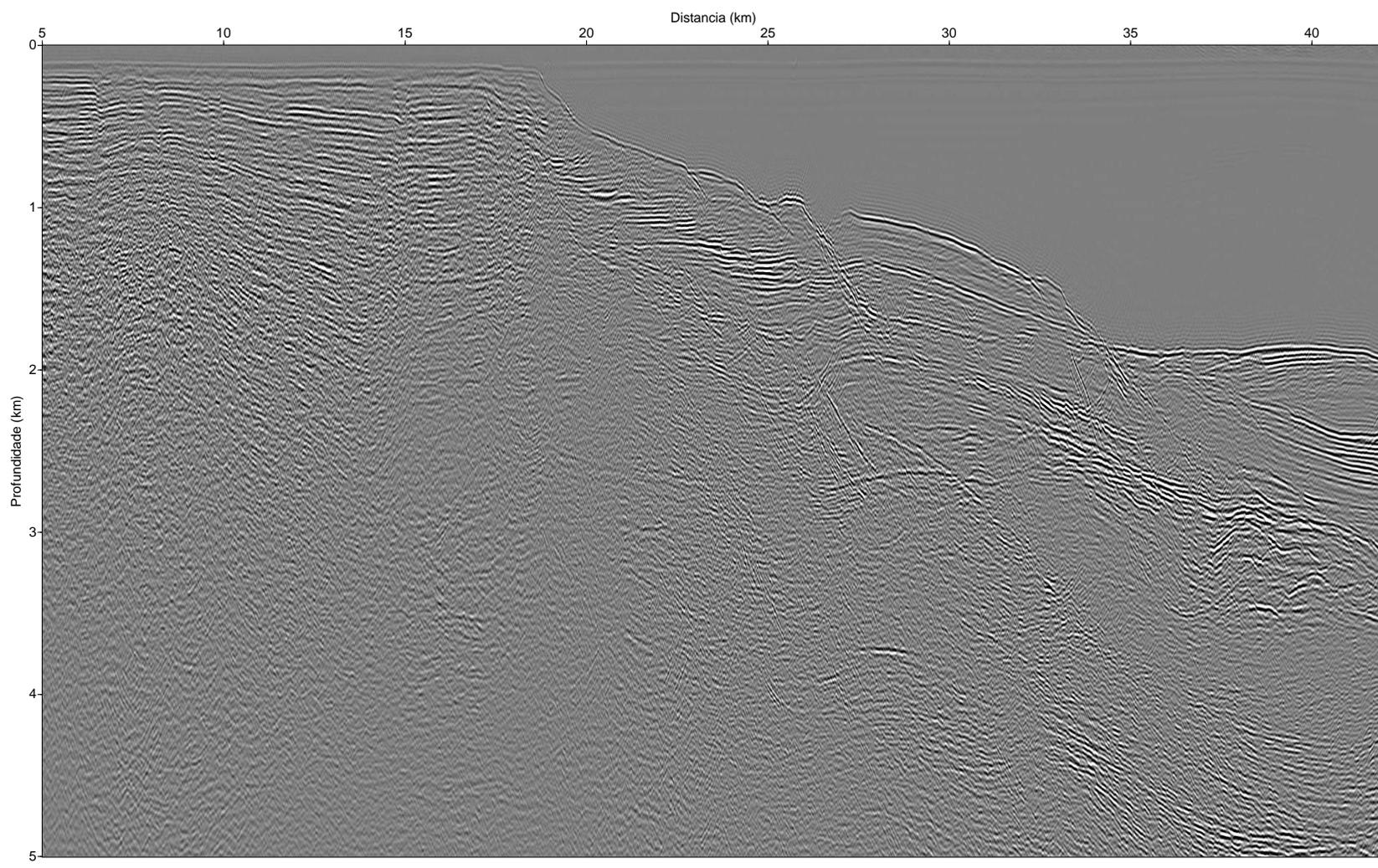


Figura 5: Seção migrada em profundidade com o modelo estimado da Figura 4b.