

## Atenuação de artefatos da migração reversa no tempo

Adriano W. G. Santos\*, Reynam C. Pestana, CPGG/UFBA e INCT-GP/CNPQ e Edvaldo S. Araujo, CPGG/UFBA

Copyright 2012, SBGF - Sociedade Brasileira de Geofísica Este texto foi preparado para a apresentação no V Simpósio Brasileiro de Geofísica, Salvador, 27 a 29 de novembro de 2012. Seu conteúdo foi revisado pelo Comitê Técnico do V 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

Reverse-time migration (RTM) uses the two-way wave-equation, allowing the propagation of the wavefield in all directions. Furthermore, this method deals with any velocity variation as well as steeply dipping reflectors. However, this method presents a low-frequency noise on the migrated sections caused by cross correlation of headwaves, diving waves, and back-scattered waves. This effect is more pronounced in regions with strong velocity contrasts, complicating the interpretation in these places. In this paper, we study how different approaches can be used to mitigate these artifacts, especially three techniques: the Laplacian filter, wavefield decomposition and Poynting vector, calculated from the rapid expansion method (REM).

### INTRODUÇÃO

A migração reversa no tempo utiliza a equação completa da onda, mostrada em (1). Por isso, é mais genérica do que qualquer outro método de migração baseado na equação da onda unidirecional, pois permite a propagação da onda em qualquer direção, sem limitação de mergulho. Além disso, pode contemplar quaisquer variações de velocidade e evitar problemas com ondas evanescentes (Baysal et al., 1983).

$$\frac{1}{c(\mathbf{x})^2} \frac{\partial^2 P(t, \mathbf{x})}{\partial t^2} = \nabla^2 P(t, \mathbf{x}) \quad (1)$$

onde  $\mathbf{x}$  são as coordenadas espaciais  $(x, y, z)$ ,  $\nabla^2$  é o operador Laplaciano, dado por  $\nabla^2 = \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2}$ ,  $P$  é o campo de ondas,  $c$  é a velocidade de propagação e  $t$  é o tempo.

A RTM pré-empilhamento consiste em propagar o campo de ondas da fonte utilizando a equação (1), desde o tempo  $t = 0$  até o tempo  $t = t_f$ , armazenando o resultado em  $s(t, \mathbf{x})$ . Em seguida, o campo de ondas dos

receptores é propagado desde o tempo  $t = t_f$  até o tempo  $t = 0$ , com o resultado armazenado em  $r(t, \mathbf{x})$ .

A imagem final  $I$  pode ser construída segundo a equação 2. Se o campo de velocidades usado na migração for uma boa aproximação da velocidade verdadeira no modelo geológico, no instante de tempo em que houve uma reflexão, as frentes de onda da fonte e dos receptores estarão na mesma posição do modelo, como mostra a Figura 1. Dessa forma, a correlação entre os dois campos tornará visíveis os refletores em subsuperfície.

$$I(\mathbf{x}) = \sum_{t=0}^{t_f} s(t, \mathbf{x}) r(t, \mathbf{x}) \quad (2)$$

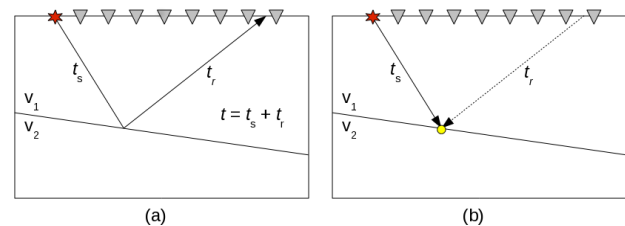


Figura 1: (a) Caminho de propagação de uma onda refletida em subsuperfície. (b) Correlação dos campos de onda da fonte (linha contínua) e dos receptores (linha pontilhada), durante a condição de imagem da RTM.

Entretanto, essa condição de imagem introduz um ruído de baixa frequência, causado pela correlação de ondas refratadas, ondas de mergulho e ondas retornantes (Yoon et al., 2004), produtos da equação completa da onda, como pode ser observado na Figura 2.

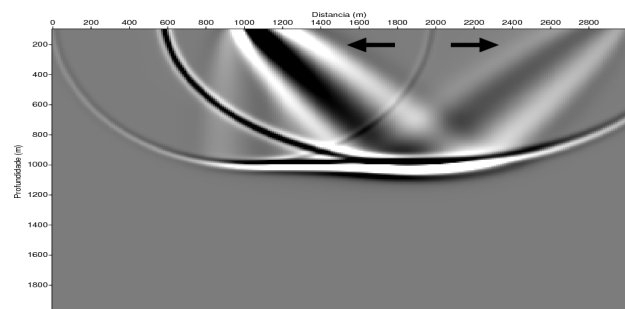


Figura 2: Ruído de baixa frequência observado na RTM de um tiro em um modelo de duas camadas.

Neste trabalho, abordamos a origem desses artefatos indesejáveis e apresentamos algumas técnicas que podem ser usadas para atenuá-los, dentre as quais iremos destacar: filtro Laplaciano, decomposição do campo de ondas e separação do campo através do vetor de Poynting, calculado pelo método de expansão rápida (REM).

## ORIGEM DOS ARTEFATOS

Como foi visto na seção anterior, a correlação cruzada consegue imagear os refletores pois, no instante em que houve a reflexão, as frentes de onda da fonte e dos receptores estão na mesma posição do modelo.

Porém, nos demais instantes de tempo pode haver correlação entre os dois campos em posições onde não existem refletores, gerando artefatos na seção migrada que não correspondem à estruturas geológicas.

Um dos casos em que isso pode ocorrer é exemplificado na Figura 3. A onda descendente se encontra com a onda já refletida em um ponto onde não existem estruturas. Isso acontecerá para todos os pontos no caminho da reflexão.

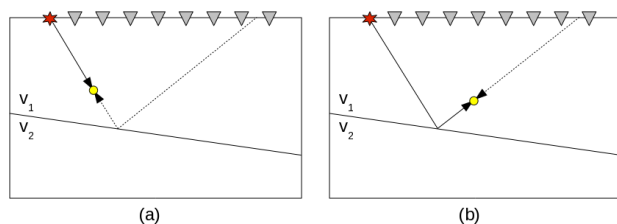


Figura 3: (a) Frente de onda da fonte sendo correlacionada com a onda refletida dos receptores. (b) Frente de onda dos receptores sendo correlacionada com a onda refletida da fonte.

É importante observar que quanto maior for a amplitude da onda refletida, mais notáveis serão os artefatos na imagem migrada. Portanto, esse ruído está mais presente em regiões mais rasas e em locais com fortes contrastes de velocidade.

## ATENUAÇÃO DOS ARTEFATOS

Uma das formas mais simples de reduzir os artefatos é suavizar o campo de velocidades utilizado na migração. Isso irá amenizar as variações abruptas de velocidade nas interfaces, reduzindo a amplitude das reflexões, o que consequentemente enfraquecerá o ruído nas imagens. A Figura 4b mostra o resultado da migração de 200 tiros do modelo de duas camadas mostrado na Figura 4a. Após a suavização do campo de velocidades (Figura 4c), um novo resultado foi obtido (Figura 4d), mostrando uma clara atenuação do ruído de baixa frequência.

A grande vantagem dessa abordagem é dispensar alterações no algoritmo de migração. Porém, o uso da veloci-

dade incorreta pode prejudicar a qualidade do resultado final, principalmente em modelos mais complexos, limitando assim sua eficácia.

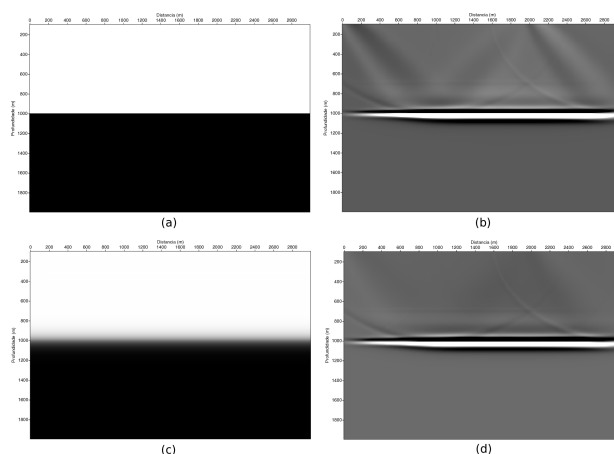


Figura 4: (a) Campo de velocidades com duas camadas (2000m/s e 2500m/s) sem suavização. (b) Resultado da RTM para o campo sem suavização. (c) Modelo de velocidades suavizado. (d) Resultado da RTM com o campo suavizado.

Outra opção é utilizar diferentes condições de imagem (Chattopadhyay e McMechan, 2008), em que não exista a correlação com as ondas retornantes. Como por exemplo, utilizar a equação da onda unidirecional para calcular tempos de trânsito (Chang e McMechan, 1986).

Uma outra classe importante de algoritmos usados para atenuar esse ruído são os métodos de filtragem, que procuram se aproveitar de sua característica de baixa frequência, para removê-lo das seções migradas.

Este tipo de procedimento possui um custo adicional relativamente baixo, já que os filtros podem ser aplicados no resultado final da migração.

Mulder e Plessix (2003) utilizam um filtro corta-baixa no domínio do espaço. Enquanto Guitton et al. (2006) aplicam um filtro de mínimos quadrados, fazendo um comparativo com um filtro de derivadas e com o filtro Laplaciano.

Um modo diferente de pensar o problema é construir pontos de imagem comum (CIGs) no domínio do ângulo. A ideia consiste em identificar neste domínio os ângulos de reflexão em que o ruído de baixa frequência está presente. Zhang et al. (2010) mostram que é possível melhorar a imagem final ao somar apenas os eventos com ângulo de reflexão entre  $0^\circ$  e  $60^\circ$ .

Por fim, ainda é possível fazer a decomposição do campo de ondas, por exemplo, a partir do vetor de Poynting (Bulcão et al., 2007) ou no domínio  $t-k$  (Liu et al., 2011). O objetivo é eliminar da condição de imagem as correlações das componentes responsáveis pelo ruído,

mantendo apenas aquelas que carregam informação referente aos refletores.

### Filtro Laplaciano

A imagem final  $I$  pode ser processada utilizando o filtro Laplaciano da seguinte forma (Youn e Zhou, 2001):

$$I'(\mathbf{x}) = \left( \frac{\partial^2 I}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 I}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 I}{\partial z^2} \right) \quad (3)$$

em que  $I$  é a seção migrada obtida pela equação 2 e  $I'$  é o resultado da aplicação do filtro Laplaciano.

A partir da relação (4), é possível observar que este filtro é equivalente a aplicação de um peso de  $\cos^2 \theta$  aos CIGs no domínio do ângulo (Zhang e Sun, 2008).

$$k_x^2 + k_y^2 + k_z^2 = 4\omega^2 \cos^2 \theta / v^2 \quad (4)$$

onde  $\theta$  é o ângulo de reflexão e  $v$  é a velocidade intervar local.

Na Figura 5 pode-se ver o resultado da migração do modelo de duas camadas após a aplicação do filtro Laplaciano. É possível observar que o ruído apresentado na Figura 4b foi significativamente reduzido.

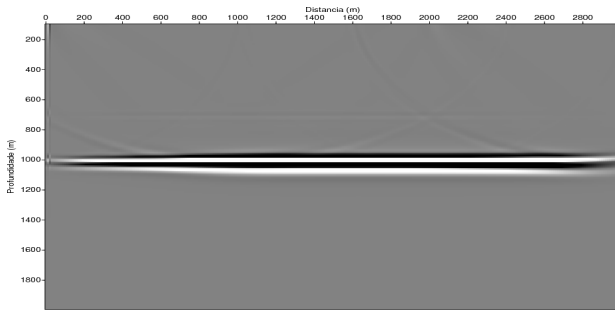


Figura 5: Resultado da migração após a aplicação do filtro Laplaciano.

A principal vantagem dessa filtragem, além de sua fácil implementação, é o fato de preservar as informações nos refletores mais inclinados, ao contrário do que pode acontecer numa filtragem corta-baixa. Porém, o filtro Laplaciano pode aumentar o ruído de alta frequência e remover parte da informação de baixa frequência (Guitton et al., 2006), que pode ser importante, por exemplo, em alguns métodos de análise de velocidade.

### Decomposição do campo de ondas

Para realizar a decomposição do campo de ondas, usamos a abordagem proposta por Liu et al. (2011), em que a separação é feita no domínio  $t-k_z$ . Assim, serão necessárias apenas transformadas de Fourier 1D, reduzindo o custo adicional do método, quando comparado com a decomposição no domínio  $f-k_z$ , que precisa de transformadas de Fourier 2D.

O campo de ondas da fonte pode ser decomposto em:

$$S_+(t, k_z) = \begin{cases} \bar{S}(t, k_z), & \text{if } k_z \geq 0 \\ 0, & \text{if } k_z < 0 \end{cases} \quad (5)$$

$$S_-(t, k_z) = \begin{cases} 0, & \text{if } k_z \geq 0 \\ \bar{S}(t, k_z), & \text{if } k_z < 0 \end{cases}$$

e o campo de ondas dos receptores em:

$$R_+(t, k_z) = \begin{cases} \bar{R}(t, k_z), & \text{if } k_z \geq 0 \\ 0, & \text{if } k_z < 0 \end{cases} \quad (6)$$

$$R_-(t, k_z) = \begin{cases} 0, & \text{if } k_z \geq 0 \\ \bar{R}(t, k_z), & \text{if } k_z < 0 \end{cases}$$

onde  $\bar{S}$  e  $\bar{R}$  são as transformadas de Fourier 1D, em relação a  $z$ , dos campos de onda da fonte e dos receptores, respectivamente.

A nova condição de imagem é dada por:

$$I(\mathbf{x}) = \sum_{t=0}^{t_f} s_+^*(t, \mathbf{x}) r_-(t, \mathbf{x}) + s_-^*(t, \mathbf{x}) r_+(t, \mathbf{x}) \quad (7)$$

em que  $s_{\pm}$  e  $r_{\pm}$  são, respectivamente, as transformadas inversas de Fourier de  $S_{\pm}$  e  $R_{\pm}$  e  $*$  representa o operador de complexo conjugado.

Nota-se que os termos  $s_+^*(t, \mathbf{x}) r_+(t, \mathbf{x})$  e  $s_-^*(t, \mathbf{x}) r_-(t, \mathbf{x})$  não estão presentes na equação (7), pois, nesse contexto, são essas correlações que introduzem o ruído na imagem migrada.

A Figura 6 mostra o resultado final da migração utilizando a decomposição dos campos de onda na condição de imagem. O método foi eficiente em remover o ruído de baixa frequência.

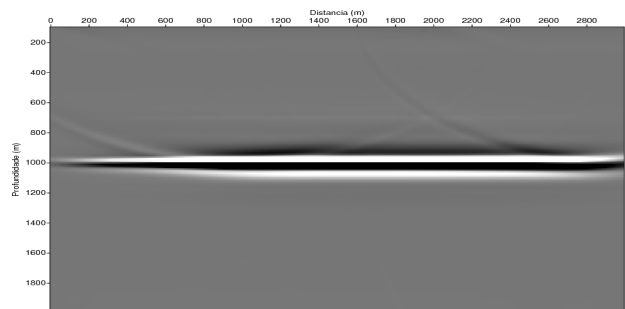


Figura 6: Resultado da migração utilizando a decomposição dos campos de onda no domínio  $t-k_z$ .

### Vetor de Poynting

Uma outra forma de decompor o campo de ondas é conhecer sua direção de propagação em cada ponto do

modelo. Essa informação pode ser obtida pelo vetor de Poynting, que é definido por (Bonomi et al., 1998):

$$\vec{S} = -\frac{\partial P}{\partial t} \nabla P \quad (8)$$

onde  $\vec{S}$  é o vetor de Poynting,  $P$  é o campo de ondas e  $\nabla$  é o operador gradiente.

Para obter a derivada do campo em relação ao tempo, utilizamos o método de expansão rápida (REM) (Pestana e Stoffa, 2010).

Partindo da solução exata da equação da onda:

$$P(t + \Delta t, \mathbf{x}) = -P(t - \Delta t, \mathbf{x}) + 2 \cos(L \Delta t) P(t, \mathbf{x}) \quad (9)$$

com  $-L^2 = c^2(\mathbf{x}) \nabla^2$ , a expansão da função cosseno pode ser feita segundo a abordagem proposta por Tal-Ezer et al. (1987):

$$\cos(L \Delta t) = \sum_{k=0}^{\infty} C_{2k} J_{2k}(\Delta t R) Q_{2k} \left( \frac{iL}{R} \right) \quad (10)$$

onde  $C_{2k} = 1$  para  $k = 0$  e  $C_{2k} = 2$  para  $k > 0$ .  $R$  é um escalar com magnitude igual ao maior autovalor associado ao operador  $-L^2$ .  $J_{2k}$  é a função de Bessel de ordem  $2k$ , e  $Q_{2k}$  são os polinômios de Chebyshev.

O somatório da expressão (10) converge exponencialmente para  $k > \Delta t R$ . Portanto, a aproximação do cosseno pode ser obtida com boa precisão a partir de valores de  $k$  maiores que  $\Delta t R$ , possibilitando trabalhar com qualquer valor de amostragem no tempo sem problema de estabilidade.

Tessmer (2011) mostra que a derivada temporal ( $\dot{P}$ ) pode ser calculada por:

$$\dot{P}(t + \Delta t, \mathbf{x}) = \dot{P}(t - \Delta t, \mathbf{x}) + 2 \sum_{k=0}^{\infty} C_{2k} R \frac{d}{d\tau} J_{2k}(\tau = \Delta t R) Q_{2k} \left( \frac{iL}{R} \right) P(t, \mathbf{x}) \quad (11)$$

Assim, precisamos também calcular  $\frac{d}{d\tau} J_{2k}(\tau = \Delta t R)$ , como coeficiente para a expansão, e obter a derivada do campo de ondas a cada avanço no tempo.

Araujo et al. (2012) mostram como é possível obter a decomposição do campo de ondas em profundidade a partir do vetor de Poynting, calculando suas componentes ascendente ( $P_u$ ) e descendente ( $P_d$ ).

A condição de imagem (12), proposta por Bulcão et al. (2007), sugere utilizar apenas as componentes descendentes da fonte ( $s_d$ ) e dos receptores ( $r_d$ ).

$$I(\mathbf{x}) = \sum_{t=0}^{t_f} s_d(t, \mathbf{x}) r_d(t, \mathbf{x}) \quad (12)$$

Desta forma, a parte da onda que foi refletida estará presente nas componentes ascendentes, que não serão

usadas na correlação. Assim, espera-se que a causa do ruído seja eliminada.

A Figura 7 mostra o resultado da migração de um único tiro do modelo de duas camadas utilizando diferentes condições de imagem. É possível notar que a maior parte do ruído está contida naquelas em que a componente ascendente está presente (Figuras 7b e 7c).

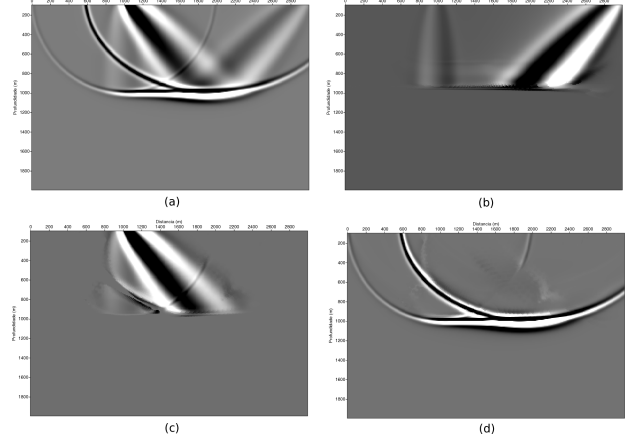


Figura 7: Resultado da migração de um tiro com (a) Condição de imagem convencional. (b) Correlação de  $s_u$  e  $r_d$ . (c) Correlação de  $s_d$  e  $r_u$ . (d) Correlação de  $s_d$  e  $r_d$ .

A Figura 8 mostra o resultado da migração de todos os tiros, utilizando a condição de imagem apresentada em (12).

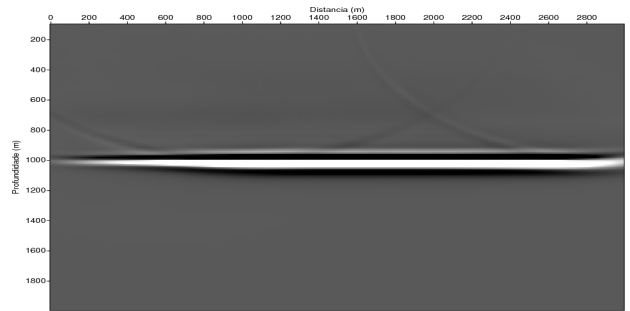


Figura 8: Resultado da migração utilizando a separação através do vetor de Poynting.

Apesar de neste caso ter apresentado um bom resultado em relação a atenuação do ruído, é importante acrescentar que a decomposição utilizando vetor de Poynting pode ser menos precisa quando usada em estruturas mais complexas, onde existem mais eventos propagando-se em diferentes direções.

Uma forma de amenizar esse problema é suavizar o vetor de Poynting antes da decomposição. Ao contrário da suavização do campo de velocidades, a aplicação ao

vetor de Poynting não afeta a propagação do campo de ondas, atuando apenas na identificação dos campos ascendentes e descendentes.

Uma vantagem da utilização do vetor de Poynting é a possibilidade do cálculo dos ângulos de reflexão dos eventos (Yoon e Marfurt, 2006). A partir deles é possível construir CIGs que podem ser usados em outros processos de condição de imagem ou em métodos de análise de velocidade.

## RESULTADOS

Para testar a real eficácia das técnicas apresentadas, utilizamos o modelo Sigsbee2a, cujo campo de velocidades utilizado na migração pode ser visto na Figura 9. Esse modelo tem como característica um forte contraste de velocidades nos limites do corpo de sal, principalmente no seu topo. Isso gera um ruído bastante notável nas seções migradas, como pode ser observado na Figura 10, que apresenta o resultado da migração de 500 tiros com a condição de imagem convencional.

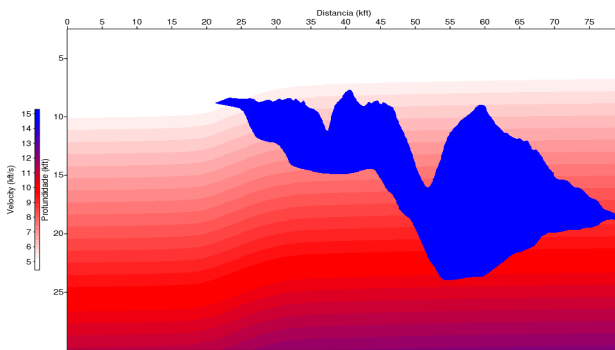


Figura 9: Campo de velocidades do modelo Sigsbee2a.

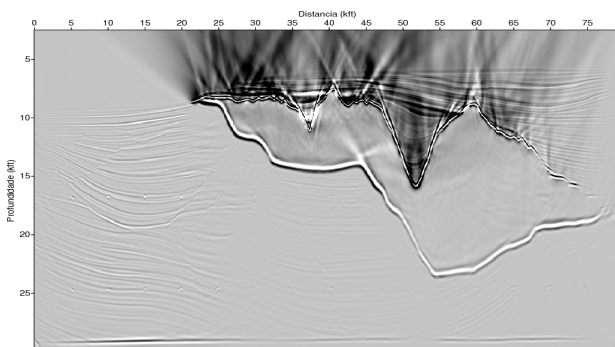


Figura 10: Resultado da migração utilizando a condição de imagem de correlação cruzada.

A Figura 11 mostra a imagem final após a aplicação do filtro Laplaciano. Ainda é possível notar algum resquício do ruído de baixa frequência nas partes rasas, mas de uma forma geral houve uma melhora significativa na aparência da imagem, sem afetar os refletores mais inclinados.

A Figura 12 mostra a seção migrada obtida com a decomposição do campo de ondas no domínio  $t-k$ . Não é possível notar nenhuma evidência significativa dos artefatos. As estruturas também foram preservadas.

A Figura 13 mostra a seção migrada com a separação a partir do vetor de Poynting. Nas partes mais rasas, o método conseguiu remover bem os artefatos, porém a parte inferior do corpo de sal ainda apresenta algum ruído, quando comparado aos outros dois métodos.

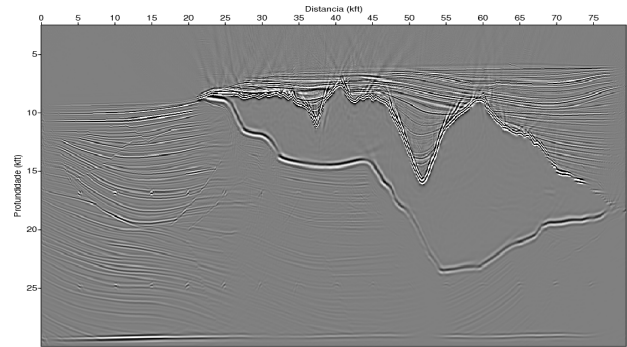


Figura 11: Resultado da migração após a aplicação do filtro Laplaciano.

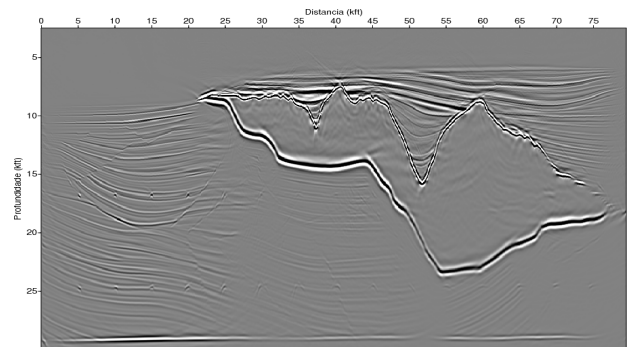


Figura 12: Resultado da migração utilizando decomposição do campo de ondas no domínio  $t-k$ .

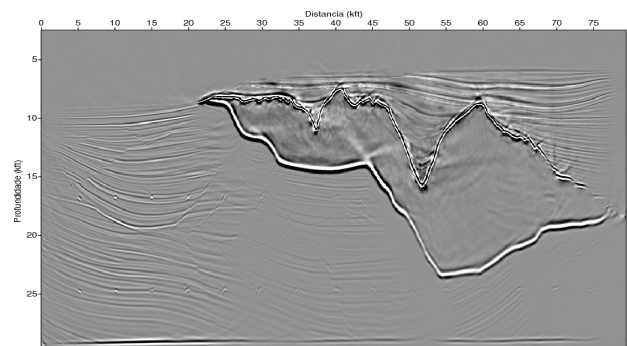


Figura 13: Resultado da migração utilizando separação através do vetor de Poynting.

Um ponto favorável do uso do vetor de Poynting foi a manutenção da fase do pulso em relação a imagem

original (Figura 10). A inversão de fase já poderia ser esperada no filtro Laplaciano (Youn e Zhou, 2001) e deve ser melhor investigada na decomposição do campo de ondas no domínio  $t-k$ .

## CONCLUSÕES

Neste trabalho, mostramos que é possível atenuar os artefatos gerados pela correlação cruzada na condição de imagem da RTM utilizando desde técnicas mais simples, como algoritmos de filtragem, até esquemas mais elaborados, que realizam a decomposição do campo de ondas.

O filtro Laplaciano conseguiu reduzir parcialmente o ruído, a um custo adicional muito pequeno, já que é aplicado apenas após a migração.

Já a decomposição do campo de ondas no domínio  $t-k$  apresentou um excelente resultado, retirando quase completamente os artefatos indesejáveis. Porém o uso de transformadas de Fourier tornam o método computacionalmente mais custoso.

Por fim, a separação a partir do vetor de Poynting conseguiu remover bem o ruído de baixa frequência, principalmente se levarmos em consideração a complexidade do modelo usado nos testes. Uma vantagem deste último método é a possibilidade do cálculo dos ângulos de reflexão, que podem ser usados, por exemplo, em algoritmos de análise de velocidade.

Dentre alguns trabalhos futuros, podemos citar a utilização de técnicas de iluminação para realçar os eventos mais profundos em relação ao ruído e o aperfeiçoamento da separação dos campos utilizando o vetor de Poynting.

## AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao INCT-GP/CNPq e ao CAPES pelo apoio financeiro e ao CPGG/UFBA por disponibilizar a infraestrutura para o desenvolvimento do trabalho.

## REFERÊNCIAS

Araujo, E. S., Pestana, R. C., e Santos, A. W. G., 2012, Esquemas simpléticos e vetor de poynting na modelagem e migração reversa no tempo: V Simpósio Brasileiro de Geofísica (Submetido).

Baysal, E., Kosloff, D. D., e Sherwood, J. W. C., 1983, Reverse time migration: *Geophysics*, **48**, no. 11, 1514–1524.

Bonomi, E., Brieger, L., Nardone, C., e Pieroni, E., 1998, 3d spectral reverse time migration with no-wraparound absorbing conditions: *SEG Technical Program Expanded Abstracts*, **17**, no. 1, 1925–1928.

Bulcão, A., Filho, D. M. S., e Mansur, W. J., 2007, Improved quality of depth images using reverse time migration: *SEG Technical Program Expanded Abstracts*, **26**, no. 1, 2407–2411.

Chang, W.-F., e McMechan, G. A., 1986, Reverse-time migration of offset vertical seismic profiling data using the excitation-time imaging condition: *Geophysics*, **51**, no. 1, 67–84.

Chattopadhyay, S., e McMechan, G. A., 2008, Imaging conditions for prestack reverse-time migration: *Geophysics*, **73**, no. 3, S81–S89.

Gitton, A., Kaelin, B., e Biondi, B., 2006, Least-square attenuation of reverse time migration artifacts: *SEG Technical Program Expanded Abstracts*, **25**, no. 1, 2348–2352.

Liu, F., Zhang, G., Morton, S. A., e Leveille, J. P., 2011, An effective imaging condition for reverse-time migration using wavefield decomposition: *Geophysics*, **76**, no. 1, S29–S39.

Mulder, W. A., e Plessix, R.-E., 2003, One-way and two-way wave-equation migration: *SEG Technical Program Expanded Abstracts*, **22**, no. 1, 881–884.

Pestana, R. C., e Stoffa, P. L., 2010, Time evolution of the wave equation using rapid expansion method: *Geophysics*, **75**, 121–131.

Tal-Ezer, H., Kosloff, D., e Koren, Z., 1987, An accurate scheme for forward seismic modeling: *Geophysical Prospecting*, **35**, 479–490.

Tessmer, E., 2011, Using the rapid expansion method for accurate time-stepping in modeling and reverse-time migration: *Geophysics*, **76**, no. 4, S177–S185.

Yoon, K., e Marfurt, K. J., 2006, Reverse-time migration using the poynting vector: *Exploration Geophysics*, **37**, no. 11, 102–107.

Yoon, K., Marfurt, K. J., e Starr, W., 2004, Challenges in reverse-time migration: *SEG Technical Program Expanded Abstracts*, **23**, no. 1, 1057–1060.

Youn, O. K., e Zhou, H., 2001, Depth imaging with multiples: *Geophysics*, **66**, no. 1, 246–255.

Zhang, Y., e Sun, J., 2008, Practical issues of reverse time migration - true-amplitude gathers, noise removal and harmonic-source encoding: 70th EAGE Conference & Exhibition.

Zhang, Y., Xu, S., Tang, B., Bai, B., Huang, Y., e Huang, T., 2010, Angle gathers from reverse time migration: *The Leading Edge*, **29**, no. 11, 1364–1371.