

## Tomografia para migração em tempo

Patrícia da T. Soares, UFPA; Jessé C. Costa, UFPA

Copyright 2008, SBGF - Sociedade Brasileira de Geofísica. Este texto foi preparado para a apresentação no III Simpósio Brasileiro de Geofísica, Belém, 26 a 28 de novembro de 2008. Seu conteúdo foi revisado pelo Comitê Técnico do III 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

The flatness of reflection events in common image gathers (CIG), when the migration velocity model is correct, is the basis for migration velocity analysis. We use two coherence measures, differential semblance and normalized zero-delay cross correlation, to measure the flatness of events in CIG. The velocity estimation reduces to an optimization problem for these objective functions. Two strategies are combined to estimate the time migration velocity model that better flattens reflection events in CIG, the simulated annealing and quasi-Newton algorithms. This strategy does not have the shortcomings of the conventional NMO/DMO loop for time velocity analysis. The algorithm was successfully applied to estimate the velocity model for pre-stack time migration of the Marmousoft synthetic data set.

### INTRODUÇÃO

A sísmica de reflexão é a principal ferramenta para a construção de imagens acústicas dos refletores em subsuperfície. Em meios onde a velocidade de propagação das ondas sísmicas apresentam variação lateral moderada, a migração em tempo pré-empilhamento é uma alternativa robusta para construir imagens da subsuperfície (Biondi, 2006; Claerbout, 1985).

O fluxo de processamento rotineiramente utilizado para processar dados sísmicos consiste em uma aproximação da migração pré-empilhamento em tempo (Yilmaz, 1987). Os passos essenciais deste processo são: a) análise de velocidade em famílias de ponto médio comum (CMP), b) aplicação da correção de sobretempo normal (NMO), c) empilhamento dos dados para simular uma aquisição com afastamento nulo entre fonte e receptor, e d) a migração dos dados empilhados com operadores de afastamento nulo. Adicionalmente, o efeito do mergulho dos refletores no modelo de velocidade pode ser atenuado efetuando a correção DMO (Yilmaz, 1987).

Neste trabalho investiguei a análise de velocidade utilizando diretamente o operador de migração em tempo, chamada de tomografia de migração em tempo (Leggot, 2006). Como algoritmos de otimização utilizei o *Simula-*

*ted Annealing* (Ma., 2001) e o método quasi-Newton. A combinação destes dois algoritmos não requer um modelo inicial de velocidade próximo à solução para convergência. Nesta implementação da análise de velocidade utilizamos as funções objetivo *Semblance Diferencial* (Verm and Symes, 2006) e *Correlação cruzada normalizada* (Zhou et al., 2005). O algoritmo proposto foi validado nos dados sintéticos do Marmousoft (Billete et al., 2003).

### ANÁLISE DE VELOCIDADE CONVENCIONAL

O fluxo convencional de processamento sísmico assume meios homogêneos, com suave variação lateral de velocidade e baixo ângulo de mergulhos nos refletores.

A construção de uma imagem sísmica inicia com a organização dos dados em famílias de Ponto Médio Comum (CMP). A seguir um modelo de velocidade é selecionado observando a coerência do empilhamento de eventos de reflexão em trajetórias hiperbólicas. Após a estimativa do modelo de velocidade, os traços de família CMP são corrigidos do efeito do afastamento fonte e receptor e empilhados simulando uma seção de afastamento nulo entre fonte e receptor. Uma boa estimativa de velocidade é imprescindível para o empilhamento. Finalmente efetua-se a migração pós-empilhamento para colapsar os pontos difratores e reposicionar os eventos.

Em meios onde os refletores apresentam forte mergulho a velocidade é sobrestimada. Para reduzir os efeitos provocados pelos mergulhos das interfaces na análise de velocidade foi proposta a correção DMO (Yilmaz and Claerbout, 1980; Levin, 1971). A aplicação desta correção é feita iterativamente. Primeiramente, efetua-se uma análise de velocidade inicial seguida de correção NMO. A seguir, a correção DMO é aplicada em famílias de afastamento comum, em geral utilizando uma velocidade média. A correção NMO é removida dos dados através do NMO inverso. Uma nova análise de velocidade é efetuada para estimar um modelo de velocidade sem a influência do mergulho dos refletores. Este ciclo de operações pode ser aplicado iterativamente e produz um modelo de velocidade mais adequado para migração em tempo.

As iterações NMO/DMO apresentam limitações em meios com variação lateral moderada de velocidade. Na tentativa de contornar as limitações da análise convencional de velocidade, investigamos uma alternativa ao fluxo padrão de processamento. A nova abordagem consiste da estimativa do modelo de velocidade através da migração pré-empilhamento em tempo.

### TOMOGRAFIA PARA CONSTRUÇÃO DO MODELO DE VELOCIDADE

A estimativa de velocidade utilizou a focalização das i-

magens migradas em tempo como critério para definir o modelo de velocidade.

A medida de focalização dos eventos é definida em seções de ponto imagem comum (*Common Image Gathers*). Estas, são obtidas após a migração em tempo pré-empilhamento de diferentes seções de afastamento comum.

Após a migração pré-empilhamento em tempo se obtém um volume de dados, e cada traço migrado é função do CMP e do afastamento. Para validar o modelo de velocidade reordenamos estes traços em painéis de ponto imagem comum (CIG). Cada CIG é uma seção do volume de dados migrados contendo os traços com o mesmo CMP e diferentes afastamentos, conforme a Figura 3.

A construção das seções de afastamento comum corresponde ao passo inicial para a construção das seções CIG's (Figura 2). Cada seção de afastamento comum é migrada em tempo através da migração pré-empilhamento. Apartir da seção migrada cada CMP é amostrado em diferentes painéis de cada afastamento  $h$ . À essas seções amostrando um mesmo ponto migrado de diferentes seções de afastamento comum denominamos de CIG's (Figura 3)

O alinhamento dos eventos das seções CIG indica uma otimização do modelo de velocidade. Se o o modelo de velocidade de migração estiver correto, o evento de reflexão deve estar alinhado horizontalmente. Neste trabalho foi avaliado a medida de alinhamento com o *Semblance Diferencial* (Verm and Symes, 2006) e com a Correlação cruzada normalizada (Zhou et al., 2005) como funções objetivos.

Para a construção das seções CIG's foram selecionados todos os traços do mesmo CMP das seções migradas. Se o modelo de velocidade de migração estiver correto, um mesmo evento deve ser imageado no mesmo tempo em todos os traços de uma seção CIG. O alinhamento dos eventos indica uma otimização do modelo de velocidade. Esse critério é utilizado para validar o modelo de velocidade construído para fazer a migração pré-empilhamento de Kirchhoff. A Figura 1 mostra um exemplo de 6 seções CIG lado a lado. No topo encontra-se a seção antes da otimização do modelo de velocidade, e a baixo, depois da otimização.

A função semblance diferencial mede a energia da diferença entre traços adjacentes nas seções CIG's. A *Semblance diferencial* de um cubo de dados migrados é definida pela expressão (Verm and Symes, 2006):

$$J_{DS}[v_m] = \frac{1}{2} \sum_{k=1}^{N_m} \sum_{j=1}^{N_h} \sum_{i=1}^N \left| \frac{p(\tau_i, h_{j+1}; m_k) - p(\tau_i, h_j; m_k)}{\Delta h} \right|^2 \quad (1)$$

Em que,  $v_m$  indica o modelo de velocidade utilizado na migração,  $p(\tau_i, h_j; m_k)$ , as amostras de um traço migrado,  $N$  o número de amostras de cada traço,  $N_h$  o número de afastamentos,  $\Delta h$  o intervalo entre afastamentos de traços adjacentes nos CIG's e  $N_m$  o número de CMPs.

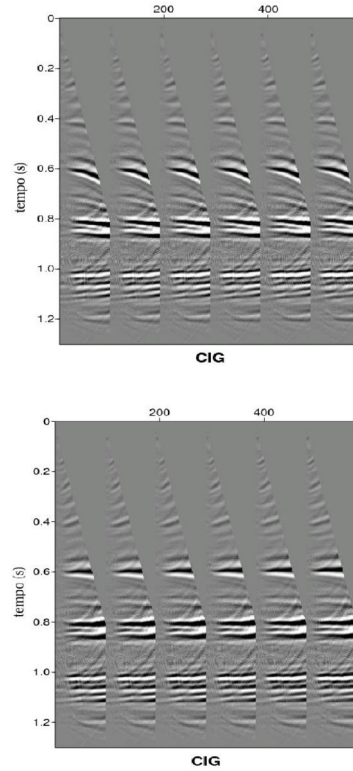


Figura 1: Seções CIG's antes (no topo) e depois (abaixo) da otimização na velocidade. Os eventos entre 0,4 e 0,6 s observam maior grau de alinhamento caracterizando uma boa otimização de velocidade nesta região.

Se os eventos em cada uma das seções CIG estão alinhados horizontalmente, o valor do semblance será zero. Consequentemente, o *Semblance diferencial* pode ser utilizado como função objetivo a ser minimizada para a estimativa do modelo de velocidade  $v_m$ .

Outra função objetivo avaliada, foi a função Correlação cruzada normalizada, (Zhou et al., 2005) que corresponde a um somatório de traços em todas as seções CIG's:

$$O = \frac{2}{N(N-1)} \sum_{x=I_1}^{I_2} \sum_{\tau=\tau_1}^{\tau_2} \sum_{l=1}^{M-1} \sum_{h=1}^{M-l} \frac{s(h, x, \tau) s(h+l, x, \tau)}{A} \quad (2)$$

Em que:

$$A^2 = \sum_{\tau=\tau_1}^{\tau_2} s^2(h, x, \tau) \sum_{\tau=\tau_1}^{\tau_2} s^2(h+l, x, \tau) \quad (3)$$

$\tau$  indica o tempo,  $h$  e  $l$ , os índices dos traços,  $N$ , o número de seções CIG's,  $x$ , a coordenada lateral.

O algoritmo de tomografia de migração em tempo consiste em estimar o modelo de velocidade que minimize a curvatura de eventos de reflexão. A estimativa do modelo de velocidade que minimiza o semblance, e maximiza

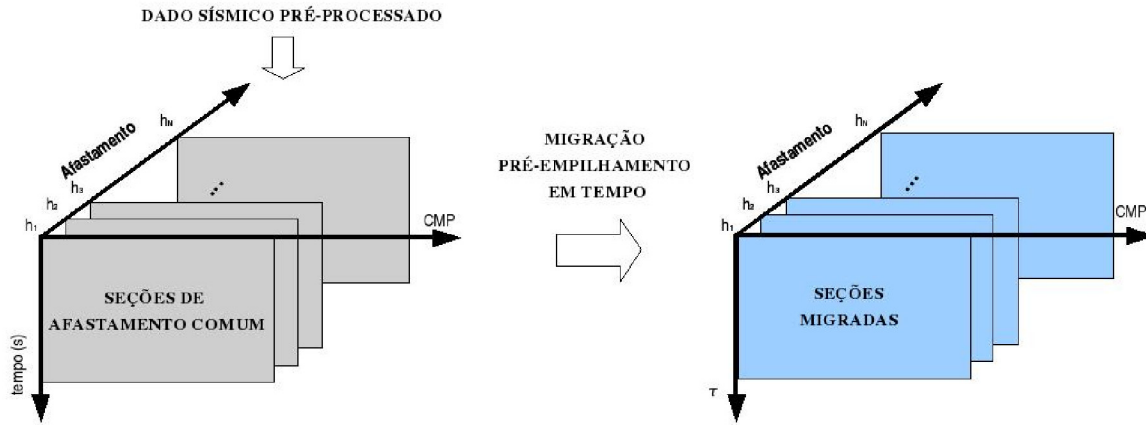


Figura 2: Representação esquemática da migração pré-empilhamento em tempo de cada seção de afastamento comum. Cada seção migrada corresponde a uma seção de afastamento comum com mesmo CMP e mesmo afastamento.

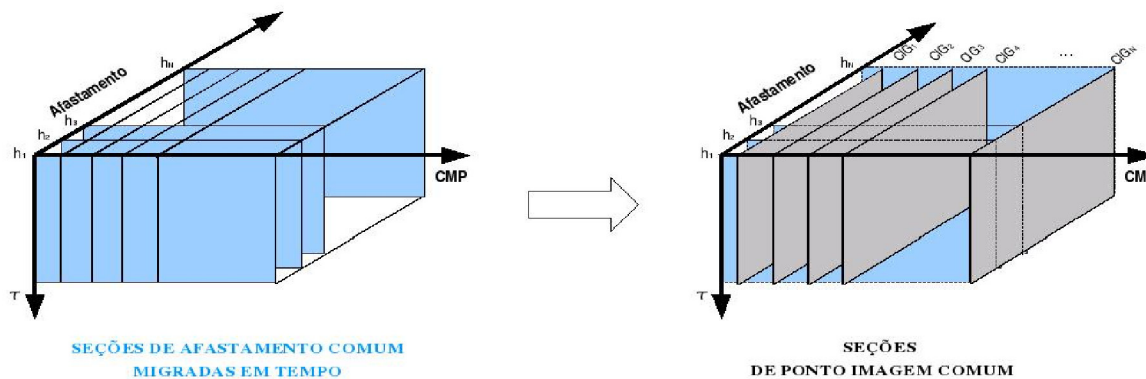


Figura 3: Representação esquemática da construção de seções CIG's a partir da migração em tempo.

o Correlação cruzada normalizada é efetuada pelo algoritmo de otimização global *Simulated Annealing* (SA). Valores de velocidades são progressivamente gerados e alterados até que o valor do funcional (Equação 1) seja minimizado e o valor (Equação 2) seja maximizado. Uma implementação da estratégia utilizando a semblance como medida de coerência e algoritmo de gradiente conjugado não linear foi efetuada por Leggot(2006). Uma implementação utilizando a Correlação cruzada como medida de coerência foi efetuada por (Zhou et al., 2005). Neste trabalho avaliou-se o algoritmo SA e a implementação do algoritmo Quasi-newton para convergência dos resultados do SA.

Nesta implementação o modelo de velocidade é representado através de B-splines. O valor do campo de velocidade em um ponto do modelo de coordenadas  $(\tau, x)$  é função dos coeficientes da interpolação,

$$V_{mig}(\tau, x) = \sum_{I=1}^{N_I} \sum_{J=1}^{M_J} V_{IJ} B_I(\tau) B_J(x), \quad (4)$$

em que  $N_I$  indica o número de nós ao longo da coordenada  $\tau$ , e  $M_J$ , o número de nós ao longo da coordenada  $x$ . Fixadas as coordenadas dos nós em uma malha regular, o modelo de velocidade é completamente especificado pelos coeficientes  $V_{IJ}$  (Leggot, 2006). O algoritmo de otimização estima os valores destes coeficientes.

O algoritmo *Simulated Annealing* realiza buscas aleatórias em uma região definida para encontrar a solução ótima. Este algoritmo imita o processo físico pelo qual um cristal se desenvolve (ou cristaliza) a partir do resfriamento lento de um cristal fundido, até atingir o estado de energia mínima (Corana et al., 1987).

Dada uma função  $f(x)$  a ser minimizada em um intervalo finito definido, o algoritmo SA inicia um processo interativo de busca da solução ótima a partir de um dado ponto

$x_0$  gerando uma sucessão de pontos testes ao longo de cada direção de  $x_i$  (Corana et al., 1987) de acordo com:

$$x'_i = x_i + rv_i \quad (5)$$

Em que  $r$  é um número entre  $[-1, 1]$ , e  $v_i$  é o elemento do vetor dos comprimentos do passo. Se o ponto teste cair fora dos limites do espaço de busca, um novo ponto teste é gerado até ficar dentro dos limites do espaço de busca. E a função  $f'$  é então computada. Se  $f'$  for menor do que  $f$ , o ponto é aceito incondicionalmente e o algoritmo tem um deslocamento descendente. Por outro lado, se  $f'$  for maior ou igual à  $f$  o critério de Metrópolis avalia a aceitação ou rejeição do ponto:

$$p = e^{-\frac{(f'-f)}{T}} \quad (6)$$

em que  $T$  é a temperatura e  $p$  é comparado com  $p'$ , que é um número dentro do intervalo  $[0, 1]$ . Se  $p < p'$ , o novo ponto teste é aceito e o algoritmo tem um deslocamento ascendente, se não o ponto não é aceito. Um baixo valor de temperatura e uma grande diferença entre os valores  $f$  e  $f'$ , diminuem a probabilidade de um deslocamento ascendente ser aceito.

Após  $N_s$  ciclos de geração de pontos testes o vetor  $v$  dos comprimentos dos passos é ajustado objetivando um melhor mapeamento da função objetivo (Ma., 2001). Se uma grande porcentagem de deslocamento são aceitos na  $i$ -ésima direção, então o vetor  $v$  é aumentado. Para uma dada temperatura isto aumenta o número de rejeições e diminui a porcentagem de aceitações. Do ponto de vista da otimização, um grande número de deslocamentos aceitos em relação aos rejeitados significa que a função objetivo é explorada com passos muitos pequenos. Por outro lado um grande número de deslocamentos rejeitados significa que os pontos testes são gerados muito longe do ponto atual. Em uma proporção de 1:1 entre deslocamentos aceitos e rejeitados o algoritmo faz um bom mapeamento.

Após  $N_t N_s$  ciclos de gerações de pontos testes numa temperatura  $T$  reduz-se o valor de  $T$ . O novo valor é:

$$T_{j+1} = r_T T_j, \quad j = 1, 2, \dots \quad (7)$$

em que  $r_T$  é o fator de decaimento da temperatura dentro do intervalo  $[0, 1]$ . Como critério de parada, é usado a comparação do valor final da função da temperatura atual com os  $N_\xi$  valores finais da função correspondente às  $N_\xi$  temperaturas e com o valor ótimo da função. Se todas as diferenças são menores do que uma dada tolerância de erro, o processo de minimização termina. Quando as diferenças são maiores, a temperatura diminui e todo o processo de minimização descrito continua.

## RESULTADOS

A validação do algoritmo de análise de velocidade foi efetuada com dados sintéticos do modelo Marmousoft (Billete et al., 2003) ilustrada na Figura 4 (a baixo). Este modelo consiste de uma versão suavizada do modelo

Marmousi Figura 4 (a cima) (Versteeg and Grau, 1990) em que os dados foram simulados sem a presença de múltiplas. A validação consistiu de três experimentos numéricos que diferem na escolha das funções objetivos para o algoritmo de otimização.

Os dados sintéticos Marmousi (Versteeg and Grau, 1990) simulam um levantamento sísmico marinho e foram produzidos para avaliar a capacidade de imageamento sísmico em áreas complexas.

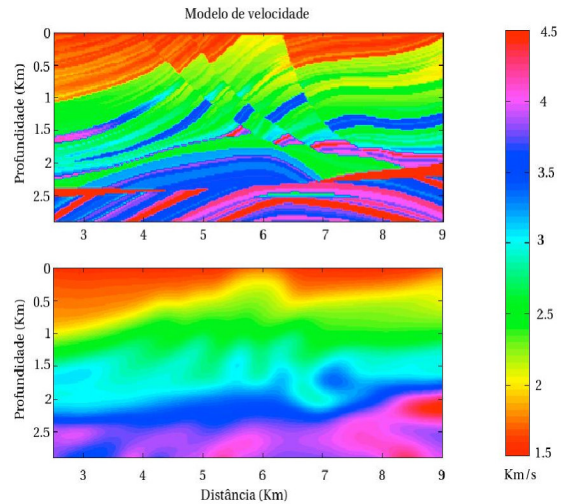


Figura 4: No topo, o modelo de velocidade Marmousi; abaixo, o modelo de velocidade Marmousoft utilizado para gerar os dados sintéticos utilizados nos experimentos numéricos.

Os resultados ilustrados mostram a otimização do *Simulated Annealing* na função em Semblance diferencial, Correlação cruzada e uma otimização dos resultados da função Correlação cruzada com a otimização Quasi-Newton. Na tabela a baixo encontram-se os valores dos parâmetros utilizados para o algoritmo SA.

Parâmetros	Valores
Temperatura inicial	0.050
Temperatura final	0.0071
Taxa de resfriamento	0.15
nº de ciclos de geração	10

Apresento, a seguir, os resultados das soluções produzidas. Os resultados consistem na seção migrada e o modelo de velocidade estimado.

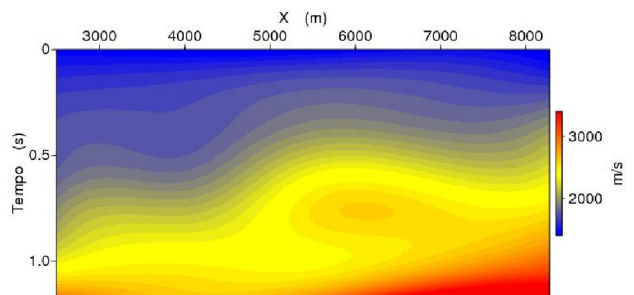
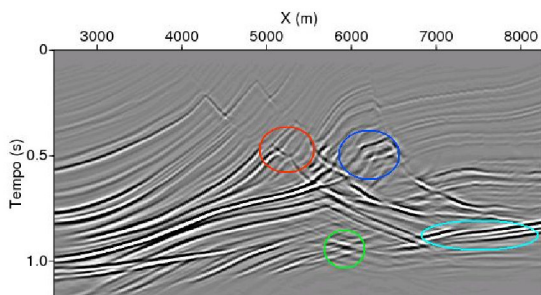
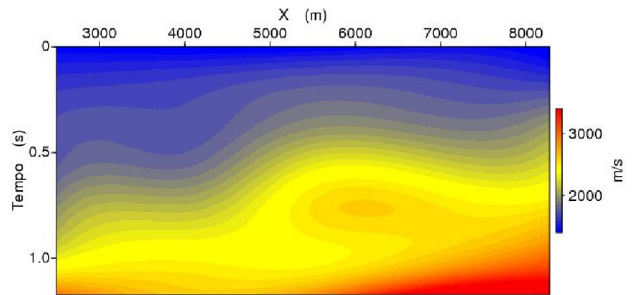
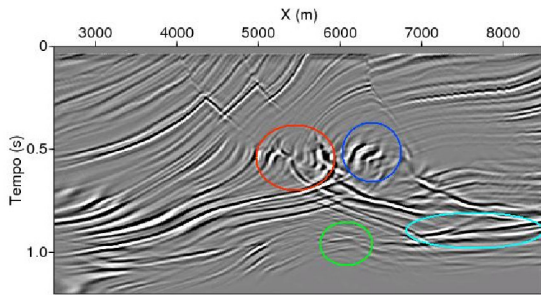
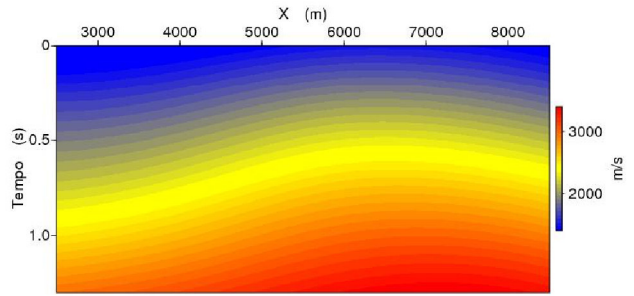
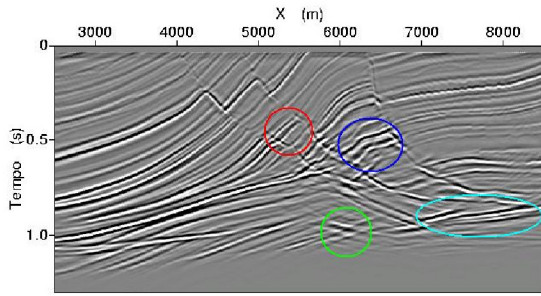


Figura 5: Seções migradas obtidas dos experimento. No topo, algoritmo avaliado na função *Semblance diferencial*, no meio, na *Correlação cruzada*. Abaixo encontra-se a convergência dos resultados do algoritmo na função *Correlação cruzada* pela otimização de Quasi-Newton.

Figura 6: Modelos de velocidades estimados nos experimento. No topo, algoritmo avaliado na função *Semblance diferencial*, no meio, na *Correlação cruzada*. Abaixo encontra-se a convergência dos resultados do algoritmo na função *Correlação cruzada* pela otimização de Quasi-Newton.

As seções migradas apresentam aumento da focalização de alguns eventos, indicando a eficácia do algoritmo na estimativa de velocidade. As regiões selecionadas das seções migradas apontam as principais regiões de otimização e suavização alcançada. No conjunto de ilustrações na Figura 5, as elipses destacam alguns eventos com boa focalização mesmo em regiões de moderada variação lateral de velocidade. Observa-se ainda através da Figura 5 (na base) que a partir dos resultados do algoritmo SA na função objetivo *Correlação cruzada* (Figura 5 no meio) é possível obter uma resposta mais aprimorada através da implementação do algoritmo de otimização Quasi-Newton aos resultados obtidos.

Os três experimentos numéricos indicam que o algoritmo apresentou bons resultados nas regiões de menor variação lateral de velocidade. Nos modelos de velocidade observamos que o algoritmo SA tenta buscar uma estimativa para o campo de velocidade que melhor aproxime ao modelo investigado. Esta aproximação é melhor alcançada com a função objetivo *Correlação cruzada* (Figura 6 no meio) aprimorada com a implementação do algoritmo Quasi-Newton aos resultados obtidos (Figura 6 na base). Nos modelos de velocidades ilustrados pela Figura 6 vemos que a otimização Quasi-Newton converge a estimativa de velocidade para valores mais próximos dos valores corretos, que pode ser

comprovado pela melhor focalização na sua respectiva seção migrada (Figura 5 na base). Esta característica indica que o algoritmo SA é eficiente para realizar otimizações de primeira ordem (ver Figura 5 no topo, o algoritmo SA alcançou boa focalização nos eventos selecionados mesmo sem o aprimoramento pela otimização Quase Newton na função *Semblance diferencial*). Testes com outras funções objetivo também podem ser uma das alternativas para a validação do algoritmo.

## CONCLUSÕES

A tomografia usando migração pré-empilhamento em tempo é uma alternativa robusta para análise de velocidade em meios com moderada variação lateral de velocidade. Este trabalho investigou uma implementação alternativa da tomografia de migração em tempo. O algoritmo proposto utiliza o método de *Simulated Annealing* para estimar o modelo de velocidade avaliando a *Semblance diferencial* e a Correlação cruzada normalizada para medir a horizontalização dos eventos nas famílias de imagem comum, adicionado a uma otimização de segunda ordem aos resultados obtidos através do algoritmo Quasi-Newton.

O algoritmo de tomografia investigado apresenta as seguintes características:

- 1) permite a automatização da estimativa de um modelo de velocidade para migração pré-empilhamento em tempo;
- 2) não requer um modelo inicial de velocidade;
- 3) admite paralelização em cada nível de temperatura;
- 4) permite especificar vínculos do tipo caixa ao perfil de velocidade.

A validação do algoritmo nos dados Marmousoft, apresentou bons resultados de focalização nas regiões de moderada heterogeneidade. Nas regiões de maior complexidade, onde os pressupostos da migração em tempo são violados, não houve focalização dos eventos. Entretanto, é possível fazer uma convergência dos resultados obtidos do algoritmo SA e obter a focalização desejada. Esta convergência foi efetuada através da implementação do algoritmo Quasi-Newton.

Testes com outras funções objetivo podem ser uma das alternativas para a validação do algoritmo.

## REFERÊNCIAS

- Billete, F., Le Begat, S., Povin, P., and Lambare, G., 2003, Practical aspects and applications of 2d stereotomography.: *Geophysics*, **68**, 1008–1021.
- Biondi, B., 2006, 3d seismic imaging: Society of Exploration Geophysicists.
- Claerbout, J. F., 1985, Imaging the earth's interior: Blackwell Scientific Publications.
- Corana, A. M., Martini, C., and Ridela, S., 1987, Minimizing multimodal functions of continuous variables with simulated annealing algorithm.: *ACM Transactions on Mathematical Software*, **13**, 262–280.
- Leggot, R., 2006, Time migration tomography.: *Society Exploration Geophysicists.*, **25**, 3393–3397.
- Levin, F. K., 1971, Apparent velocity from dipping interface reflections.: *Geophysics.*, **36**, 6–510.
- Ma, X.-Q., 2001, A constrained global inversion method using an overparametrized scheme: Application to poststack seismic data.: *Geophysics.*, **66**, 613–626.
- Verm, R. W., and Symes, W. W., 2006, Practice and pitfalls in nmo-based differential semblance velocity analysis.: *SEG Expanded Abstracts.*, **25**, 2112–2115.
- Versteeg, R., and Grau, G., 1990, Practical aspects of seismic data inversion, the marmoussi experience.: *Geophysics*. In: 52<sup>o</sup> EAGE meeting, Europa, Society Exploration Geophysicists, Europa, 1990, **52**, 1–194.
- Yilmaz, O., and Claerbout, J. F., 1980, Pre-stack partial migration geophysics: *Geophysics*, **45**, 753–1779.
- Yilmaz, O., 1987, Seismic data processing., volume 2 Society of Exploration Geophysicists, USA.
- Zhou, H., Sato, M., and Liu, H., 2005, Migration velocity analysis and prestack migration of common-transmitter gpr data: *IEEE Transactions on Geoscience and remote sensing*, **43**, 86–91.