

## Modelagem, Empilhamento e Imageamento de Dados Sísmicos Marinhos

Anderson B. Gomes\*, Lourenildo W. B. Leite\*, Wildney S. Vieira\*, Gary Aldunate\*\* (\*UFPA (\*\*UFBA

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

Este trabalho resume aspectos práticos da modelagem, do processamento e do imageamento de dados sísmicos sintéticos simulando um ambiente geológico marinho de exploração de petróleo relacionando a bacias sedimentares passivas da costa Atlântica brasileira. Os resultados de uma atenção consistente ao empilhamento e ao imageamento demonstram os fundamentos e o potencial da combinação de sistemas livres de processamento voltados à pesquisa acadêmica. A atenção central é voltada ao empilhamento CRS, ao mesmo tempo em que procuramos estabelecer um fluxograma para a reavaliação de bacias sedimentares. O empilhamento CRS se apresenta como uma atração por ser considerado independente do modelo de velocidades, e baseado na recuperação dos atributos da frente de onda. O uso destes atributos permite que uma migração do tipo Kirchoff pós-empilhamento seja produzida automaticamente.

### INTRODUÇÃO

A obtenção de uma imagem suficientemente precisa, tanto no tempo como na profundidade, é normalmente uma tarefa difícil em regiões caracterizadas por estruturas geológicas complexas. Sob tais circunstâncias, onde simples pressupostos do modelo podem não ser atendidos, se torna importante extrair o máximo possível de informações dos dados medidos. Felizmente, o desenvolvimento sistemático da capacidade computacional torna possível a implementação de métodos baseados nos dados, tais como o empilhamento CRS (Mann, 2002).

O empilhamento CRS é foi desenvolvido para a simulação de seções sísmicas (usualmente ponto-médio-comum) ao afastamento-nulo, e também recuperar os atributos cinemáticos do campo de ondas como um sub-produto do processo de empilhamento. Estes atributos podem ser usados para melhorar o próprio empilhamento, e para etapas subsequentes do processamento. Devido à sua simplicidade e aplicabilidade, este método vem ganhando relevância durante os últimos anos, e podemos citar como

algumas referências (Mann, 2002), (Heilmann, 2002), (Duvenceck, 2004) e (Koglin, 2005).

A Figura 1 mostra as principais etapas do processamento realizado. Além disso, o imageamento baseado no empilhamento CRS tem extensões que incluem dados 3-D e topografias suave e rugosa da superfície de levantamento.

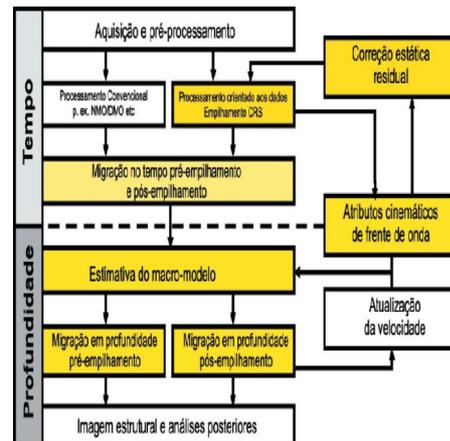


Figura 1: Etapas principais do processamento de dados sísmicos no domínio do tempo e imageamento à profundidade. Estão destacados em amarelo os procedimentos de imageamento que podem ser incorporados com base no empilhamento CRS.

Uma etapa importante para que bons resultados do empilhamento CRS sejam obtidos é o pré-processamento dos dados de multi-cobertura. Esta etapa consta normalmente das seguintes partes: (1) organização da geometria do levantamento; (2) silenciamento de fontes, de sensores e de traços; (3) silenciamento do topo das seções; e (4) filtragem banda-passante. Após esta sequência, as etapas do empilhamento CRS são realizadas.

### MÉTODO

A análise de velocidade convencional por métodos de correlação é usualmente feita em famílias ponto-médio-comum, onde o tempo-duplo de trânsito,  $t(x; t_0, v)$ , de reflexões primárias a partir de uma única interface é aproximada pela equação do tipo hiperbólica:

$$t^2(x; t_0, v) = t_0^2 + \frac{x^2}{v^2} + O(x^4). \quad (1)$$

Nesta equação,  $x$  representa o afastamento fonte-sensor,  $t_0$  o tempo-duplo normal em  $x = 0$ , e  $v$  a velocidade de empilhamento. A lei acima é ideal para uma camada homogênea, isotrópica, horizontal sobre um semi-espaço.

Para uma próxima complicação no modelo, podemos compor um meio formado por multi-camadas separadas por interfaces plano-horizontais, e admitir pequenas aberturas fonte-sensor para que a lei acima ainda seja de alta aproximação, e que  $v = v_{rms}$  (Ursin, 1982). A próxima dificuldade é considerar uma subsuperfície mais real descrita com variação 3-D de velocidade, e formada por interfaces curvas entre camadas homogêneas e isotrópicas. No entanto, este modelo impõe limites ao seu uso. Como já bem convencionalizado na prática, se deseja estabelecer uma distribuição bem definida de velocidades para o empilhamento. Uma das consequências disto é que velocidades intervalares podem ser calculadas sob o pressuposto de que a velocidade de empilhamento,  $v_E$ , seja dada aproximadamente pela velocidade quadrática-média,  $v_{rms}$  (Al-Chalabi, 1974).

Os dados sintéticos usados foram gerados pelo método de diferenças finitas a partir de um modelo de bacia sedimentar marinha (Figura 2). O modelo simula a situação de bacias marginais da costa Atlântica brasileira, onde existe a exploração de óleo e gás. Muitos relatórios e artigos sobre estas bacias, como por exemplo (Chang et al., 1988) e (Milani et al., 2000), chamam atenção para a presença de vulcanismo e para eventos de tectônica salina.

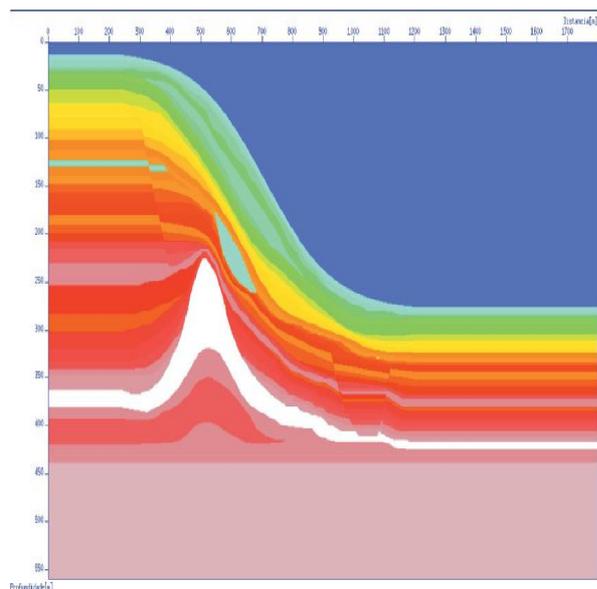


Figura 2: Modelo de velocidades de bacia sedimentar simulando a condição de bacias marginais da costa Atlântica brasileira.

O resultado do empilhamento 1-D SU/NMO está apresentado na Figura 3. As seções do empilhamento NMO e de afastamento-mínimo-comum da Figura 4 foram usadas para controle visual do empilhamento CRS inicial. É esperado que nestes processos de empilhamento as estruturas em subsuperfície sejam representadas por padrões visuais como refletores, detalhes da linha do fundo

do mar, múltiplas, estratificações e difrações.

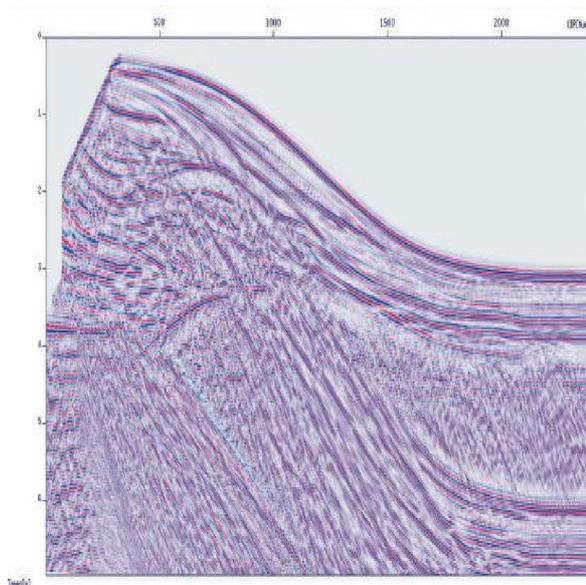


Figura 3: Seção afastamento-nulo, NMO 1-D, simulada pelo CWP/SU. Se observa muitos detalhes como a linha do fundo oceânico, estratificação, anticlinalis, múltiplas, falhas e corpos localizados.

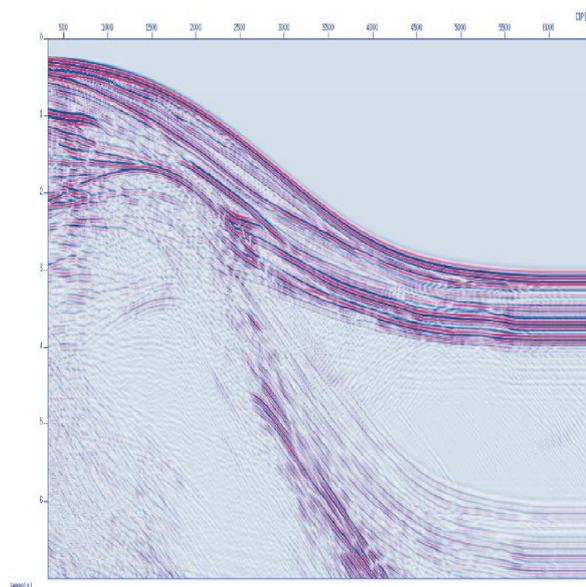


Figura 4: Seção afastamento-nulo, NMO 1-D, simulada pelo CWP/SU. Se observa muitos detalhes como a linha do fundo oceânico, estratificação, anticlinalis, múltiplas, falhas e corpos localizados.

O empilhamento CRS leva em consideração uma geometria mais complexa para os refletores em sub-superfície. Baseado na teoria paraxial do raio, o operador hiper-

bólico 2-D como uma aproximação para o tempo-duplo de trânsito de reflexão primária de uma interface curva, com relação a uma superfície de observação horizontal, é dada por:

$$t_{hyp}^2(x_m, h) = \left[ t_0 + \frac{2 \sin \alpha_0 (x_m - x_0)}{v_0} \right]^2 + \frac{2t_0 \cos^2 \alpha_0}{v_0} \left[ \frac{(x_m - x_0)^2}{R_N} + \frac{h^2}{R_{NIP}} \right] \quad (2)$$

Nesta equação é admitido que a velocidade  $v_0$  é conhecida e relacionada à subsuperfície ao redor do ponto de observação  $x_0$ . As variáveis independentes  $x_m$  e  $h$  são, respectivamente, o ponto-médio e o meio-afastamento na configuração CMP, e  $P_0(x_0, t_0)$  é o ponto de referência do empilhamento. O parâmetro  $\alpha_0$  corresponde ao ângulo de emergência vertical da frente de onda no ponto de referência. As quantidades  $R_{NIP}$  e  $R_N$  são relacionadas ao raio central na teoria paraxial do raio. O método CRS tem a forma de um empilhamento independente de um macro-modelo para simular uma seção (ao afastamento-nulo, por exemplo) no domínio  $(x, t)$ . O operador é obtido matematicamente considerando que dois experimentos teóricos são realizados para gerar ondas próprias: a onda-NIP e a onda-N. A onda-NIP é associada a um difrator em explosão que produz a onda denominada de incidência normal, com raio de curvatura  $R_{NIP}$  na superfície de observação. A onda-N é associada ao refletor em explosão para gerar a onda denominada de Normal, com raio de curvatura  $R_N$  na superfície de observação, e sendo este refletor em explosão localmente aproximado por um segmento de arco de círculo ao redor do ponto NIP. Para satisfazer a teoria paraxial do raio, um raio central de referência e informação deve ser estabelecido, e neste caso é tomado o raio de afastamento-nulo entre o ponto de observação na superfície e o ponto de incidência normal em subsuperfície. Além disso, apenas eventos primários são levados em consideração. O raio central satisfaz a lei de Snellius através das interfaces, e as curvaturas das frentes das ondas NIP e N mudam de acordo com leis de refração e transmissão. Embora o operador hiperbólico tenha uma forma simples, não é tão óbvio e direto realizar uma análise de velocidade à primeira vista a partir do operador CRS, como o é a partir do operador NMO.

Para formas de ajuste do modelo aos dados em CMP, vários funcionais têm sido propostos para estimar a velocidade de empilhamento (Sguazzero and Vesnaver, 1987). Os funcionais mais comuns fazem uma medida sobre as amplitudes corrigidas dos traços ( $\bar{v}$ ) baseada num somatório, ou correlação, de traços e escolhas de normalização. A medida normalizada Semblance,  $S(v; t_0)$ , é usada para resultar em traços corrigidos por NMO, que vai de um afastamento mínimo  $x = x_L$  a um afastamento máximo  $x = x_R$  com  $N_x$  pontos, e uma janela temporal especificadas por um valor  $\delta$ . A função  $S(v; t_0)$  admite valores no intervalo (0,1), irrespectivamente da

amplitude do sinal, e ela quantifica a uniformidade da polaridade do sinal através da família de traços a ser corrigida do NMO,  $\bar{v}(v; t_0)$ . Na análise de velocidade, a função  $S(v; t_0)$  pode também ser interpretada como uma função a ser otimizada, a partir da qual resultam valores ótimos de marcação para a velocidade de empilhamento.

O empilhamento CRS usa o ambiente CWP/SU com formatação de inteiros no cabeçalho, de onde retira as informações das coordenadas da fonte,  $x_S$ , do geofone,  $x_G$ , e da escala,  $scalco$ . A partir das famílias são calculadas as informações para as coordenadas  $x_m$  e  $h$  dadas por:  $x_m = \frac{(x_S + x_G)}{2}$  e  $h = \frac{(x_S - x_G)}{2}$ . O ponto de referência do empilhamento é representado por  $P_0(x_0, t_0)$  para as trajetórias de empilhamento ao longo das coordenadas  $h$  e  $x_m$ .

Os resultados do empilhamento CRS iniciam com a seção de Coerência da Figura 5 que controla a estimativa dos atributos do empilhamento CRS para os pontos  $P_0(x_0, t_0)$ . É esperado que estruturas em sub-superfície sejam representadas por padrões de tendências, e que as melhores imagens sejam obtidas a partir de padrões com forte continuidade e altos valores nas seções Coerência.

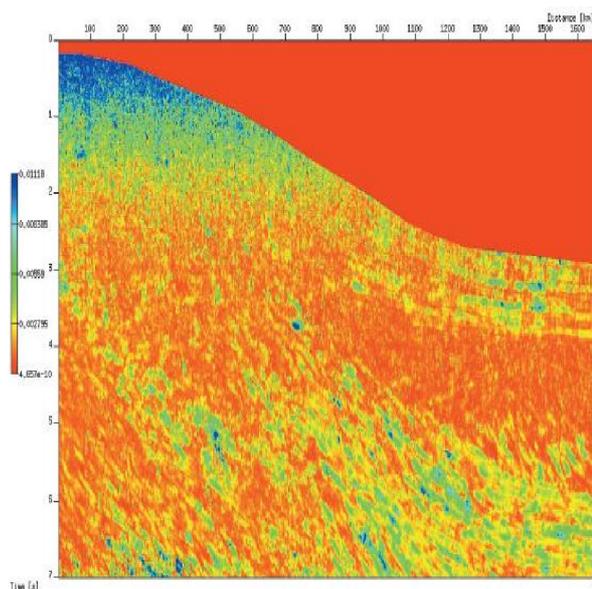


Figura 5: Seção Coerência para a linha marinha sintética. Observe-se o padrão de tendências e as múltiplas entre a superfície livre e o fundo oceânico.

Os painéis temporais dos atributos cinemáticos CRS do campo de onda, versão 2-D para superfície plana de observação, relativas ao ponto de emergência  $P_0(x_0, t_0)$  e ao afastamento-nulo, como mostrado nas Figuras 6, 7 e 8 são, respectivamente, os seguintes: (1) seção do ângulo de emergência vertical,  $\alpha_0$ ; (2) seção do raio de curvatura,  $R_{NIP}$ ; e (3) seção do raio de curvatura  $R_N$ .

As seções de Coerência são usadas para identificar locais de valores muito baixos de coerência, uma vez que tais locais são considerados como associados a valores não plausíveis para os atributos.

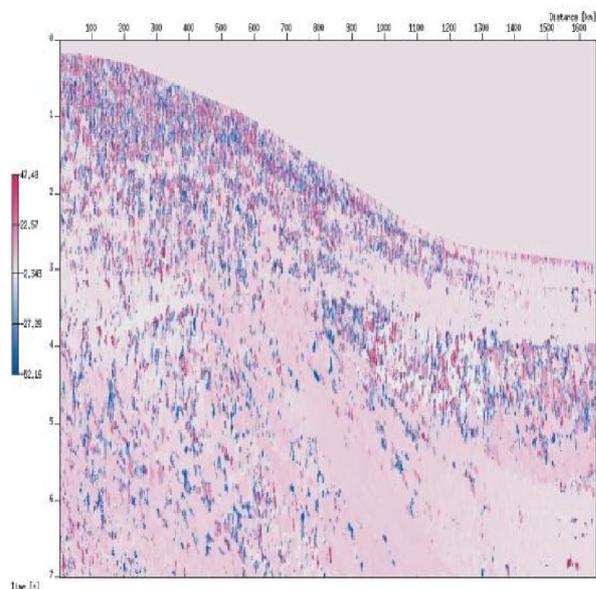


Figura 6: Atributo CRS: Seção ângulo  $\alpha_0$ . Observe-se a distribuição dos valores com padrões estruturais fortes.

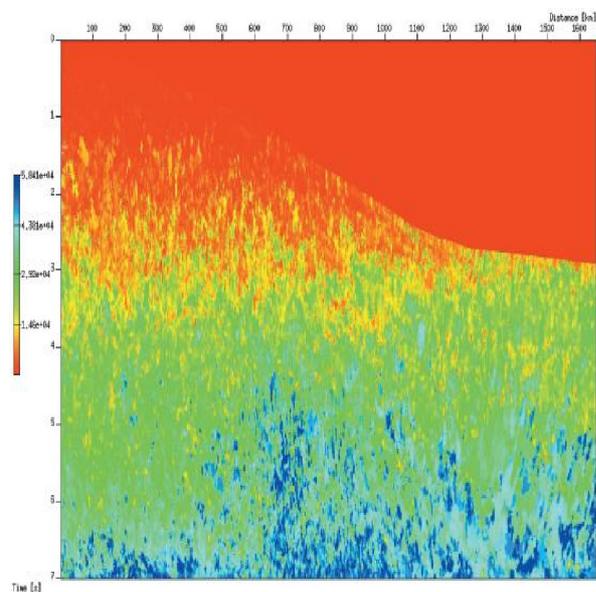


Figura 7: Atributo CRS: Seção  $R_{NIP}$ . Observe-se a distribuição dos valores com padrões fracos.

A Figura 9 mostra a seção básica CRS de afastamento-nulo. Seções de afastamento-mínimo foram usadas para ajudarem na análise e interpretação dos refletores nas seções afastamento-nulo.

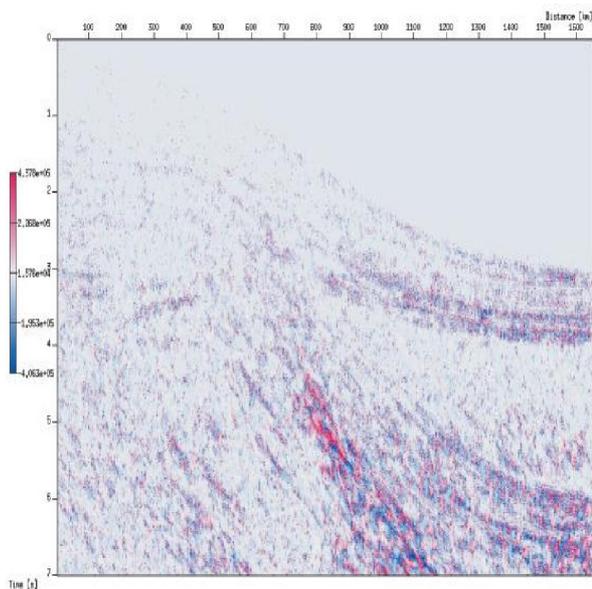


Figura 8: Atributo CRS: Seção  $R_N$ . Observe-se que esta seção não é tão clara como as anteriores, mas possui uma distribuição dos valores com padrões ainda fortes.

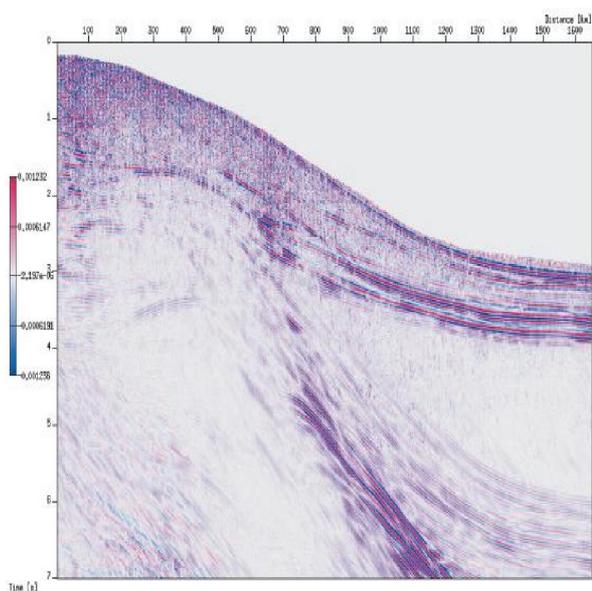


Figura 9: Seção CRS afastamento-nulo otimizada. Além da grande resolução, observam-se vários detalhes como a linha do fundo oceânico, estratificação, anticlinais, múltiplas externas, e estruturas com interpretação como de falhas e de corpos localizados.

Uma aplicação atrativa CRS pós-empilhamento foi apresentada por (Mann, 2002) para a resposta aproximada da difração como um operador do tipo Kirchhoff de migração, e esta operação é uma complementação à seção afastamento-nulo. Nesta aplicação, o apex é a po-

sição aproximada da imagem migrada no tempo. Devido ao eixo de simetria, o método se aplica ao plano do afastamento-nulo  $h = 0$ , onde  $\partial t_D(x_m, h = 0)/\partial x_m = 0$  produz a localização do apex dado por:

$$x_{apex} = x_0 - \frac{R_{NIP}t_0v_0\sin\alpha}{2R_{NIP}\sin^2\alpha + t_0v_0\cos^2\alpha} \quad (3)$$

$$t_{apex}^2 = \frac{t_0^3v_0\cos^2\alpha}{2R_{NIP}\sin^2\alpha + t_0v_0\cos^2\alpha} \quad (4)$$

Parametrizada em termos da localização do apex ( $x_{apex}$ ,  $t_{apex}$ ), em vez da localização afastamento-nulo ( $x_0, t_0$ ), e com  $h = 0$ , a resposta ao afastamento-nulo da difração resulta em:

$$t_D^2(x) = t_{apex}^2 + \frac{4(x - x_{apex})^2}{v_c^2} \quad (5)$$

$$v_c^2 = \frac{2v_0^2R_{NIP}}{2R_{NIP}\sin^2\alpha + t_0v_0\cos^2\alpha} \quad (6)$$

Um somatório ao longo da resposta da difração apropriada, com o resultado recolocado no apex, é uma aproximação à migração do tipo Kirchhoff no tempo com velocidade constante  $v_c$ , onde todos os atributos contribuem. Na estratégia usada, o empilhamento é realizado ao longo do operador CRS, em vez de ao longo do operador de difração, e o resultado recolocado no apex ( $x_{apex}$ ,  $t_{apex}$ ). A Figura 10 mostra o resultado da migração CRS tipo Kirchhoff no tempo, a qual é automática e rápida. Esta seção migrada é obtida da seção CRS otimizada ao afastamento-nulo. Se observa um espalhamento de pontos devido a ruído nos atributos; no entanto, muitos detalhes dos eventos principais são conservados.

### DISCUSSÃO E CONCLUSÕES

A seção sísmica sintética foi gerada e processada sem cortes e sem silenciamento. Um dos objetivos do estudo foi analisar aspectos da resolução geométrica das estruturas geológicas concebidas para a seção e representadas no modelo. Considerando a limitação das cores nas figuras, a análise interpretativa foi realizada principalmente com base nas seções CRS do empilhamento e da migração. Na etapa de interpretação é importante que os mapas (seções) tenham uma escala própria, tamanho próprio, e anotado o exagero vertical. A partir das apresentações e escolha das figuras, detalhes geométricos-estruturais (como discontinuidades, anticlinais e sinclinais) podem ser traçados. As partes à esquerda e à direita da seção empilhada-migrada não apresentam problemas maiores relacionados com múltipla externa ou interna, o que representa a maior preocupação com relação à parte central da seção relacionada ao declive continental.

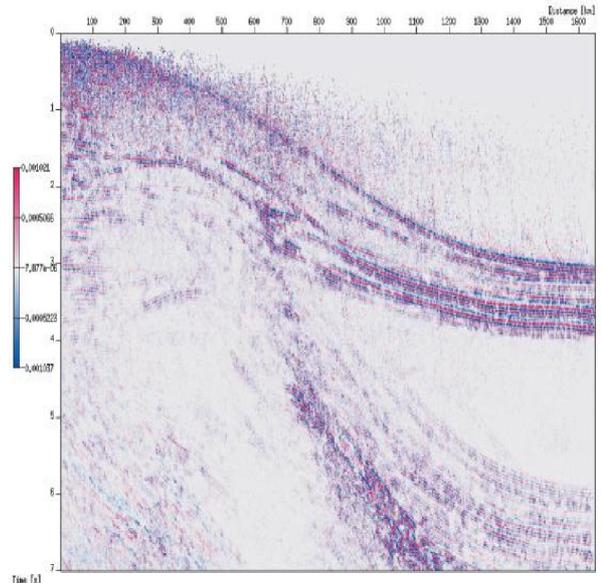


Figura 10: Migração CRS tipo Kirchhoff no tempo. Este resultado é considerado como um sub-produto do empilhamento CRS, e obtido a partir da seção otimizada ao afastamento-nulo. Se observa um espalhamento de pontos devido a ruído nos atributos, mas as principais linhas dos eventos são consistentes.

A qualidade do dado sintético marinho não impõe limitação quanto à melhora da imagem da linha sísmica e, portanto, para demonstrar a aplicabilidade do método na obtenção de imagens e a aplicações a bacias sedimentares.

A seção Coerência serve para indicar a estimativa do ajuste do modelo CRS ao dado para o caso de eventos de reflexões primárias. É evidente que no geral a qualidade do imageamento é visualmente boa, o que é classificado pela relação sinal/ruído e continuidade dos refletores.

Este exemplo serve para reforçar perspectivas de uma forma simples e efetiva na combinação modelagem-imageamento, e o trabalho posterior de interpretação de seções sísmicas. A confiabilidade e a qualidade dos resultados do sistema CRS baseado no fluxograma de imageamento sísmico representa alternativas com relação ao estudo em foco voltado à modelagem e imageamento.

Este trabalho serve também para demonstrar a colaboração efetiva e as intenções da continuidade de pesquisa em colaboração entre diferentes universidades e, conseqüentemente, uma forma de se aproximar à indústria e se obter financiamento para trabalhos de pesquisa em tecnologias de exploração.

## AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem penhoradamente a PETROBRAS e a FINEP pelo apóio aos trabalhos de pesquisa.

## REFERÊNCIAS

- Al-Chalabi, 1974, An analysis of stacking (rms) average and interval velocities over a horizontally layered ground: *Geophysical Prospecting*, **22**, no. 03, 458–475.
- Chang, H. K., Kowsmann, R. O., and Figueiredo, A. M. F., 1988, New development of east brazilian marginal basins. episodes: *International Geoscience Newsmagazine*, **11**, no. 03, 194–202.
- Duveneck, E., 2004, Tomographic determination of seismic velocity models with kinematic wavefield attributes: Ph.D. thesis, University of Karlsruhe.
- Heilmann, B. Z., 2002, The common-reflection-surface stack under consideration of the acquisition surface topography and of the near-surface velocity gradient: Ph.D. thesis, University of Karlsruhe.
- Koglin, I., 2005, Estimation of residual static time shifts by means of the crs-based residual static correction approach: Ph.D. thesis, University of Karlsruhe.
- Mann, J., 2002, Extensions and applications of the common-reflection-surface stack method: Ph.D. thesis, University of Karlsruhe.
- Milani, E. J., ao, J. A. S. L. B., Zalán, P. V., and Gamboa, L. A. P., 2000, Petróleo na margem continental brasileira: geologia, exploração, resultado e perspectivas: *Revista Brasileira de Geofísica*, **18**, no. 03, 351–395.
- Sguazzero, P., and Vesnaver, A., 1987, A comparative analysis of algorithms for stacking velocity estimation. in: Bernabini et al. deconvolution and inversion: Blackwell Scientific Publications. London.
- Ursin, B., 1982, Quadratic wavefront and travelttime approximations in inhomogeneous layered media with curved interfaces: *Geophysics*, **47**, no. 07, 1012–1021.