



UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS
FACULDADE DE GEOFÍSICA

ADRIANO SILVA FERREIRA

**MIGRAÇÃO EM TEMPO:
INFLUÊNCIA DOS PESOS PARA COMPENSAÇÃO DE
AMPLITUDE**

BELÉM
2010

ADRIANO SILVA FERREIRA

**MIGRAÇÃO EM TEMPO:
INFLUÊNCIA DOS PESOS PARA COMPENSAÇÃO DE AMPLITUDE**

Trabalho apresentado à Faculdade de Graduação em Geofísica do Instituto de Geociências da Universidade Federal do Pará - UFPA, em cumprimento às exigências para obtenção do grau de Graduação em Geofísica.
Orientador: Jessé Carvalho Costa

BELÉM
2010

ADRIANO SILVA FERREIRA

**MIGRAÇÃO EM TEMPO:
INFLUÊNCIA DOS PESOS PARA COMPENSAÇÃO DE
AMPLITUDE**

Trabalho apresentado à Faculdade de Graduação em Geofísica do Instituto de Geociências da Universidade Federal do Pará - UFPA, em cumprimento às exigências para obtenção do grau de Graduação em Geofísica.

Data de Aprovação: ____/____/____

Banca Examinadora:

Prof. Jessé Carvalho Costa - UFPA-Orientador
Doutor em Métodos Sísmicos
Universidade Federal do Pará

Prof. Lourenildo Willieme Barbosa Leite - UFPA-Membro
Doutor em Métodos Sísmicos
Universidade Federal do Pará

Profa. Ellen de Nazaré Souza Gomes - UFPA-Membro
Doutora em Métodos Sísmicos
Universidade Federal do Pará

BELÉM
2010

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao Programa Institucional de Bolsa de Iniciação Científica PIBIC/CNPq/UFGA administrado pela Pró-Reitoria de Pesquisa e Pós-Graduação/PROPESP.

Agradeço especialmente ao meu orientador Prof. Dr. Jessé Carvalho Costa pela oportunidade, apoio, orientação e pelos programas do processamento de dados.

Agradeço à aluna de pós-graduação Patrícia da Trindade Soares pela ajuda no meu Trabalho de Conclusão de Curso.

Agradeço aos colegas do curso pelo companheirismo e esclarecimento nos momentos de dificuldade.

RESUMO

Métodos automáticos para estimativa de modelos de velocidade através de migração pré-empilhamento tem melhor desempenho quando a amplitude dos eventos em famílias ponto-imagem-comum são equalizadas. Na análise de velocidade em tempo, a escolha da função peso no operador de migração Kirchhoff controla a amplitude dos eventos migrados. Experimentos numéricos avaliando cinco funções peso indicam que uma boa equalização de amplitude pode ser obtida utilizando-se aproximações de funções pesos deduzidas a partir do operador de migração de verdadeira amplitude do tipo Kirchhoff. Outro método eficaz e computacionalmente mais eficiente para se equalizar a amplitude de eventos em famílias ponto-imagem-comum é utilizar uma função peso que compense apenas o fator de obliquidade.

Palavras Chaves: Geofísica. Migração. Compensação de Amplitude.

ABSTRACT

Automatic methods for velocity model building using pre-stack migration perform better if the amplitude of events in common image gathers are equalized. For velocity analysis in time, the choice of the weight function in the Kirchhoff migration operator controls the amplitude of the migrated events. Numerical experiments evaluating five different weight functions indicate that good amplitude equalization can be achieved using approximations to weight functions derived from true amplitude Kirchhoff migration. Effective equalization of amplitudes in CIGs can also be achieved through a simpler and computationally cheaper weight function, which compensates for the obliquity factor only.

Keys words: Geophysics. Migration. Amplitude compensation.

LISTA DE FIGURAS

- Figura 2.1 Modelo para o cálculo da trajetória do tempo de difração. Considera-se num meio homogêneo, as trajetórias dos raios entre a fonte, x_s é a coordenada da fonte, e o ponto imagem, I , e entre o ponto imagem e o receptor, x_r é a coordenada do receptor, são retas de comprimento l_s e l_r , respectivamente; o ângulo α indica a bissetriz no vértice I , θ o ângulo de espalhamento e a profundidade do meio z é substituída por $V\tau$ 14
- Figura 2.2 Fatores que influenciam a amplitude da onda sísmica na reflexão. Fonte: Adaptado de Sheriff e Geldart (1982). 15
- Figura 2.3 Esquema do espalhamento geométrico a) para um fonte pontual e meio homogêneo com tons de cinza indicando a intensidade da frente de onda e b) a influência da curvatura do refletor sobre a contração (sinclinal) ou expansão (anticlinal) da frente de onda. 17
- Figura 3.1 A etapa inicial da análise de velocidade é a migração em tempo das seções afastamento-nulo. 22
- Figura 3.2 Representação esquemática da construção das seções CIG a partir das seções de afastamentos comum migradas em tempo. 22
- Figura 3.3 Seções CIG com velocidade de migração: a) menor que o valor correto; b) com o valor correto; e c) com o valor maior que o correto. 23
- Figura 4.1 Modelo de velocidade utilizado para migração. 25
- Figura 4.2 As linhas verticais indicam a posição dos CIG avaliados do modelo de velocidade. 25
- Figura 4.3 Seções migradas obtidas através da PSTM. (a) função peso W_1 , (b) função peso W_2 , (c) função peso W_3 , (d) função peso W_4 , (e) função peso W_5 . A variação de amplitude entre estas imagens é devido exclusivamente ao efeito da função peso. 26
- Figura 4.4 Seções CIG no CMP 4000 m. (a) função peso W_1 , (b) função peso W_2 , (c) função peso W_3 , (d) função peso W_4 e (d) função peso W_5 27
- Figura 4.5 Seções CIG no CMP 5000 m. (a) função peso W_1 , (b) função peso W_2 , (c) função

peso W_3 , (d) função peso W_4 e (d) função peso W_5	28
Figura 4.6 Seções CIG no CMP 6000 m. (a) função peso W_1 , (b) função peso W_2 , (c) função peso W_3 , (d) função peso W_4 e (d) função peso W_5	28
Figura 4.7 Seções CIG no CMP 6500 m. (a) função peso W_1 , (b) função peso W_2 , (c) função peso W_3 , (d) função peso W_4 e (d) função peso W_5	29
Figura 4.8 Seções CIG no CMP 7000 m. (a) função peso W_1 , (b) função peso W_2 , (c) função peso W_3 , (d) função peso W_4 e (d) função peso W_5	29
Figura 4.9 Seções CIG no CMP 7500 m. (a) função peso W_1 , (b) função peso W_2 , (c) função peso W_3 , (d) função peso W_4 e (d) função peso W_5	30

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	10
2	MIGRAÇÃO KIRCHHOFF PRÉ-EMPILHAMENTO EM TEMPO	12
2.1	PRESERVAÇÃO DE AMPLITUDE NA MIGRAÇÃO	14
3	ANÁLISE DE VELOCIDADE USANDO MIGRAÇÃO PRÉ-EMPILHAMENTO EM TEMPO	20
4	AVALIAÇÃO DOS PESOS NA MIGRAÇÃO PRÉ-EMPILHAMENTO	24
4.1	EXPERIMENTOS NUMÉRICOS	24
5	CONCLUSÃO	31
	REFERÊNCIAS	33

1 INTRODUÇÃO

A sísmica de reflexão utiliza os campos de ondas elásticas refletidas e difratadas, registrados na superfície, para produzir imagens de estruturas geológicas localizadas na subsuperfície. Os métodos da sísmica de reflexão são amplamente utilizados na indústria de prospecção de petróleo.

O fluxo de trabalho para se obter uma imagem sísmica pode ser dividido em três etapas. A primeira etapa é processamento dos dados que consiste em realçar reflexões e difrações primárias e atenuar outros eventos registrados. A segunda etapa é a análise de velocidade na qual se estima um modelo de velocidade consistente com os eventos de reflexão primária registrados. A terceira etapa consiste em utilizar o modelo de velocidade estimado para produzir a imagem por migração sísmica.

Há dois tipos de migração em função do modelo de velocidade utilizado. Na migração em tempo o modelo de velocidade é especificado em função das coordenadas em superfície e o tempo de trânsito vertical. Na migração em profundidade o modelo de velocidade é especificado em função das coordenadas em superfície e da profundidade.

Uma imagem da subsuperfície em profundidade é, em princípio, melhor para localizar alvos exploratórios. Por outro lado, a estimativa de modelos de velocidade em profundidade é um processo computacionalmente dispendioso e sem unicidade. Diferentes modelos de velocidade podem produzir seções de dados migrados contendo os traços com o mesmo CMP e diferentes afastamentos (CIG) com eventos horizontais. A escolha de um modelo de velocidade em profundidade depende muito do interprete.

Por outro lado a migração em tempo é computacionalmente eficiente e o processo de estimativa do modelo de velocidade é menos ambíguo e robusto. Quando a variação de velocidade em subsuperfície é moderada, imagens sísmicas em tempo são adequadas para a interpretação de alvos exploratórios. A grande maioria dos dados sísmicos é processada em tempo e apenas quando as imagens em tempo se mostram inadequadas é que a análise de velocidade em profundidade é efetuada.

Na sequência de processamento convencional a análise de velocidade em tempo é efetuada em famílias CMP e a seguir os dados são empilhados para simular uma seção de afastamento nulo entre fonte-receptor. Após esta etapa, os dados são migrados em tempo

para produzir uma imagem da subsuperfície. Esta sequência de processamento é a migração pós-empilhamento.

Uma limitação da análise de velocidade em tempo é a presença de eventos de reflexão com mergulhos conflitantes, particularmente na presença de falhas e flancos de domos salinos. Uma alternativa para a análise de velocidade nestes ambientes é utilizar a migração em tempo pré-empilhamento.

Na migração pré-empilhamento, uma alternativa a sequência convencional de processamento dos dados, cada traço registrado é migrado independentemente. Múltiplas imagens da subsuperfície são obtidas efetuando a soma das imagens dos traços com mesmo afastamento fonte-receptor, ou seja, pertencentes a uma família de afastamento-comum. Estas imagens sísmicas devem ser idênticas, se um modelo de velocidade consistente com os dados for utilizado para efetuar migração. Conseqüentemente, a migração pré-empilhamento fornece um critério se estimar um modelo de velocidade.

O método de análise de velocidade baseado na migração pré-empilhamento não apresenta as limitações da análise de velocidade em famílias CMP (YILMAZ, 2001), com a vantagem de estimar diretamente um modelo de velocidade para a migração. O critério para estimar um modelo de velocidade consiste em horizontalizar eventos de reflexão em seções de ponto imagem comum (CIG) (YILMAZ, 2001). As famílias CIG são obtidas a partir da migração pré-empilhamento em tempo de famílias de dados de afastamentos comum.

Análise de velocidade através da migração pré-empilhamento melhora se a amplitude dos eventos estiver equalizada nos CIG. Há diferentes estratégias para se compensar a amplitude dos eventos na migração em tempo. Um procedimento clássico é compensar o espalhamento geométrico antes da migração em tempo. Outra estratégia consiste em compensar o espalhamento geométrico durante a migração através de funções pesos na integral de Kirchhoff.

Neste trabalho foi dado a análise de velocidade através da migração pré-empilhamento pelo método de Kirchhoff, como objetivo de avaliar o efeito nas seções CIG, de funções pesos que melhor preservam a amplitude dos eventos de reflexão. A monografia está organizada em quatro capítulos. No capítulo 2, apresento os fundamentos teóricos da migração pré-empilhamento em tempo e alternativas para preservação de amplitude. No capítulo 3, descrevo a análise de velocidade usando migração pré-empilhamento em tempo. O capítulo 4 apresento os resultados de experimentos numéricos utilizando diferentes pesos para preservação de amplitude e os seus efeitos no CIG utilizados para a análise de velocidade, utilizando o modelo Marmousoft (BILLETE et al.,). Finalmente, apresento a discussão dos resultados e conclusões.

2 MIGRAÇÃO KIRCHHOFF PRÉ-EMPILHAMENTO EM TEMPO

O método de migração de dados sísmicos consiste em transformar o campo de ondas registrado na superfície na terra em uma imagem da subsuperfície (YILMAZ, 2001). A migração em tempo transforma os dados sísmicos em seções no domínio do tempo migrado. Em regiões de variação moderada de velocidade de propagação das ondas o tempo migrado corresponde tempo de trânsito ao longo da vertical. A imagem produzida através da migração em tempo representa melhor a subsuperfície (BIONDO, 2006) do que a seção empilhada, conseqüentemente, é mais adequada para interpretação geológica. Outra vantagem da migração em tempo é o baixo custo computacional quando comparada à migração em profundidade (BIONDO, 2006).

Na migração de Kirchhoff (BIONDO, 2006), onde cada ponto da imagem migrada é considerado como um possível ponto difrator. A intensidade da imagem migrada em um ponto é obtida somando-se o registro sísmico ao longo da superfície de tempo que corresponde a um evento de difração no ponto imagem considerado.

Para se obter a superfície de difração para a migração em tempo, se pressupõe que a variação lateral de velocidade na escala do lançamento de aquisição é muito menor que a variação vertical de velocidade. Esta hipótese justifica associar a cada ponto imagem uma velocidade efetiva, por exemplo, a velocidade de empilhamento.

Para o processo de migração pré-empilhamento em tempo usado na análise de velocidade utilizamos o operador de migração, que superpõe eventos de migração, para ser inserido o tempo de difração. O operador de migração é representado pela integral a seguir (BIONDO, 2006):

$$I(x, \tau) = \int_h dh \int_m dm W(x, \tau, m, h) D(m, h, t = t_D(m, h; x, \tau)) \quad (2.1)$$

onde m indica o ponto médio e h o semi-afastamento entre fonte-receptor; x representa as coordenadas do ponto imagem em subsuperfície; τ o tempo de trânsito vertical; $W(x, \tau, m, h)$ é o peso do operador de migração; $D(m, h, t)$ representa o registro sísmico filtrado; $I(x, \tau)$ representa a imagem sísmica; $t_D(m, h; x, \tau)$ representa o tempo de trânsito para um evento de difração no ponto imagem.

O ponto médio e o meio-afastamento entre fonte-receptor são obtidos através das relações:

$$m = \frac{x_s + x_r}{2} \quad (2.2)$$

e

$$h = \frac{x_r - x_s}{2}, \quad (2.3)$$

em que x_s é a coordenada da fonte e x_r é a coordenada do receptor.

Os dados devem ser filtrados antes da migração para obter $D(m, h, t)$. Estes filtros são aplicados no domínio da frequência a cada traço a ser migrado. Para o caso de levantamentos 3D, se aplica o filtro de derivada, $(-i\omega)$. Para o caso de levantamentos 2D, se aplica o filtro $\sqrt{i\omega}$ (SCHLEICHER J.; TYGEL; HUBRAL, 2007).

Considerando um meio efetivo homogêneo, a trajetória dos raios para um evento de difração está indicada na figura 2.1. O tempo de difração para operador de migração 3D, equação (2.1), é obtido imediatamente,

$$\begin{aligned} t_D(m, h; x, \tau) &= \frac{l_s}{V(x, \tau)} + \frac{l_r}{V(x, \tau)} \\ &= \sqrt{\left(\frac{m - h - x}{V_{mig}(x, \tau)}\right)^2 + \tau^2} + \sqrt{\left(\frac{m + h - x}{V_{mig}(x, \tau)}\right)^2 + \tau^2} \end{aligned} \quad (2.4)$$

onde l_s e l_r indicam as distâncias entre o ponto imagem e a fonte e o ponto imagem e o receptor, respectivamente; $V_{mig}(x, \tau)$ indica a velocidade de migração associada ao ponto imagem. Observe que a cada ponto imagem é associado um meio homogêneo efetivo de velocidade $V_{mig}(x, \tau)$.

Em duas dimensões, ver figura 2.1, o tempo de migração se reduz a expressão

$$t_D(x, \tau, m, h; V_{mig}) = \sqrt{\frac{(m - x - h)^2}{V_{mig}^2} + \tau^2} + \sqrt{\frac{(m - x + h)^2}{V_{mig}^2} + \tau^2}, \quad (2.5)$$

onde m é a coordenada do CMP, h o semi-afastamento e x a coordenada do ponto-imagem na superfície.

Na implementação do operador de migração, o filtro anti-aliasing é aplicado a cada traço durante a migração (LUMLEY D. E.; CLAERBOUT; BEVC,). Para garantir amostragem sem aliasing ao longo da curva de difração, equação (2.4) os dados devem satisfazer a condição:

$$f_{max} < \frac{1}{2\Delta m \partial t_D / \partial m}, \quad (2.6)$$

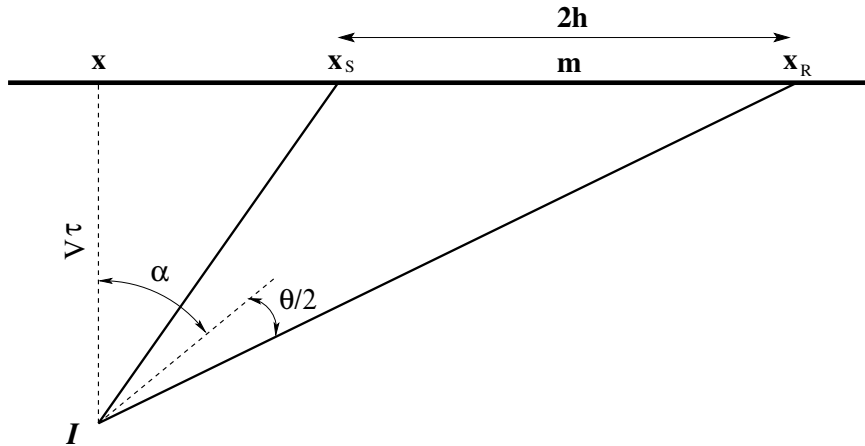


Figura 2.1: Modelo para o cálculo da trajetória do tempo de difração. Considera-se num meio homogêneo, as trajetórias dos raios entre a fonte, x_s é a coordenada da fonte, e o ponto imagem, I , e entre o ponto imagem e o receptor, x_r é a coordenada do receptor, são retas de comprimento l_s e l_r , respectivamente; o ângulo α indica a bissetriz no vértice I , θ o ângulo de espalhamento e a profundidade do meio z é substituída por $V\tau$.

onde f_{max} indica a frequência de Nyquist e Δm o intervalo entre CMPs.

O maior intervalo permitido na amostragem de dados sísmicos, de modo a assegurar sem distorção o espectro do traço sísmico, é chamado de intervalo Nyquist. A frequência definida na equação 2.6 estabelece um vínculo com intervalo de Nyquist, isto é, uma vez determinado o espaçamento de amostragem fica também definida o máximo valor de frequência admitida para o dado sísmico (LEITE,).

A simplicidade da migração Kirchhoff em tempo pré-empilhamento (PSTM) está em que todo o processo de formação de imagem em um ponto depende apenas da velocidade de migração $V_{mig}(x, \tau)$. Toda a complexidade da propagação de ondas entre a fonte, o ponto imagem e o receptor está reduzida a determinação desta propriedade efetiva. Esta característica torna a análise de velocidade em tempo para migração Kirchhoff um processo muito robusto se comparada à análise de velocidade na migração em profundidade (YILMAZ, 2001; BIONDO, 2006; FOMEL, a). Por isso imagens em tempo são comumente utilizadas pela indústria para interpretação da grande maioria dos registros sísmicos.

2.1 PRESERVAÇÃO DE AMPLITUDE NA MIGRAÇÃO

A função peso $W(m, h; x, \tau)$ é o outro fator na integral Kirchhoff (2.1) por ser utilizada para realçar a amplitude dos eventos focalizados pela migração. A amplitude de uma onda durante sua propagação é afetada por diversos fatores, e a figura 2.2 apresenta alguns:

- 1) Energia da fonte sísmica;
- 2) Padrão de radiação de fontes e o padrão de recepção do arranjo de geofones;
- 3) Resposta ao impulso dos receptores;
- 4) Acoplamento entre a fonte e o solo e o acoplamento entre os receptores e o solo;
- 5) Espalhamento por reflexão e transmissão através de interfaces ao longo da propagação;
- 6) Mecanismos de atenuação-dispersão
- 7) Mecanismos de focalização do campo de ondas causados por anomalias de velocidade e curvatura dos refletores, como indica a Figura 2.3b;
- 8) Espalhamento incoerente causado por anomalias de velocidade na escala do comprimento de onda dominante e rugosidade das interfaces;
- 9) O espalhamento geométrico.
- 10) A absorção inelástica.

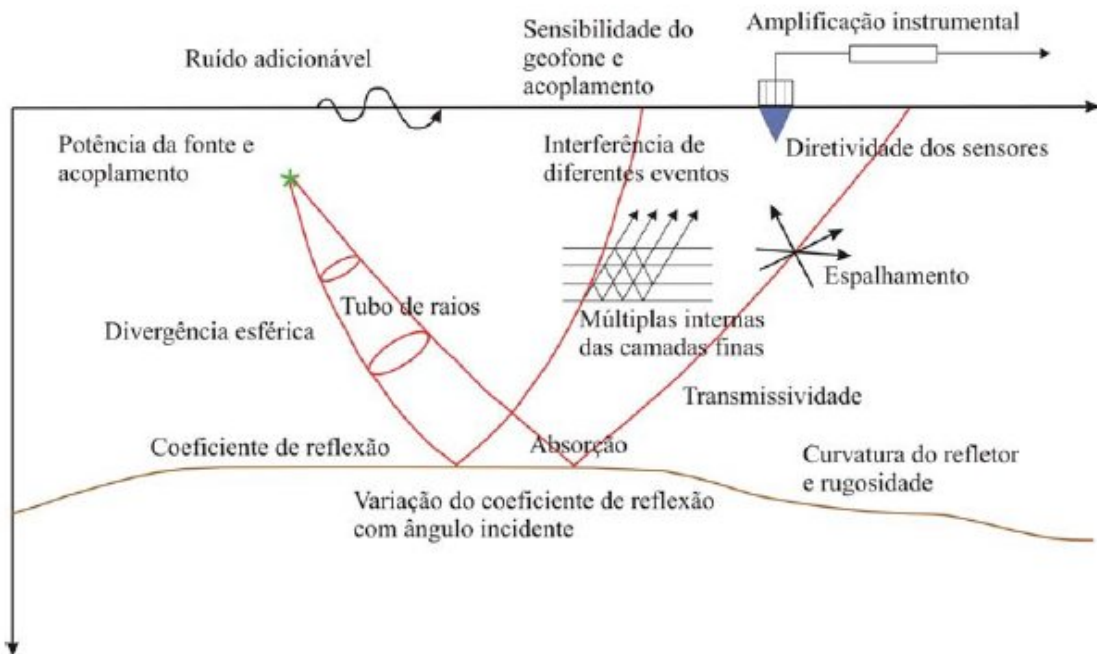


Figura 2.2: Fatores que influenciam a amplitude da onda sísmica na reflexão. Fonte: Adaptado de Sheriff e Geldart (1982).

O modelo de velocidade utilizado para a migração em tempo permite se obter uma aproximação para compensar pela perda de amplitude causada pelo espalhamento geométrico. Eventos com maior tempo de propagação possuem menor amplitude. O espalhamento geométrico (YILMAZ, 2001) é um fator que depende exclusivamente da trajetória dos raios. A compensação da perda de amplitude causada pelo espalhamento geométrico pode ser efetuada através de uma escolha adequada da função peso $W(m, h; x, \tau)$.

Considerando um meio acústico homogêneo e o campo de onda produzindo por uma fonte explosiva com padrão de radiação isotrópico. Neste caso as frentes de onda são esféricas, como indica a Figura 2.3a. Como o meio não possui mecanismo de dissipação a energia se conserva sobre as frentes de onda durante a propagação.

A área das frentes de onda é $S = 4\pi R$, em que R indica o raio da frente de onda. Para cada frequência do pulso sísmico, a energia da onda é proporcional ao quadrado da amplitude, A . Portanto a conservação da energia requer que

$$4\pi R^2 A^2 = E$$

em que E representa a energia conservada na frente de onda. Conseqüentemente,

$$A \cong \frac{1}{R} = \frac{1}{Vt} \quad (2.7)$$

em que t indica o tempo de propagação (SHERIFF; GELDART, 1982). O espalhamento geométrico em um meio homogêneo é definido pelo raio R .

No contexto da migração Kirchhoff em profundidade, a correção do espalhamento geométrico no operador de migração foi denominado de migração com amplitude verdadeira (HUBRAL, ; SCHLEICHER J.; TYGEL; HUBRAL, 2007). Na migração em tempo o espalhamento geométrico pode ser corrigido aproximadamente através da função peso.

A correção da amplitude melhora a performance de métodos de análise de velocidade baseados na migração pré-empilhamento. A equalização entre as amplitudes de imagens obtidas a partir de diferentes famílias de afastamento comum permite avaliar melhor a adequação do modelo de velocidade.

Este trabalho investiga o efeito de cinco funções peso na equalização das amplitude na migração, e o efeito é avaliado nas famílias ponto-imagem-comum. Duas funções peso foram derivadas a partir das expressões para migração em verdadeira amplitude em profundidade. Duas funções peso aplicam apenas o fator de obliquidade, que é definido abaixo. O último peso é aplicado aos dados antes da migração.

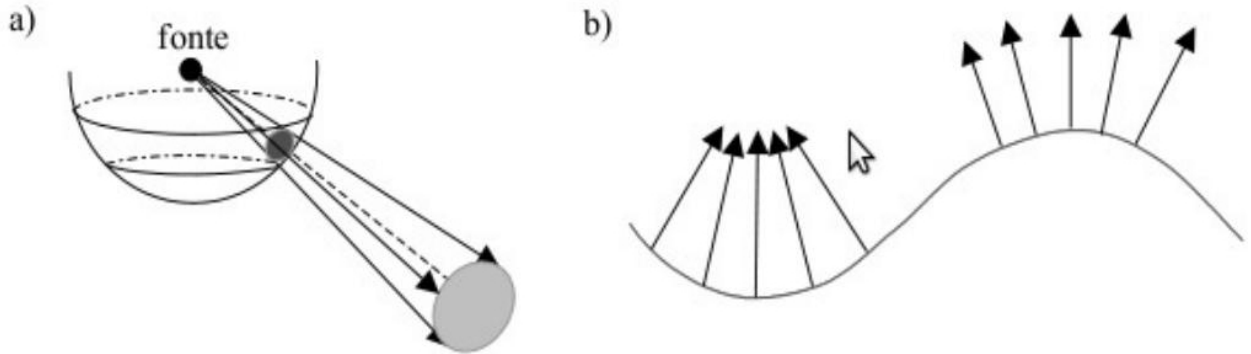


Figura 2.3: Esquema do espalhamento geométrico a) para um fonte pontual e meio homogêneo com tons de cinza indicando a intensidade da frente de onda e b) a influência da curvatura do refletor sobre a contração (sinclinal) ou expansão (anticlinal) da frente de onda.

A primeira função peso para corrigir o espalhamento geométrico foi proposta por Dellinger et al. () foi obtida através do operador de migração Kirchhoff em profundidade proposto por BLEISTEIN N.;COHEN e HAGIN (1987) para meios homogêneos, o que resulta na seguinte função peso:

$$W(m, h, x, \tau, V_{mig}) = \frac{2\tau}{\sqrt{\pi V_{mig}}} \sqrt{1 + \cos \theta} \sqrt{\frac{1}{l_s} + \frac{1}{l_r}} \left(\frac{l_r}{l_s} + \frac{l_s}{l_r} \right) \quad (2.8)$$

Considerando a Figura 2.1, aplicando a lei dos cossenos ao triângulo de vértices x_s , x_r e I obtém-se que

$$l_s^2 + l_r^2 - 2l_s l_r \cos \theta = (2h)^2, \quad (2.9)$$

Observando-se que comprimentos dos raios l_s e l_r são:

$$l_s = V_{mig} t_s \quad (2.10)$$

$$l_r = V_{mig} t_r \quad (2.11)$$

em que t_s e t_r são tempos de trânsito entre a fonte e o ponto imagem, e entre o ponto imagem e o receptor, respectivamente. Substituindo estas expressões em (2.8), chega-se a expressão

$$year = 1994, t_s^2 + t_r^2 - 2t_s t_r \cos \theta = \frac{(2h)^2}{V_{mig}^2} \quad (2.12)$$

que permite obter a expressão para $\cos \theta$ em função dos tempos de trânsito e da velocidade:

$$\cos \theta = \frac{1}{2} \left(\frac{t_r}{t_s} + \frac{t_s}{t_r} - \frac{4h^2}{V_{mig}^2 t_r t_s} \right). \quad (2.13)$$

As equações 2.10, 2.11 e 2.13 são substituídas na equação 2.8:

$$W(x, \tau, m, h; V_{mig}) = \sqrt{\frac{2}{\pi}} \frac{\tau}{V_{mig}} t_D^{\frac{3}{2}} \sqrt{1 - \frac{(2h)^2}{(V_{mig} t_D)^2}} \left(\frac{1}{t_s^2} + \frac{1}{t_r^2} \right). \quad (2.14)$$

A expressão final para o peso resultado da aproximação, válida para $h \ll V\tau$,

$$\frac{1}{t_s^2} + \frac{1}{t_r^2} \approx \frac{8}{t_D^2}. \quad (2.15)$$

Esta função peso proposta por Dellinger et al. () é indicada por W_1 :

$$W_1(x, \tau, m, h; V_{mig}) = 8 \sqrt{\frac{2}{\pi}} \frac{\tau}{V_{mig}} \frac{1}{\sqrt{t_D}} \sqrt{1 - \frac{(2h)^2}{(V_{mig} t_D)^2}}. \quad (2.16)$$

A segunda função peso para corrigir o espalhamento geométrico foi proposta por Pelles et al. () foi obtida através do operador de migração em verdadeira amplitude proposto por Schleicher J.; Tygel e Hubral (2007) para um meio homogêneo. Esta função peso proposta por Pelles et al. () é indicada por W_2 ,

$$W_2(x, \tau, m, h; V_{mig}) = \frac{1}{2} V_{mig} \tau \left(\frac{t_s}{t_r} + \frac{t_r}{t_s} \right) \sqrt{\frac{1}{t_s} + \frac{1}{t_r}} \quad (2.17)$$

Na migração Kirchhoff com amplitude verdadeira em profundidade o peso no operador de migração, além do fator que corrige o espalhamento geométrico, contém chamado fator de obliquidade (SCHLEICHER J.; TYGEL; HUBRAL, 2007). Considerando novamente a Figura 2.1, o fator de obliquidade é o cosseno do ângulo de mergulho de um potencial refletor plano no ponto imagem, I . Para que a lei de Snell seja obedecida, a normal ao refletor deve apontar na direção da bissetriz que passa no vértice I da figura 2.1. Denominando por α o ângulo de

mergulho, podemos obter imediatamente (FOMEL, a) que

$$\cos \alpha = \frac{\tau}{t_s} + \frac{\tau}{t_r} . \quad (2.18)$$

Os dois outros pesos estudados corrigem a amplitude utilizando apenas o fator de obliquidade. O peso W_3 utiliza a expressão exata:

$$W_3(x, \tau, m, h; V_{mig}) = \frac{1}{2} \left(\frac{\tau}{t_r} + \frac{\tau}{t_s} \right) . \quad (2.19)$$

O peso W_4 aproxima o fator de obliquidade pressupondo que $t_s \approx t_r$:

$$W_4(x, \tau, m, h; V_{mig}) = \frac{2\tau}{t_D} \quad (2.20)$$

Esta expressão só é válida para pequenos afastamentos $h \ll V_{mig}\tau$.

A última função peso utilizada foi aplicada antes da migração. Para recuperar a amplitude dos eventos foi aplicado um ganho aos dados, ou seja,

$$W_5(x, \tau, m, h; V_{mig}) = t_D^{3/2} . \quad (2.21)$$

O expoente maior que a unidade tenta compensar o maior espalhamento geométrico causado pelo aumento da velocidade com a profundidade, o que comumente ocorre em ambientes sedimentares (SHERIFF; GELDART, 1982).

3 ANÁLISE DE VELOCIDADE USANDO MIGRAÇÃO PRÉ-EMPILHAMENTO EM TEMPO

O sucesso ou o fracasso da migração em tempo depende da estimativa do modelo de velocidade $V_{mig}(x, \tau)$. Convencionalmente, a estimativa do modelo de velocidade é feita em famílias CMP (YILMAZ, 2001). Nesta configuração, a curva tempo-afastamento, $t(h)$, para eventos de reflexão é dada por:

$$t_{CMP}^2(m, h) = t_0^2 + \frac{4h^2}{V_{stk}^2(m, t_0)} ; \quad (3.1)$$

onde t_0 é o tempo de afastamento-nulo e $V_{stk}(m, t_0)$ é a velocidade de empilhamento. Em geral, a velocidade de empilhamento é estimada interpolando os máximos de coerência no espectro de velocidade (YILMAZ, 2001).

Este método para se estimar o modelo de velocidade possui duas limitações. A primeira é a equação (3.1) é válida apenas para pequenos afastamento, $h < V_{stk}t_0$ e para um modelo sem variação lateral de velocidade (SHERIFF; GELDART, 1982). A segunda é dependência da velocidade de empilhamento do mergulho do refletor. Por exemplo, para um modelo de velocidade homogêneo contendo um refletor com ângulo de mergulho α a velocidade de empilhamento é:

$$V_{stk} = \frac{V}{\cos \alpha} . \quad (3.2)$$

Portanto, quanto maior o mergulho do refletor maior será a velocidade de empilhamento estimada (SHERIFF; GELDART, 1982).

A dependência da velocidade de empilhamento no mergulho dos refletores pode atenuar eventos na seção empilhada, comprometendo a interpretação dos dados sísmicos. Quando refletores com mergulhos diferentes possuem o mesmo tempo para afastamento-nulo, como acontece na presença de falhas e flancos de domos salinos, mais de uma velocidade de empilhamento é associada a um mesmo instante de tempo no espectro de velocidade. Nestas circunstâncias a escolha de uma única velocidade, em geral a menor, leva á atenuação de

eventos com maior mergulho na seção empilhada e, por consequência, na migração pós-empilhamento. Portanto, a dependência da velocidade de empilhamento do mergulho dos refletores pode degradar a qualidade da imagem sísmica prejudicando a interpretação.

A correção de sobretempo de mergulho, DMO (*dip moveout*), é uma alternativa para preservar eventos com mergulhos conflitantes na seção empilhada. A implementação desta correção tem três etapas: NMO, DMO e empilhamento. Na primeira etapa, aplica-se a correção de sobretempo normal, NMO (*normal moveout*) em famílias CMP. O campo de velocidade utilizado na correção NMO deve estar associado exclusivamente à refletores sub-horizontais. Na segunda etapa, aplica-se a correção DMO. Em cada família de afastamento-comum, move-se os eventos corrigidos de NMO para a configuração de afastamento-nulo. Finalmente, os traços corrigidos de cada família CMP são empilhados. Se efetuada com sucesso, esta sequência de operações preserva refletores com mergulhos conflitantes após o empilhamento, tornando a seção empilhada mais próxima de uma seção de afastamento nulo (YILMAZ, 2001).

A correção DMO é, em geral, aplicada pressupondo-se um modelo de velocidade constante para toda a área do levantamento, o que pode comprometer a transformação dos dados para afastamento nulo e posteriormente o empilhamento. A migração pré-empilhamento é uma melhor alternativa á estratégia de imageamento baseada na sequência: análise de velocidade, empilhamento e migração pós-empilhamento (YILMAZ, 2001).

Na migração pré-empilhamento, equação (3.3), é o resultado do empilhamento das imagens de família de afastamento-comum migradas independentemente,

$$I(x, \tau; h) = \int_m dm W(x, \tau, m, h) D(m, h, t = t_D(m, h; x, \tau)) . \quad (3.3)$$

A Figura 3.1 ilustra este procedimento. Se o modelo de velocidade, $V_{mig}(x, \tau)$, for consistente com os dados, estas imagens sísmicas devem ser idênticas. Este é o critério utilizado para se estimar um modelo de velocidade.

Um domínio mais adequado para ser avaliar o modelo de velocidade são famílias de ponto imagem-comum, CIG (common image gather). Uma família CIG é uma seção, $I(\tau, h; x)$, do volume de dados migrado $I(x, \tau; h)$ contendo traços com mesmo CMP e diferentes afastamentos. Os traços de um CIG são imagens sob o mesmo ponto x na superfície, cada traço foi obtido pela migração de uma seção de afastamento comum diferente. A Figura 3.2 ilustra a construção de famílias CIG. Para um modelo de velocidade todos os traços em um CIG devem está alinhados, isto é, o modelo de velocidade deve ser adequado (YILMAZ, 2001).

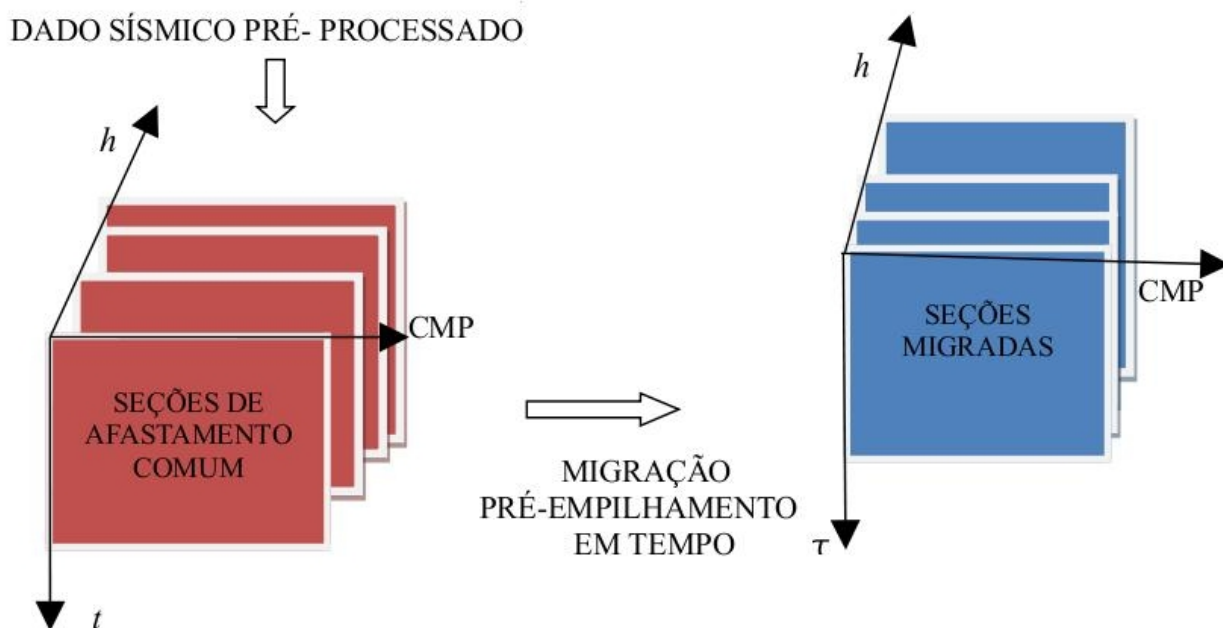


Figura 3.1: A etapa inicial da análise de velocidade é a migração em tempo das seções afastamento-nulo.

As seções afastamento-comum migradas em tempo são à base da construção de seções de ponto imagem comum (YILMAZ, 2001).

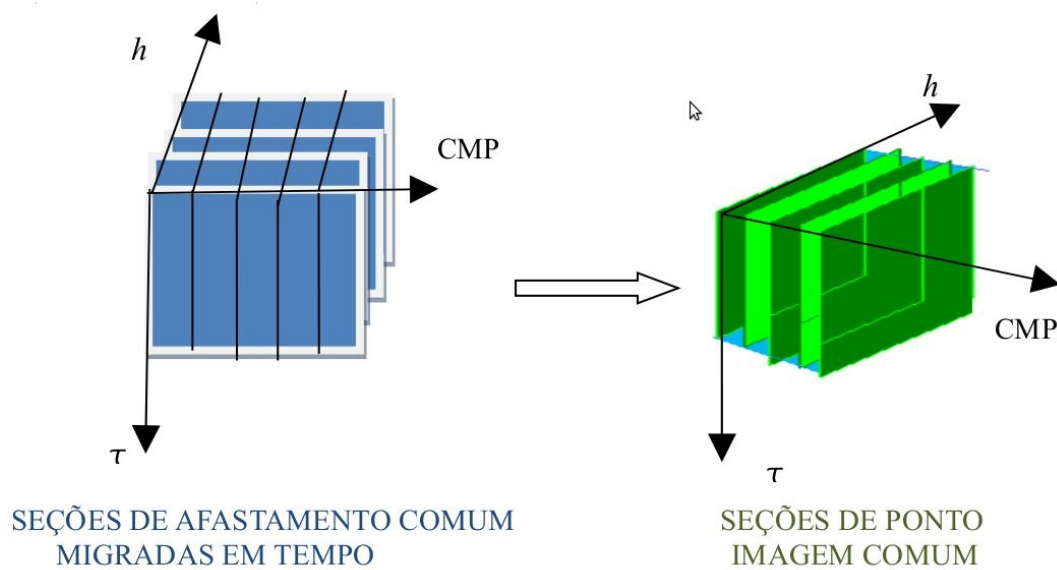


Figura 3.2: Representação esquemática da construção das seções CIG a partir das seções de afastamentos comum migradas em tempo.

A figura 3.3 ilustra a análise de velocidade em famílias CIG. Se a velocidade de migração estiver correta para um evento, a curva de afastamento para este evento terá curvatura nula, ou seja, o evento estará alinhado horizontalmente (YILMAZ, 2001). Se o valor da velocidade de migração estiver incorreto evento, haverá curvatura ascendente ou descendente na curva de afastamento associada ao evento na seção CIG.

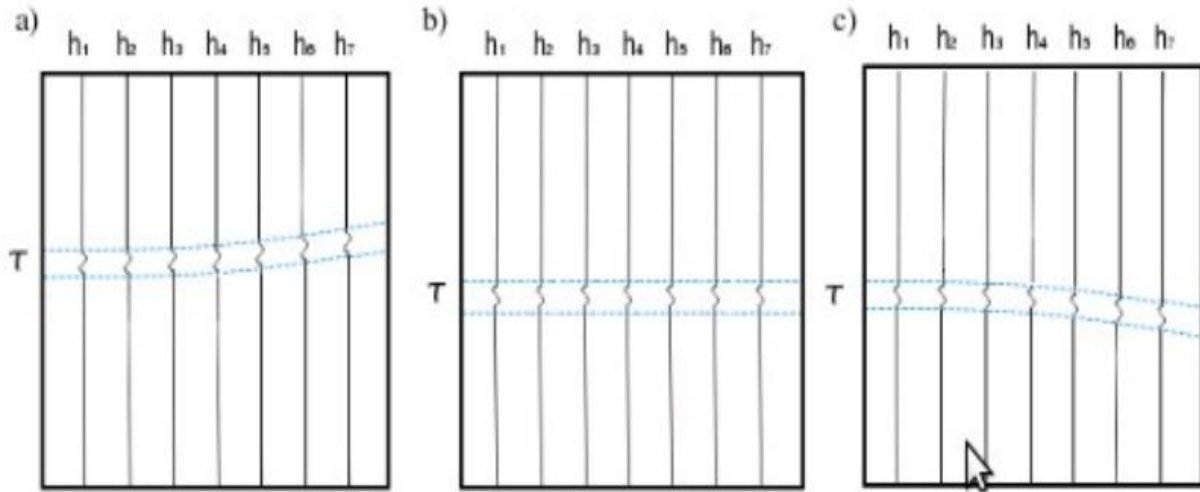


Figura 3.3: Seções CIG com velocidade de migração: a) menor que o valor correto; b) com o valor correto; e c) com o valor maior que o correto.

O desenvolvimento de métodos automáticos para efetuar a análise de velocidade utilizando a migração pré-empilhamento é um tema atual de pesquisa em sismica de exploração (SCHLEICHER; COSTA,). Estes métodos utilizam diferentes abordagens para detectar a horizontalidade de eventos em CIG (FOMEL, b; SHEN; SYMES, ; SCHLEICHER J.; COSTA; NOVais, 2008). Em geral alguma medida de coerência é utilizada. Algumas destas medidas de coerência dependem da equalização da amplitude dos eventos nos CIG. Por exemplo, a semblance diferencial é a medida da energia de focalização das reflexões na direção dos afastamento h e varia no intervalo $[0,1]$ (SHEN; SYMES,), e requer eventos com amplitudes equalizadas para produzir um valor que seja mínimo ao longo de eventos com curvatura nula. A detecção da inclinação da curva de afastamento associada a um evento utilizando, por exemplo, estimadores do tipo destruidores de onda plana (FOMEL, c), tem melhor desempenho se as amplitudes ao longo do evento estiverem equalizadas. Neste contexto, apresentamos no próximo capítulo os resultados de experimentos numéricos sobre o efeito de diferentes funções peso na equalização das amplitudes de eventos em famílias CIG.

4 AVALIAÇÃO DOS PESOS NA MIGRAÇÃO PRÉ-EMPILHAMENTO

Para avaliar o efeito dos pesos para a equalização das amplitudes dos eventos em famílias de ponto imagem comum, foi utilizado os dados sintéticos Marmousoft. Este conjunto de dados foi gerado através de modelagem Born-raio, portanto não possui múltiplas. O modelo de referência utilizado para efetuar o traçamento de raios foi obtido a partir da suavização do modelo Marmousi (BILLETE et al.,). Os dados contém 96 famílias de afastamento comum, com intervalo de 12.5 m entre CMPs, intervalo de amostragem de 4 ms e tempo de registro de 2.9 s.

O modelo de velocidade utilizado para migrar os dados foi estimado pelo método de análise de velocidade através do duplo empilhamento de integrais de trajetórias (SCHLEICHER; COSTA,). Este método estima uma amostragem densa de valores de velocidade através do empilhamento ponderado de imagens migradas com modelos de velocidade homogêneos. O modelo de velocidade final foi obtido através do ajuste pelo método de mínimos-quadrados de B-splines cúbicos em uma malha regular, com 26 nós no tempo e 62 nós ao longo dos CMPs. O intervalo de amostragem no tempo é de 50 ms e o intervalo ao longo de CMPs de 100 m. A Figura 4.1 mostra o modelo de velocidade em tempo utilizado nos experimentos numéricos.

Seis famílias ponto-imagem-comum foram selecionadas para avaliar o efeito dos diferentes pesos. Cada família CIG selecionada é identificada pela sua coordenada: 4000 m, 5000 m, 6000 m, 6500 m, 7000 m e 7500 m. Observando a Figura 4.2 nota-se que os CIG de coordenadas 6000 m a 7000 m estão em região de maior variação lateral de velocidade.

4.1 EXPERIMENTOS NUMÉRICOS

Para avaliar o efeito dos pesos na equalização das amplitudes na migração pré-empilhamento em tempo foi comparado dois conjuntos de imagens. Primeiro, a imagem obtida empilhando

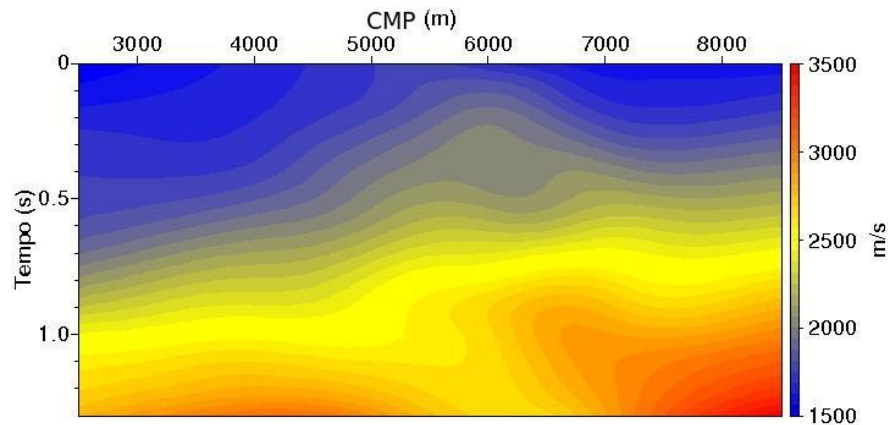


Figura 4.1: Modelo de velocidade utilizado para migração.

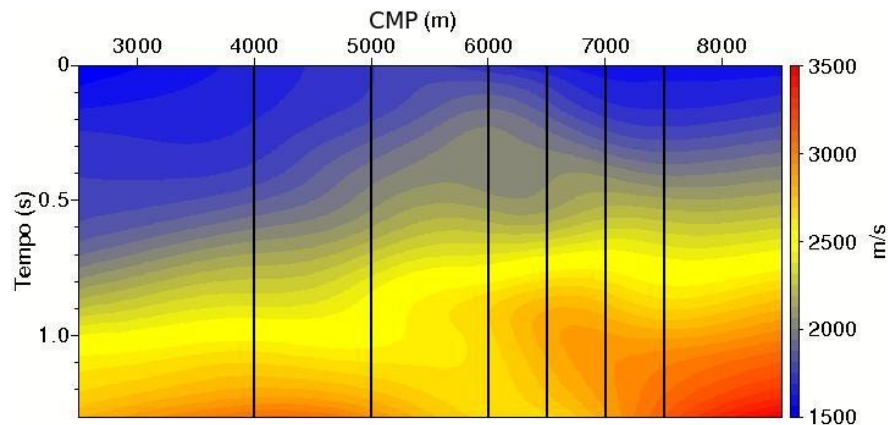


Figura 4.2: As linhas verticais indicam a posição dos CIG avaliados do modelo de velocidade.

o resultado da migração de seção de afastamento comum. Segundo, imagens de famílias de ponto imagem comum para posições CMP indicadas na Figura 4.2.

A figura 4.3 apresenta imagens obtidas após o empilhamento das migração de cada seção de afastamento comum. As cinco imagens diferem exclusivamente pela função peso utilizada na migração. A imagem da Figura 4.3a, obtida a partir da função peso W_1 , apresenta ruídos de baixa frequência e perda de amplitude para os eventos abaixo de 0.8 s. As imagens nas figuras 4.3b, 4.3c e 4.3d foram obtidas com as funções peso W_2 , W_3 e W_4 , respectivamente. Estas imagens apresentam melhor equalização de amplitudes em relação a figura 4.3a. As funções pesos, W_3 e W_4 , apresentam imagens quase indistinguíveis e uma melhor equalização de amplitudes para os eventos mais rasos que a função peso W_2 . A função peso W_5 , Figura 4.3e, apresenta o pior resultado, os eventos mais rasos, abaixo de 0.2 s, apresentam amplitude muito pequena.

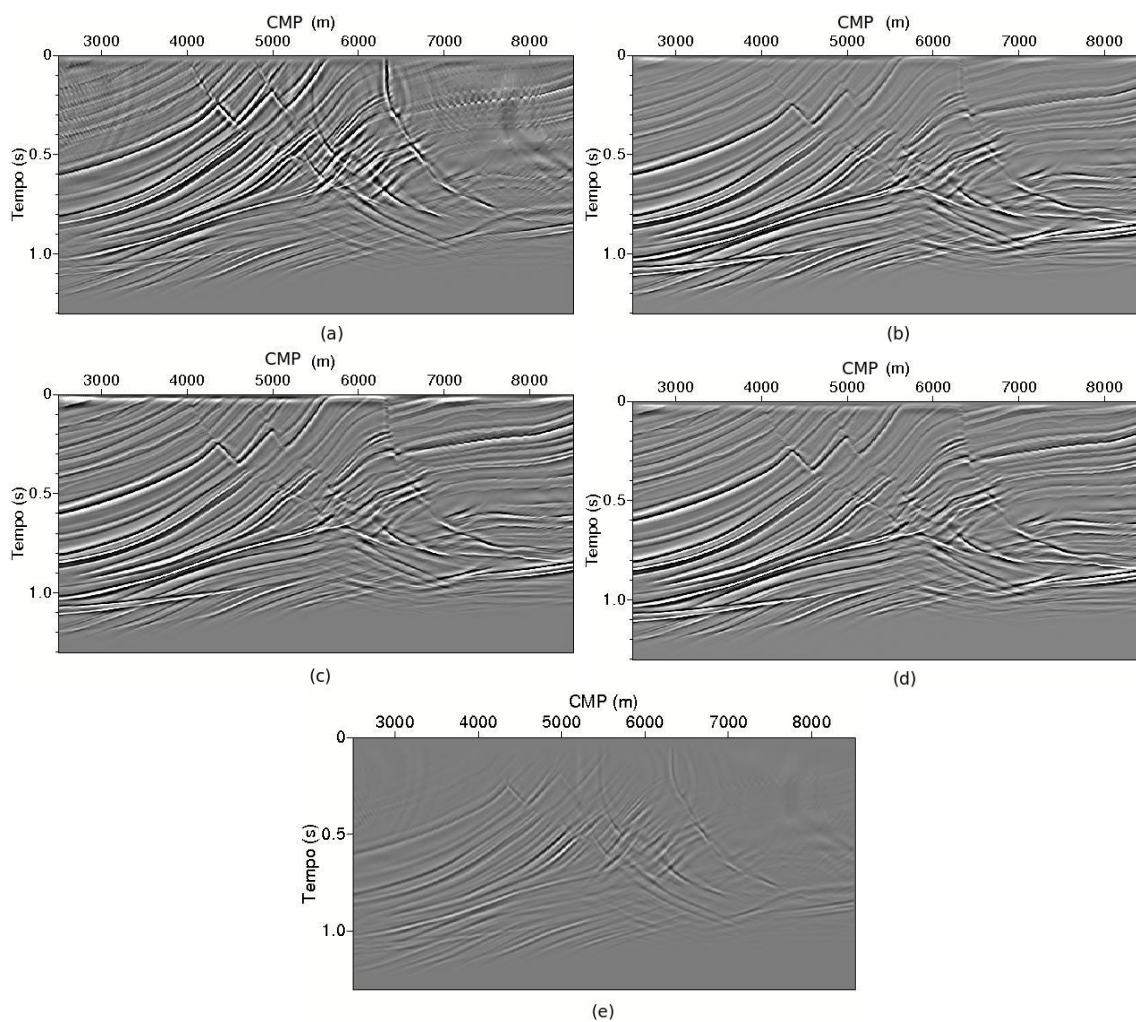


Figura 4.3: Seções migradas obtidas através da PSTM. (a) função peso W_1 , (b) função peso W_2 , (c) função peso W_3 , (d) função peso W_4 , (e) função peso W_5 . A variação de amplitude entre estas imagens é devido exclusivamente ao efeito da função peso.

A segunda avaliação da influência dos pesos para equalização da amplitude foi efetuada nas famílias ponto-imagem-comum. A figura 4.4a-e apresenta os CIG no CMP de coordenada 4000 m obtido com as cinco funções pesos estudadas. Em todos os CIG os eventos estão horizontalizados, indicando que o modelo de velocidade em tempo é adequado. As figuras 4.4a e 4.4b mostram os CIGs obtidos com as funções pesos W_1 e W_2 , respectivamente. Estas funções pesos corrigem a obliquidade e espalhamento geométrico e aproximação a migração com amplitude verdadeira. Observa-se que a função peso W_1 apresenta melhor equalização de amplitude para os eventos mais rasos, por exemplo, o evento em torno de 0.4 s apresenta maior amplitude em na figura 4.4a que na figura 4.4b. Por outro lado, para eventos mais profundos a função peso W_2 produz melhor equalização, veja o evento com forte amplitude logo abaixo de 1.0 s aparece fortemente atenuado na figura 4.4a.

Os CIGs com melhor equalização de amplitude estão nas figuras 4.4c e 4.4d, obtidos com as funções pesos que corrigem apenas o fator de obliquidade. Estas duas figuras são praticamente idênticas. A amplitude dos eventos está bem melhor equalizada que nas figuras 4.4a e 4.4b. Finalmente, a figura 4.4e, obtida aplicando-se a correção de espalhamento geométrico antes da migração, função peso W_5 , degrada a equalização ao realçar a amplitude dos eventos profundos em relação aos eventos mais rasos.

A figura 4.5a-e apresenta os CIGs obtidos com as diferentes funções pesos para o CMP de coordenada 5000 m. Os eventos ainda se apresentam praticamente sem curvatura indicando que o modelo de velocidade em tempo é adequado. Todas as observações feitas na comparação das figuras 4.4a-e se aplicam a estes CIGs. Novamente as funções pesos W_3 e W_4 produzem melhor equalização das amplitudes.

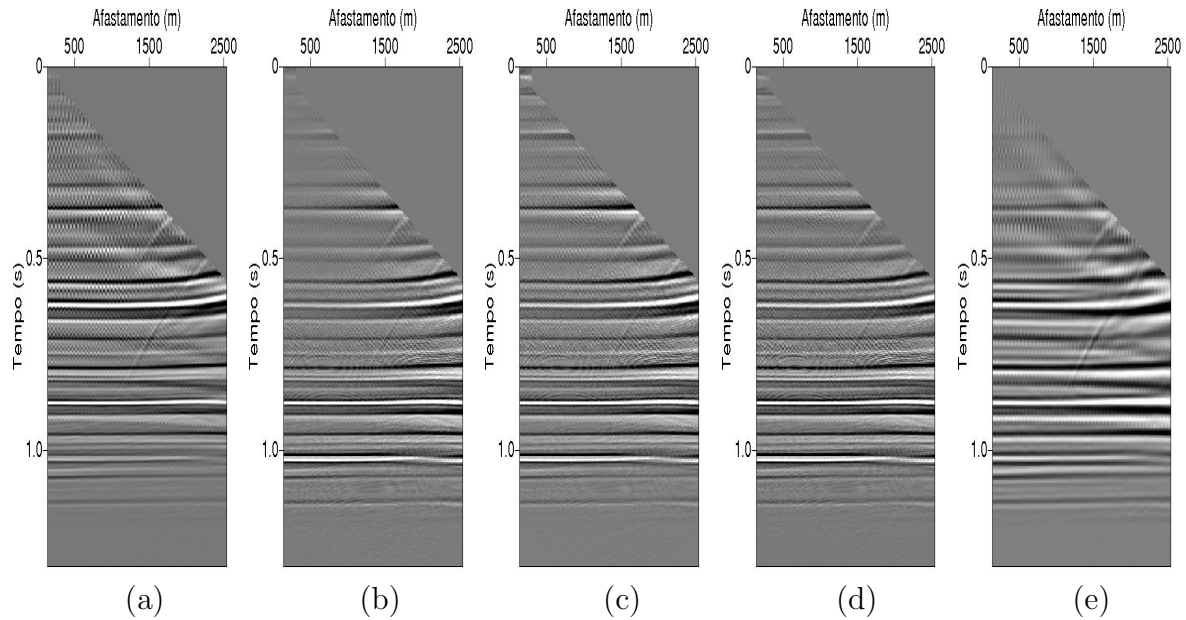


Figura 4.4: Seções CIG no CMP 4000 m. (a) função peso W_1 , (b) função peso W_2 , (c) função peso W_3 , (d) função peso W_4 e (e) função peso W_5 .

As figuras 4.6, 4.7 e 4.8 mostram CIGs em regiões de maior variação lateral de velocidade. Por violar os pressupostos da migração não há focalização uniforme de eventos ao longo do CIG. Particularmente, os eventos mais profundos não são focalizados.

A figura 4.9a-e apresenta os CIGs obtidos com as diferentes funções pesos para o CMP de coordenada 7500 m. Este CIG está em uma região de menor variação de velocidade, mas que ainda apresenta ruído indicando que o modelo de velocidade utilizado para a migração ainda precisa ser refinado. Apesar do ruído as figuras 4.9c e 4.9d destacam melhor o alinhamento dos eventos mais rasos, onde o modelo de velocidade está melhor estimado.

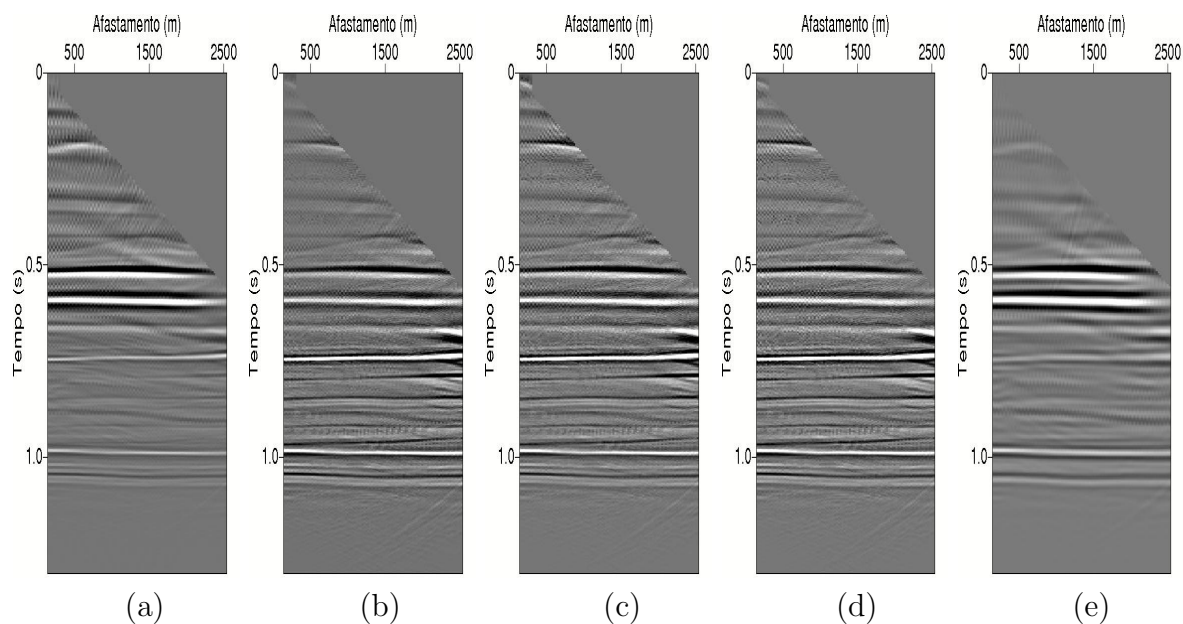


Figura 4.5: Seções CIG no CMP 5000 m. (a) função peso W_1 , (b) função peso W_2 , (c) função peso W_3 , (d) função peso W_4 e (d) função peso W_5 .

Os resultados destes experimentos indicam que as funções pesos W_3 e W_4 são as mais adequadas para serem usadas em métodos automáticos de análise de velocidade usando migração Kirchhoff.

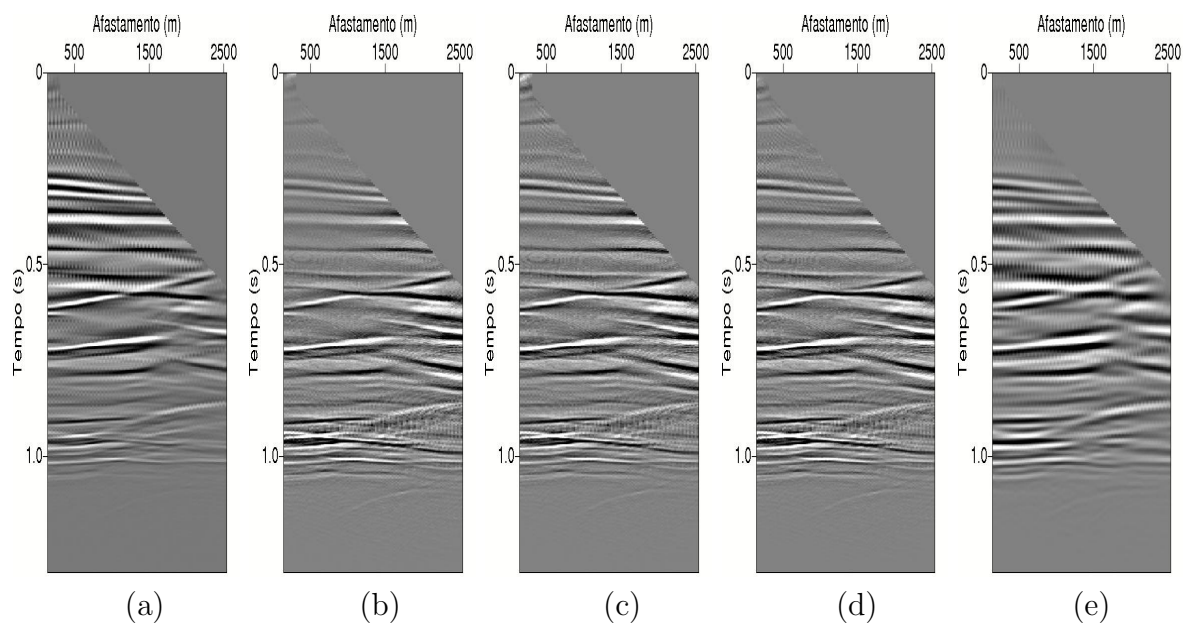


Figura 4.6: Seções CIG no CMP 6000 m. (a) função peso W_1 , (b) função peso W_2 , (c) função peso W_3 , (d) função peso W_4 e (d) função peso W_5 .

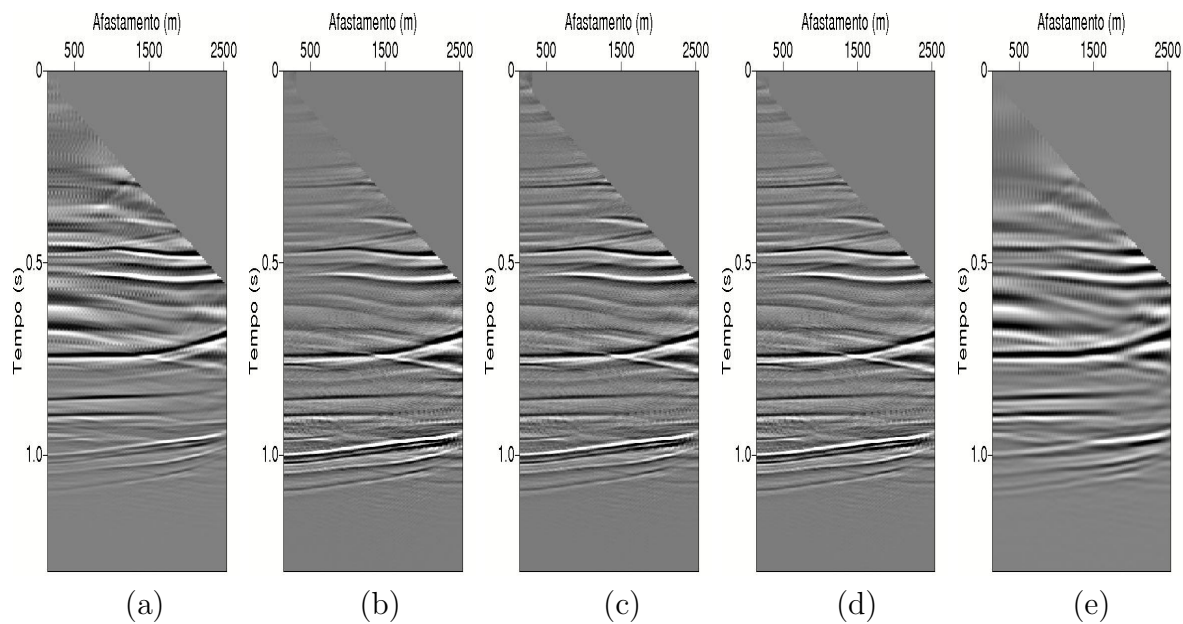


Figura 4.7: Seções CIG no CMP 6500 m. (a) função peso W_1 , (b) função peso W_2 , (c) função peso W_3 , (d) função peso W_4 e (d) função peso W_5 .

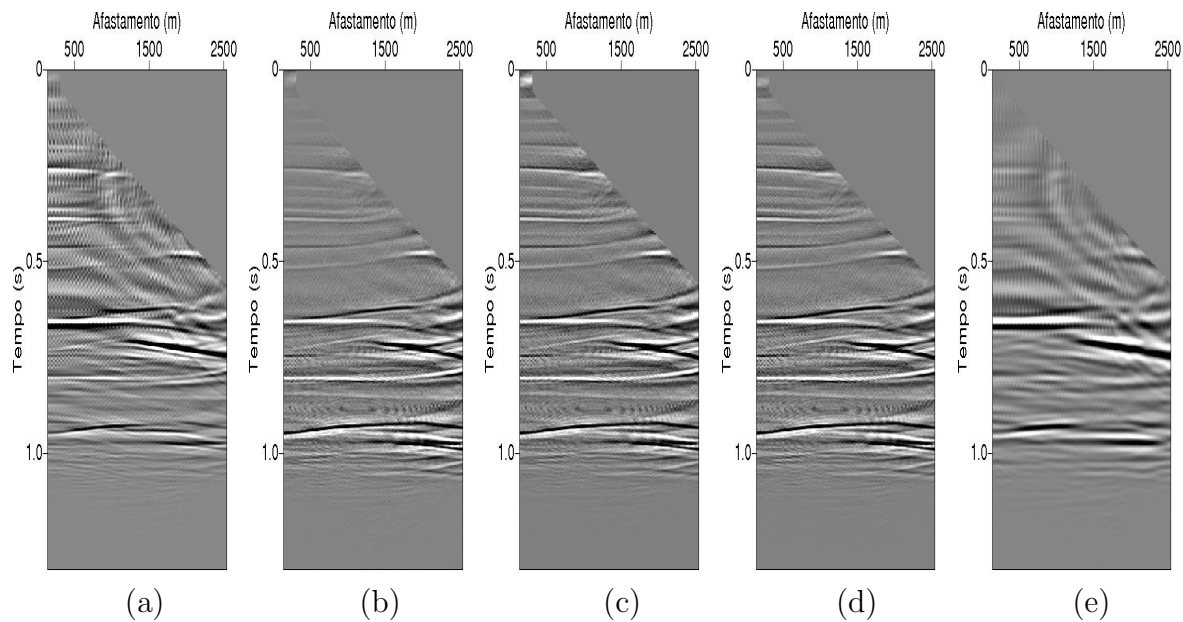


Figura 4.8: Seções CIG no CMP 7000 m. (a) função peso W_1 , (b) função peso W_2 , (c) função peso W_3 , (d) função peso W_4 e (d) função peso W_5 .

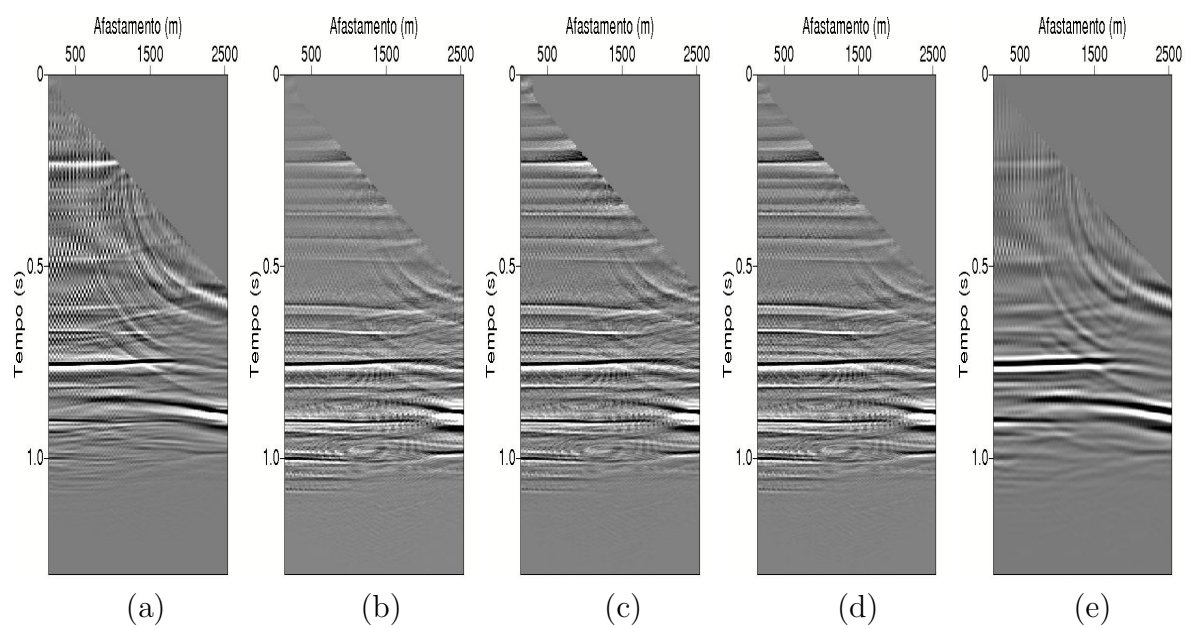


Figura 4.9: Seções CIG no CMP 7500 m. (a) função peso W_1 , (b) função peso W_2 , (c) função peso W_3 , (d) função peso W_4 e (d) função peso W_5 .

5 CONCLUSÃO

Métodos automáticos de análise de velocidade através de migração pré-empilhamento são um tema atual de pesquisa em sísmica de exploração. O desempenho destes métodos é melhor se a amplitude dos eventos em famílias de ponto-imagem-comum é equalizada. Neste trabalho diferentes funções peso foram avaliadas com o objetivo de melhor equalizar a amplitude de eventos em famílias CIG na migração Kirchhoff pré-empilhamento em tempo.

As funções pesos W_1 e W_2 para corrigir o espalhamento geométrico e o fator de obliquidade são aproximações utilizadas na migração Kirchhoff com verdadeira amplitude. Outras duas funções peso, W_3 e W_4 , compensam apenas o fator de obliquidade. A última função peso, W_5 , corresponde aplicar a correção de espalhamento geométrico antes da migração.

Foram avaliadas os efeitos das funções pesos na equalização de amplitudes em famílias CIG em experimentos numéricos utilizando os dados sintéticos Marmousoft (BILLETE et al.,). O modelo de velocidade utilizado para gerar os dados apresenta regiões com forte variação lateral, que violam os pressupostos da migração em tempo. Nestas regiões os efeitos de focalização causados por anomalias de velocidade degradam a qualidade das imagens em tempo.

O modelo de velocidade em tempo utilizado para a migração foi obtido suavizando valores de velocidade de migração obtidos pelo método de análise de velocidade através do duplo empilhamento de integrais de trajetória (SCHLEICHER; COSTA,).

Os experimentos numéricos para avaliar a equalização da amplitude dos eventos em famílias CIG indicaram que:

- (a) a função peso W_5 , equação (2.21), que compensa o espalhamento geométrico antes da migração, produziu os piores resultados;
- (b) a função peso W_2 , equação (2.17), proposta por (PELLES et al.,) apresentou o melhor equalização da amplitude para eventos profundos em relação ao peso W_1 , que foram deduzidos a partir da migração Kirchhoff de amplitude verdadeira;

- (c) a função peso W_1 , equação (2.16), proposta por (DELLINGER et al.,), apresentou melhor equalização de amplitude para os eventos mais rasos em relação ao peso W_2 ;
- (d) a função peso W_3 , equação (2.19), que compensa apenas o fator de obliquidade, foi eficaz na equalização da amplitude dos eventos, a função W_4 , equação (2.20) apresentou resultados equivalentes.

Os resultados dos experimentos numéricos indicam que, entre as funções pesos estudadas, W_3 e W_4 são as mais adequadas para métodos automáticos de análise de velocidade através da migração pré-empilhamento em tempo. Para análise de velocidade o critério de equalização da amplitudes dos eventos em CIG é mais conveniente que o critério de amplitude-verdadeira. Funções peso que aproximam a migração em amplitude verdadeira, ao corrigir o espalhamento geométrico, tornam a amplitude dos eventos migrados mais próximas do coeficientes de reflexão. Consequentemente, eventos associados a um menor contraste de impedância apresentam menor amplitude relativa a outros eventos nos CIG o que pode comprometer medidas de coerência, por exemplo, a semblance diferencial.

REFERÊNCIAS

- BILLETE, F. et al. Practical aspects and applications of 2d stereotomography. *Geophysics*, v. 48, p. 1008–1021.2003.
- BIONDO, B. *3D Seismic Imaging*. [S.l.]: Society of Exploration Geophysicists, 2006. 383 p. (Investigations in Geophysics, 14).
- BLEISTEIN N.; COHEN, J. K.; HAGIN, F. G. *Two and one-half dimensional Born inversion with an arbitrary reference*. [S.l.]: Society of Exploration Geophysics, 1987. 26-36 p.
- DELLINGER, J. A. et al. Efficient 2,5-d true amplitude migration. *Geophysics*, v. 65, p. 943–950.2000.
- FOMEL, S. Time migration velocity analysis by velocity continuation. *Geophysics*, v. 68, p. 1662–1672.2003.
- FOMEL, S. Velocity analysis using ab semblance. *Geophysical Prospecting*, v. 56, p. 1–13.2008.
- FOMEL, S. Velocity-independent time-domain seismic imaging using local event slopes. *Geophysics*, v. 72, p. S139–S147.2007.
- HUBRAL, P. Computing true amplitude reflections in a laterally inhomogeneous earth. *Geophysics*, v. 48, p. 1051–1062.1983.
- LEITE, L. W. B. Fundamentos da análise de sinais digitais em geofísica. Projeto PROINT, 2006-2007, p. 59.2008.
- LUMLEY D. E.; CLAERBOUT, J. F.; BEVC, D. Anti-aliased kirchoff 3-d migration. In:SEG Expanded Abstracts, v. 13, p. 1282–1285.1994.
- PELLES, O. et al. A practical approach to true amplitude migration. *Journal of Seismic Exploration*, v. 10, p. 183–203.2001.
- SCHLEICHER, J.; COSTA, J. Migration velocity analysis by double path-integral migration. *Geophysics*, v. 74, p. WCA225–WCA231.2009.
- SCHLEICHER J.; COSTA, J. C.; NOVAIS, A. Time-migration velocity analysis by image-wave propagation of common-image gathers. 2008.
- SCHLEICHER J.; TYGEL, M.; HUBRAL, P. *Seismic true-amplitude imaging*. [S.l.]: Society of Exploration Geophysicists, 2007. 354 p. (Geophysical Developments, 12).

SHEN, P.; SYMES, W. Automatic velocity analysis via shot profile migration. *Geophysics*, v. 73, p. VE49–VE59.2008.

SHERIFF, R. E.; GELDART, L. P. *Exploration seismology: history, theory and data acquisition*. [S.l.]: Cambridge University Press, 1982.

YILMAZ, O. *Seismic data analysis: processing, inversion, and interpretation of seismic data*. [S.l.]: Society of Exploration Geophysicists, 2001. 1000 p. (Investigations in Geophysics, 10).