



UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ  
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOFÍSICA

ISIS TOURINHO DOS SANTOS

UTILIZAÇÃO DE MÚLTIPLAS DE SUPERFÍCIE LIVRE NO  
IMAGEAMENTO SÍSMICO

BELEM  
2014

ISIS TOURINHO DOS SANTOS

**UTILIZAÇÃO DE MÚLTIPLAS DE SUPERFÍCIE LIVRE NO  
IMAGEAMENTO SÍSMICO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Geofísica da Universidade Federal do Pará, para obtenção do título de Mestra em Geofísica.

Área de Concentração : Métodos Sísmicos

Orientadora: Prof<sup>a</sup>. Dra. Ellen de Nazaré Souza Gomes

BELÉM  
2014

Dados Internacionais de Catalogação de Publicação (CIP)  
(Biblioteca do Instituto de Geociências/UFPA)

---

Santos, Isis Tourinho dos, 1991-  
Utilização de múltiplas de superfície livre no imageamento  
sísmico / Isis Tourinho dos Santos. – 2014.  
92 f. : il. ; 30 cm

Inclui bibliografias

Orientadora: Ellen de Nazaré Souza Gomes  
Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Pará,  
Instituto de Geociências, Programa de Pós-Graduação em  
Geofísica, Belém, 2014.

1. Prospecção sísmica. 2. Método de reflexão sísmica. I.  
Título.

CDD 22. ed. 622.1592

---

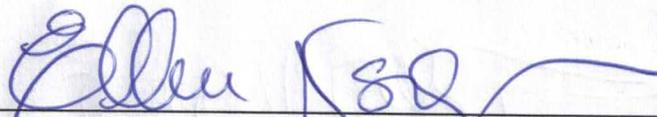
ISIS TOURINHO DOS SANTOS

UTILIZAÇÃO DE MÚLTIPLAS DE SUPERFÍCIE LIVRE NO  
IMAGEAMENTO SÍSMICO

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Geofísica da Universidade Federal do Pará, para obtenção do título de Mestre em Geofísica.

Data de Aprovação: 29 / 08 / 2019

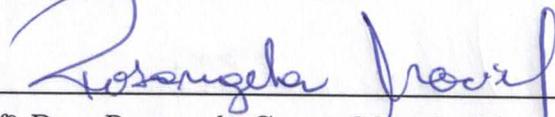
Banca Examinadora:



Prof<sup>a</sup>. Dra. Ellen de Nazaré Souza Gomes - Orientadora  
Doutora em Geofísica  
Universidade Federal do Pará



Prof. Dr. Lourenildo Willame Barbosa Leite - Membro  
Doutor em Geofísica  
Universidade Federal do Pará



Prof<sup>a</sup> Dra. Rosângela Correa Maciel - Membro  
Doutora em Geofísica  
Universidade Federal do Rio Grande do Norte

*Aos meus queridos pais, Suzane e Silvio.*

## AGRADECIMENTOS

Aos meus amados pais, Suzane e Silvio, pelo incentivo, apoio e por todos os ensinamentos.

À minha querida irmã, Ingrid Tourinho, pelo incentivo e pelos momentos de descontração.

À minha orientadora, Prof<sup>a</sup> Dr<sup>a</sup> Ellen Gomes, pelo tema sugerido e por todos os ensinamentos. Agradeço também pela disponibilidade, paciência e confiança depositadas durante o trabalho.

Ao professor Jessé Costa por todo suporte prestado durante a realização desse trabalho.

Aos professores da banca examinadora, Lourenildo Barbosa e Rosângela Maciel, pelas contribuições e sugestões no trabalho.

Ao Alexandre da Costa pela constante preocupação comigo e com meu trabalho.

Ao Andrei Oliveira e Wildney Vieira pela amizade e contribuição no trabalho.

A CAPES pelo apoio financeiro ao projeto.

## RESUMO

O processamento sísmico convencional trata as reflexões múltiplas como ruído, eliminando-as do processo de imageamento da subsuperfície. Entretanto, reflexões múltiplas apresentam diferentes trajetórias em relação às primárias, e portanto podem ser usadas para iluminar regiões não iluminadas pelas reflexões primárias. Conseqüentemente, a migração de múltiplas pode surgir como uma possibilidade de imageamento de estruturas complexas na subsuperfície. Nesse contexto, é apresentado nesse trabalho um resumo sobre as principais abordagens de imageamento utilizando múltiplas e ainda são apresentados os resultados do imageamento utilizando múltiplas de superfície livre através da migração reversa no tempo.

**Palavras-chave:** Processamento Sísmico. Imageamento. Reflexões Múltiplas. Reflexões Primárias. Migração Reversa no Tempo.

## ABSTRACT

Conventional seismic processing treats multiple reflections as noise, removing them from the imaging process. However, multiple reflections have different propagation wave paths from primary reflections and thus can be used to illuminate areas not illuminated by primary reflections. Consequently, migration of multiples can arise as possibility of imaging of complex structures in the subsurface. In this context, this work shows a abstract about the most relevant approaches from the imaging using multiples. In addition, this work shows results with free-surface multiples used in seismic imaging by reverse time migration.

**keywords:** Seismic Processing. Imaging. Multiple Reflections. Primary Reflections. Reverse Time Migration.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

- Figura 2.1 Representação da trajetória do raio associada à reflexão primária (linha branca) e sua múltipla de superfície livre de primeira ordem (linha vermelha). . . . . 21
- Figura 2.2 Diferentes categorias de múltiplas são identificadas em uma seção empilhada de um dado de campo da região de Nordkapp, mar da costa da Noruega (dado cortesia da ExxonMobil). As setas laranjas indicam múltiplas referentes a camada de água, as setas vermelhas indicam reverberações na camada de água, e as setas azuis indicam múltiplas de superfície que não estão relacionadas a camada de água. A seta amarela indica, possivelmente, uma múltipla interna. . . . . 22
- Figura 2.3 Múltiplas, muitas vezes, se caracterizam pelo aumento da inclinação na seção sísmica se comparadas com as primárias que as geraram. As setas vermelhas indicam as múltiplas de várias ordens relacionadas a superfície livre (seção empilhada com a velocidade da água da linha 0214-0268, bacia do Jequitinhonha, Brasil). . . . . 23
- Figura 2.4 Múltiplas, geralmente, se caracterizam por mergulhos conflitantes com as primárias, indicados pelos círculos amarelos. Isso ocorre devido ao fato das interfaces geradoras das múltiplas, em águas rasas, apresentarem orientação e formas diferentes se comparadas com as primárias mais profundas. As setas vermelhas indicam as múltiplas relacionadas a superfície livre e as setas laranjas indicam múltiplas internas (seção empilhada do mar da costa da Noruega; dado cortesia da Satoil). . . . . 24
- Figura 2.5 Pequenas variações na geometria das interfaces que geram as múltiplas, como nas estruturas sinclinal e anticlinal no fundo oceânico, geram efeitos de focalização e desfocalização nas múltiplas registradas. Note que a energia está concentrada (focalizada) na parte inferior da estrutura sinclinal e ao redor das bordas da estrutura anticlinal. . . . . 25
- Figura 2.6 A presença de diferentes tipos e ordens das múltiplas resulta em um padrão de interferência. Pequenas variações nas amplitudes das reflexões e na geometria das interfaces geradoras das múltiplas na parte rasa da seção resulta em fortes variações na energia das reflexões múltiplas, como pode ser visto nas setas vermelhas (seção marinha empilhada do oeste da Austrália, dado cortesia da BHP Petroleum). . . . . 26
- Figura 3.1 (a) Dois traços do dado original. O traço em  $x_p$  registra a reflexão primária cujo

tempo de trânsito foi  $t_1$  (tempo para a onda se propagar de  $x_s \rightarrow R_1 \rightarrow x_p$ ). O traço em  $x_m$  registra a reflexão múltipla, cujo tempo de trânsito foi  $t_1 + t_2$  (tempo para onda se propagar de  $x_s \rightarrow R_1 \rightarrow x_p \rightarrow R_2 \rightarrow x_m$ ). (b) O traço da pseudoprimária relacionada aos traços nas posições  $x_p$  e  $x_m$ . O traço em  $(x, h)$  é a correlação cruzada entre os traços que estão nas posições  $x_p$  e  $x_m$ , onde  $x$  é o ponto médio entre  $x_p$  e  $x_m$  e  $h$  é a metade do afastamento entre os traços nas posições  $x_p$  e  $x_m$ . . . . . 30

Figura 3.2 (a) Traço no dado original. O traço registrado em  $x$  tem dois pulsos. O primeiro é o registro do tempo de trânsito da reflexão primária  $t_1 : x_s \rightarrow R_1 \rightarrow x$  e o segundo é o registro do tempo de trânsito da reflexão múltipla  $t_2 : x_s \rightarrow R_1 \rightarrow x \rightarrow R_2 \rightarrow x$ . (b) Dado com afastamento-nulo obtido da pseudoprimária. O traço na pseudoprimária é a correlação cruzada do traço em (a) com ele mesmo. O tempo de trânsito do pulso no traço é o dobro do tempo de trânsito entre  $x$  e  $R_2$ . . . . . 32

Figura 3.3 Modelo de velocidade do dado sintético Amoco 2.5D usado para a migração de pseudoprimárias através da migração fonte-receptor. . . . . 33

Figura 3.4 (a) Seção em afastamento-nulo obtida do dado original registrado; (b) Seção em afastamento-nulo obtida das pseudoprimárias. . . . . 33

Figura 3.5 (a) Resultado da migração para um registro de tiro do dado original; (b) Resultado da migração para um registro de tiro do dado de pseudoprimárias. . . . . 34

Figura 3.6 (a) Migração fonte-receptor do dado original utilizando reflexões primárias. (b) Migração fonte-receptor utilizando as pseudoprimárias. . . . . 35

Figura 3.7 Migração fonte-receptor utilizando as pseudoprimárias calculadas a partir da deconvolução. . . . . 36

Figura 3.8 Reflexões secundárias ( $U_{>1}$ ), geradas pelas múltiplas de superfície livre ( $D_{>1}$ ) podem ser incluídas no processo de imageamento com retropropagação do campo de onda total descendente e ascendente abaixo do assoalho oceânico. . . . . 37

Figura 3.9 (a) Modelo de velocidade do dado Pluto 1.5 simulando uma subsuperfície geologicamente complexa. (b) Seção em afastamento-nulo do dado. . . . . 40

Figura 3.10 (a) Imagens obtidas para o dado Pluto 1.5: (a) Através da migração por perfis de tiro utilizando reflexões primárias, e (b) através do DIPMR. . . . . 41

Figura 3.11 Geometria de aquisição OBH: os receptores são posicionados no assoalho oceânico enquanto as fontes são posicionadas na superfície da água. São ilustradas a trajetória da reflexão primária (a), a trajetória da múltipla de superfície livre referida como “múltipla da

fonte” (b) e a trajetória da múltipla de superfície livre referida como “múltipla do receptor” (c). . . . .	43
Figura 3.12 (a) Em uma aquisição com fontes e receptores na superfície, a “múltipla da fonte” (linha branca) e a “múltipla do receptor” (linha preta) apresentam amplitudes aproximadamente iguais. (b) Em dados OBH, no entanto, as “múltiplas do receptor” (linha preta) apresentam amplitudes significativamente maiores que as “múltiplas da fonte” (linha branca). . . . .	44
Figura 3.13 Representação da integral de Kirchhoff. O campo de pressão no ponto $A$ é estimado a partir do campo de pressão $P$ registrado na superfície fechada $S$ e da função de Green $G$ do meio. . . . .	45
Figura 3.14 Dados reais registrados com aquisição OBH. . . . .	46
Figura 3.15 Seção em detalhes das reflexões primária e múltipla. . . . .	47
Figura 3.16 (a) Imagem obtida pela migração Kirchhoff convencional, ao longo da trajetória da primária. (b) Imagem obtida pela migração ao longo da trajetória da “múltipla do receptor”. (c) Imagem combinada, obtida pela soma das duas imagens anteriores. . . . .	48
Figura 3.17 Esboço da base da migração por correlação cruzada. A múltipla gerada em $A$ é correlacionada com a primária resultando em uma reflexão gerada por uma fonte virtual em $A$ . . . . .	50
Figura 3.18 (a) Modelo sintético com nove camadas plano-horizontais; (b) Imagem obtida com a migração Kirchhoff convencional em profundidade; (c) Imagem obtida com a migração por correlação, utilizando reflexões múltiplas; e (c) Imagem obtida pela multiplicação entre as duas imagens anteriores. . . . .	52
Figura 3.19 (a) Princípio da migração por perfis de tiro para as reflexões primárias. (b) Princípio da migração por perfis de tiro para as reflexões múltiplas. . . . .	54
Figura 3.20 (a) Modelo de velocidade usado para a migração de primárias e múltiplas por Perfis de Tiro. (b) Seção em afastamento-nulo desse modelo. . . . .	55
Figura 3.21 (a) Migração de reflexões primárias por perfis de tiro. (a) Campo da fonte para um registro de tiro. (b) Campo do receptor, ou seja, um registro de tiro apenas com as reflexões primárias. (c) Resultado da migração desse registro de tiro. (d) Resultado da soma de todos os registros de tiro migrados. . . . .	56
Figura 3.22 (a) Migração de reflexões múltiplas por perfis de tiro. (a) Campo-fonte, correspondente a um registro de tiro total, com primárias e múltiplas, multiplicado por -1. (b)	

Campo-receptor, correspondente apenas às múltiplas de superfície desse registro de tiro. (c) Resultado da migração desse registro de tiro. (d) Resultado da soma de todos os registros de tiro migrados. ....	57
Figura 4.1 Ilustração de uma múltipla de superfície livre interpretada como uma combinação de duas reflexões primárias que são conectadas por um ponto na superfície. ....	60
Figura 4.2 Após a reflexão na superfície, a resposta $x_0(t)$ , torna-se múltipla de primeira ordem. Após outra reflexão novamente na superfície, ela se torna múltipla de segunda ordem e assim por diante. ....	61
Figura 4.3 A geração de múltiplas de superfície pode ser representada pelo diagrama de <i>feedback</i> . ....	62
Figura 4.4 Ilustração de uma múltipla de superfície livre de primeira ordem construída a partir da combinação de uma família de fontes do dado $P$ com uma família de receptores de resposta impulsiva primária $X_0(t)$ . Essas famílias são convolvidas com outras famílias e somadas para chegar ao traço múltiplo somado. ....	65
Figura 4.5 (a) Notação matricial de todos os dados sísmicos pré-empilhados no domínio da frequência. Cada componente de $\mathbf{P}$ é dada por $\mathbf{P}(x_f, x_s, f)$ . Cada coluna contém uma família de tiro comum monocromático e cada linha contém uma família de receptor monocromático. Cada ponto da matriz indica um número complexo o qual é a resposta sísmica para uma combinação fonte-receptor para uma dada frequência. (b) A múltipla predita pode ser escrita como uma multiplicação matricial. Uma componente resultante de $\mathbf{M}$ é obtida pela combinação de uma linha da matriz $\mathbf{X}_0$ com uma coluna da matriz $\mathbf{P}_0$ . ....	66
Figura 4.6 Ilustração da utilização das múltiplas no RTM. ....	68
Figura 5.1 Fluxograma do processamento do dado. ....	72
Figura 5.2 Modelo de velocidade estratigráfico do dado Sigsbee2B. ....	75
Figura 5.3 Dado, organizado em afastamento mínimo, contendo apenas reflexões primárias. ....	77
Figura 5.4 Dado total registrado, organizado em afastamento mínimo, contendo reflexões primárias e múltiplas. ....	78
Figura 5.5 Múltiplas de superfície livre preditas do dado total, no ProMAX, a partir do método SRME. ....	79
Figura 5.6 Migração reversa no tempo convencional utilizando apenas reflexões primárias.	

Nota-se regiões onde não há nenhuma informação, sendo assinaladas por elipses brancas. Falhas e interfaces são imageadas e indicadas por setas brancas. ....	80
Figura 5.7 Migração reversa no tempo utilizando o dado contendo reflexões primárias e múltiplas, sem nenhum tipo de processamento sísmico. Ainda não se tem informações em regiões abaixo do domo de sal (elipses brancas). Além disso, a imagem contém fortes artefatos indicados por setas amarelas. ....	81
Figura 5.8 Migração reversa no tempo utilizando apenas as reflexões múltiplas. Regiões sem nenhuma informação são indicadas por elipses brancas. A imagem também apresenta fortes artefatos indicados por setas amarelas. ....	82
Figura 5.9 Migração reversa no tempo resultante da soma entre as migrações somente de primárias e apenas de múltiplas. Nota-se que houve um melhor imageamento dos pontos difratores indicados pelas setas verdes. ....	83
Figura 5.10 Migração reversa no tempo resultante da soma entre as migrações só de primárias e só de múltiplas. Nota-se que houve um resultado mais robusto do imageamento abaixo do domo de sal indicados pelas áreas retangulares verdes. ....	84

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABREVIATURA/SIGLA	DESCRIÇÃO
RTM	Reverse-Time Migration (Migração Reversa no Tempo)
SRME	Surface-Related Multiple Elimination (Eliminação de Múltiplas Relacionadas a Superfície)
DIPMR	Depth Imaging using Primary and Multiple Reflections (Imageamento em Profundidade utilizando Reflexões Primárias e Múltiplas)
DSR	Double Square Root (Dupla Raiz Quadrada)
OBH	Ocean-Bottom Hydrophones (Hidrofones no Fundo Oceânico)
PS	Phase-Shift (Mudança de Fase)
FD	Finite Differences (Diferenças Finitas)
1D	Uma dimensão
2D	Duas dimensões
2.5D	Duas dimensões e meia
CDP	Common Depth Point (Ponto Comum em Profundidade)
SMAART JV	Subsalt Multiple Attenuation And Reduction Team (Equipe de Redução e Atenuação de Múltiplas Abaixo do Sal)
EAGE	European Association of Geoscientists and Engineers (Associação Europeia de Geocientistas e Engenheiros)
SEG	Society of Exploration Geophysicists (Sociedade dos Geofísicos de Exploração)
Sigsbee2B FS	Sigsbee2B Free-Surface (Sigsbee2B com Múltiplas de Superfície Livre)
Sigsbee2B NFS	Sigsbee2B No Free-Surface (Sigsbee2B Sem Múltiplas de Superfície Livre)
CMP	Common Mid-Point (Ponto Médio Comum)
FFD	Fourier Finite Differences (Diferenças Finitas de Fourier)
VSP	Vertical Seismic Profile (Perfil Sísmico vertical)
RVSP	Reverse Vertical Seismic Profile (Perfil Sísmico Vertical Reverso)
SU	Seismic Unix
Matlab	Matrix Laboratory (Laboratório de Matrizes)

## LISTA DE SÍMBOLOS

SÍMBOLOS	DESCRIÇÃO
$f - k$	Frequência-número de onda
$W$	Dado transformado em pseudoprimárias
$P$	Campo de ondas contendo o dado tota. Aparece também na forma matricial $\mathbf{P}$
$M_0$	Campo de ondas contendo as múltiplas de superfície. Aparece também na forma matricial $\mathbf{M}_0$
$x_p$	Coordenada horizontal relacionada à reflexão primária
$x_m$	Coordenada horizontal relacionada à reflexão múltipla
$\omega$	Frequência angular
$h$	Metade do afastamento entre $x_p$ e $x_m$
$x$	Ponto médio entre $x_p$ e $x_m$
$t$	Tempo
$v$	Velocidade
$z$	Profundidade
$x_s$	Coordenada horizontal relacionada ao tiro $s$
$x_r$	Coordenada horizontal relacionada ao receptor $r$
$D$	Campo de ondas descendentes
$x_D$	Coordenada lateral relacionada ao campo descendente $D$
$U$	Campo de ondas ascendentes
$x_U$	Coordenada lateral relacionada ao campo ascendente $U$
$P_r$	Campo de pressão registrado
$P^U$	Campo de pressão decomposto em ondas ascendentes
$P_r^D$	Campo de pressão refletido decomposto em ondas descendentes
$P_p^D$	Campo de pressão primário decomposto em ondas descendentes
$P_t^D$	Campo de pressão total decomposto em ondas descendentes
$r_0$	Coefficiente de reflexão ar-água
$z_g$	Profundidade do geofone $g$
$q_0$	Vagarosidade vertical da água
$\alpha_0$	Velocidade do som na água
$\rho$	Vagarosidade

$k_{x_s}$	Número de onda da fonte
$\epsilon$	Pequena constante de estabilização
$I(x, z)$	Imagem do ponto de coordenada lateral $x$ e profundidade $z$
$P_A$	Campo de pressão em determinado ponto A
$\vec{n}$	Vetor normal à superfície de aquisição $S$
$G$	Função de Green
$d_A$	Registro, no domínio da frequência, de um determinado receptor A.
$\tau_{ab}$	Tempo de trânsito entre dois pontos quaisquer $a$ e $b$
$m(X)$	Operador de migração aplicado para imagear o ponto $X$
$R$	Refletividade
$d_A$	Registro, no domínio da frequência, em um determinado receptor $A$
$s$	Tiro disparado pela fonte sísmica
$x_0(t)$	Resposta primária ou resposta impulsiva da terra. Aparece também na forma matricial $\mathbf{X}_0$
$m_1$	Múltipla de primeira ordem
$x(t)$	Resposta total
$\delta(t)$	Função impulsiva
$s(t)$	Assinatura da fonte
$p_0(t)$	Resposta primária incluindo $s(t)$ Aparece também na forma matricial $\mathbf{P}_0$
$a(t)$	Operador de superfície
$x_k$	Coordenada horizontal onde se realiza o somatório
$f$	Frequência
$F$	Subscrito relacionado ao campo da fonte
$R$	Subscrito relacionado ao campo do receptor
$G^*$	Conjugado complexo da função $G$
$f(t)$ e $g(t)$	Funções arbitrárias
$*$	Sinal de operação da convolução
$\otimes$	Sinal de operação da correlação
$\int$	Símbolo da integração
$\sum$	Símbolo do somatório
$\oint$	Símbolo da integração fechada
$m$	metros
$km$	quilômetros
$ft$	pés
$ms$	milissegundos

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>18</b>
<b>2</b>	<b>REFLEXÕES MÚTIPLAS</b>	<b>20</b>
2.1	CARACTERÍSTICAS DAS MÚTIPLAS	21
<b>3</b>	<b>UTILIZAÇÃO DE MÚTIPLAS DE SUPERFÍCIE LIVRE NO IMAGEAMENTO SÍSMICO</b>	<b>28</b>
3.1	TRANSFORMAÇÃO DE MÚTIPLAS EM PSEUDOPRIMÁRIAS E POSTERIOR MIGRAÇÃO	29
<b>3.1.1</b>	<b>Migração Fonte-Receptor de Pseudoprimárias</b>	<b>30</b>
3.2	UTILIZAÇÃO CONJUNTA DE PRIMÁRIAS E MÚTIPLAS NA MIGRAÇÃO	36
3.3	UTILIZAÇÃO DIRETA DAS MÚTIPLAS NA MIGRAÇÃO	42
<b>3.3.1</b>	<b>Migração Kirchhoff Utilizando Múltiplas</b>	<b>42</b>
<b>3.3.2</b>	<b>Utilização das Múltiplas na Migração por Correlação</b>	<b>49</b>
<b>3.3.3</b>	<b>Migração de Múltiplas por Perfis de Tiro</b>	<b>53</b>
<b>4</b>	<b>MIGRAÇÃO REVERSA NO TEMPO UTILIZANDO MÚTIPLAS</b>	<b>59</b>
4.1	SEPARAÇÃO DAS MÚTIPLAS DO DADO TOTAL REGISTRADO	60
4.2	PREDIÇÃO DAS MÚTIPLAS	60
4.3	CONDIÇÃO DE IMAGEM PARA A MIGRAÇÃO RTM UTILIZANDO MÚTIPLAS	67
<b>5</b>	<b>TESTES NUMÉRICOS</b>	<b>71</b>
<b>6</b>	<b>CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES</b>	<b>87</b>
	<b>REFERÊNCIAS</b>	<b>90</b>

## 1 INTRODUÇÃO

A sísmica de reflexão é um dos métodos de prospecção geofísica mais utilizados na pesquisa de hidrocarbonetos. Através de ondas mecânicas refletidas são geradas imagens das estruturas geológicas da subsuperfície.

As técnicas de imageamento sísmico, em geral, baseiam-se no pressuposto de que a energia da onda que se propaga na subsuperfície é espalhada uma única vez antes de retornar a superfície (YILMAZ, 2001). Entretanto, essa energia na trajetória de retorno para a superfície irá passar por heterogeneidades mais rasas, que funcionarão como fontes secundárias de espalhamento de energia, de volta para a subsuperfície. Como resultado disso, reflexões múltiplas irão ocorrer e estas podem eventualmente ser registradas nos receptores sísmicos (VERSCHUUR, 2006).

Estes eventos de reflexão múltipla são normalmente considerados ruído e precisam ser removidos dos dados sísmicos para evitar dificuldades na interpretação das imagens sísmicas. Várias metodologias foram desenvolvidas para eliminação de reflexões múltiplas de acordo com a sua natureza e ocorrência (ABMA et al., 2005; BERKHOUT, 1999; DRAGOSET, 1998; GUITTON, 2005; KELAMIS; VERSCHUUR, 2000; KENNET, 1979; NEKUT; VERSCHUUR, 1998).

Entretanto, reflexões múltiplas se propagam através da terra com um tempo pelo menos duas vezes maior que as reflexões primárias, podendo portanto contribuir com informações sobre a subsuperfície, além de iluminar regiões onde as primárias não chegam, como, por exemplo, em regiões abaixo do sal e do basalto (SHENG, 2001). Portanto, esses eventos podem servir como uma fonte de iluminação adicional, complementar e alternativo para o imageamento sísmico (GUITTON, 2002; MUIJS et al., 2007; SHAN, 2003; VASCONCELOS et al., 2008).

Partindo deste princípio, várias metodologias considerando múltiplas no imageamento sísmico, vem sendo desenvolvidas (BERKHOUT; VERSCHUUR, 1994b; LIU et al., 2011; GUITTON, 2002; MUIJS et al., 2007; REITER et al., 1991; SHENG, 2001; SHAN, 2003; SHAN; GUITTON, 2004). As tentativas de utilizar múltiplas como sinal concentram-se especialmente nos dados marinhos e nas múltiplas que surgem nesses dados devido a interface água-ar (as múltiplas de superfície livre). Isso se deve à considerável energia desse tipo de

múltipla, que pode mascarar os refletores mais profundos.

Neste trabalho é apresentado um resumo sobre as principais metodologias que utilizam múltiplas para o imageamento de regiões abaixo de domos de sal ou soleiras de diabásio. Os resultados da migração reversa no tempo (RTM) utilizando múltiplas, de acordo com apresentado em Liu et al. (2011), é aplicada a um dado sintético e, em seguida, é feita uma análise dos resultados.

O trabalho está dividido da seguinte forma: O segundo capítulo aborda as reflexões múltiplas em dados marinhos e suas características. O terceiro capítulo aborda os principais métodos que utilizam múltiplas de superfície livre no imageamento sísmico. No quarto capítulo é apresentado um resumo sobre o método do RTM utilizando múltiplas. No quinto capítulo é apresentado os testes numéricos realizados no dado sintético. Por fim, no sexto capítulo é apresentado uma análise dos resultados obtidos no trabalho.

## 2 REFLEXÕES MÚLTIPLAS

As medidas de reflexão sísmica são normalmente feitas com as fontes e os receptores posicionados na superfície da terra, ou submersos em meio marinho, ou ainda dispostos dentro de poços. Os algoritmos de imageamento sísmico têm por objetivo concentrar a energia registrada nos receptores na superfície em pontos na subsuperfície. Dessa forma, cria-se uma imagem da subsuperfície.

Entretanto, a maioria destes algoritmos de imageamento adota o pressuposto de que toda a energia que sai da fonte e se propaga na subsuperfície é espalhada uma única vez. Na prática, contudo, as ondas mecânicas que se encontram numa trajetória de retorno à superfície registram as heterogeneidades mais rasas, resultando em uma dispersão da energia de volta para a subsuperfície, gerando as reflexões múltiplas. Estes eventos de reflexão são, normalmente, considerados ruídos e devem ser removidos dos dados sísmicos, com o objetivo de evitar dificuldades na interpretação das imagens sísmicas (VERSCHUUR, 2006).

As reflexões sísmicas podem ser classificadas em primárias e secundárias (múltiplas). De uma maneira simples, as reflexões múltiplas podem ser definidas como eventos repetitivos em uma trajetória que apresentam pelo menos uma reflexão descendente.

De acordo com o número de reflexões descendentes sofridas na superfície, as múltiplas são classificadas por ordem. As reflexões primárias são consideradas ser de ordem zero. As múltiplas que sofreram apenas uma reflexão descendente na superfície são classificadas de primeira ordem, as múltiplas que sofreram duas reflexões descendentes na superfície são classificadas de segunda ordem e assim por diante.

As múltiplas podem ser classificadas também de acordo com a sua origem, ou seja, de acordo com o local onde esses eventos são gerados. Nesse sentido, destacam-se as múltiplas de superfície livre. Esse tipo de múltipla ocorre em aquisições marinhas e se origina do contraste de impedância acústica<sup>1</sup>. Na Figura 2.1 é mostrado uma reflexão primária e sua múltipla de superfície de primeira ordem.

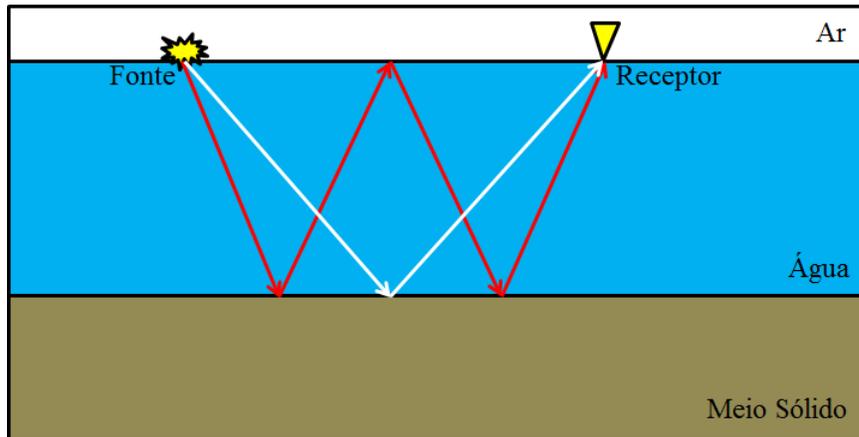
Devido ao contraste de impedância entre ar-água, esse tipo de múltipla possui grande energia e pode mascarar os refletores mais profundos nas seções sísmicas empilhadas ou

---

<sup>1</sup>Relação entre densidade e velocidade das ondas sísmicas entre duas camadas.

migradas.

Figura 2.1: Representação da trajetória do raio associada à reflexão primária (linha branca) e sua múltipla de superfície livre de primeira ordem (linha vermelha).



Fonte: Baseado em Verschuur (2006).

As múltiplas de superfície livre são divididas em subcategorias. Nesse sentido, destacam-se as múltiplas que se propagam somente na camada da água, refletindo diversas vezes para cima e para baixo, sem se propagar abaixo do fundo oceânico, referidas como múltiplas da camada (ou lâmina) de água ou múltiplas do fundo oceânico.

As múltiplas de superfície livre que sofreram uma reflexão abaixo do fundo oceânico e uma ou mais reflexões na camada de água, são chamadas de reverberações da camada de água, também conhecidas como *peg-legs*. As múltiplas que, além de uma ou mais reflexões na superfície, sofreram mais de uma reflexão abaixo do fundo oceânico, não possuem um nome específico, cabendo a denominação geral de “outras múltiplas de superfície” (VERSCHUUR, 2006).

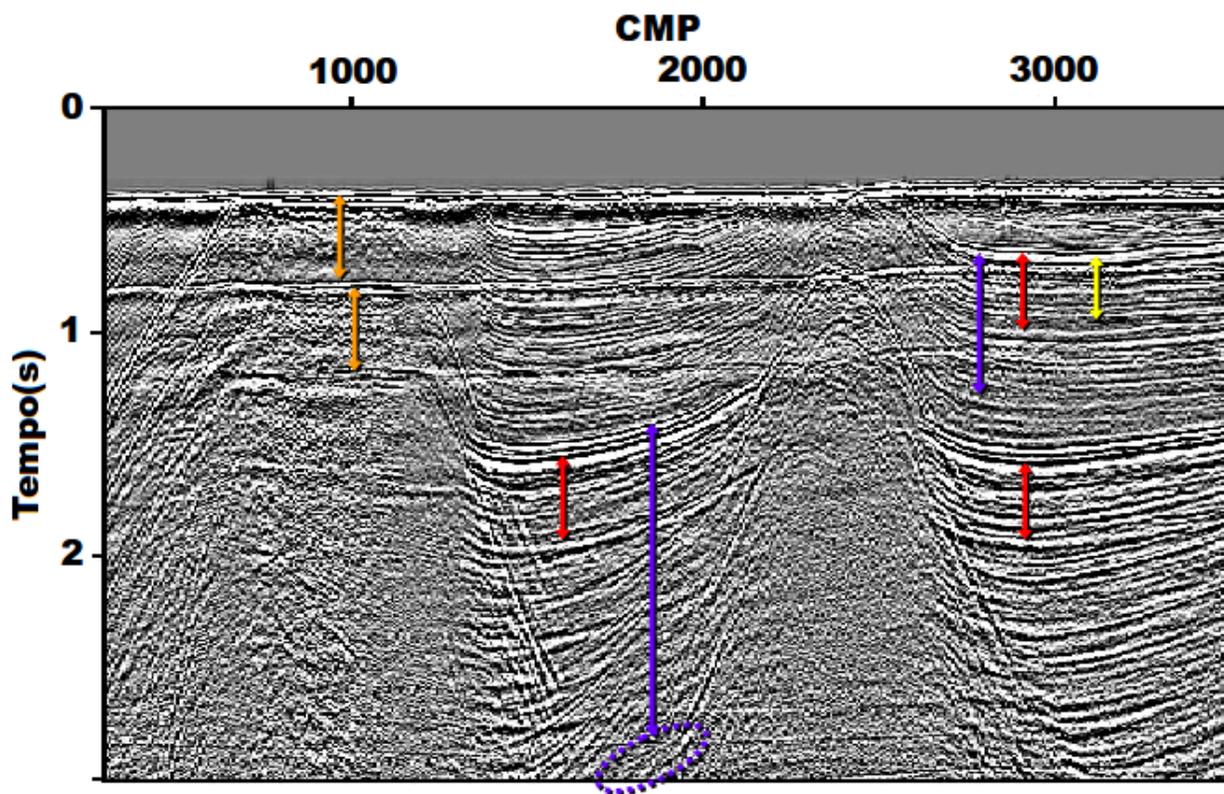
Em geral, os eventos de múltiplas são atenuados do dado sísmico no processamento. Nessa etapa, a atenuação destes eventos baseia-se em características específicas das múltiplas, descritas a seguir.

## 2.1 CARACTERÍSTICAS DAS MÚLTIPLAS

São observadas as seguintes características das múltiplas em uma seção sísmica empilhada ou migrada (VERSCHUUR, 2006):

- Repetição periódica de eventos de reflexão (Figura 2.2): Se em uma seção sísmica existem eventos que são repetidos em um intervalo regular, com amplitude aumentando ou diminuindo também de forma regular, provavelmente esses eventos são múltiplas.

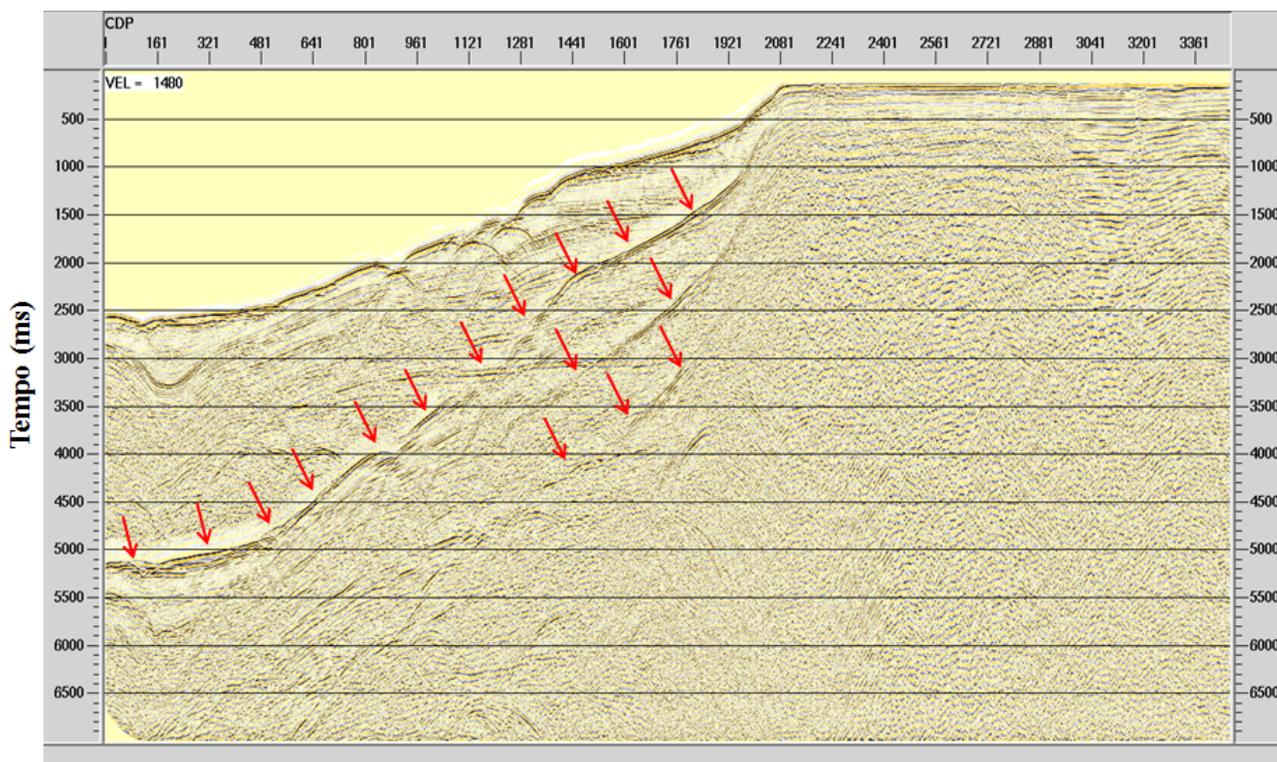
Figura 2.2: Diferentes categorias de múltiplas são identificadas em uma seção empilhada de um dado de campo da região de Nordkapp, mar da costa da Noruega (dado cortesia da ExxonMobil). As setas laranjas indicam múltiplas referentes a camada de água, as setas vermelhas indicam reverberações na camada de água, e as setas azuis indicam múltiplas de superfície que não estão relacionadas a camada de água. A seta amarela indica, possivelmente, uma múltipla interna.



Fonte: Verschuur (2006).

- Inclinação: Se o refletor possui uma inclinação, esta aumenta à medida que aumenta a ordem das múltiplas. Portanto, se as primárias apresentam um determinado mergulho na seção sísmica empilhada ou migrada, múltiplas podem ser reconhecidas pelo progressivo aumento nesse mergulho.

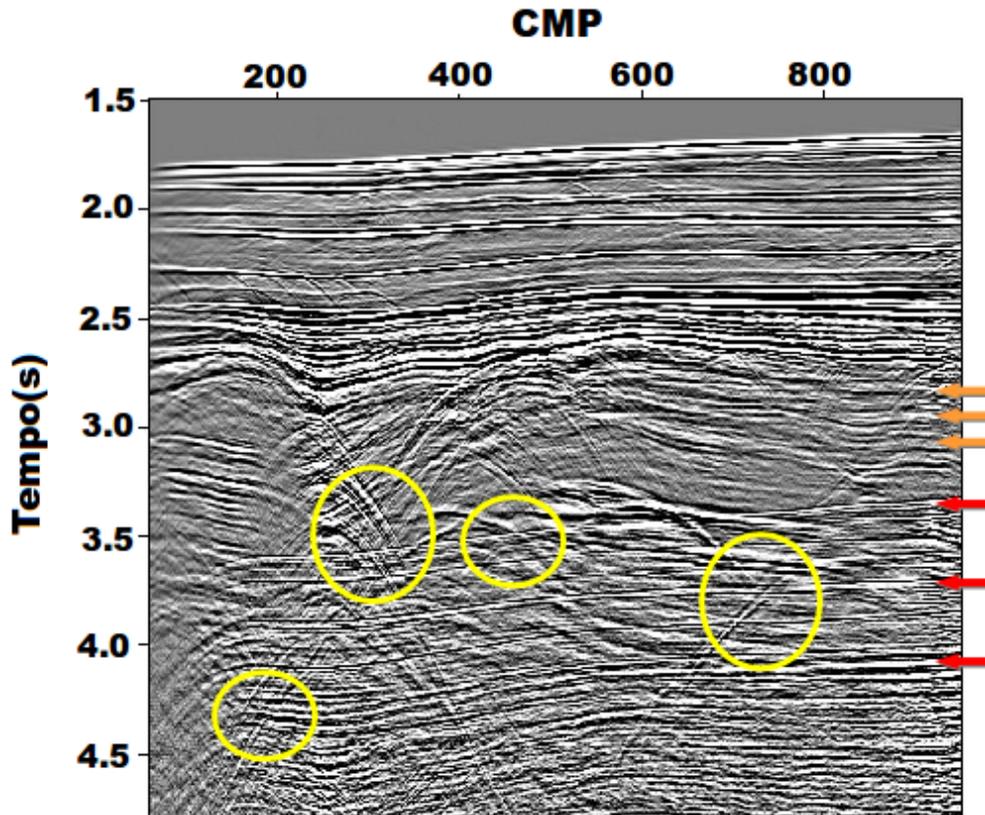
Figura 2.3: Múltiplas, muitas vezes, se caracterizam pelo aumento da inclinação na seção sísmica se comparadas com as primárias que as geraram. As setas vermelhas indicam as múltiplas de várias ordens relacionadas a superfície livre (seção empilhada com a velocidade da água da linha 0214-0268, bacia do Jequitinhonha, Brasil).



Fonte: A autora.

- Conflito de mergulhos entre primárias e múltiplas (Figura 2.4): Reflexões em interfaces profundas eventualmente podem causar interferência entre primárias e múltiplas, provocando um conflito de mergulhos entre esses eventos. Se esse conflito puder ser identificado na seção empilhada ou migrada, provavelmente é devido à presença de múltiplas.

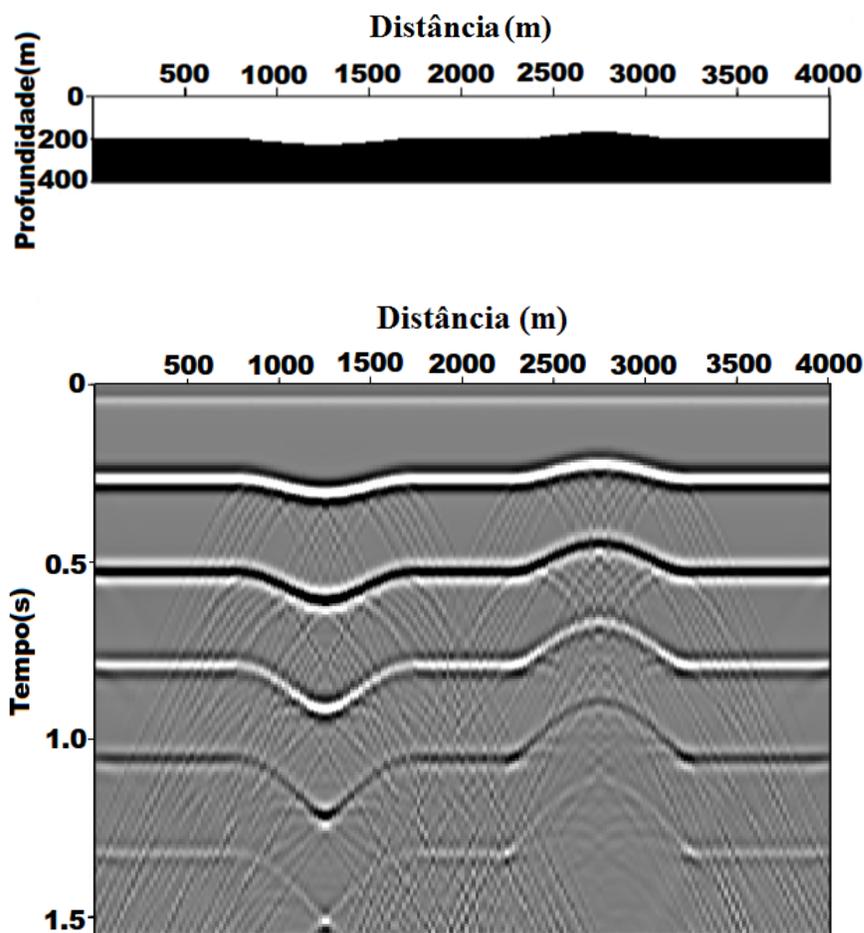
Figura 2.4: Múltiplas, geralmente, se caracterizam por mergulhos conflitantes com as primárias, indicados pelos círculos amarelos. Isso ocorre devido ao fato das interfaces geradoras das múltiplas, em águas rasas, apresentarem orientação e formas diferentes se comparadas com as primárias mais profundas. As setas vermelhas indicam as múltiplas relacionadas a superfície livre e as setas laranjas indicam múltiplas internas (seção empilhada do mar da costa da Noruega; dado cortesia da Statoil).



Fonte: Verschuur (2006).

- Efeitos de focalização e desfocalização devido a variações estruturais nos refletores que geram múltiplas (Figura 2.5): A presença de estruturas em sinclinal e/ou anticlinal, podem afetar o tempo de trânsito e a amplitude do evento de reflexão, provocando um efeito de focalização e desfocalização na seção sísmica. Quanto maior a ordem das múltiplas, maior é esse efeito.

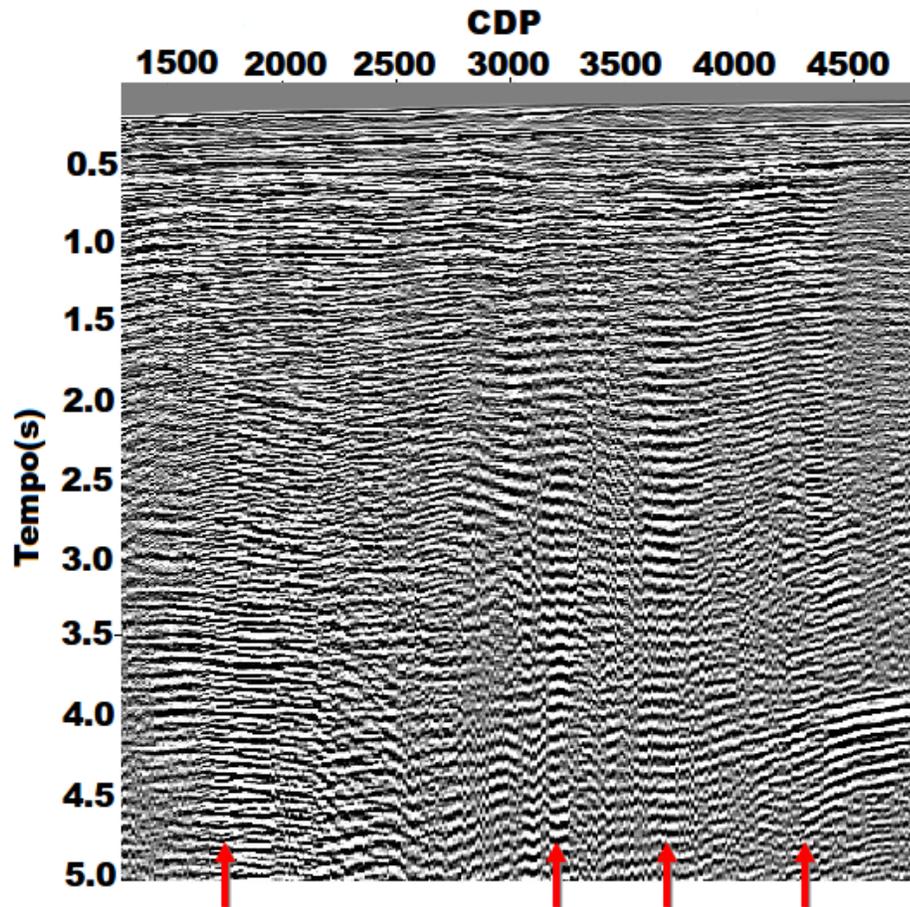
Figura 2.5: Pequenas variações na geometria das interfaces que geram as múltiplas, como nas estruturas sinclinal e anticlinal no fundo oceânico, geram efeitos de focalização e desfocalização nas múltiplas registradas. Note que a energia está concentrada (focalizada) na parte inferior da estrutura sinclinal e ao redor das bordas da estrutura anticlinal.



Fonte: Verschuur (2006).

- Efeitos de interferência de múltiplas e primárias ou entre diferentes tipos de múltiplas (Figura 2.6): Se isso ocorrer, será difícil reconhecer individualmente em uma seção os diferentes eventos de reflexão, devido ao forte e complexo padrão de interferência que é gerado.

Figura 2.6: A presença de diferentes tipos e ordens das múltiplas resulta em um padrão de interferência. Pequenas variações nas amplitudes das reflexões e na geometria das interfaces geradoras das múltiplas na parte rasa da seção resulta em fortes variações na energia das reflexões múltiplas, como pode ser visto nas setas vermelhas (seção marinha empilhada do oeste da Austrália, dado cortesia da BHP Petroleum).



Fonte: Verschuur (2006).

Várias técnicas para a atenuação de reflexões múltiplas foram desenvolvidas, e podem ser classificadas em duas grandes categorias (VERSCHUUR, 2006).

A primeira são as técnicas de filtragem que baseiam-se na diferença comportamental entre múltiplas e primárias. Elas removem/atenuam múltiplas através da discriminação do *moveout*<sup>2</sup>. Exploram o fato de que as múltiplas se propagam em uma trajetória diferente na terra apresentando, desse modo, diferentes velocidades sísmicas. Assim, as técnicas de filtragem são aplicadas para separar as múltiplas de primárias, baseadas no conhecimento a priori de quem está fazendo o processamento. As filtragens  $f - k$  e Radon são exemplos.

<sup>2</sup>Palavra do inglês que significa sobretempo.

A segunda categoria são as técnicas de predição. Estes métodos pressupõe que primárias e múltiplas tem uma relação inerente e que as reflexões múltiplas são eventos repetitivos. A partir de pressupostos estatísticos, as múltiplas são então modeladas e subtraídas do dado original. Estes métodos são aplicados em geral nos dados pré-empilhados. São exemplos a Deconvolução Preditiva e o SRME.

### 3 UTILIZAÇÃO DE MÚLTIPLAS DE SUPERFÍCIE LIVRE NO IMAGEAMENTO SÍSMICO

Diferente da abordagem convencional, que utiliza apenas as reflexões primárias no imageamento, trabalhos recentes têm utilizado reflexões múltiplas como sinal construtivo para o imageamento da subsuperfície (SHENG, 2001; GUITTON, 2002; SHAN, 2003; MUIJS et al., 2007; VASCONCELOS et al., 2008).

Por passarem mais tempo na subsuperfície, as múltiplas iluminam zonas consideradas de sombra pelas reflexões primárias, contêm usualmente ângulos de reflexão menores quando comparados com as primárias (BERKHOUT; VERSCHUUR, 2003), e podem assim fornecer informações mais detalhadas sobre a subsuperfície. Por essas razões, as múltiplas tem sido utilizadas no imageamento sísmico de regiões geologicamente complexas (O'BRIEN; GRAY, 1996; KESSINGER; RAMASWAMY, 1996; ROSENBERG, 2000; GLOGOVSKY et al., 2002; HUANG et al., 2009; LIU et al., 2009).

Dependendo da forma de como a múltipla é utilizada no imageamento, pode-se organizar os métodos em três grupos.

O primeiro grupo reúne os métodos que transformam as múltiplas nas chamadas pseudoprimárias; ou seja, as múltiplas são preditas e transformadas nas pseudoprimárias para posterior migração. Nesse grupo, destaca-se o trabalho que aplica pseudoprimárias na migração fonte-receptor (SHAN, 2003).

No segundo grupo estão todos os métodos que utilizam primárias e múltiplas de forma conjunta na migração; ou seja, utiliza-se o dado total registrado para o imageamento da subsuperfície. Nesse grupo, destaca-se o trabalho que utiliza conjuntamente primárias e múltiplas na migração DIPMR (MUIJS et al., 2007).

No terceiro grupo, as múltiplas são utilizadas diretamente no processo do imageamento; isto é, as múltiplas são preditas do dado total registrado (que contém reflexões primárias e diversas ordens de múltiplas) e, então, é aplicado um dos métodos de imageamento, que foi devidamente modificado para utilizar múltiplas.

Nesse grupo, destacam-se os trabalhos que utilizam as múltiplas: na migração de Kirchhoff (REITER et al., 1991), na migração por correlação (SHENG, 2001; SCHUSTER; RICKETT, 2000), na migração por perfis de tiro (BERKHOUT, 1993; BERKHOUT; VERSCHUUR, 1994b; GUITTON, 2002) e na migração reversa no tempo (LIU et al., 2011).

A seguir, os principais trabalhos em cada um desses grupos são apresentados.

### 3.1 TRANSFORMAÇÃO DE MÚLTIPLAS EM PSEUDOPRIMÁRIAS E POSTERIOR MIGRAÇÃO

Nesse grupo, estão todos os métodos que transformam as múltiplas em pseudoprimárias para em seguida aplicar a migração.

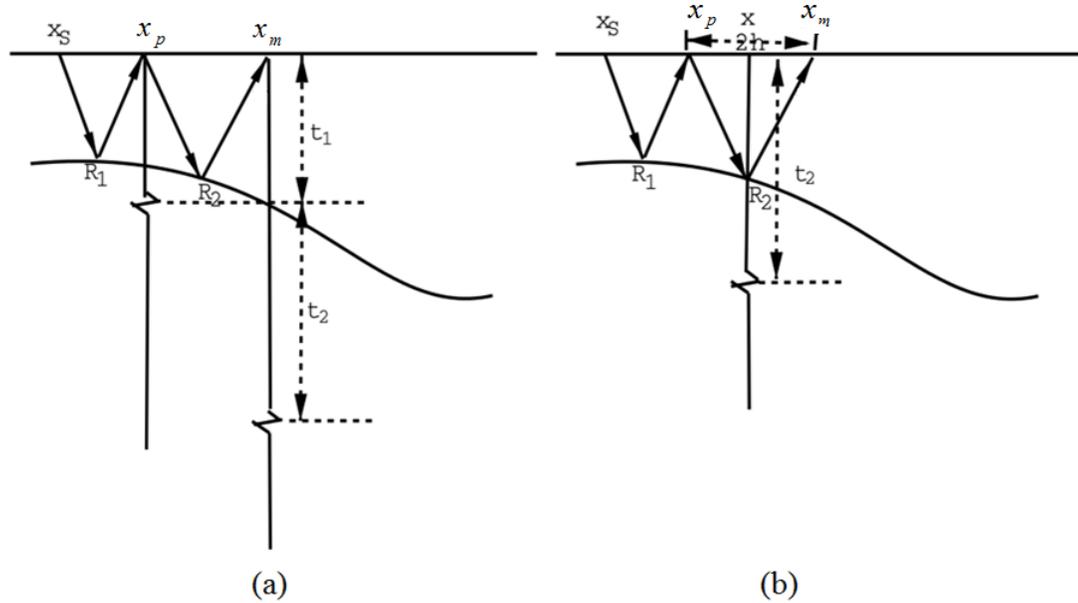
As múltiplas são preditas dos dados e transformadas em pseudoprimárias, que recebem esse nome pela semelhança de comportamento com as reflexões primárias.

As pseudoprimárias, representadas por  $W$ , são o resultado da correlação cruzada entre o dado total registrado  $P$  (chamado como campo da fonte), organizado em famílias de tiro comum, e as múltiplas de superfície livre  $M_0$  (chamadas como campo do receptor), realizada para todos os tiros  $s$ , de acordo com a equação (3.1) (SHAN; GUITTON, 2004):

$$W(x_p, x_m, \omega) = \sum_s M_0(x_s, x_m, \omega, s) P^*(x_s, x_p, \omega, s), \quad (3.1)$$

em que  $x_s$  corresponde à posição do tiro  $s$ ;  $x_p$  corresponde à posição onde a reflexão primária foi registrada;  $x_m$  corresponde à posição onde foi registrada a reflexão múltipla e  $\omega$  é a componente de frequência (ver Figura 3.1).

Figura 3.1: (a) Dois traços do dado original. O traço em  $x_p$  registra a reflexão primária cujo tempo de trânsito foi  $t_1$  (tempo para a onda se propagar de  $x_s \rightarrow R_1 \rightarrow x_p$ ). O traço em  $x_m$  registra a reflexão múltipla, cujo tempo de trânsito foi  $t_1 + t_2$  (tempo para onda se propagar de  $x_s \rightarrow R_1 \rightarrow x_p \rightarrow R_2 \rightarrow x_m$ ). (b) O traço da pseudoprimária relacionada aos traços nas posições  $x_p$  e  $x_m$ . O traço em  $(x, h)$  é a correlação cruzada entre os traços que estão nas posições  $x_p$  e  $x_m$ , onde  $x$  é o ponto médio entre  $x_p$  e  $x_m$  e  $h$  é a metade do afastamento entre os traços nas posições  $x_p$  e  $x_m$ .



Fonte: Shan (2003).

Dentre as metodologias que utilizam pseudoprimárias no imageamento da subsuperfície, destaca-se o trabalho de Shan (2003) que aplica pseudoprimárias na migração fonte-receptor.

### 3.1.1 Migração Fonte-Receptor de Pseudoprimárias

A migração fonte-receptor (*source-receiver migration*) baseia-se no conceito de “submersão do levantamento” (*survey sinking*) (CLAERBOUT, 1985). Esse conceito consiste em continuar para baixo tanto o campo das fontes quanto o campo dos receptores para profundidades progressivamente maiores e aplicar uma condição de imagem. O método utiliza-se da equação da Dupla Raiz Quadrada (DSR: *Double Square Root*) para realizar a continuação para baixo.

A migração fonte-receptor tradicional, que utiliza somente reflexões primárias e considera que a fonte seja um impulso, consiste em organizar o dado registrado na superfície em famílias

CMP, representado por  $P(x, h, z = 0, \omega)$ , e propagá-lo para a subsuperfície através da equação da Dupla Raiz Quadrada:

$$\frac{\partial}{\partial z} P(x, h, z, \omega) = \left( \frac{i\omega}{v(x_s, z)} \sqrt{1 + \frac{v^2(x_s, z)}{\omega^2} \frac{\partial^2}{\partial x_s^2}} + \frac{i\omega}{v(x_r, z)} \sqrt{1 + \frac{v^2(x_r, z)}{\omega^2} \frac{\partial^2}{\partial x_r^2}} \right) P(x, h, z = 0, \omega). \quad (3.2)$$

Na equação (3.2),  $x_s$  é a coordenada horizontal do tiro,  $x_r$  é a coordenada horizontal do receptor e  $h$  é meio afastamento dado por  $h = \frac{x_s - x_r}{2}$ . O campo de ondas  $P(x, h, z, \omega)$  em cada profundidade  $z$  é equivalente ao dado que seria registrado se as fontes e os receptores estivessem localizados nessa profundidade. Essa é a migração pré-empilhamento clássica de CLAERBOUT (1985). O operador pseudo-parcial diferencial  $\sqrt{1 + \frac{v^2(x_s, z)}{\omega^2} \frac{\partial^2}{\partial x_s^2}}$  pode ser aproximado por métodos numéricos como Diferenças Finitas de Fourier (FFD) e *split-step*.

A condição de imagem da migração fonte-receptor consiste, para cada profundidade, calcular o dado com afastamento-nulo  $P(x, h = 0, z, \omega)$  para cada frequência. A repetição do processo para todas as profundidades produz uma imagem da subsuperfície e o empilhamento para todas as frequências produz a imagem final.

Para o caso específico da migração de múltiplas, o campo de ondas  $P(x, h, z = 0, \omega)$  que é propagado para a subsuperfície não é o dado organizado em famílias CMP, mas a correlação entre o campo da fonte  $D(x_D = x - h, z = 0, \omega, s)$  e o campo do receptor  $U(x_U = x - h, z = 0, \omega, s)$ , para todos os tiros  $s$ :

$$P(x, h, z = 0, \omega) = \sum_s U(x_U, z = 0, \omega, s) D^*(x_D, z = 0, \omega, s). \quad (3.3)$$

O campo  $P(x, h, z = 0, \omega)$  é então continuado para baixo através da equação da Dupla Raiz Quadrada, para várias profundidades. Depois, calcula-se o dado em afastamento-nulo  $P(x, h = 0, z, \omega)$  para cada profundidade e realiza-se o empilhamento para a obtenção da imagem completa da subsuperfície.

Nesse caso, o campo da fonte  $D$  corresponde ao dado total registrado  $P$ , e o campo do receptor  $U$  corresponde às múltiplas de superfície livre  $M_0$ ;  $x_D$  corresponde a  $x_p$  e  $x_U$  corresponde a  $x_m$ . A equação (3.3), portanto, equivale à equação (3.1). Assim, o campo de ondas  $P(x, h, z = 0, \omega)$  que é propagado para a subsuperfície através da equação DSR consiste nas pseudoprimárias  $W$ . Novamente, a condição de imagem consiste em calcular o

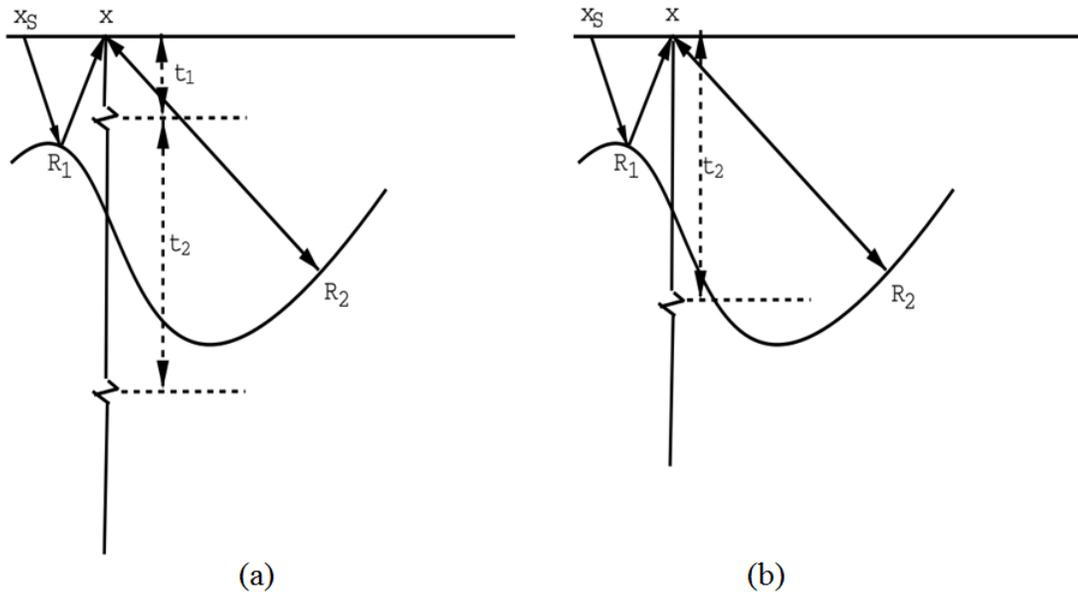
dado com afastamento-nulo em cada profundidade.

O dado organizado em afastamento-nulo é muitas vezes necessário no processamento sísmico, entretanto nunca no caso real o dado é registrado dessa forma. O dado com afastamento-nulo pode ser obtido da pseudoprímária de maneira fácil. Na equação (3.4) fazendo  $x_D = x_U = x$  ou  $x_p = x_m = x$ , tem-se o dado organizado em afastamento-nulo.

$$W(x, h, z = 0, \omega) = \sum_s M_0(x, z = 0, \omega) P^*(x, z = 0, \omega). \quad (3.4)$$

A Figura 3.2 ilustra como é gerado um dado de afastamento-nulo do dado pseudoprímario. A informação de fase do dado com afastamento-nulo obtido a partir da pseudoprímária é exatamente igual ao dado com afastamento-nulo se fonte e receptor estivessem na posição  $x$ .

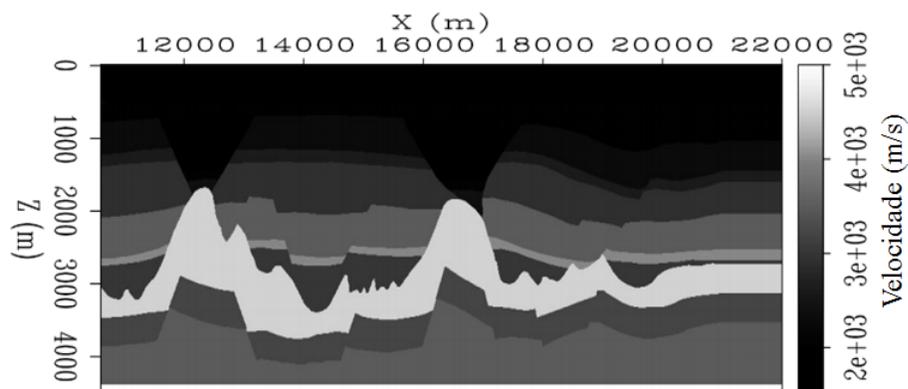
Figura 3.2: (a) Traço no dado original. O traço registrado em  $x$  tem dois pulsos. O primeiro é o registro do tempo de trânsito da reflexão primária  $t_1 : x_s \rightarrow R_1 \rightarrow x$  e o segundo é o registro do tempo de trânsito da reflexão múltipla  $t_2 : x_s \rightarrow R_1 \rightarrow x \rightarrow R_2 \rightarrow x$ . (b) Dado com afastamento-nulo obtido da pseudoprímária. O traço na pseudoprímária é a correlação cruzada do traço em (a) com ele mesmo. O tempo de trânsito do pulso no traço é o dobro do tempo de trânsito entre  $x$  e  $R_2$ .



Fonte: Shan (2003).

Para testar a migração fonte-receptor de múltiplas, Shan (2003) utilizou dados sísmicos gerados do modelo Amoco 2.5D mostrado na Figura 3.3:

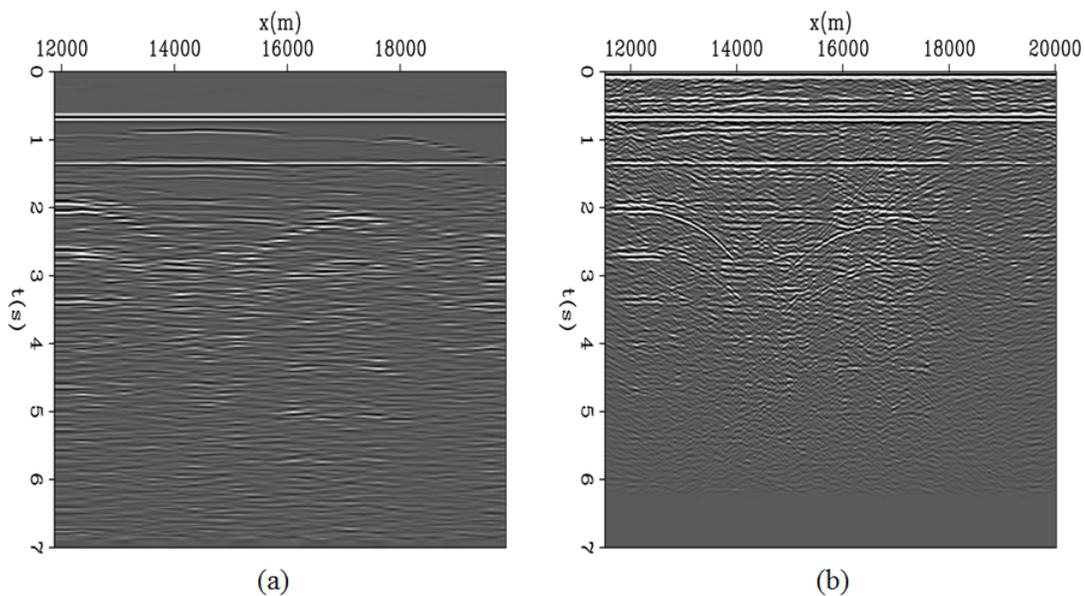
Figura 3.3: Modelo de velocidade do dado sintético Amoco 2.5D usado para a migração de pseudo-primárias através da migração fonte-receptor.



Fonte: Shan (2003).

As pseudoprimárias foram obtidas, então, através da correlação, equação (3.1), entre o dado total (campo da fonte) e o dado somente com múltiplas (campo do receptor) e organizou-se o dado em afastamento-nulo a partir das pseudoprimárias, de acordo com a equação (3.4). A seguir, são mostrados o dado em afastamento-nulo do dado original na Figura 3.4(a), e o dado em afastamento-nulo das pseudoprimárias na Figura 3.4(b).

Figura 3.4: (a) Seção em afastamento-nulo obtida do dado original registrado; (b) Seção em afastamento-nulo obtida das pseudoprimárias.

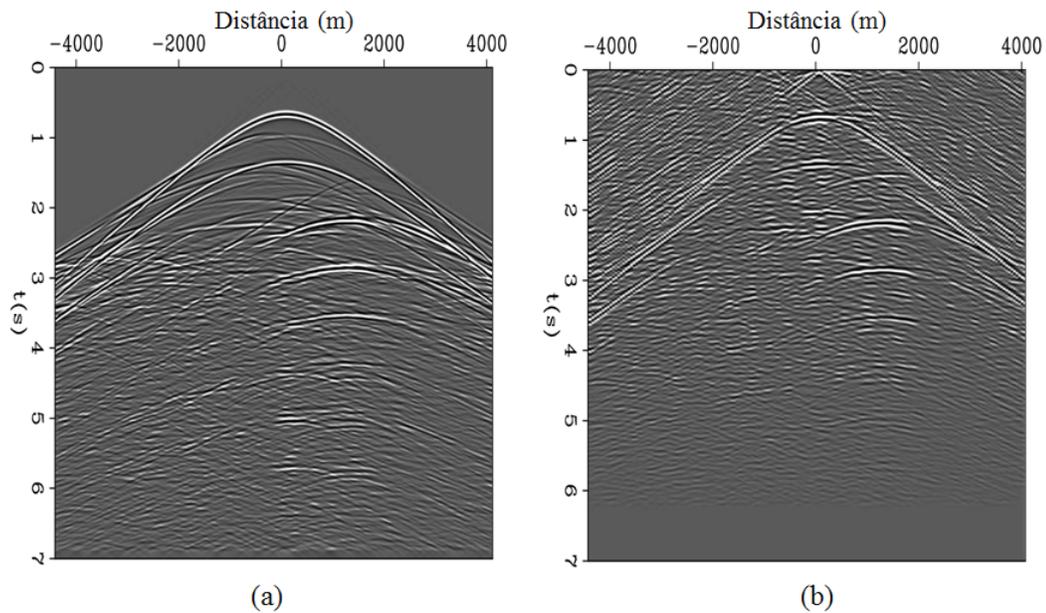


Fonte: Shan (2003).

De acordo com a Figura 3.4, nota-se que o dado com afastamento-nulo obtido do dado original é mais grosseiro, enquanto que o dado com afastamento-nulo obtido a partir das pseudoprímarias é bem mais amplo e contínuo, uma vez que cada traço no dado original funciona como uma fonte areal nas pseudoprímarias (SHAN, 2003).

A Figura 3.5(a) mostra o resultado da migração para um registro de tiro do dado original e a Figura 3.5(b) ilustra o resultado da migração para um registro de tiro das pseudoprímarias. Embora a estrutura entre os dois seja parecida, a migração das pseudoprímarias é mais ruidosa, especialmente nos pequenos tempos de trânsito.

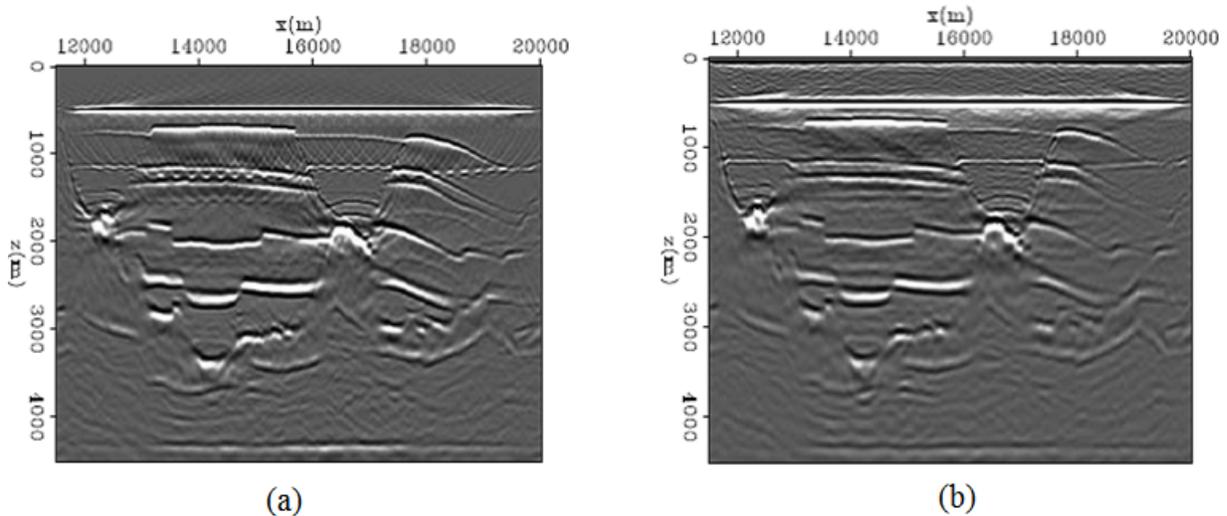
Figura 3.5: (a) Resultado da migração para um registro de tiro do dado original; (b) Resultado da migração para um registro de tiro do dado de pseudoprímarias.



Fonte: Shan (2003).

Para comparação dos resultados da migração fonte-receptor das pseudoprímarias, Figura 3.6(b), o dado original foi migrado através da migração fonte-receptor utilizando reflexões primárias e os resultados são mostrados na Figura 3.6(a).

Figura 3.6: (a) Migração fonte-receptor do dado original utilizando reflexões primárias. (b) Migração fonte-receptor utilizando as pseudoprímárias.



Fonte: Shan (2003).

De acordo com as Figuras 3.6(a) e 3.6(b), as duas imagens geradas possuem alta qualidade e são perfeitamente interpretáveis. A imagem gerada pela migração com primárias é um pouco mais nítida e apresenta resolução um pouco melhor da estrutura de sal, principalmente nas maiores profundidades as imagens das pseudoprímárias são mais ruidosas do que a das primárias.

Entretanto, um forte artefato horizontal pouco abaixo da profundidade 1000 m aparece na imagem das primárias, mas é atenuado nas imagens das pseudoprímárias. Sendo assim, as imagens geradas pelas múltiplas confirmam que elas podem ser usadas no imageamento sísmico e fornecer informações estruturais sobre a subsuperfície.

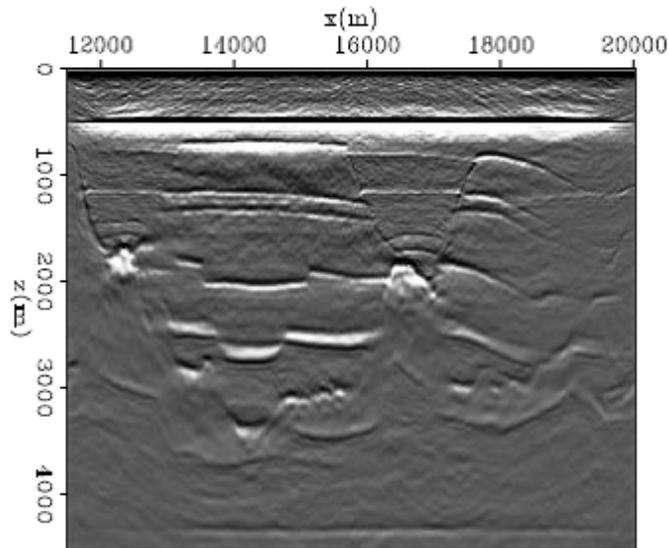
Alternativamente à correlação cruzada entre campo da fonte e campo do receptor para gerar as pseudoprímárias, Shan (2003) também testou gerá-las por deconvolução (CLAERBOUT, 1999).

Gerar as pseudoprímárias por deconvolução é importante para realizar um balanceamento de amplitude, já que a amplitude das primárias varia com a posição e com o tempo, fazendo com que as múltiplas tenham fontes de diferentes amplitudes.

Além disso, a correlação pode produzir um tipo de artefato, conhecido como *crosstalk*, resultante da interferência entre campo da fonte e campo do receptor não associada a pontos comuns de reflexão, que aparece principalmente para dados de múltiplas fontes. Esse ruído pode diminuir a razão sinal-ruído e, portanto, a qualidade da imagem final.

Os resultados da migração utilizando as pseudoprimárias calculadas através da deconvolução é mostrado na Figura 3.7.

Figura 3.7: Migração fonte-receptor utilizando as pseudoprimárias calculadas a partir da deconvolução.



Fonte: Shan (2003).

Verifica-se que a imagem obtida na Figura 3.7 tem melhor qualidade que a Figura 3.6(b). Isso se deve a utilização da deconvolução para a geração das pseudoprimárias.

Além do balanceamento de amplitude, notável principalmente em grandes afastamentos e grandes profundidades, e da redução do nível de ruído, a imagem também mostra melhor resolução. Entretanto, o custo computacional é maior, já que a deconvolução é um processo mais longo e dispendioso do que a correlação.

### 3.2 UTILIZAÇÃO CONJUNTA DE PRIMÁRIAS E MÚLTIPLAS NA MIGRAÇÃO

A maioria dos métodos que utilizam múltiplas como sinal construtivo no imageamento sísmico, considera a migração desses eventos como alternativa ou complementar à migração baseada em reflexões primárias.

No entanto, alguns autores propuseram métodos que procuram imagear conjuntamente primárias e múltiplas, de modo a otimizar a integração das informações contidas nesses dois eventos (JIANG et al., 2007; BROWN; GUITTON, 2005; YU; SCHUSTER, 2002; YOUN

O.;ZHOU, 2001). Assim, evita-se a geração de duas imagens - o que diminuiu o tempo e o custo computacional - e a necessidade de separação entre primárias e múltiplas.

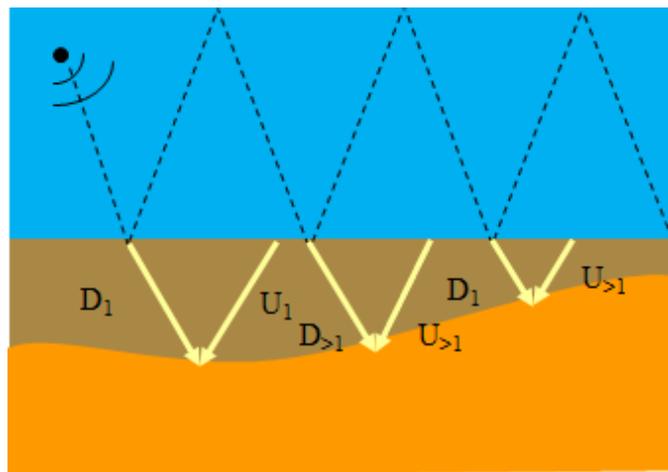
Nesse sentido, Muijs et al. (2007) apresentaram um método, que deram o nome de DIPMR (*Depth Imaging using Primary and Multiple Reflections* – Imageamento em Profundidade Utilizando Reflexões Primárias e Múltiplas), que realiza uma migração pré-empilhamento, em profundidade, utilizando conjuntamente primárias e múltiplas.

O método foi originalmente desenvolvido para dados registrados com hidrofones no fundo oceânico (OBH) <sup>1</sup>, mas pode também ser utilizado, com pequenas modificações, para dados obtidos com arraste de cabo marinho (MUIJS et al., 2007). Entre as vantagens do DIPMR, está o fato do método não necessitar de informações a priori sobre a diretividade ou a assinatura da fonte.

O método é composto de três etapas:

- I. Separação do dado em campo de ondas ascendentes e descendentes;
- II. Continuação para baixo dos campos de ondas ascendentes e descendentes (Figura 3.8);
- III. Imageamento multidimensional.

Figura 3.8: Reflexões secundárias ( $U_{>1}$ ), geradas pelas múltiplas de superfície livre ( $D_{>1}$ ) podem ser incluídas no processo de imageamento com retropropagação do campo de onda total descendente e ascendente abaixo do assoalho oceânico.



Fonte: Baseado em Muijs et al. (2007).

<sup>1</sup>Ocean bottom hydrophones: levantamento em que as fontes são disparadas na superfície e os hidrofones estão posicionados no fundo oceânico.

Os *inputs* necessários são o campo de pressão e, para dados OBH, as componentes vertical e horizontal da velocidade, que são funções da frequência e das posições das fontes e receptores.

A primeira etapa é realizada no nível de profundidade dos receptores. Para dados OBH, o campo de ondas descendentes, no nível dos receptores, contém o campo iluminador total, primário (função impulso) e secundário (reflexões que voltam à subsuperfície e geram múltiplas). O campo de ondas ascendentes, no nível dos receptores, concentra as reflexões primárias e múltiplas (MUIJS et al., 2007).

A separação ocorre no domínio frequência-vagarosidade horizontal. Para o caso acústico, essa separação ocorre logo acima do fundo oceânico e depende do campo de pressão e da componente vertical da velocidade. Para o caso elástico, a separação ocorre em um nível logo abaixo do fundo oceânico, dependendo também da componente horizontal da velocidade. A decomposição do dado em ondas ascendentes e descendentes logo abaixo do fundo oceânico resulta em um grande número de múltiplas de superfície livre sendo separadas das primárias, já que muitas múltiplas de superfície livre consistem em ondas descendentes logo abaixo do fundo oceânico (AMUNDSEN; REITAN, 1995; MUIJS et al., 2007). Maiores detalhes pode ser visto em Muijs et al. (2007).

Para dados obtidos com receptores na superfície marinha, onde a componente vertical de velocidade não é disponível, a decomposição do campo de pressão registrado  $P_r$  em campo de ondas ascendentes  $P^U$  e descendentes  $P_r^D$  é feita também no domínio frequência-vagarosidade, conforme as seguintes equações (AMUNDSEN, 1993; MUIJS et al., 2007):

$$P^U(\omega, \rho) = \frac{P_r(\omega, \rho)}{1 + r_0 e^{2i\omega q_0 z_g}}. \quad (3.5)$$

$$P_r^D(\omega, \rho) = r_0 e^{2i\omega q_0 z_g} P^U(\omega, \rho). \quad (3.6)$$

O índice  $r$  indica que apenas a parte refletida do campo é incluída. Ou seja, ondas diretas devem estar silenciadas e, no caso do campo descendente  $P_r^D$ , a fonte primária de iluminação, representada por  $P_p^D$  e relacionada à fonte sísmica, também não está incluída.  $r_0$  representa o coeficiente de reflexão na superfície marinha, igual a -1;  $z_g$  representa a profundidade dos receptores e  $q_0$  é a vagarosidade vertical da água, dada por  $q_0 = \sqrt{\left(\frac{1}{\alpha_0}\right)^2 - \rho^2}$ , em que  $\alpha_0$  é a velocidade do som na água e  $\rho$  é a vagarosidade (inverso da velocidade).

O DIPMR utiliza, como campo da fonte  $D(\omega, x, z)$ , o campo total descendente  $P_t^D$ , dado pela soma entre o campo descendente primário  $P_p^D$  e o campo descendente refletido  $P_r^D$ :

$$D(\omega, x, z) = P_t^D = P_p^D + P_r^D. \quad (3.7)$$

Como o campo refletido  $P_r^D$  é obtido isoladamente com a equação (3.6), é necessário isolar o campo descendente primário  $P_p^D$  para então somá-lo ao campo refletido e obter o campo total descendente  $P_t^D$ , que será usado como campo da fonte  $D$ .

A segunda etapa do DIPMR, que consiste em continuar para baixo os campos de ondas ascendente e descendente, baseia-se na equação unidirecional da onda e pode, a princípio, ser realizada por qualquer método numérico, observadas suas limitações e (in)adequações para diferentes situações. A migração PS (*phase-shift*) que é baseada em modelos formados por camadas horizontais, diminui sua eficiência para meios com heterogeneidades laterais, onde Muijs et al. (2007) recomendam o uso de diferenças finitas (FD – *Finite Differences*). O DIPMR é implementado no domínio da frequência, permitindo que frequências sejam individualmente processadas e então empilhadas.

A terceira etapa do DIPMR é o imageamento multidimensional, que consiste em uma deconvolução 2D, realizada no domínio frequência-número de onda da fonte, que é o grande diferencial do método. A deconvolução 2D, representada pela equação (3.8), consiste em uma deconvolução (divisão regularizada sobre a frequência  $\omega$  e o número de onda da fonte  $k_{x_s}$ ), seguida de somas sobre todas as frequências e todos os números de ondas da fonte, para extrair a imagem  $I(x, z)$ :

$$I(x, z) = \sum_{k_{x_s}} \left( \sum_{\omega} \frac{U(\omega, x, z | k_{x_s}, z_s) D^*(\omega, x, z | k_{x_s}, z_s)}{D(\omega, x, z | k_{x_s}, z_s) D^*(\omega, x, z | k_{x_s}, z_s) + \epsilon} \right). \quad (3.8)$$

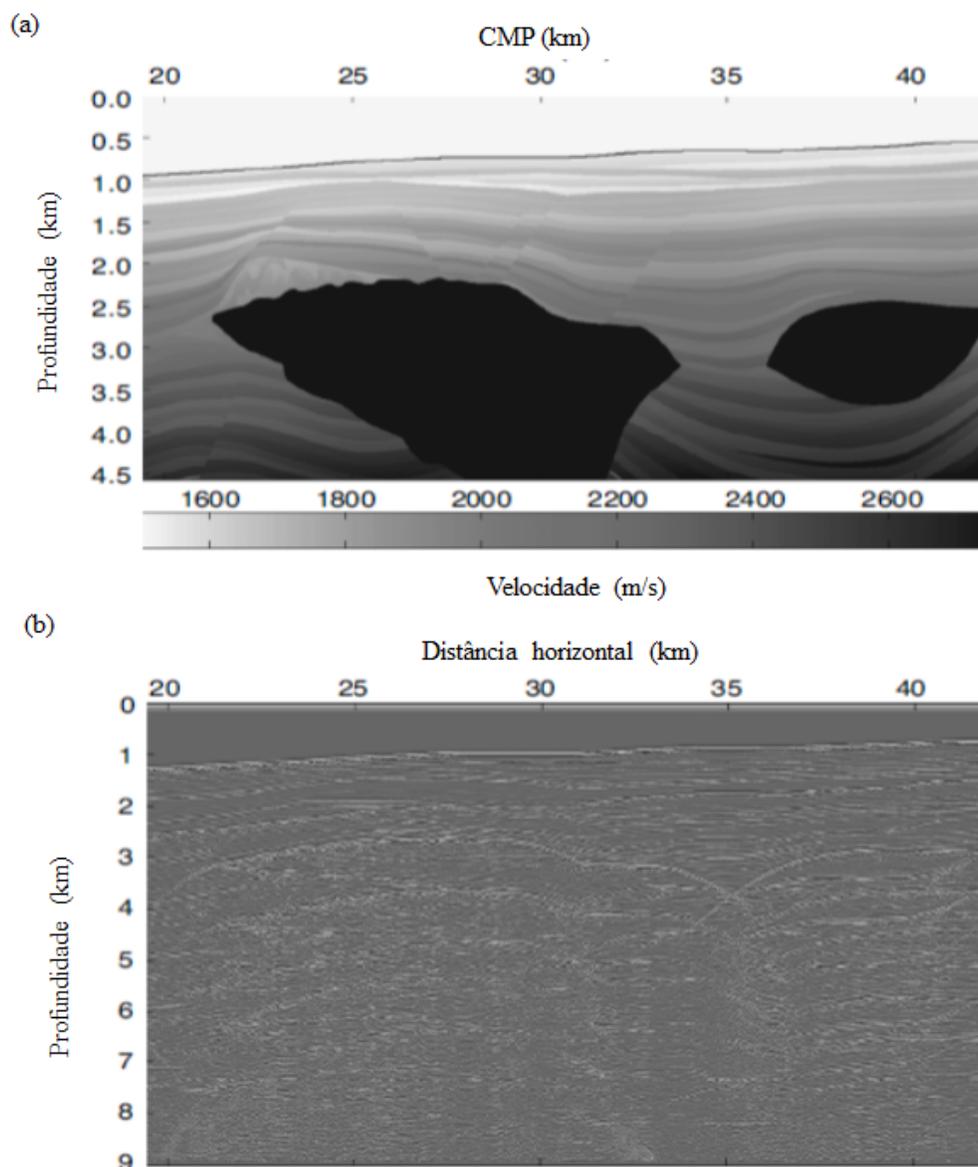
Nessa notação,  $U(\omega, x, z | k_{x_s}, z_s)$  e  $D(\omega, x, z | k_{x_s}, z_s)$  representam, respectivamente, os campos ascendente (receptor) e descendente (fonte) continuados para baixo na posição  $(x, z)$  e transformados para o domínio frequência-número de onda da fonte  $(k_{x_s}, z_s)$ . A quantidade  $\epsilon$  é a regularização representada por um valor para evitar problemas de instabilidade associada à divisão por números pequenos.

Essa deconvolução sobre o número de onda da fonte, o DIPMR, portanto, exige que as energias ascendente e descendente coincidam não apenas no tempo, mas também para a posição de cada fonte iluminando uma determinada posição em subsuperfície. Desse modo, artefatos como o *crosstalk* são melhor atenuados e os verdadeiros refletores são realçados.

No entanto, essa deconvolução, bem como a transformada de Fourier adicional para levar ao domínio do número de onda, realizada para cada ponto imageado na subsuperfície, aumentam o custo computacional do processo.

O DIPMR foi aplicado ao modelo Pluto 1.5 que simula complexas estruturas em águas profundas do Golfo do México. O dado foi simulado para um levantamento com arraste de cabo marinho, com geometria de aquisição *end-on*. A Figura 3.9(a) mostra o modelo de velocidade desse dado, e a Figura 3.9(b) a seção em afastamento-nulo do dado.

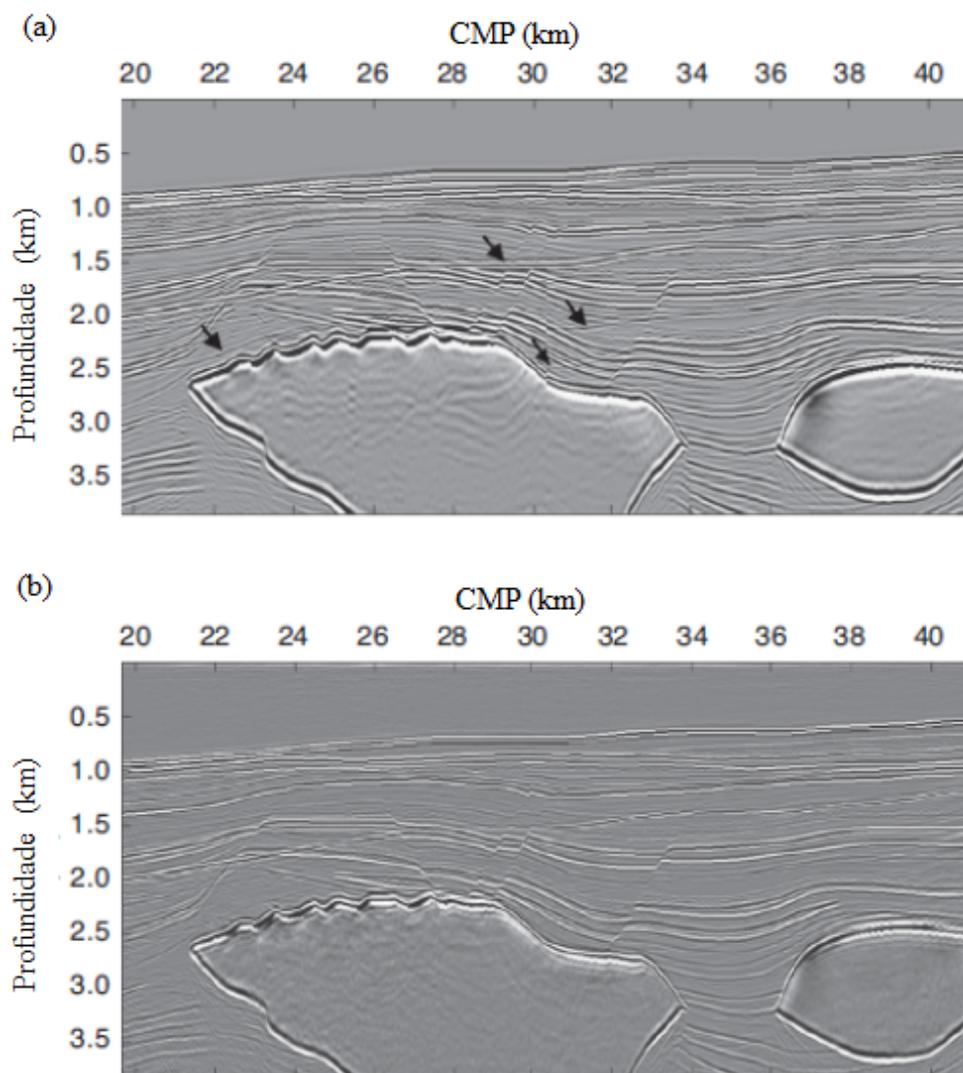
Figura 3.9: (a) Modelo de velocidade do dado Pluto 1.5 simulando uma subsuperfície geologicamente complexa. (b) Seção em afastamento-nulo do dado.



Fonte: Muijs et al. (2007).

Muijs et al. (2007) utilizaram a propriedade de reciprocidade para trocar as posições de fontes e receptores e, assim, reorganizar a geometria *end-on* original para *split-spread*. Utilizando diferenças finitas (FD) para continuar para baixo os campos de ondas, o dado foi, então, migrado pelo método convencional de perfis de tiro e pelo método DIPMR. Os resultados são mostrados, respectivamente, nas Figuras 3.10(a) e 3.10(b).

Figura 3.10: (a) Imagens obtidas para o dado Pluto 1.5: (a) Através da migração por perfis de tiro utilizando reflexões primárias, e (b) através do DIPMR.



Fonte: Muijs et al. (2007).

Na Figura 3.10(a), apesar dos corpos de sal terem sido corretamente imageados, o nível de ruído, especialmente de *cross-talk*, é acentuado conforme indicado pelas setas. A Figura

3.10(b), por sua vez, possui melhor relação sinal-ruído, melhor resolução vertical e melhor focalização dos refletores. O *crosstalk*, embora ainda possa ser observado, foi significadamente atenuado (MUIJS et al., 2007).

Entretanto, o custo computacional do processo é alto em decorrência da decomposição em ondas ascendentes e descendentes, das transformadas de Fourier necessárias e do imageamento multidimensional. O método permite, porém, otimizar a integração das informações contidas em primárias e múltiplas, evitando a geração de duas imagens da subsuperfície (uma com primárias e outra com múltiplas).

Um conhecimento detalhado do modelo de velocidade é necessário, especialmente para a etapa de extrapolação dos campos de ondas, mas essa necessidade é comum a todos os processos de imageamento em profundidade.

### 3.3 UTILIZAÇÃO DIRETA DAS MÚLTIPLAS NA MIGRAÇÃO

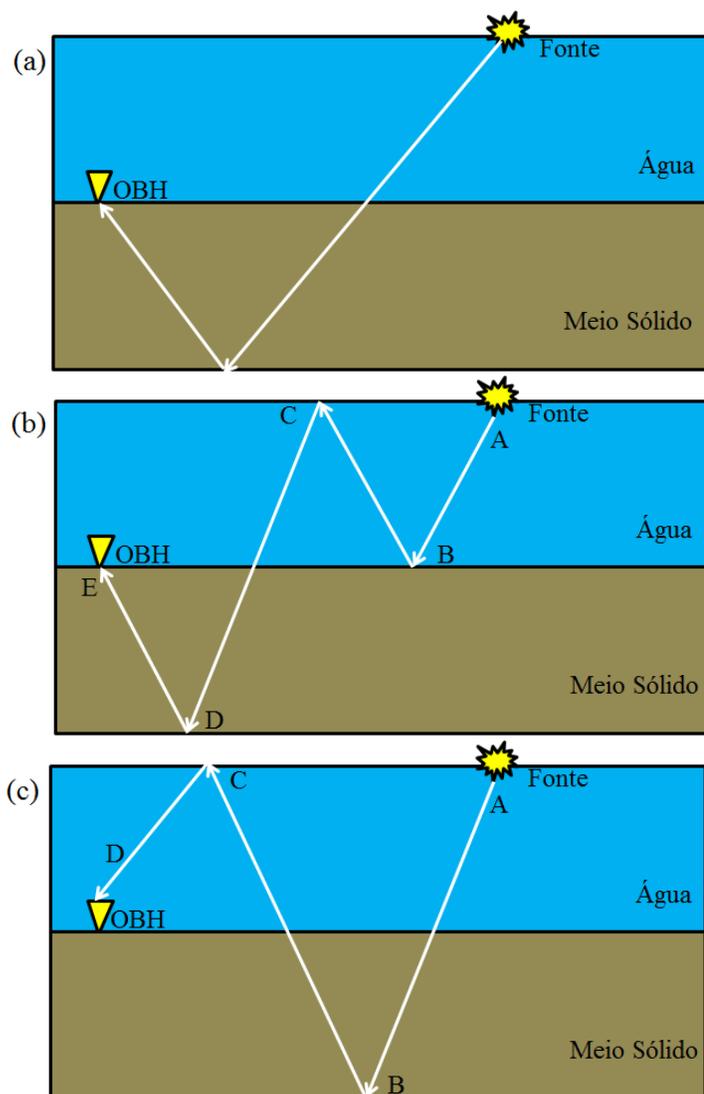
Neste grupo, as múltiplas são preditas do dado total registrado, contendo primárias e múltiplas, e a elas é aplicado um método de migração.

#### 3.3.1 Migração Kirchhoff Utilizando Múltiplas

Em Reiter et al. (1991), a migração de Kirchhoff pré-empilhamento em profundidade, baseada na teoria do raio, é usada para imagear reflexões primárias e múltiplas em registros com aquisição OBH em águas profundas (ver Figura 3.11).

No levantamento OBH, e considerando um modelo formado por camadas planas, dois tipos de múltiplas são identificados: uma que possui uma reflexão no fundo oceânico abaixo da fonte, denominada de “múltipla da fonte”, Figura 3.11(b), e outra que possui uma reflexão na superfície acima dos receptores, denominada de “múltipla do receptor”, Figura 3.11(c).

Figura 3.11: Geometria de aquisição OBH: os receptores são posicionados no assoalho oceânico enquanto as fontes são posicionadas na superfície da água. São ilustradas a trajetória da reflexão primária (a), a trajetória da múltipla de superfície livre referida como “múltipla da fonte” (b) e a trajetória da múltipla de superfície livre referida como “múltipla do receptor” (c).



Fonte: Baseado em Reiter et al. (1991).

Na geometria de aquisição marinha convencional, com fontes e receptores na superfície, há uma dificuldade fundamental em identificar as verdadeiras trajetórias das reflexões múltiplas, uma vez que as “múltiplas da fonte” e as “múltiplas do receptor” têm amplitudes aproximadamente iguais, Figura 3.12(a). Isso faz com que o processamento e a interpretação desses eventos se torne uma tarefa difícil, uma vez que é quase impossível determinar a trajetória percorrida por determinada múltipla.

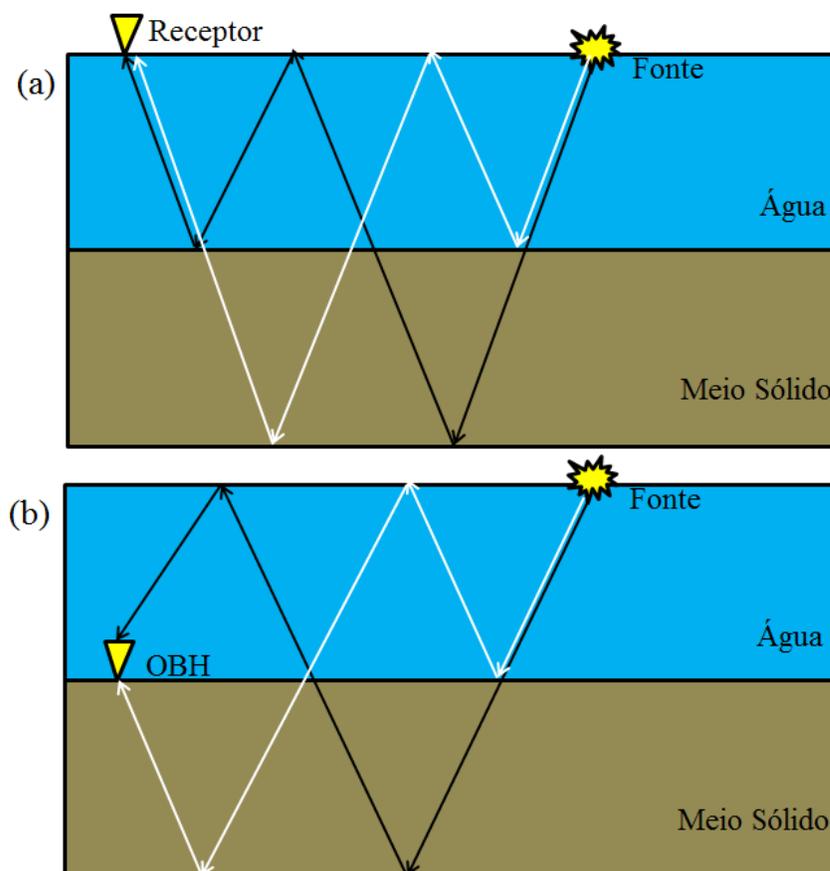
Enquanto que na geometria de aquisição onde o receptor fica no fundo, tal como um OBH,

as “múltiplas do receptor” apresentam amplitudes significativamente maiores que as “múltiplas da fonte”, Figura 3.12(b), sendo, portanto, mais fáceis de separar. Essa é a razão do método de Reiter et al. (1991) se restringir a dados OBH.

Isso ocorre porque as amplitudes desses dois tipos de múltiplas são controladas pelo número de reflexões que esses eventos sofrem. Essas amplitudes estão associadas a consolidação do fundo oceânico: quanto menos rígido for o fundo oceânico, menor seu coeficiente de reflexão e maior a razão entre a amplitude da “múltipla do receptor” e amplitude da “múltipla da fonte”.

Sendo assim, embora duas múltiplas de primeira ordem continue presente nos dados, a “múltipla do receptor” será dominante, tornando possível um tratamento posterior. Entretanto, é necessário que as múltiplas estejam separadas das primárias no tempo, e é por isso que o método se limita aos dados de águas profundas.

Figura 3.12: (a) Em uma aquisição com fontes e receptores na superfície, a “múltipla da fonte” (linha branca) e a “múltipla do receptor” (linha preta) apresentam amplitudes aproximadamente iguais. (b) Em dados OBH, no entanto, as “múltiplas do receptor” (linha preta) apresentam amplitudes significativamente maiores que as “múltiplas da fonte” (linha branca).



Fonte: Baseado em Reiter et al. (1991).

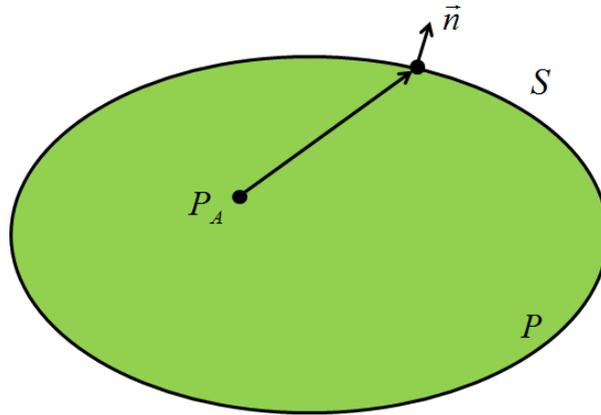
De acordo com o método descrito por Reiter et al. (1991), a equação do raio baseada na migração de Kirchhoff 2D em profundidade é usada para imagear o dado ao longo da trajetória da “múltipla do receptor”.

O campo de pressão em um ponto  $A$  pode ser calculado através da equação:

$$P_A = -\frac{1}{4\pi} \oint_S [P \frac{\partial G}{\partial n} - G \frac{\partial P}{\partial n}] dS, \quad (3.9)$$

em que  $P_A$  é o campo de pressão no ponto  $A$ , que se deseja conhecê-lo;  $P$  é o campo de pressão registrado na superfície  $S$ ;  $\vec{n}$  é o vetor normal a essa superfície e  $G$  é a função de Green, que depende das propriedades físicas do meio, e representa a resposta produzida na superfície  $S$  por uma fonte pontual em  $A$  (ver Figura 3.13).

Figura 3.13: Representação da integral de Kirchhoff. O campo de pressão no ponto  $A$  é estimado a partir do campo de pressão  $P$  registrado na superfície fechada  $S$  e da função de Green  $G$  do meio.



Fonte: Baseado em Verschuur (2006).

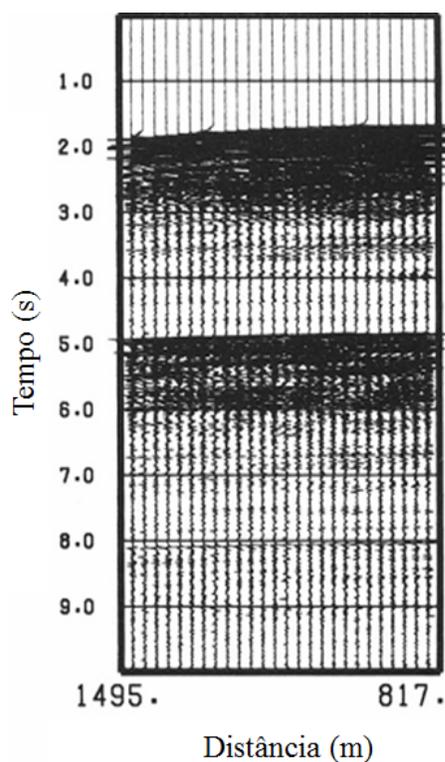
De acordo com a equação (3.9), é necessário o cálculo das funções de Green na subsuperfície. Isso é feito traçando-se raios das bordas do espaço imagem na subsuperfície até a posição de fonte e receptor e interpolando para se obter a resposta para todos os pontos imagem na subsuperfície.

Para o imageamento da “múltipla do receptor”, por exemplo, os raios são traçados do espaço imagem na subsuperfície (ponto B, na Figura 3.11(c)) e são refletidos para abaixo da superfície livre indo em direção ao receptor. Em seguida, os raios são traçados a partir do espaço imagem na direção da fonte na superfície. Esses dois conjuntos de função de Green são tudo o que é necessário para migrar uma dada posição de fonte; e somente as funções de Green do espaço imagem para a fonte em subsuperfície são necessárias para os afastamentos subsequentes.

Na Figura 3.11(c) são mostradas condições de extrapolação e imageamento para as “múltiplas do receptor”. A “múltipla do receptor” é extrapolada ao longo da trajetória D-C-B e, em seguida, imageada para o tempo de trânsito da trajetória A-B. Para a aplicação desse método, é necessário um conhecimento apurado do modelo de velocidade, para a estimativa da função de Green através do traçamento de raio, além da separação da múltipla do dado.

Em Reiter et al. (1991), o método foi aplicado a dados reais ao longo da costa leste dos Estados Unidos, obtidos com aquisição OBH. A Figura 3.14 mostra dados medidos a 2300 m de profundidade de água e gravados no tempo de 10 s. Os afastamentos mínimo e máximo entre fonte e receptor do levantamento é de 800 e 1500 m, respectivamente.

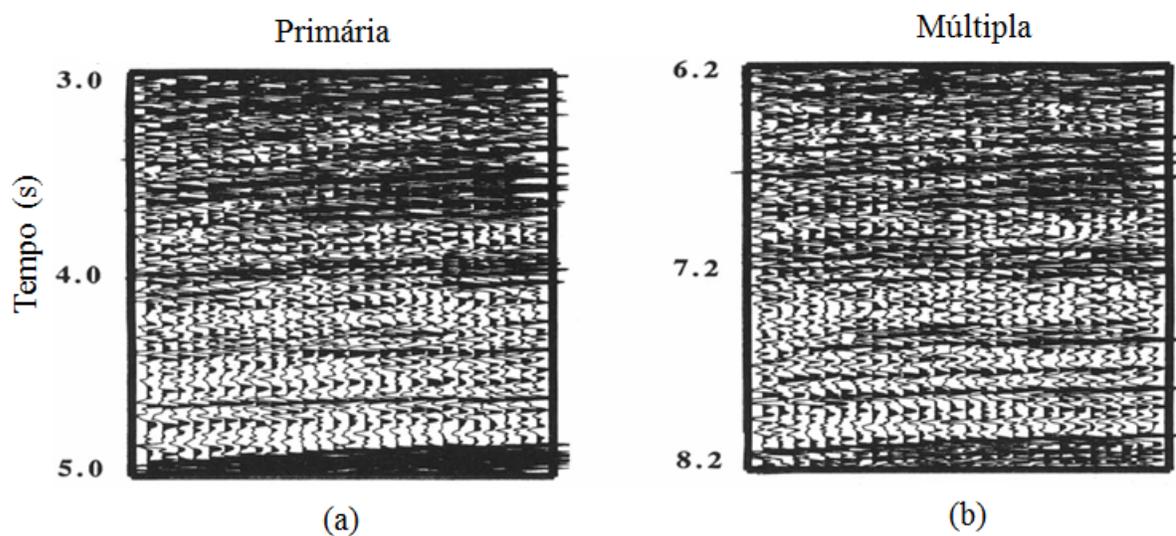
Figura 3.14: Dados reais registrados com aquisição OBH.



Fonte: Reiter et al. (1991).

Na Figura 3.15(a) é mostrado em detalhes a chegada da reflexão primária entre 3 e 5 s, enquanto que na Figura 3.15(b) é mostrado em detalhes a múltipla de primeira ordem entre 6,2 e 8,2 s. As múltiplas aparecem plotadas com polaridade reversa.

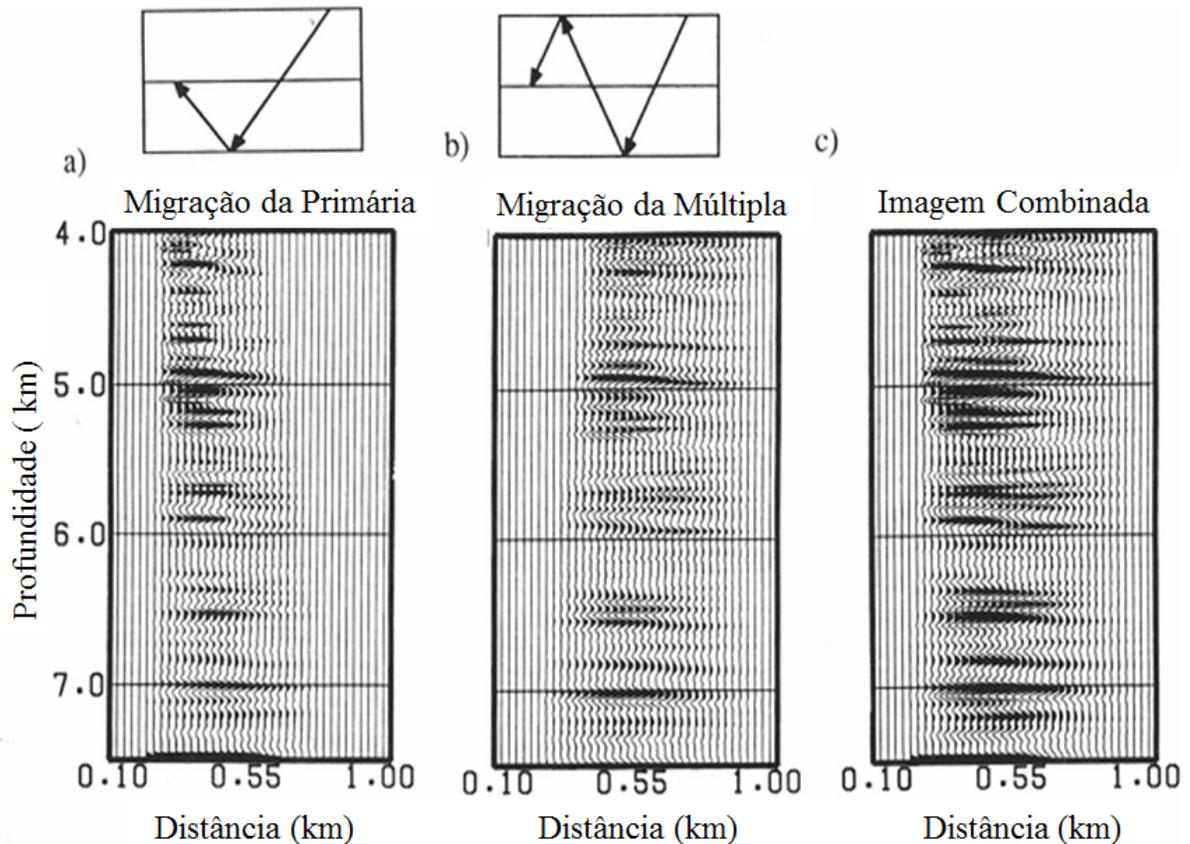
Figura 3.15: Seção em detalhes das reflexões primária e múltipla.



Fonte: Reiter et al. (1991).

A Figura 3.16(a) mostra a imagem resultante da migração Kirchhoff ao longo da trajetória da reflexão primária. Não foi realizado nenhum processamento para a separação das reflexões primárias e múltiplas. Na Figura 3.16(b) é mostrado o resultado da migração do mesmo dado (após a correção de polaridade) migrado ao longo da trajetória da “múltipla do receptor”, de acordo com o método de Reiter et al. (1991). Na Figura 3.16(c) é mostrado a imagem obtida da somas das imagens das Figuras 3.16(a) e 3.16(b).

Figura 3.16: (a) Imagem obtida pela migração Kirchhoff convencional, ao longo da trajetória da primária. (b) Imagem obtida pela migração ao longo da trajetória da “múltipla do receptor”. (c) Imagem combinada, obtida pela soma das duas imagens anteriores.



Fonte: Reiter et al. (1991).

A imagem gerada pela migração da “múltipla do receptor”, Figura 3.16(b), apresenta maior extensão lateral quando comparada à imagem gerada pela migração da primária, Figura 3.16(a). Já a composição final da imagem, Figura 3.16(c), difere da imagem das primárias em dois aspectos principais: em primeiro lugar, melhora a relação sinal-ruído; e em segundo lugar, há um aumento da cobertura lateral da imagem como resultado da inclusão da múltipla de superfície livre.

Apesar das limitações (restrição a dados de águas profundas, com aquisição OBH, e dependência de um apurado modelo de velocidade da subsuperfície), o trabalho de Reiter et al. (1991) é um dos pioneiros na utilização de múltiplas para imagear a subsuperfície, produzindo resultados promissores. A limitação a dados OBH foi resolvida por Roeck et al. (2001), que estenderam essa metodologia a dados de superfície. A utilização de filtros de velocidade de alta resolução possibilita separar primárias e múltiplas mesmo em águas menos profundas, resolvendo outra limitação da metodologia (REITER et al., 1991).

Entretanto, a exigência de um conhecimento preciso das propriedades do meio, a necessidade de separar as múltiplas das primárias antes da migração, além da geração de três imagens (uma gerada pelas primárias, uma pelas múltiplas, e outra resultante da combinação entre as duas anteriores), implica em um elevado custo computacional, caracterizando sérias desvantagens da metodologia proposta.

### 3.3.2 Utilização das Múltiplas na Migração por Correlação

Nesse método, as reflexões múltiplas são consideradas como sinal e são utilizadas na migração por correlação, a partir dos dados organizados em famílias CDP<sup>2</sup>. Baseia-se no princípio em que múltiplas são eventos correlacionáveis em diferentes traços sísmicos, ou seja, se uma reflexão múltipla é registrada em um traço, múltiplas de maior ou menor ordem também são registradas em outros traços. Esse método é descrito em Schuster e Rickett (2000) e expandido em Sheng (2001).

A correlação é uma medida de similaridade entre dois sinais, uma medida de como esses sinais se relacionam (LEITE, 2008). Dadas duas funções arbitrárias  $f(t)$  e  $g(t)$  a medida de correlação entre elas é representada por:

$$\phi_{fg}(\tau) = f(t) \otimes g(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} f(t)g(t - \tau)dt, \quad (3.10)$$

em que  $\phi_{fg}(\tau)$  é o resultado da operação de correlação, representada pelo símbolo  $\otimes$ , entre duas funções arbitrárias  $f(t)$  e  $g(t)$ ,  $\tau$  é o deslocamento no domínio  $t$  da função  $g(t)$  em relação a  $f(t)$ .

No domínio da frequência, a correlação equivale a multiplicar uma função pelo complexo conjugado da outra. Dados os pares tempo-frequência, obtidos por Transformada de Fourier,  $f(t) \leftrightarrow F(\omega)$ ,  $g(t) \leftrightarrow G(\omega)$  e  $\phi_{fg}(\tau) \leftrightarrow \Phi_{FG}(\omega)$ , tem-se:

$$\Phi_{FG}(\omega) = F(\omega)G^*(\omega), \quad (3.11)$$

em que  $G^*$  representa o conjugado complexo da função  $G$  e a equação (3.11) representa a chamada correlação cruzada. Nessa operação, subtrai-se o termo comum de fase entre duas funções e multiplicam-se suas amplitudes, e representa o fundamento da migração por correlação (SHENG, 2001).

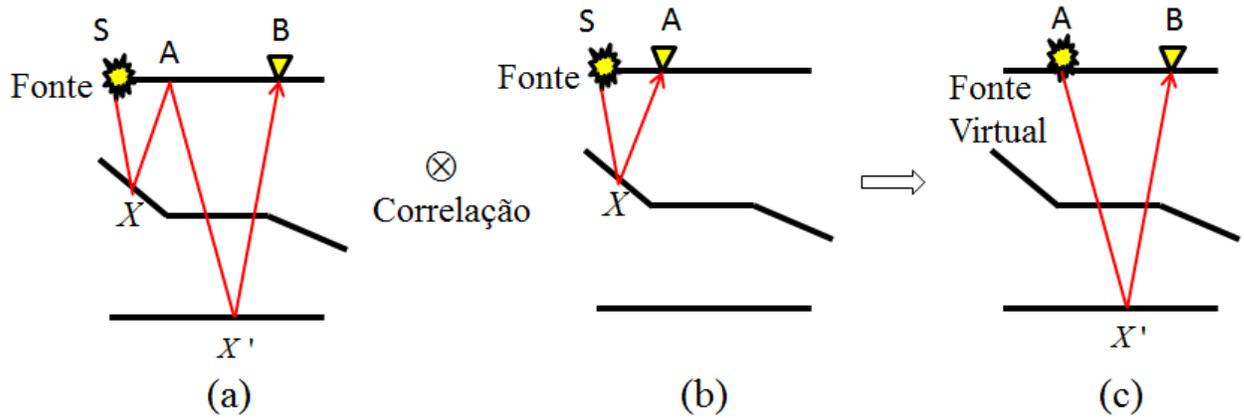
A Figura 3.17 é um esboço do fundamento da migração por correlação de Sheng (2001),

---

<sup>2</sup>Common Depth Point ou Ponto Comum em Profundidade.

onde correlaciona-se dois traços, o primeiro corresponde a múltipla registrada, Figura 3.17(a), o segundo traço corresponde a reflexão primária, Figura 3.17(b). A correlação entre esses traços remove o termo de fase comum e apenas o termo referente à reflexão múltipla é mantido, Figura 3.17(c). O traço resultante equivale a uma reflexão gerada por uma fonte virtual em  $A$ .

Figura 3.17: Esboço da base da migração por correlação cruzada. A múltipla gerada em  $A$  é correlacionada com a primária resultando em uma reflexão gerada por uma fonte virtual em  $A$ .



Fonte: Baseado em Sheng (2001).

Na Figura 3.17(a), uma múltipla de superfície é registrada em  $B$ , com um tempo de trânsito igual a  $\tau_{SX} + \tau_{XA} + \tau_{AX'} + \tau_{X'B}$ , onde  $X$  e  $X'$  são os pontos de reflexão na subsuperfície. No domínio da frequência, este registro, representado por  $d_B$ , é dado por:

$$d_B = R^2 e^{i\omega(\tau_{SX} + \tau_{XA} + \tau_{AX'} + \tau_{X'B})}, \quad (3.12)$$

em que  $R$  representa o coeficiente de reflexão na interface da camada e  $\omega$  representa a frequência angular. Uma reflexão primária é registrada em  $A$ , Figura 3.17(b), com tempo de trânsito igual a  $\tau_{SX} + \tau_{XA}$ , tem seu registro no domínio da frequência dado por:

$$d_A = R e^{i\omega(\tau_{SX} + \tau_{XA})}. \quad (3.13)$$

Os dois traços registrados em  $A$  e  $B$  são então correlacionados. Isso equivale, no domínio da frequência, a multiplicar o registro em  $B$  pelo conjugado complexo do registro em  $A$ :

$$d_B d_A^* = R^2 e^{i\omega(\tau_{SX} + \tau_{XA} + \tau_{AX'} + \tau_{X'B})} R e^{-i\omega(\tau_{SX} + \tau_{XA})} = R^3 e^{i\omega(\tau_{AX'} + \tau_{X'B})}. \quad (3.14)$$

O resultado da equação (3.14) é equivalente ao traço que seria registrado em  $B$  se houvesse uma fonte em  $A$ , devido a uma reflexão em  $X'$ . Diz-se, portanto, que a correlação entre os traços  $A$  e  $B$  cria uma “fonte virtual” ou “pseudo tiro” em  $A$ , conforme mostrado na Figura 3.17(c). Realizando a correlação de  $A$  com diferentes posições do receptor em  $B$  na superfície, forma-se uma família de “pseudos-tiros” em comum.

É importante ressaltar, que a equação (3.14) representa apenas a correlação entre o evento da múltipla registrado em  $B$  e o evento da primária registrado em  $A$ , isto é, o resultado da correlação representa o caminho percorrido por uma múltipla virtual de primeira ordem. Ambos os traços, da Figura 3.17, apresentam outros eventos além dos citados, que podem gerar artefatos capazes de prejudicar a qualidade do resultado final do imageamento da subsuperfície. Para uma análise em maiores detalhes, consultar Sheng (2001).

Ao resultado da correlação na equação (3.14), aplica-se um operador de migração:

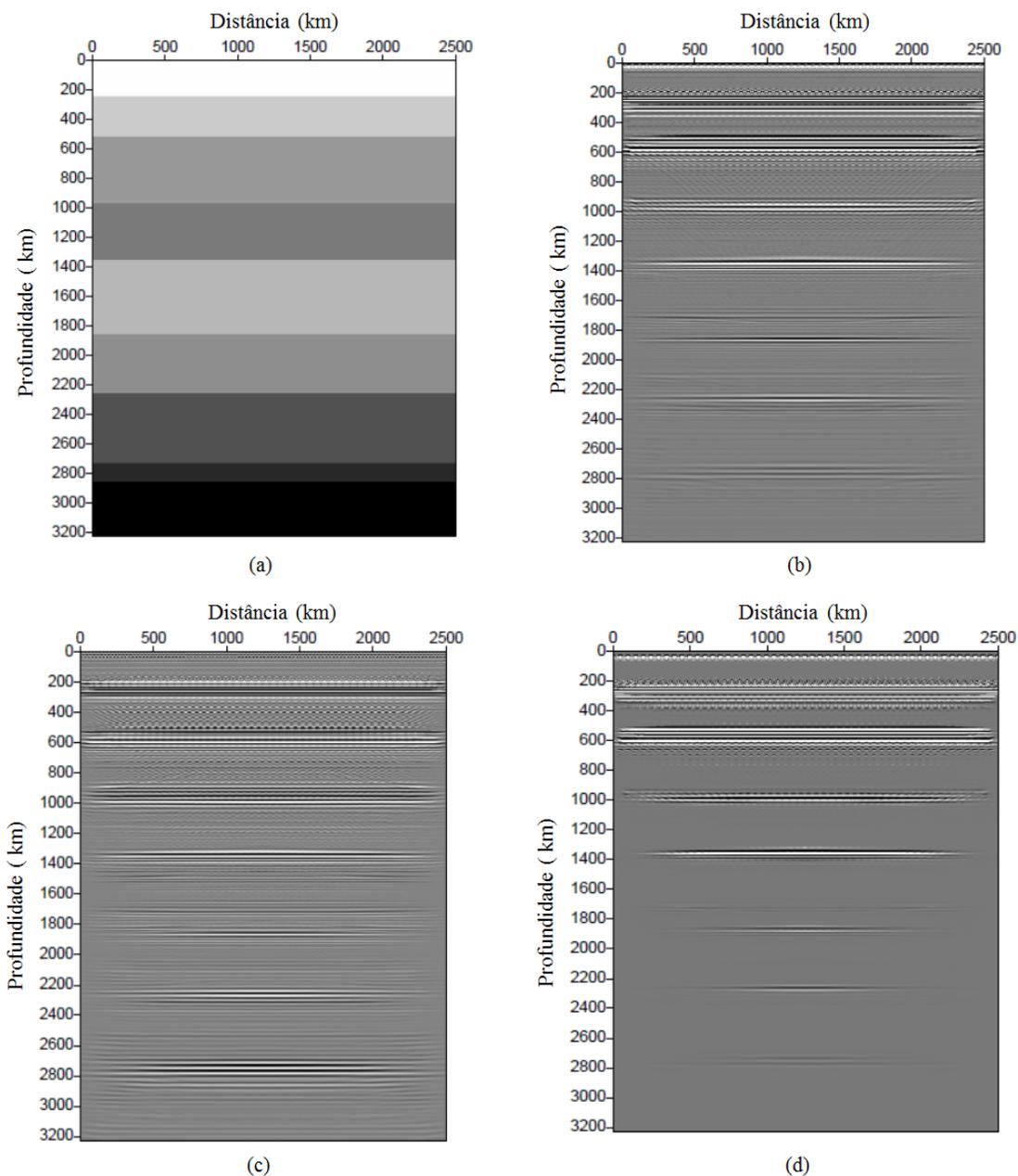
$$m(X) = e^{-i\omega(\tau_{AX} + \tau_{XB})}, \quad (3.15)$$

em que  $X$  é um ponto no espaço imagem em subsuperfície. Se  $X$  for um ponto de reflexão em subsuperfície, então  $X$  coincide com  $X'$ , e ocorrerá interferência construtiva entre o resultado da correlação e o operador de migração, que produzirá a imagem. Caso contrário, a interferência será destrutiva e não formará imagem alguma.

Em Sheng (2001) é proposto combinar a imagem produzida pelas múltiplas, de acordo com a metodologia acima apresentada, com a imagem produzida apenas pelas primárias, gerada através da migração Kirchhoff em profundidade. A metodologia propõe a combinação das imagens com o objetivo de eliminar artefatos (gerados, principalmente, pela correlação entre primárias) e realçar os eventos correlatos.

Esse processo foi, então, aplicado a um modelo sintético de nove camadas planas e horizontais, mostrado na Figura 3.18(a). A esse dado, foi aplicada a migração Kirchhoff utilizando primárias, Figura 3.18(b), e a migração por correlação utilizando múltiplas, Figura 3.18(c). A imagem obtida pela multiplicação entre as duas anteriores é mostrada na Figura 3.18(d).

Figura 3.18: (a) Modelo sintético com nove camadas plano-horizontais; (b) Imagem obtida com a migração Kirchhoff convencional em profundidade; (c) Imagem obtida com a migração por correlação, utilizando reflexões múltiplas; e (d) Imagem obtida pela multiplicação entre as duas imagens anteriores.



Fonte: Sheng (2001).

Observa-se, tanto na Figura 3.18(b) (migração Kirchhoff) quanto na Figura 3.18(c) (migração por correlação), uma quantidade significativa de artefatos, que podem inclusive ser erroneamente interpretados como refletores da subsuperfície. Entretanto, quando essas imagens são multiplicadas, os artefatos localizados em posições diferentes nas duas imagens

são atenuados e os reais refletores são realçados. Assim, o resultado final é uma imagem com maior razão sinal-ruído, melhor resolução vertical e melhor focalização dos refletores. A aplicação da metodologia de Sheng (2001), portanto, mostrou-se eficaz para dados sintéticos com refletores planos.

Uma das principais vantagens da migração por correlação utilizando reflexões múltiplas é que o método não exige periodicidade da múltipla. A combinação das imagens da migração de Kirchhoff e da migração por correlação é capaz de realçar refletores e atenuar artefatos.

Contudo, para modelos geologicamente mais complexos, a metodologia apresenta limitações. Acredita-se que essas limitações se devam ao fato da migração por correlação de-considerar no dado outros eventos como múltiplas internas e múltiplas de altas ordens (ver Sheng (2001)).

Além disso, o custo computacional é muito alto, já que é necessário migrar o dado duas vezes (uma com a migração Kirchhoff e outra com a migração por correlação) para gerar uma terceira imagem migrada, resultante da combinação entre as duas imagens anteriores. Essa etapa, no entanto, não pode ser evitada, pois, caso contrário, os artefatos não serão eliminados, limitando bastante a razão sinal-ruído e a resolução da imagem final.

### 3.3.3 Migração de Múltiplas por Perfis de Tiro

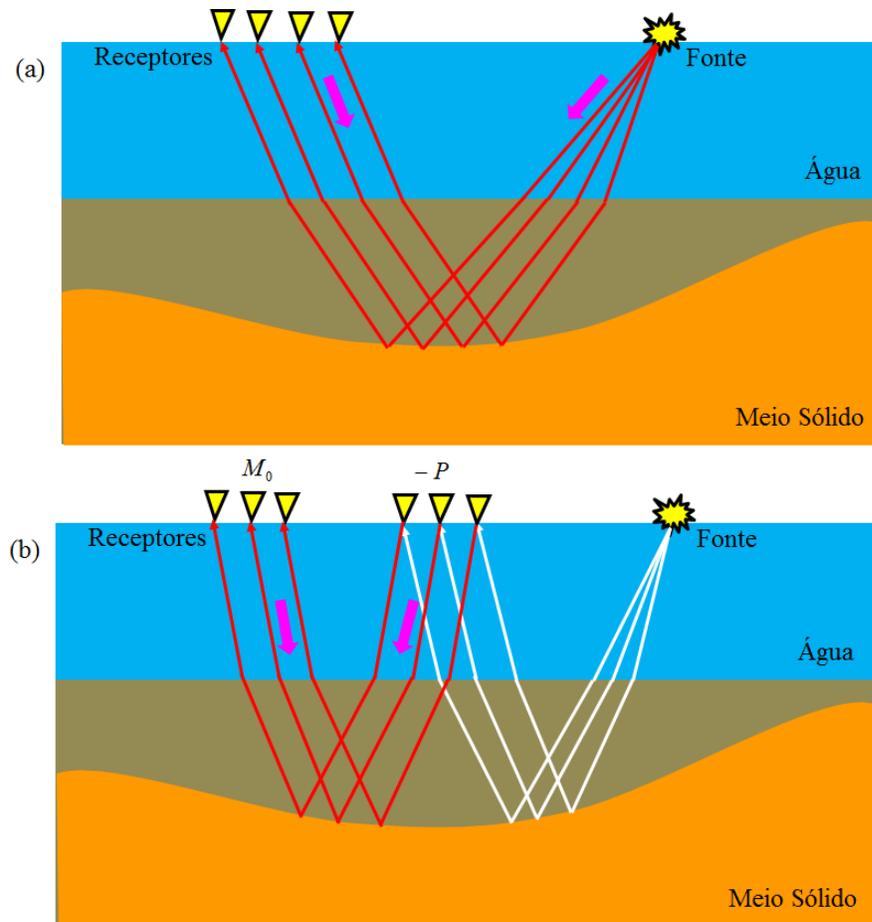
Berkhout (1993) e Berkhout e Verschuur (1994b) foram os pioneiros na utilização de múltiplas em um esquema de migração por perfis de tiro (*shot-profile migration*).

A migração por perfis de tiro é baseada no conceito de extrapolação direta e inversa do campo de onda. Primeiro o campo de onda registrado no receptor é inversamente extrapolado para uma determinada profundidade, em um modelo de velocidade. A seguir, o campo de onda da fonte (um pulso na posição da fonte) é diretamente extrapolado para a mesma profundidade, onde esse campo de onda sofre correlação cruzada traço a traço com o campo de onda resultante da extrapolação inversa do campo do receptor.

Por fim, a componente de tempo zero é selecionada, a qual representa a propriedade de reflexão para a profundidade escolhida. Esse processo se repete para todos os níveis de profundidade e todos os registros de tiro e uma imagem completa é obtida da soma de todos os resultados.

O método da migração por perfis de tiro utilizando apenas reflexões primárias é mostrado na Figura 3.19(a).

Figura 3.19: (a) Princípio da migração por perfis de tiro para as reflexões primárias. (b) Princípio da migração por perfis de tiro para as reflexões múltiplas.



Fonte: Baseado em Verschuur (2006).

Considerando a relação entre primárias e múltiplas dada por (VERSCHUUR, 2006):

$$\mathbf{P} = \mathbf{P}_0 - \mathbf{X}_0\mathbf{P}, \quad (3.16)$$

em que  $\mathbf{X}_0$  contém a multimimensional resposta impulsiva da terra; e o dado com múltiplas  $\mathbf{P}$  é a soma das primárias  $\mathbf{P}_0$  e das múltiplas  $\mathbf{M}_0$ , onde  $\mathbf{M}_0 = -\mathbf{X}_0\mathbf{P}$ , e pode ser interpretado como o resultado do uso de um registro de tiro do dado total  $\mathbf{P}$  como um campo de onda da fonte que ilumina a subsuperfície (VERSCHUUR, 2006).

Um registro de tiro que contém só múltiplas pode ser usado na migração por perfis de tiro, sendo que o campo total  $\mathbf{P}$  (após a multiplicação por -1) é usado como um campo de fonte. O esquema da migração por perfis de tiro utilizando reflexões múltiplas é mostrado na Figura 3.19(b).

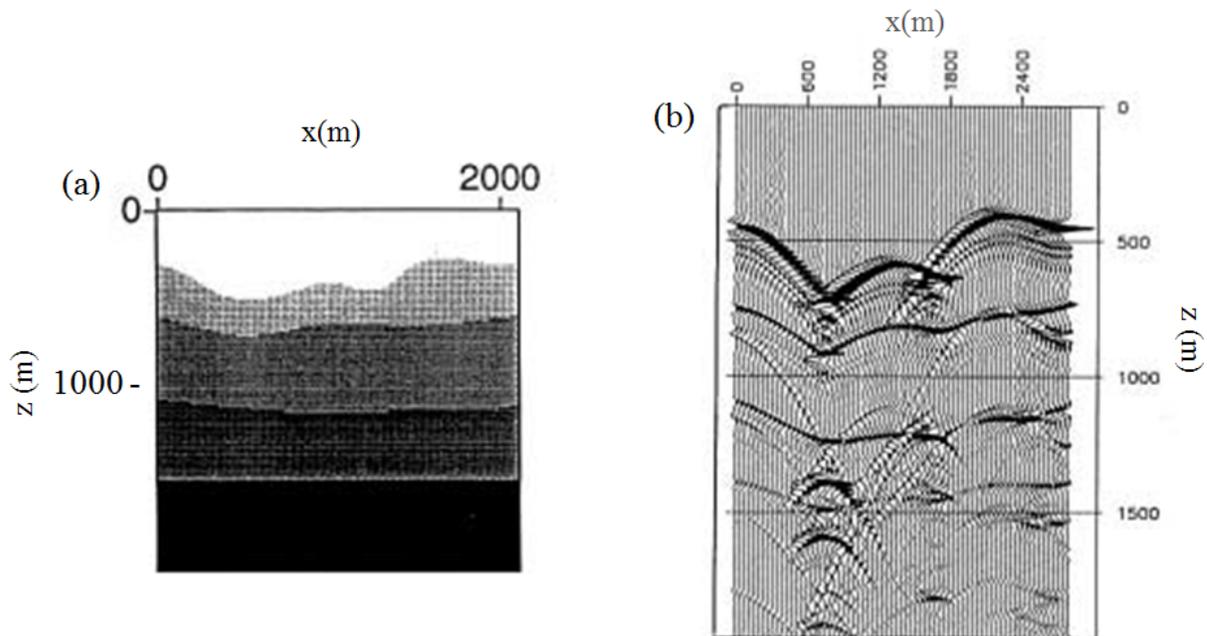
Dessa forma, a migração utilizando reflexões múltiplas é realizada da seguinte forma:

- I. Faz-se a extrapolação direta do dado total, após a multiplicação por -1, para uma determinada profundidade;
- II. Faz-se a extrapolação inversa da múltipla registrada em um registro de tiro para a mesma profundidade;
- III. Faz-se a correlação cruzada traço a traço dos dois dados;
- IV. Seleciona-se a componente de tempo zero resultante desta correlação.

Esse procedimento precisa ser repetido para todas as profundidades para se obter uma completa imagem em subsuperfície.

Verschuur (2006) e Berkhout e Verschuur (1994b) aplicaram o mesmo modelo para aplicar e comparar a migração por perfis de tiro de reflexões primárias e múltiplas. O modelo de velocidade usado é mostrado na Figura 3.20(a) e sua respectiva seção em afastamento-nulo é mostrado na Figura 3.20(b).

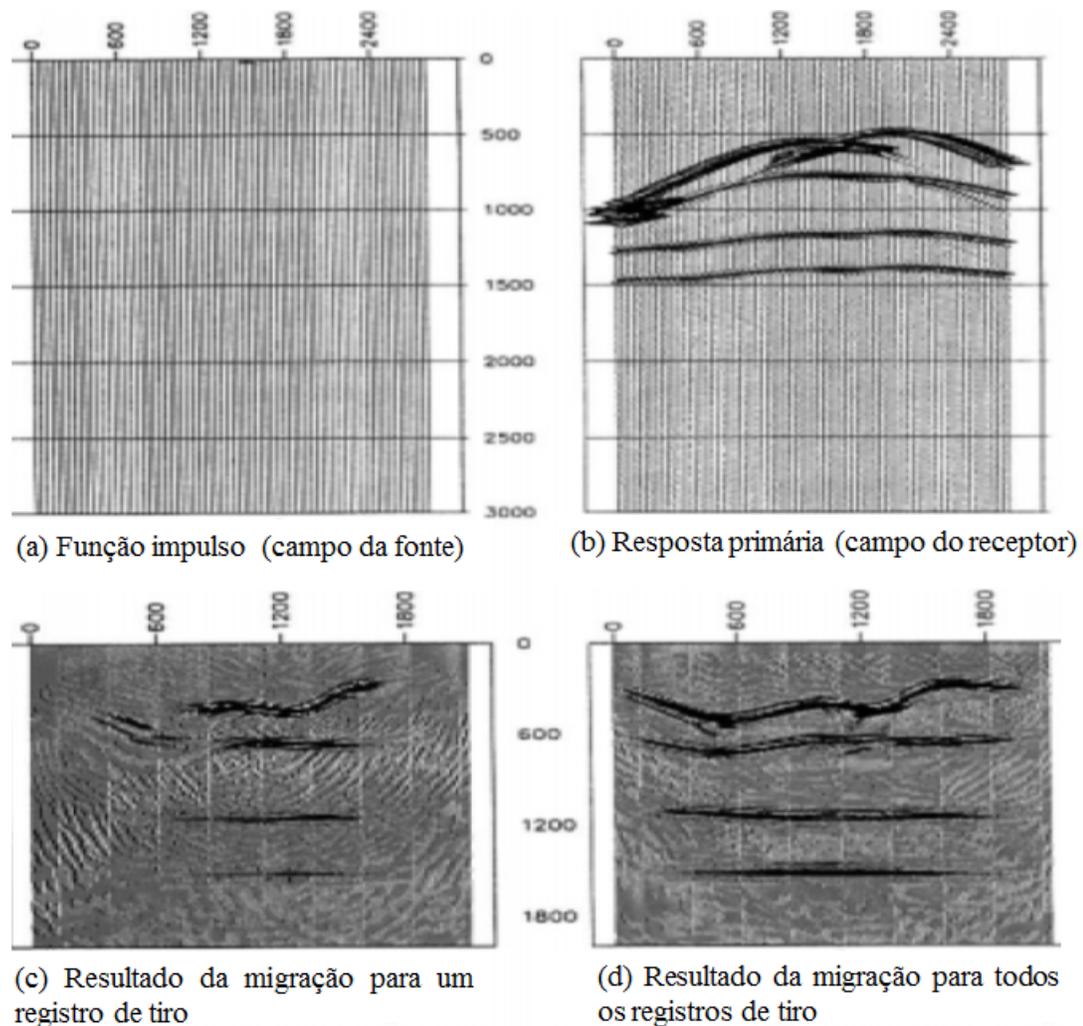
Figura 3.20: (a) Modelo de velocidade usado para a migração de primárias e múltiplas por Perfis de Tiro. (b) Seção em afastamento-nulo desse modelo.



Fonte: Verschuur (2006), Berkhout e Verschuur (1994b).

A Figura 3.21 mostra a migração das reflexões primárias para o dado da Figura 3.20(a). Na Figura 3.21(a) é mostrado o campo-fonte para um tiro (função impulso) e na Figura 3.21(b) é mostrado o campo-receptor (o registro do tiro apenas com as primárias). A Figura 3.21(c) mostra o resultado da migração desse registro de tiro, obtido pela correlação cruzada entre os campos das Figuras 3.21(a) e 3.21(b), em todas as profundidades. A Figura 3.21(d) mostra o resultado da soma de todos os registros de tiro migrados do dado.

Figura 3.21: (a) Migração de reflexões primárias por perfis de tiro. (a) Campo da fonte para um registro de tiro. (b) Campo do receptor, ou seja, um registro de tiro apenas com as reflexões primárias. (c) Resultado da migração desse registro de tiro. (d) Resultado da soma de todos os registros de tiro migrados.

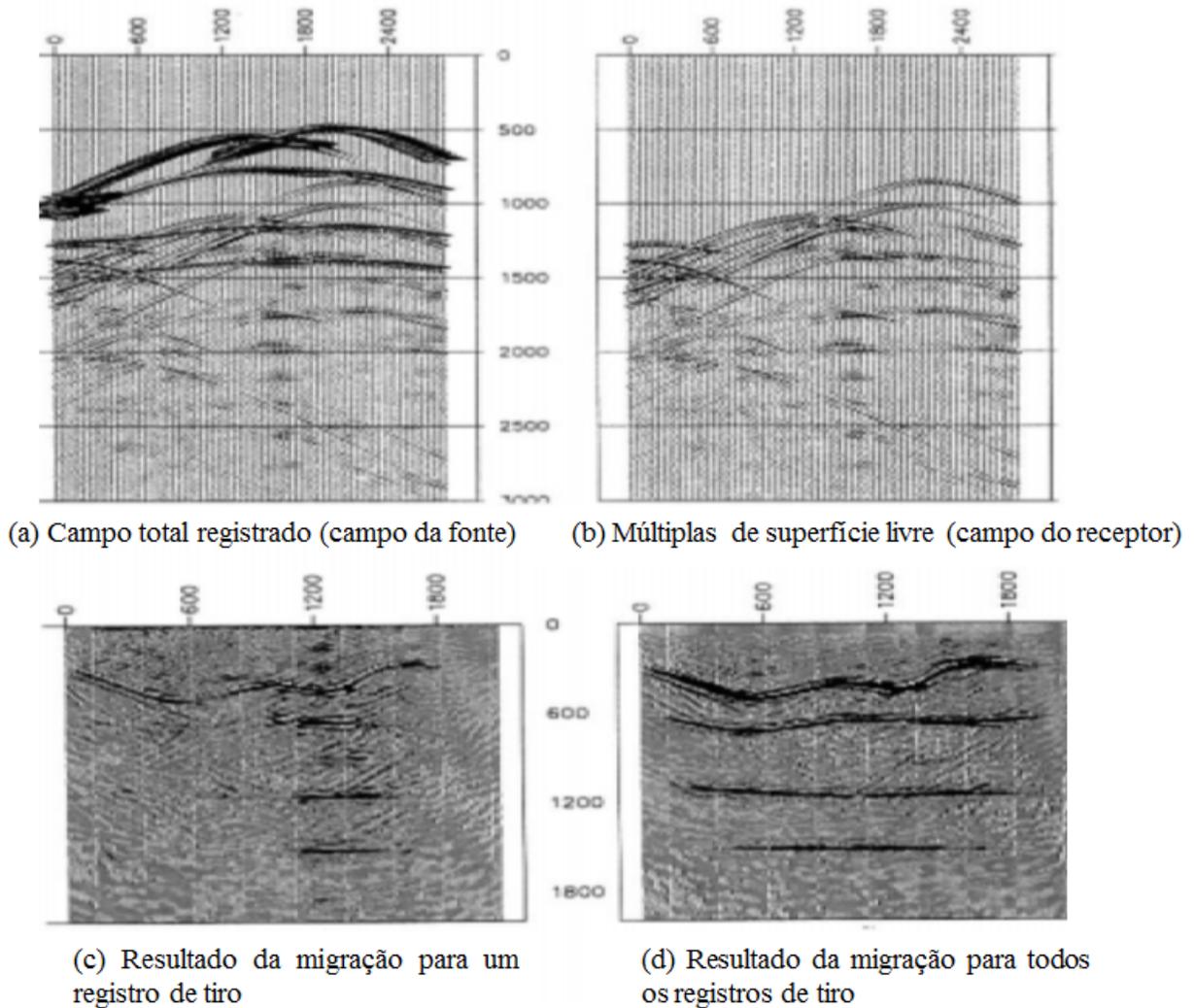


Fonte: Verschuur (2006), Berkhout e Verschuur (1994b).

A Figura 3.22 mostra a migração de reflexões múltiplas para o dado da Figura 3.20(a). Nesse caso, o campo-fonte, conforme mostrado na Figura 3.22(a), é um registro de tiro total,

com primárias e múltiplas, que deve ser multiplicado por  $-1$ , para representar a reflexão contra a superfície e a conseqüente mudança de fase. O campo-receptor é dado pelas múltiplas de superfície desse registro de tiro e é mostrado na Figura 3.22(b). O resultado da migração desse registro de tiro, obtido pela correlação entre os campos das Figuras 3.22(a) e 3.22(b), em todas as profundidades, é mostrado na Figura 3.22(c). A imagem final da migração, resultante da soma de todos os tiros migrados, é mostrada na Figura 3.22(d).

Figura 3.22: (a) Migração de reflexões múltiplas por perfis de tiro. (a) Campo-fonte, correspondente a um registro de tiro total, com primárias e múltiplas, multiplicado por  $-1$ . (b) Campo-receptor, correspondente apenas às múltiplas de superfície desse registro de tiro. (c) Resultado da migração desse registro de tiro. (d) Resultado da soma de todos os registros de tiro migrados.



Fonte: Verschuur (2006), Berkhout e Verschuur (1994b).

Comparando as Figuras 3.21(c) e 3.22(c), vê-se que a imagem gerada pela migração das

múltiplas é mais larga, principalmente no primeiro refletor. Isso se deve porque, mesmo para um registro de tiro, há várias múltiplas iluminando a subsuperfície de diferentes ângulos. É como se as fontes estivessem distribuídas sobre uma área mais extensa ao longo da superfície (fontes areais, ver Figura 3.19(b)).

Entretanto, os resultados obtidos pela migração das múltiplas são mais ruidosos, gerando imagens “borradas”, apesar de interpretáveis. A explicação para esses ruídos é que o processo de correlação, usado como condição de imagem, pode gerar artefatos, causados pela correlação de eventos não relacionados a pontos refletores comuns em subsuperfície (MUIJS et al., 2007).

Outro ponto fraco do método é que as múltiplas precisam ser previamente separadas das primárias, para serem utilizadas como campo-receptor. Em geral, essa estimativa é feita utilizando algum método de eliminação de múltiplas de superfície, sendo o SRME (VERSCHUUR, 2006) o mais utilizado.

O ponto forte da utilização dessa metodologia se deve ao fato de que as múltiplas iluminam áreas não detectadas através da migração de reflexões primárias.

Ainda na categoria de utilização direta das múltiplas, tem-se a migração reversa no tempo - RTM (LIU et al., 2011). Da mesma forma que na migração por perfis de tiro, nesse método, o campo da múltipla (já estimada do dado total) e o dado total são extrapolados (inverso e diretamente) para um determinado nível de profundidade em subsuperfície e a condição de imagem é a correlação cruzada desses campos.

A diferença para o método de Berkhout (1993) e Berkhout e Verschuur (1994b) é que a extrapolação é feita através da migração reversa no tempo.

Seguindo os passos do que é apresentado em (LIU et al., 2011), esse método foi programado e testado em um dado sintético. Mais sobre esse método é apresentado no próximo capítulo.

## 4 MIGRAÇÃO REVERSA NO TEMPO UTILIZANDO MÚLTIPLAS

Existem vários métodos que podem ser usados para produzir uma imagem em subsuperfície através da extrapolação direta e inversa, do campo de onda de fontes e receptores, para o interior da terra (WHITMORE, 1983; CHANG; MCMECHAN, 1987).

Na migração reversa no tempo (RTM), a extrapolação é realizada através da utilização da equação completa da onda, que modela estruturas com variações laterais de velocidade, ondas que mudam de direção antes de atingir algum refletor (*turning waves*) e eventos prismáticos. Todas essas situações estão presentes em estruturas com domo salino.

Liu et al. (2011) apresentou uma modificação da abordagem convencional de RTM, para utilizar as múltiplas de superfície livre no imageamento. Segundo essa abordagem, a fonte impulsiva é substituída pelo dado total registrado na subsuperfície contendo ambas reflexões, primárias e múltiplas, e usa-se as múltiplas (preditas) como dado registrado no receptor ao invés das reflexões primárias.

No processo do RTM, as múltiplas registradas na superfície são extrapoladas inversamente no tempo para cada nível de profundidade e o dado registrado (com ambas reflexões primárias e múltiplas) são extrapoladas diretamente no tempo para o mesmo nível de profundidade. Em seguida, é aplicada a condição de imagem, que consiste na correlação cruzada destes dois campos. Assim, o método para a utilização das múltiplas no RTM é dividido em duas etapas:

- I. Separação das múltiplas do dado total registrado. Isso é feito através do uso de métodos de predição e eliminação de múltiplas relacionadas a superfície como: Transformada Radon, Deconvolução Preditiva e o SRME (VERSCHUUR et al., 1992; BERKHOUT; VERSCHUUR, 1997).
- II. Aplicação do RTM para imageamento da subsuperfície.

Através da utilização da equação completa da onda, o RTM é capaz de lidar com estruturas que apresentam forte variação lateral de velocidade, característica de ambientes com domos salinos.

O objetivo desse trabalho foi reproduzir a abordagem apresentada em Liu et al. (2011), de utilização de múltiplas de superfície no imageamento através do RTM.

#### 4.1 SEPARAÇÃO DAS MÚLTIPLAS DO DADO TOTAL REGISTRADO

Nesse trabalho, as múltiplas são separadas do dado registrado através da aplicação do SRME, metodologia desenvolvida por Verschuur et al. (1992).

No SRME, as múltiplas são previstas da convolução do dado registrado com ele mesmo. Não há necessidade de informação a priori da velocidade em subsuperfície. O SRME possui duas etapas.

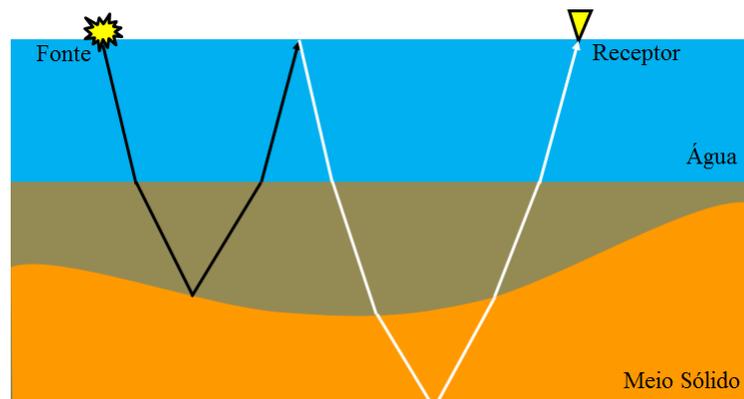
A primeira etapa consiste na predição das múltiplas a partir do dado. A segunda etapa, consiste na subtração da múltipla do dado total, que apresenta complexidades (SPITZ, 1999; LUO et al., 2003; LIU et al., 2009).

Para a utilização da múltipla no RTM, foi realizada apenas a primeira etapa.

#### 4.2 PREDIÇÃO DAS MÚLTIPLAS

Introduzido por Anstey e Newman (1967), o SRME é um método de remoção de múltiplas de superfície livre que utiliza reflexões presentes no próprio dado sísmico para estimar múltiplas de superfície e removê-las. Baseia-se no fato de que uma múltipla de primeira ordem pode ser pensada como duas trajetórias primárias, conectadas em um ponto de reflexão na superfície, conforme mostra a Figura 4.1.

Figura 4.1: Ilustração de uma múltipla de superfície livre interpretada como uma combinação de duas reflexões primárias que são conectadas por um ponto na superfície.



Fonte: Baseado em Verschuur (2006).

O SRME não necessita de informações a priori sobre a subsuperfície para ser executado com sucesso.

Considera-se a terra um meio sem variação lateral de velocidade (caso 1D), e a resposta sísmica de uma onda sísmica plana de banda infinita espalhada na subsuperfície. A resposta impulsiva da terra, excluindo os efeitos de sua superfície, é definida por  $x_0(t)$ , que contém todas as reflexões primárias e as múltiplas internas, denominada de resposta primária. Se  $x_0(t)$  chegar a uma superfície livre (interface entre ar-água, por exemplo), ela é espalhada de volta para a subsuperfície. Assim, cada evento da resposta impulsiva chegando na superfície livre, irá atuar como uma nova fonte de onda que voltará novamente a superfície.

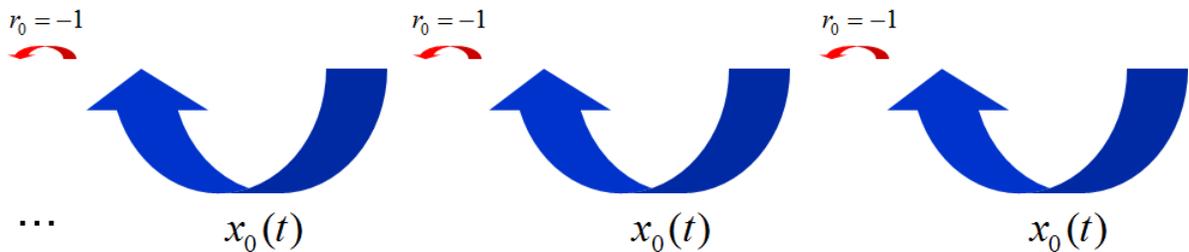
As múltiplas de primeira ordem, são modeladas pela convolução da resposta impulsiva com ela mesma, expressa por:

$$m_1(t) = -x_0(t) * x_0(t), \quad (4.1)$$

o sinal de menos é introduzido para descrever a reflexão contra a superfície livre.

As múltiplas de primeira ordem chegando na superfície livre, serão espalhadas novamente, retornando a subsuperfície. Assim,  $m_1(t)$  irá atuar como uma nova fonte para as múltiplas de segunda ordem e assim por diante. Um desenho esquemático desse processo é mostrado na Figura 4.2.

Figura 4.2: Após a reflexão na superfície, a resposta  $x_0(t)$ , torna-se múltipla de primeira ordem. Após outra reflexão novamente na superfície, ela se torna múltipla de segunda ordem e assim por diante.



Fonte: Baseado em Verschuur (2006).

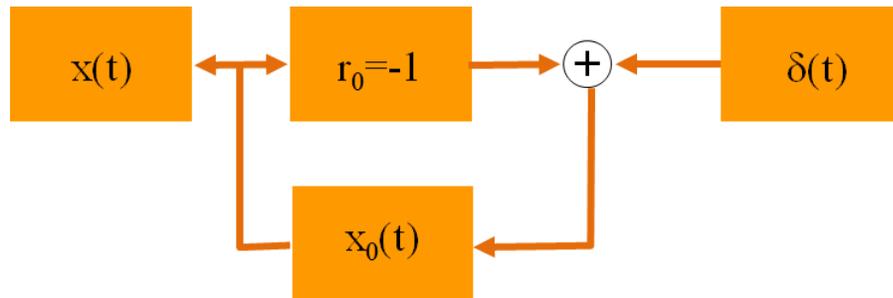
A resposta total  $x(t)$  é dada pela soma entre a resposta primária  $x_0(t)$  e todas as múltiplas de superfície,  $m_1(t) + m_2(t) + m_3(t) + \dots$ :

$$x(t) = x_0(t) + m_1(t) + m_2(t) + m_3(t) + \dots \quad (4.2)$$

$$x(t) = x_0(t) - x_0(t) * x_0(t) + x_0(t) * x_0(t) * x_0(t) - x_0(t) * x_0(t) * x_0(t) * x_0(t) + \dots \quad (4.3)$$

Essa resposta pode também ser visualizada através do diagrama de *feedback* (BERKHOUT, 1999) apresentado na Figura 4.3.

Figura 4.3: A geração de múltiplas de superfície pode ser representada pelo diagrama de *feedback*.



Fonte: Baseado em Verschuur (2006).

A resposta total ao impulso,  $x(t)$ , é registrada na superfície, mas é também refletida de volta para a subsuperfície gerando múltiplas de alta ordem.

De acordo com o diagrama de *feedback*, Figura 4.3, pode-se determinar uma importante relação implícita entre a resposta impulsiva e todas as múltiplas. A resposta total descendente é: a fonte original (função delta) combinada com a resposta total das reflexões,  $x(t)$ , combinada com a resposta da terra, que é  $x_0(t)$ . Isso pode ser escrito por:

$$x(t) = x_0(t) * [\delta(t) - x(t)] = x_0(t) - x_0(t) * x(t). \quad (4.4)$$

Isso significa que toda múltipla de subsuperfície pode ser gerada pela convolução da resposta primária com a resposta total.

Todas essas equações podem também ser escritas no domínio da frequência, observando a propriedade de que uma convolução no domínio do tempo equivale a uma multiplicação no domínio da frequência. Assim, a equação (4.3) se escreve na forma:

$$x(f) = x_0(f) - x_0^2(f) + x_0^3(f) - x_0^4(f) + \dots \quad (4.5)$$

E a equação (4.4) pode ser escrita por:

$$x(f) = x_0(f)[\delta(f) - x(f)] = x_0(f) - x_0(f)x(f). \quad (4.6)$$

A equação (4.6) pode ser escrita explicitamente para  $x_0(f)$  por:

$$x_0(f) = x(f)[1 - x(f)]^{-1}. \quad (4.7)$$

Expandindo em série geométrica a equação acima, obtém-se:

$$x_0(f) = x(f) + x^2(f) + x^3(f) + x^4(f) + \dots \quad (4.8)$$

No domínio do tempo, a equação acima transforma-se na seguinte convolução:

$$x_0(t) = x(t) + x(t) * x(t) + x(t) * x(t) * x(t) + \dots \quad (4.9)$$

Essa equação mostra que o dado livre de múltiplas pode ser obtido através de sucessivas autoconvoluções do dado total registrado.

A equação (4.9), será trazida para um passo mais próximo da realidade física pela inclusão da assinatura da fonte, ao invés de se considerar a perfeita resposta impulsiva  $\delta(t)$ .

As respostas sem e com múltiplas podem ser escritas, respectivamente, por:

$$p_0(t) = x_0(t) * s(t) \leftrightarrow p_0(f) = x_0(f)s(f), \quad (4.10)$$

$$p(t) = x(t) * s(t) \leftrightarrow p(f) = x(f)s(f), \quad (4.11)$$

em que  $s(t)$  é a assinatura da fonte.

Agora a relação entre o dado com e sem múltipla, equação (4.4), é dada por:

$$p(t) = p_0(t) - x_0(t) * p(t). \quad (4.12)$$

Isso significa que para produzir as múltiplas relacionadas a superfície, é necessário que a resposta impulsiva real  $x_0(t)$  opere com o dado total  $p(t)$ .

Definindo o operador, no domínio do tempo, como  $a(t) * s(t) = -\delta(t)$  e no, domínio da frequência, como  $A(f) = -[s(f)]^{-1}$ , a equação (4.12) pode ser escrita em termos do dado com e sem múltiplas por:

$$p(t) = p_0(t) + a(t) * p_0(t) * p(t). \quad (4.13)$$

Isolando a resposta sem múltipla e expandindo em série obtém-se:

$$p_0(t) = p(t) - a(t) * p(t) * p(t) + a(t) * a(t) * p(t) * p(t) * p(t) - \dots \quad (4.14)$$

No domínio da frequência, a equação (4.14) é dada por:

$$p_0(f) = p(f) - A(f)p^2(f) + A^2(f)p^3(f) - A^3(f)p^4(f) + \dots \quad (4.15)$$

Novamente, o dado livre de múltiplas de superfície pode ser obtido por várias auto-convoluções do dado sísmico. Entretanto, neste caso, cada termo precisa de um filtro de deconvolução,  $A(f)$ , para retirar a *wavelet*<sup>1</sup> da fonte.

A teoria apresentada até agora é válida para o caso 1D.

Para o caso 2D discreto, a múltipla é modelada, no domínio da frequência, considerando apenas um par fonte-receptor por:

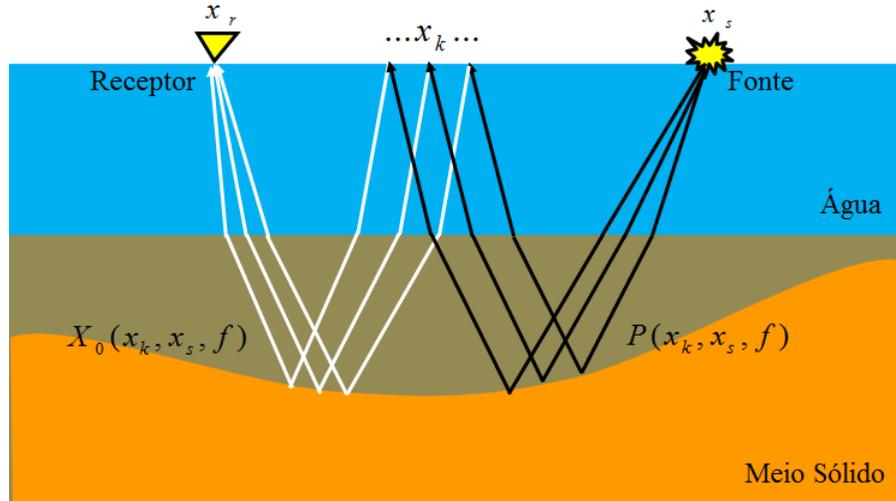
$$M_0(x_r, x_s, f) = - \sum_{x_k} X_0(x_r, x_s, f) P(x_k, x_s, f). \quad (4.16)$$

A equação (4.16) é um somatório considerando todas as trajetórias da múltipla entre o par fonte-receptor, em que  $x_s$  é a coordenada da fonte,  $x_r$  é a coordenada do receptor e  $x_k$  é a coordenada a qual se realiza o somatório (ver Figura 4.4).

---

<sup>1</sup>Assinatua da fonte sísmica.

Figura 4.4: Ilustração de uma múltipla de superfície livre de primeira ordem construída a partir da combinação de uma família de fontes do dado  $P$  com uma família de receptores de resposta impulsiva primária  $X_0(t)$ . Essas famílias são convolidas com outras famílias e somadas para chegar ao traço múltiplo somado.



Fonte: Baseado em Verschuur (2006).

Considerando mais pares de fonte-receptor, tem-se a múltipla de primeira ordem modelada por Berkhout (1999):

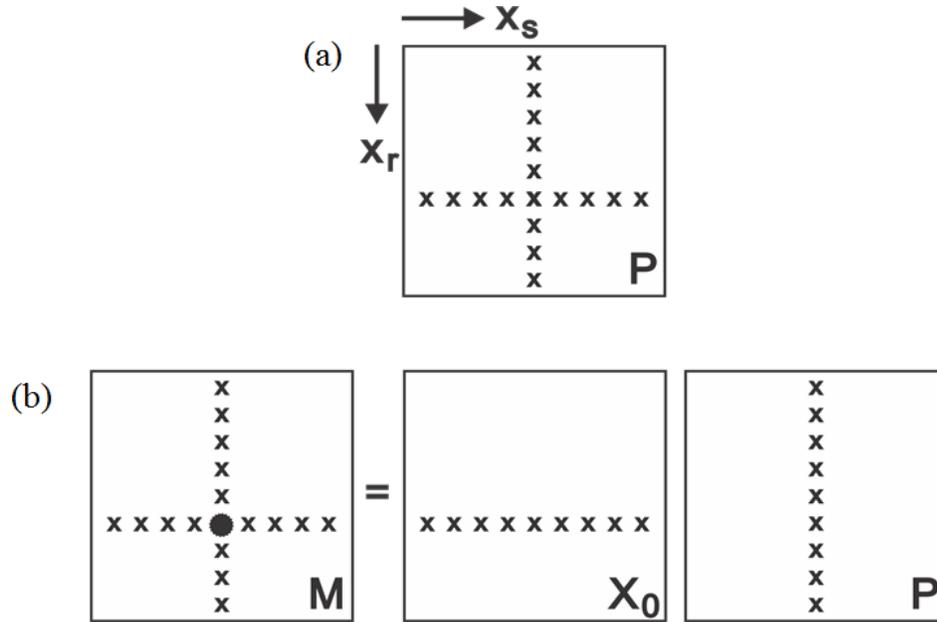
$$\mathbf{M}_0 = -\mathbf{X}_0\mathbf{P}, \quad (4.17)$$

em que a matriz  $\mathbf{P}$  representa uma componente de frequência do dado sísmico pré-empilhamento  $P(x_r, x_s, f)$ . Para construí-la, aplica-se uma transformada de Fourier para levar um registro de tiro para o domínio da frequência. Em seguida, seleciona-se um componente de frequência para se obter um vetor-coluna de números complexos, onde cada número representa a medida registrada em um receptor para esse tiro. O processo é repetido para todos os registros de tiro, e esses vetores-coluna, então, são organizados lado a lado, compondo a matriz  $\mathbf{P}$ .

Cada coluna da matriz, portanto, contém um registro de tiro monocromático (apenas uma frequência) do dado para cada tiro e cada linha contém uma família monocromática de receptor comum, conforme mostra a Figura 4.5.

Com o dado sísmico na forma matricial apresentado na Figura 4.5(a), a equação (4.16) representa um elemento da matriz de múltiplas preditas  $\mathbf{M}$ , a qual é calculada pela multiplicação da linha da matriz  $\mathbf{X}_0$  com a coluna da matriz  $\mathbf{P}$ , ilustrado em 4.5(b).

Figura 4.5: (a) Notação matricial de todos os dados sísmicos pré-empilhados no domínio da frequência. Cada componente de  $\mathbf{P}$  é dada por  $\mathbf{P}(x_f, x_s, f)$ . Cada coluna contém uma família de tiro comum monocromático e cada linha contém uma família de receptor monocromático. Cada ponto da matriz indica um número complexo o qual é a resposta sísmica para uma combinação fonte-receptor para uma dada frequência. (b) A múltipla predita pode ser escrita como uma multiplicação matricial. Uma componente resultante de  $\mathbf{M}$  é obtida pela combinação de uma linha da matriz  $\mathbf{X}_0$  com uma coluna da matriz  $\mathbf{P}_0$ .



Fonte: Baseado em Verschuur (2006).

A relação implícita entre o dado com e sem múltiplas para todos os pares de fonte-receptor de um levantamento 2D é dada por (VERSCHUUR, 2006):

$$\mathbf{P} = \mathbf{P}_0 + \mathbf{M}_0 = \mathbf{P}_0 - \mathbf{X}_0\mathbf{P}, \quad (4.18)$$

em que  $\mathbf{P}_0 = \mathbf{X}_0S(f)$  é a resposta sem as múltiplas de superfície.

A equação (4.18) pode ser reescrita como:

$$\mathbf{P}(f) = \mathbf{P}_0(f) + A(f)\mathbf{P}_0\mathbf{P}(f). \quad (4.19)$$

A resposta sem múltiplas é então:

$$\mathbf{P}_0(f) = \mathbf{P}[1 + A(f)\mathbf{P}(f)]^{-1}, \quad (4.20)$$

expandindo:

$$\mathbf{P}_0 = \mathbf{P} - A(f)\mathbf{P}^2 + A^2(f)\mathbf{P}^3 - A^3(f)\mathbf{P}^4 + \dots, \quad (4.21)$$

em que  $A(f)$  é o operador de superfície e funciona como um filtro de deconvolução, devendo multiplicar os termos  $\mathbf{P}^2$ ,  $\mathbf{P}^3$ , etc.

Para a determinação da resposta sem múltipla, é necessário a estimativa dos fatores  $A(f)$ ,  $A^2(f)$ ,  $A^3(f)$ , ... para cada frequência. Essa estimativa não é linear. Um pequeno erro na assinatura da fonte pode alterar o resultado do imageamento e levar a erros graves de interpretação.

É portanto desejável que a estimativa seja linear. Berkhout e Verschuur (1997) propuseram o SRME iterativo que consiste na seguinte relação implícita:

$$\mathbf{P}_0 = \mathbf{P} - A(f)\mathbf{P}_0\mathbf{P}. \quad (4.22)$$

A equação (4.22) requer que para se calcular o campo livre de múltipla, ele deve ser conhecido a priori. Isso pode ser resolvido da seguinte forma: inicialmente utiliza-se uma aproximação do campo livre de múltipla e a expressão na equação (4.22) é atualizada a cada estimativa no processo iterativo dado por:

$$\mathbf{P}_0^{(i+1)} = \mathbf{P} - A(f)\mathbf{P}_0^{(i)}\mathbf{P}. \quad (4.23)$$

Uma estimativa inicial do campo livre de múltipla é dado por:

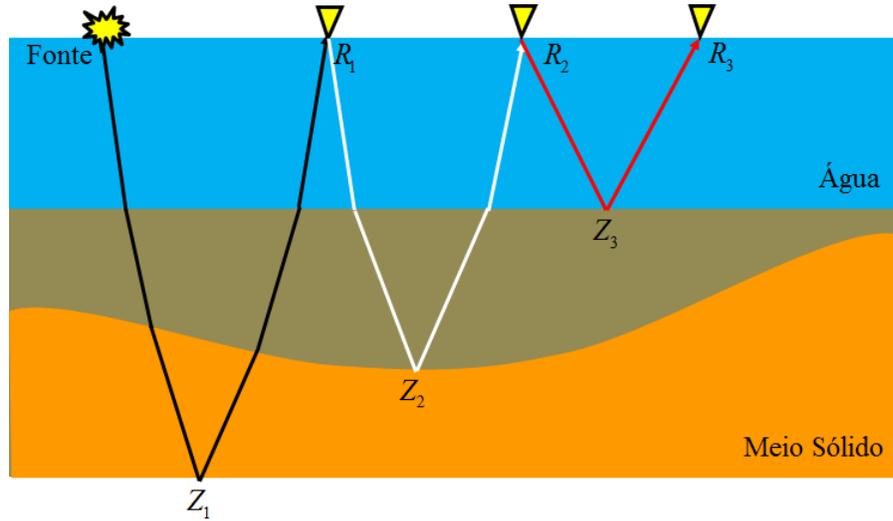
$$\mathbf{P}_0^{(0)} = \mathbf{P}. \quad (4.24)$$

Para este trabalho, cujo objetivo é a estimativa da múltipla, esta é obtida após a estimativa do dado sem múltipla, subtraído do dado registrado.

### 4.3 CONDIÇÃO DE IMAGEM PARA A MIGRAÇÃO RTM UTILIZANDO MÚLTIPLAS

A utilização das múltiplas de superfície é ilustrada na Figura 4.6.

Figura 4.6: Ilustração da utilização das múltiplas no RTM.



Fonte: Baseado em Liu et al. (2011).

De acordo com a Figura acima, as múltiplas de primeira ordem registradas em  $R_2$  são extrapoladas inversamente no tempo e sofrem correlação cruzada em  $Z_2$  com o campo de ondas registrado em  $R_1$  que sofre extrapolação direta. A múltipla de segunda ordem registrada em  $R_3$  pode, então, ser extrapolada inversamente no tempo e sofre a correlação cruzada com o campo da múltipla de primeira ordem registrada em  $R_2$ , que sofreu extrapolação direta até  $Z_3$ .

Cada múltipla pode ser imageada pela correlação cruzada com outra múltipla a qual é uma ordem maior ou menor, ou é ainda uma reflexão primária.

Aos campos extrapolados é aplicada a correlação cruzada como condição de imagem.

A imagem  $I$  é dada, então, pela correlação entre esses dois campos, para todos os tempos de registro:

$$I(x, z, t) = \sum_{t=0}^{t_{max}} \{P_F(x, z, t) + M_F(x, z, t)\} \otimes M_R(x, z, t), \quad (4.25)$$

em que  $I(x, z, t)$  é a imagem no ponto  $(x, z, t)$  e  $t_{max}$  é o tempo total de registro. O dado total incluindo primárias  $P_F(x, z, t)$  e múltiplas  $M_F(x, z, t)$  é diretamente extrapolado, agindo como campo da fonte, enquanto as múltiplas  $M_R(x, z, t)$  são inversamente extrapoladas, agindo como campo do receptor.

Sabendo que uma múltipla de superfície pode ser refletida mais de uma vez na superfície da água, então ela é composta de várias ordens de múltiplas, como segue:

$$M(x, z, t) = M^1(x, z, t) + M^2(x, z, t) + M^3(x, z, t) + \dots, \quad (4.26)$$

em que  $M^1(x, z, t)$ ,  $M^2(x, z, t)$  e  $M^3(x, z, t)$  são as múltiplas de primeira, segunda e terceira ordem, respectivamente. Expandindo a equação (4.25), obtém-se:

$$I(x, z, t) = \sum_{t=0}^{t_{max}} \begin{bmatrix} P_F^0(x, z, t) + \\ M_F^1(x, z, t) + \\ M_F^2(x, z, t) + \\ M_F^3(x, z, t) + \\ \dots \end{bmatrix} \otimes \begin{bmatrix} M_R^1(x, z, t) + \\ M_R^2(x, z, t) + \\ M_R^3(x, z, t) + \\ \dots \end{bmatrix} \quad (4.27)$$

E expandindo a equação (4.27), obtemos, então, a equação (4.28):

$$\begin{aligned} I(x, z, t) = \sum_{t=0}^{t_{max}} \{ & P_F(x, z, t) \otimes [M_R^1(x, z, t) + M_R^2(x, z, t) + M_R^3(x, z, t) + \dots] + \\ & M_F^1(x, z, t) \otimes [M_R^1(x, z, t) + M_R^2(x, z, t) + M_R^3(x, z, t) + \dots] + \\ & M_F^2(x, z, t) \otimes [M_R^1(x, z, t) + M_R^2(x, z, t) + M_R^3(x, z, t) + \dots] + \\ & M_F^3(x, z, t) \otimes [M_R^1(x, z, t) + M_R^2(x, z, t) + M_R^3(x, z, t) + \dots] \}. \end{aligned} \quad (4.28)$$

Pode-se reorganizar a equação acima em três diferentes somatórios: no primeiro, são reunidas as correlações entre os campos da fonte de ordem  $n$  e os campos do receptor de ordem  $n + 1$  (primárias com múltiplas de primeira ordem, múltiplas de primeira ordem com múltiplas de segunda ordem, e assim por diante); no segundo, são reunidas as correlações entre os campos da fonte de ordem  $n$  e os campos do receptor de ordem  $n + 2$  ou maior; no terceiro, são reunidas as correlações em que as ordens dos campos do receptor são iguais ou menores que a ordem dos campos da fonte. O resultado é a equação (4.29):

$$\begin{aligned}
I(x, z, t) = & \sum_{t=0}^{t_{max}} \left[ \begin{array}{l} P_F^0(x, z, t) \otimes M_R^1(x, z, t) + \\ M_F^1(x, z, t) \otimes M_R^2(x, z, t) + \\ M_F^2(x, z, t) \otimes M_R^3(x, z, t) + \\ \dots \end{array} \right] \\
& + \sum_{t=0}^{t_{max}} \left[ \begin{array}{l} P_F^0(x, z, t) \otimes M_R^2(x, z, t) + P_F^0(x, z, t) \otimes M_R^3(x, z, t) + \dots \\ M_F^1(x, z, t) \otimes M_R^3(x, z, t) + M_F^1(x, z, t) \otimes M_R^4(x, z, t) + \dots \\ M_F^2(x, z, t) \otimes M_R^4(x, z, t) + M_F^2(x, z, t) \otimes M_R^5(x, z, t) + \dots \\ \dots \end{array} \right] \\
& + \sum_{t=0}^{t_{max}} \left[ \begin{array}{l} M_F^1(x, z, t) \otimes M_R^1(x, z, t) + \\ M_F^2(x, z, t) \otimes M_R^1(x, z, t) + M_F^2(x, z, t) \otimes M_R^2(x, z, t) + \\ M_F^3(x, z, t) \otimes M_R^1(x, z, t) + M_F^3(x, z, t) \otimes M_R^2(x, z, t) + \dots \\ \dots \end{array} \right]. \tag{4.29}
\end{aligned}$$

No primeiro somatório da equação (4.29), estão os termos que formam a real imagem da subsuperfície. O segundo somatório produzirá artefatos indesejados e o terceiro simplesmente não formará imagem alguma, já que eventos no campo da fonte de ordem  $n$  não se correlacionam com eventos no campo do receptor de ordem igual ou menor, pois esses eventos nunca se encontram na propagação dos campos (LIU et al., 2011).

A migração RTM utilizando múltiplas se mostrou um método poderoso em dados cuja estrutura é complexa como o caso de regiões com domo de sal. Através desse tipo de migração, regiões que eram mal iluminadas com a migração convencional podem ser imageadas.

No RTM de múltiplas é necessário a predição das múltiplas, sem necessidade de atenuá-las, o que em geral é uma tarefa difícil. A grande desvantagem dessa metodologia é que múltiplas de alta ordem ao sofrerem correlação cruzada com outras múltiplas de alta ordem geram artefatos na imagem migrada.

## 5 TESTES NUMÉRICOS

Neste capítulo, o RTM utilizando múltiplas é aplicado aos dados de múltiplas de superfície livre obtidas do modelo sintético Sigsbee2B, conforme o método apresentado em Liu et al. (2011).

Os dados sísmicos foram processados utilizando o ProMAX e as múltiplas de superfície livre foram preditas através do SRME (VERSCHUUR, 2006). O método foi programado em Fortran 90, aplicado e a imagem foi processada em ambientes *Seismic Unix* e Matlab.

A aplicação do RTM usando múltiplas foi realizada em duas etapas:

- I. As múltiplas de superfície livre foram estimadas do dado original;
- II. Aplicação do RTM aos dados de múltipla.

Na Figura 5.1 é apresentado o fluxograma de processamento aplicado ao dado até a obtenção da imagem migrada final.

Figura 5.1: Fluxograma do processamento do dado.



Fonte: A autora.

De acordo com o fluxograma de processamento apresentado na Figura 5.1, antes de fazer a separação de múltiplas e primárias, no ProMAX, a geometria foi carregada ao dado de acordo com o *header* do mesmo.

A próxima etapa foi a conversão do modelo de velocidade, de intervalar em profundidade para velocidade RMS. Essa conversão de velocidade ocorre no fluxo porque mesmo o SRME sendo um método baseado na periodicidade e preditividade (teoricamente não precisaria de informação do modelo de velocidade em subsuperfície) há necessidade dos dados

estarem organizados na forma *split-spread* para pequenos afastamentos. Para a realização da transformação, os dados medidos em apenas um lado da fonte são extrapolados para dados medidos nos dois lados da fonte, e, para isso, a velocidade RMS se torna necessária.

Na etapa seguinte do processamento foi aplicado ao dado o método do SRME para a separação de múltiplas e primárias. Para isso, é necessário realizar predição das múltiplas, a partir do campo de onda. Com a ferramenta SRME, os horizontes de múltiplas de superfície livre são previstos no tempo. Neste método, podemos informar os horizontes de entrada que podem gerar múltiplas. No caso específico das múltiplas de superfície livre, o único horizonte de entrada é o fundo oceânico. E, finalmente, informa-se o tipo de múltipla que iremos predizer.

Em seguida, o modelo de velocidade foi convertido novamente, para intervalar em profundidade, pré-requisito para uma migração em profundidade, como é o caso do RTM.

Na etapa seguinte, o dado foi extraído do ProMAX e convertido do formato *seg-y* para o formato *SU*. Logo após, foi aplicado o programa de migração pré-empilhamento em profundidade RTM, desenvolvido em Fortran 90, para reflexões primárias e múltiplas.

Para aumentar a razão sinal-ruído da migração RTM utilizando reflexões múltiplas, foi feita a soma das seções entre o resultado da migração RTM utilizando apenas reflexões primárias e o resultado da migração utilizando apenas as reflexões múltiplas. Essa etapa foi realizada em ambiente *SU*.

A próxima etapa consistiu de realizar a edição de traços, mais precisamente o *top-mute*, para eliminar o ruído relacionado a camada de água. Por fim, foi feita a conversão da unidade do dado de pés para metros e quilômetros. Essas duas últimas etapas foram realizadas no Matlab.

O modelo utilizado é o Sigsbee2B, que é um dado sintético, marinho e 2D, produzido pela SMAART JV (Equipe de Redução e Atenuação de Múltiplas Abaixo do Sal). Foi desenvolvido para testar tratamentos de reflexões múltiplas e a efetividade de diferentes métodos de migração abaixo de domos de sal (PAFFENHOLZ et al., 2002).

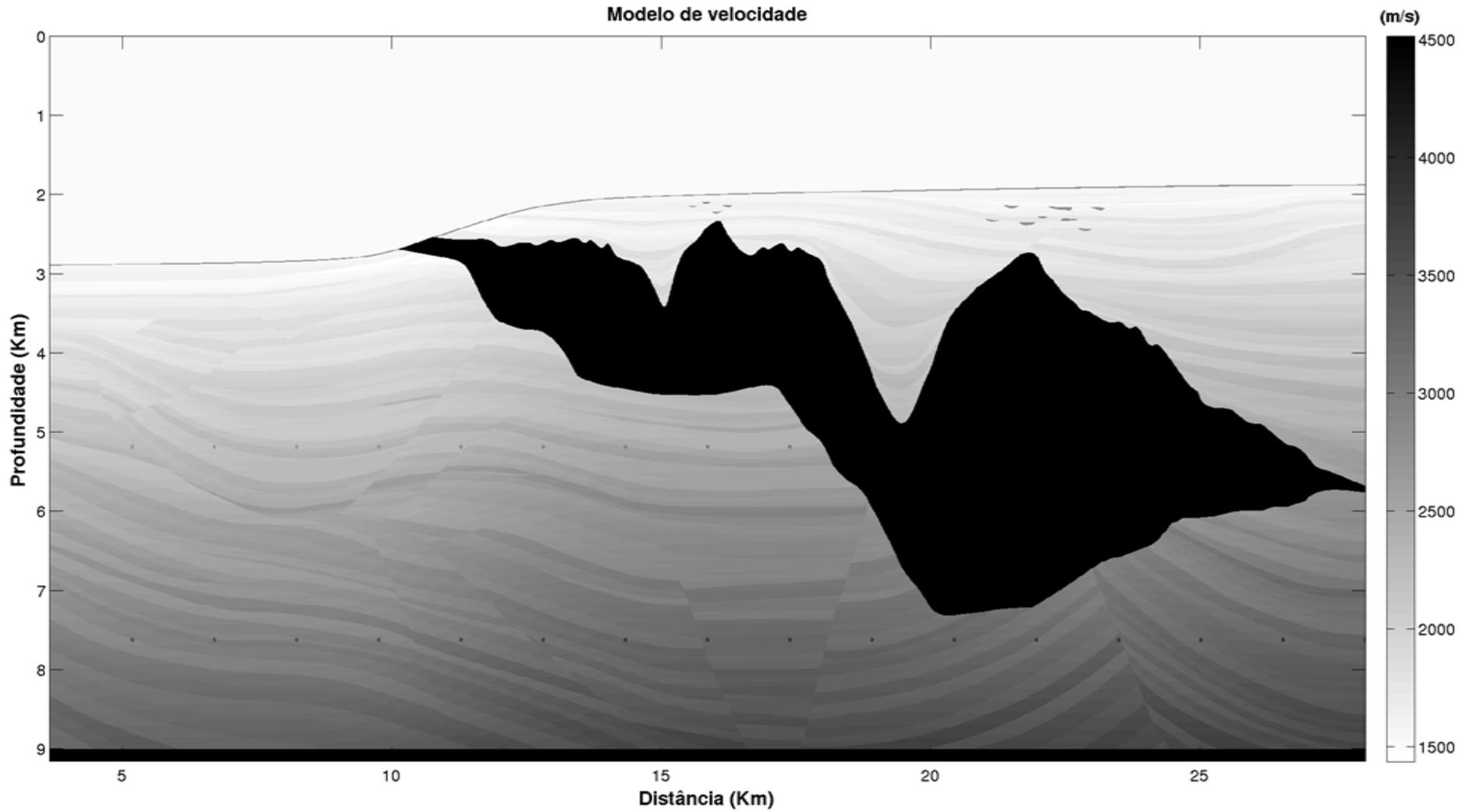
Esse modelo simula complexas estruturas geológicas observadas em águas profundas do Golfo do México. Representa um corpo de sal em uma sequência sedimentar com falhas, normais e de empurrão, e pontos difratores.

O contraste de velocidade nas interfaces do fundo da água, topo e base do sal, são capazes de gerar fortes múltiplas de superfície livre e múltiplas internas. Além disso, a geometria do corpo de sal gera *moveouts* não-hiperbólicos e imagens com baixa razão sinal-ruído a partir

da migração convencional de reflexões primárias.

O domo de sal está incorporado dentro da seção sedimentar, cuja velocidade varia de 1437 m/s até aproximadamente 4511 m/s, e apresenta uma profundidade de 9,14 km, conforme mostra a Figura 5.2.

Figura 5.2: Modelo de velocidade estratigráfico do dado Sigsbee2B.



Fonte: A autora.

Este dado foi simulado como um levantamento com arraste de cabo marinho, com geometria de aquisição *end-on*. O modelo de velocidade é composto de 3201 (em x) por 1201 (em z – profundidade) pontos na malha, com intervalos de malha de 7.62 m, em x, e 7.62 m, em z. Os detalhes da geometria do levantamento estão na Tabela 5.1.

Tabela 5.1: Parâmetros da configuração do levantamento do modelo Sigsbee2B.

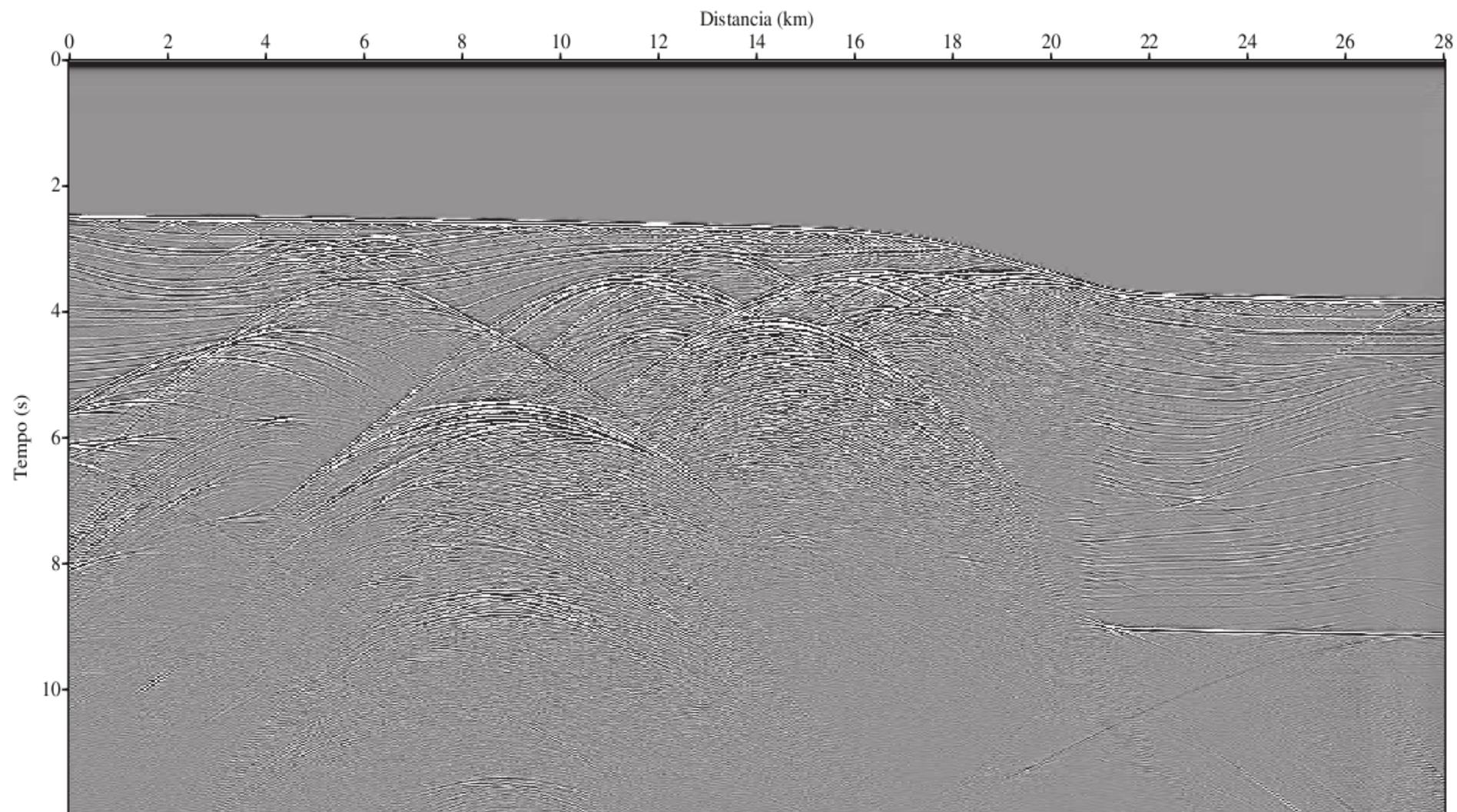
Número de receptores	348
Intervalo entre receptores	22.86 m
Número de tiros	496
Intervalo entre tiros	45.76 m
Profundidade do receptor	7.62 m
Profundidade da fonte	7.62 m
Afastamento mínimo	0 m
Afastamento máximo	7932.4 m
Intervalo de amostragem	8 ms
Tempo total do registro	12 s

Para testar vários algoritmos de migração, uma segunda versão do Sigsbee2B (FS) foi gerado sem múltiplas relacionadas a superfície livre, o Sigsbee2B (NFS).

Para efeito de comparação, o RTM foi aplicado a três conjuntos de dados: o primeiro foi aos dados apenas com as reflexões primárias (Sigsbee2B NFS, Figura 5.3); o segundo conjunto era o constituído do dado total registrado, com reflexões primárias e múltiplas, (Sigsbee2B FS, Figura 5.4); e o terceiro conjunto era constituído de apenas os dados de múltiplas (dado estimado com a técnica SRME, Figura 5.5).

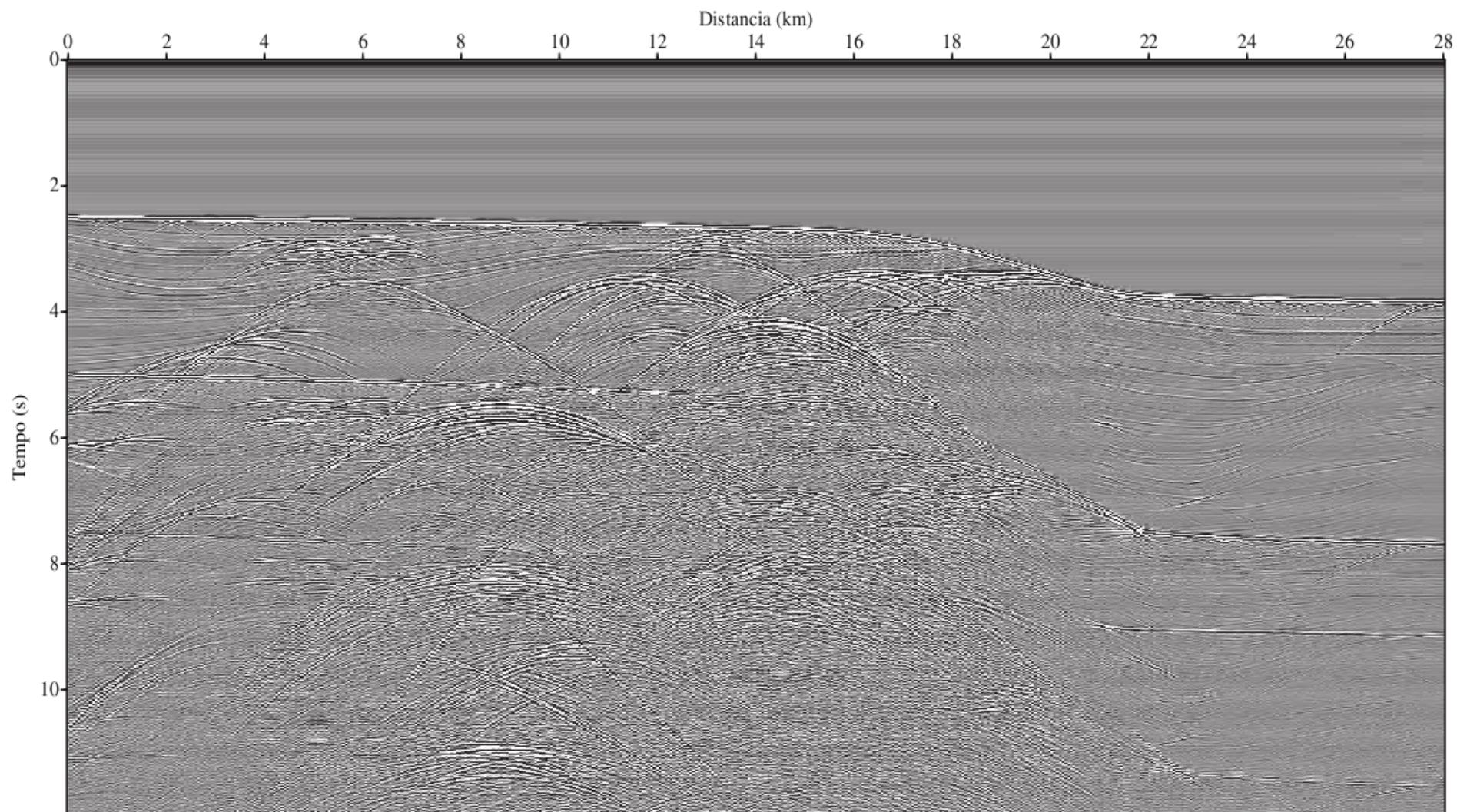
Os resultados do RTM aplicado aos três conjuntos de dados são apresentados nas Figuras 5.6 (RTM utilizando apenas reflexões primárias), 5.7 (RTM utilizando todo o dado, com reflexões múltiplas e primárias) e 5.8 (RTM utilizando apenas as reflexões múltiplas). As Figuras 5.9 e 5.10 são os resultados da soma das imagens migradas obtidas em 5.6 e 5.8.

Figura 5.3: Dado, organizado em afastamento mínimo, contendo apenas reflexões primárias.



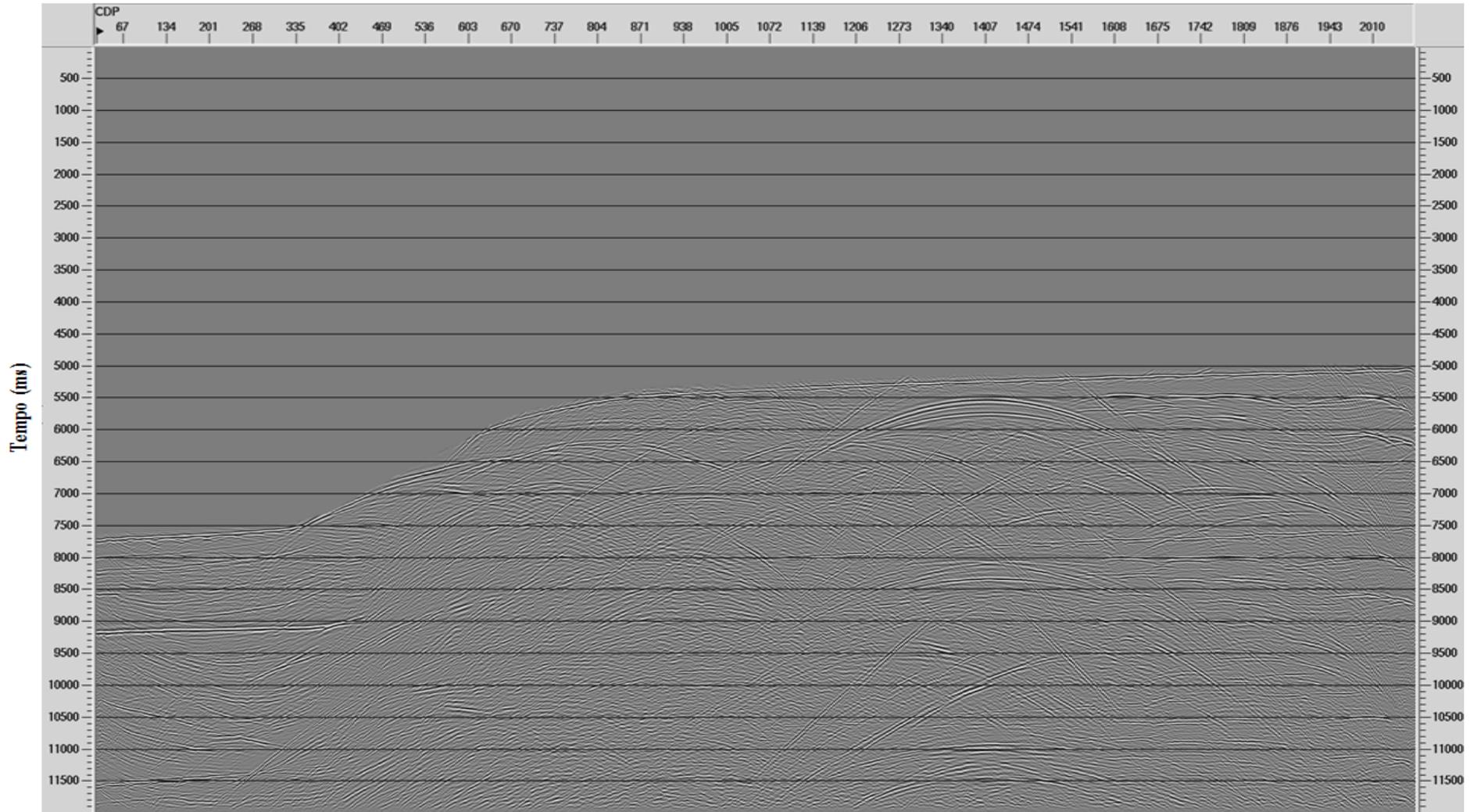
Fonte: A autora.

Figura 5.4: Dado total registrado, organizado em afastamento mínimo, contendo reflexões primárias e múltiplas.



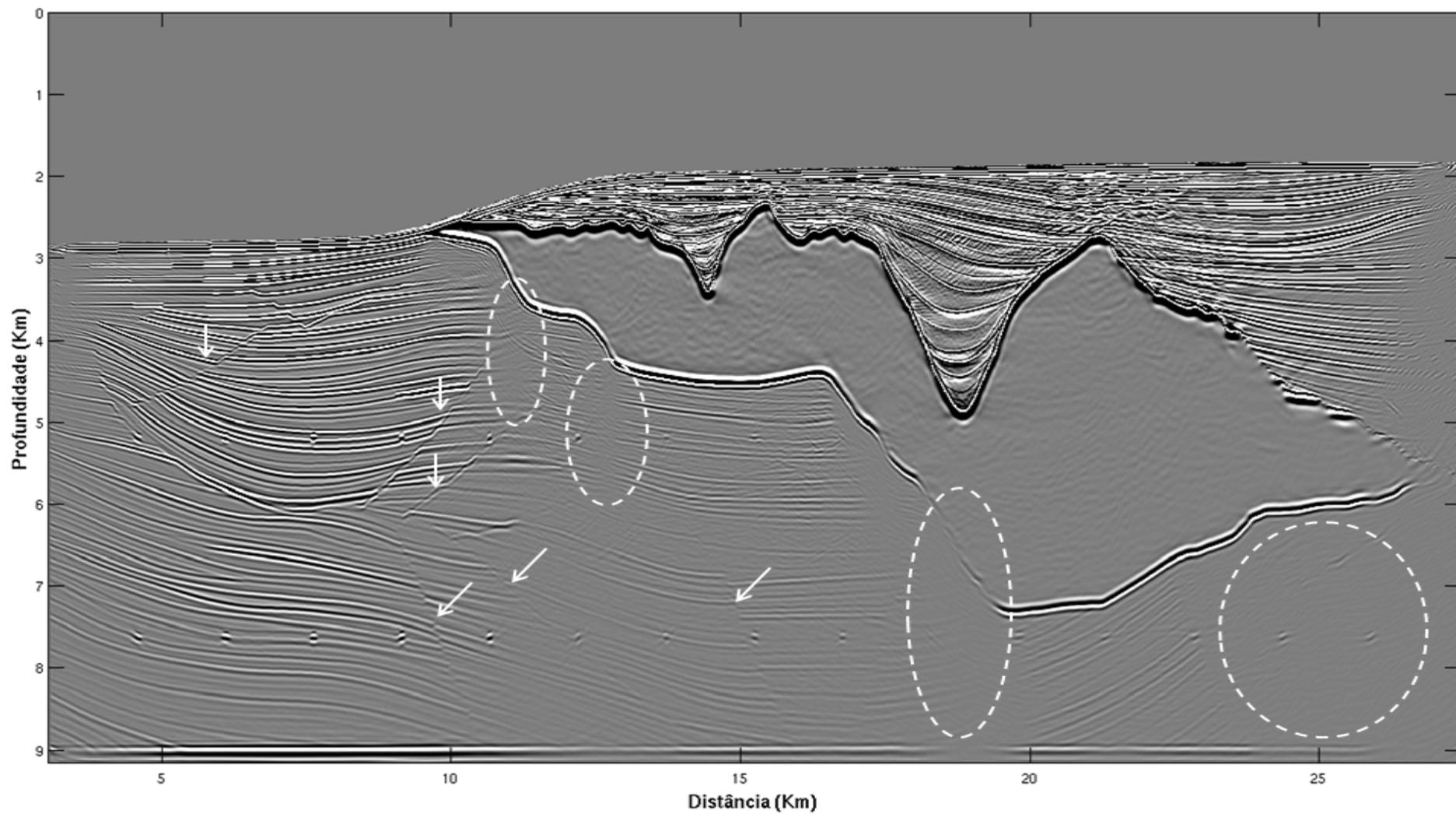
Fonte: A autora.

Figura 5.5: Múltiplas de superfície livre previstas do dado total, no ProMAX, a partir do método SRME.



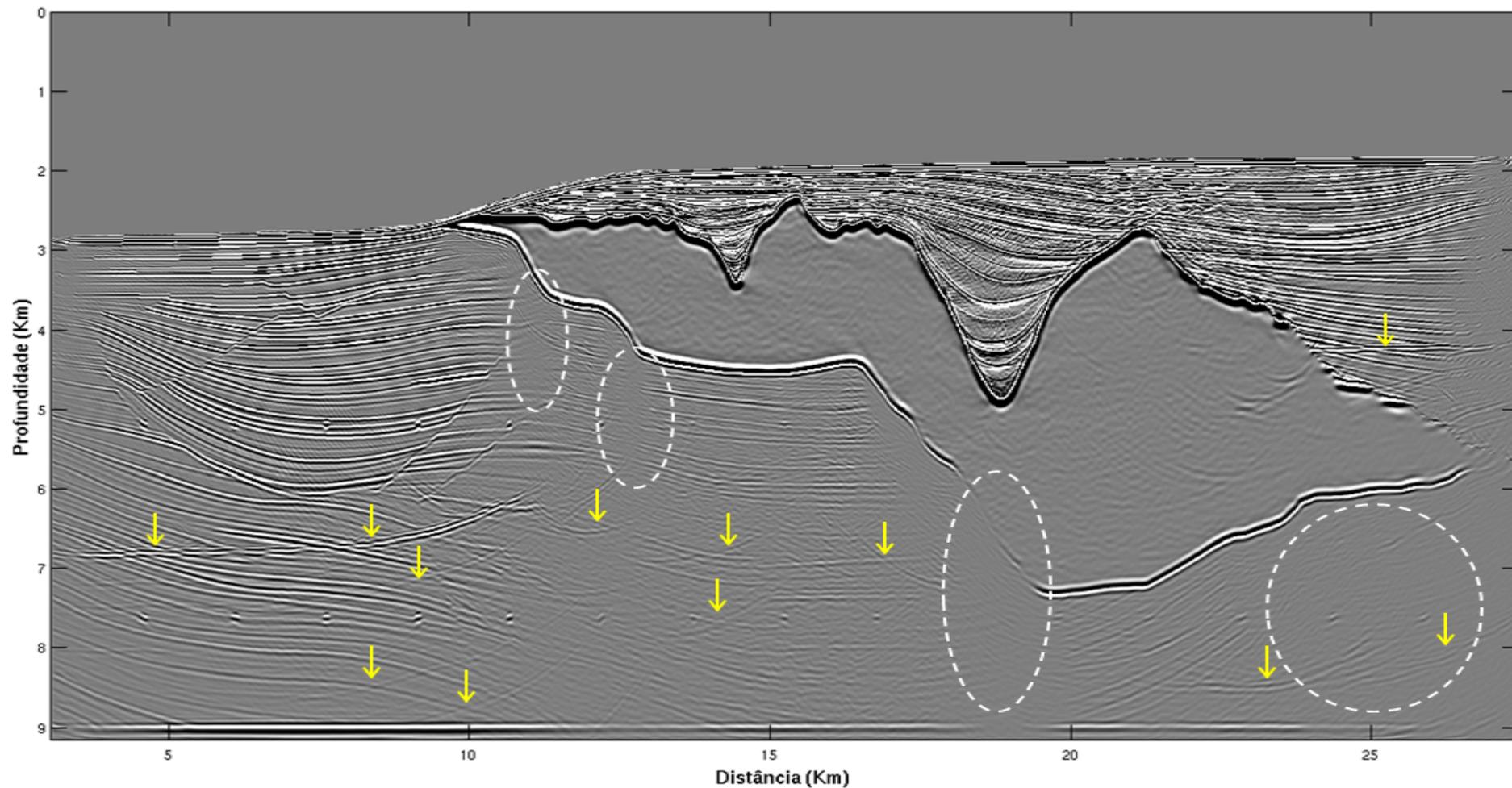
Fonte: A autora.

Figura 5.6: Migração reversa no tempo convencional utilizando apenas reflexões primárias. Nota-se regiões onde não há nenhuma informação, sendo assinaladas por elipses brancas. Falhas e interfaces são imageadas e indicadas por setas brancas.



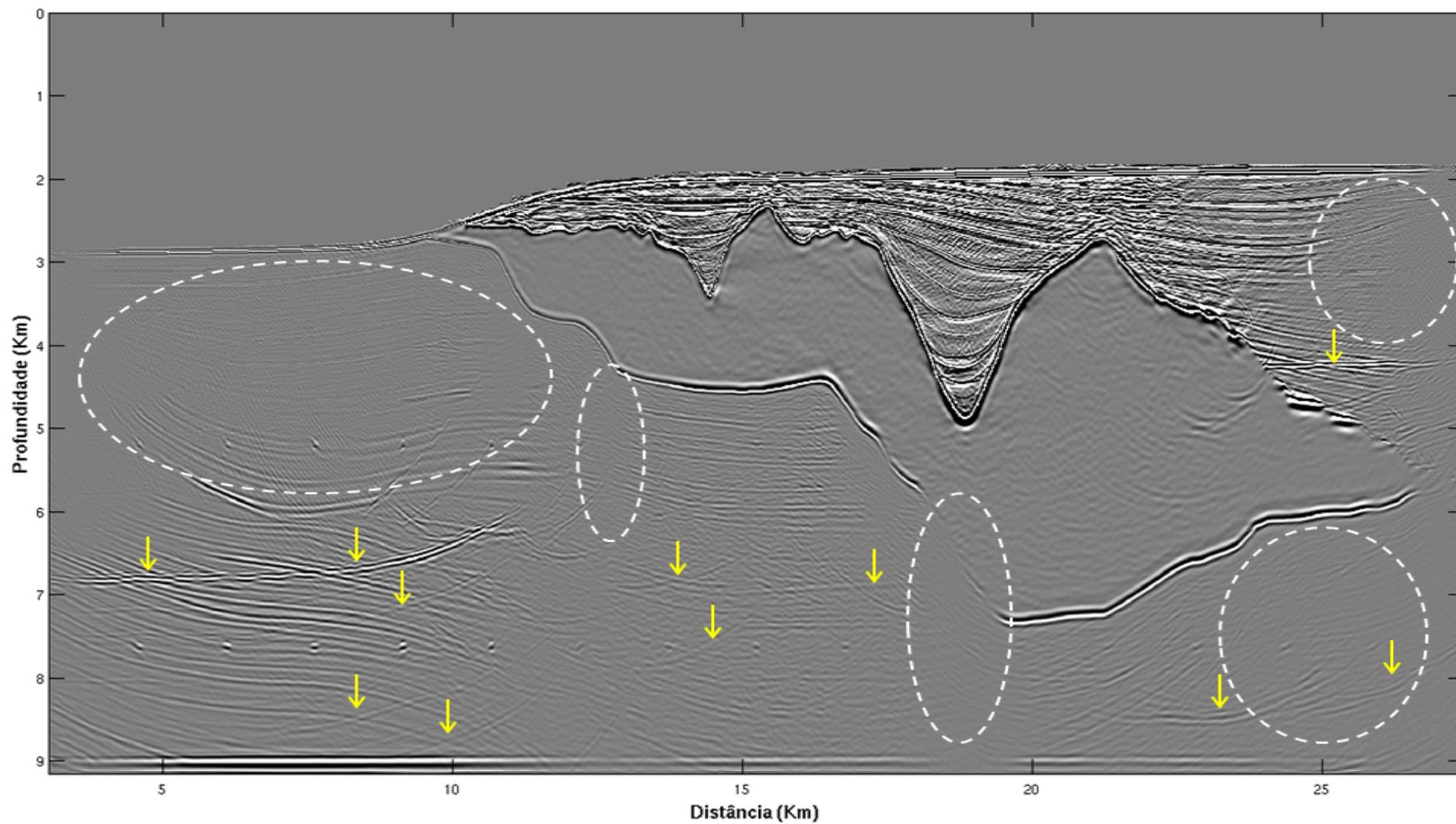
Fonte: A autora.

Figura 5.7: Migração reversa no tempo utilizando o dado contendo reflexões primárias e múltiplas, sem nenhum tipo de processamento sísmico. Ainda não se tem informações em regiões abaixo do domo de sal (elipses brancas). Além disso, a imagem contém fortes artefatos indicados por setas amarelas.



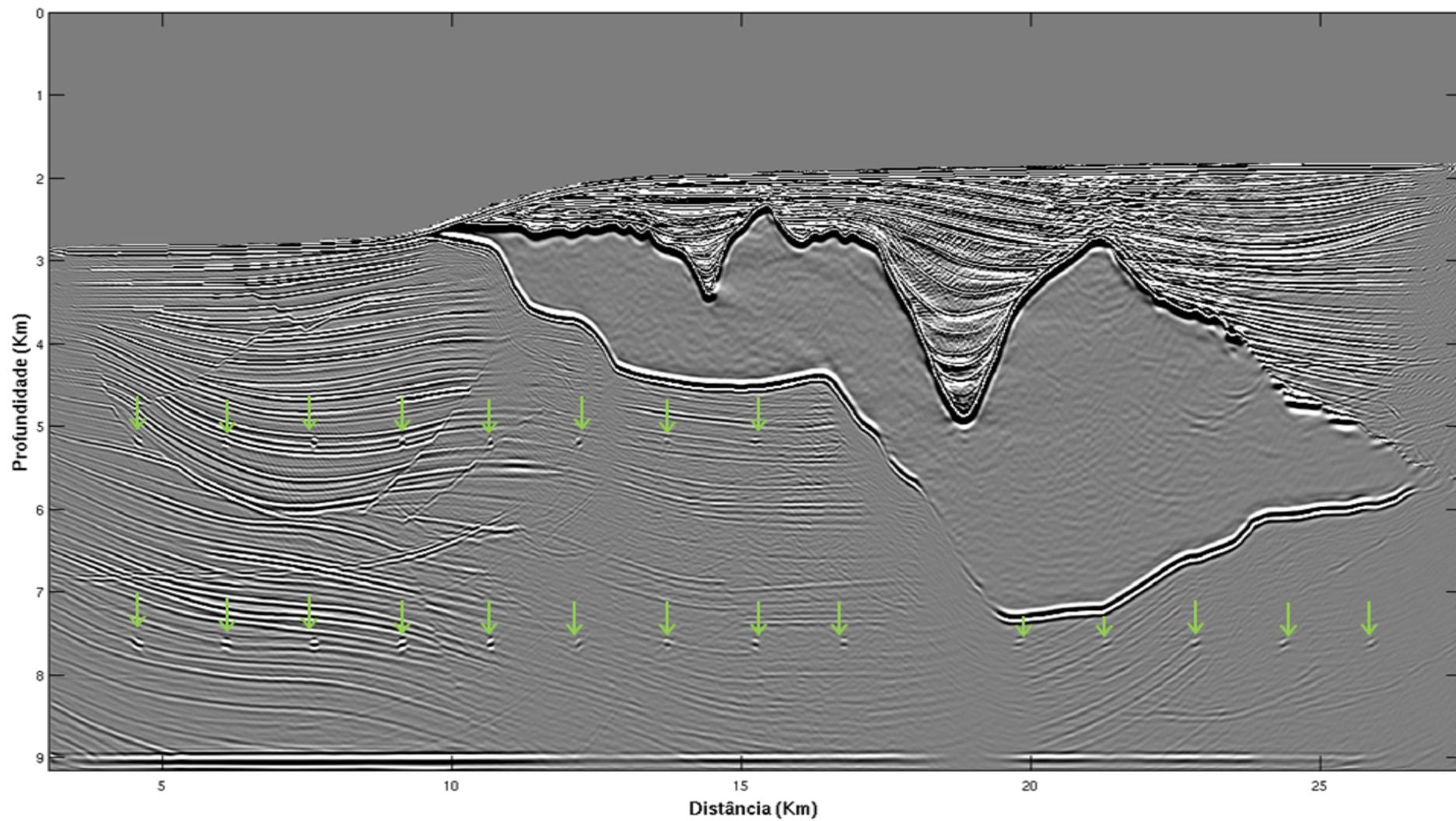
Fonte: A autora.

Figura 5.8: Migração reversa no tempo utilizando apenas as reflexões múltiplas. Regiões sem nenhuma informação são indicadas por elipses brancas. A imagem também apresenta fortes artefatos indicados por setas amarelas.



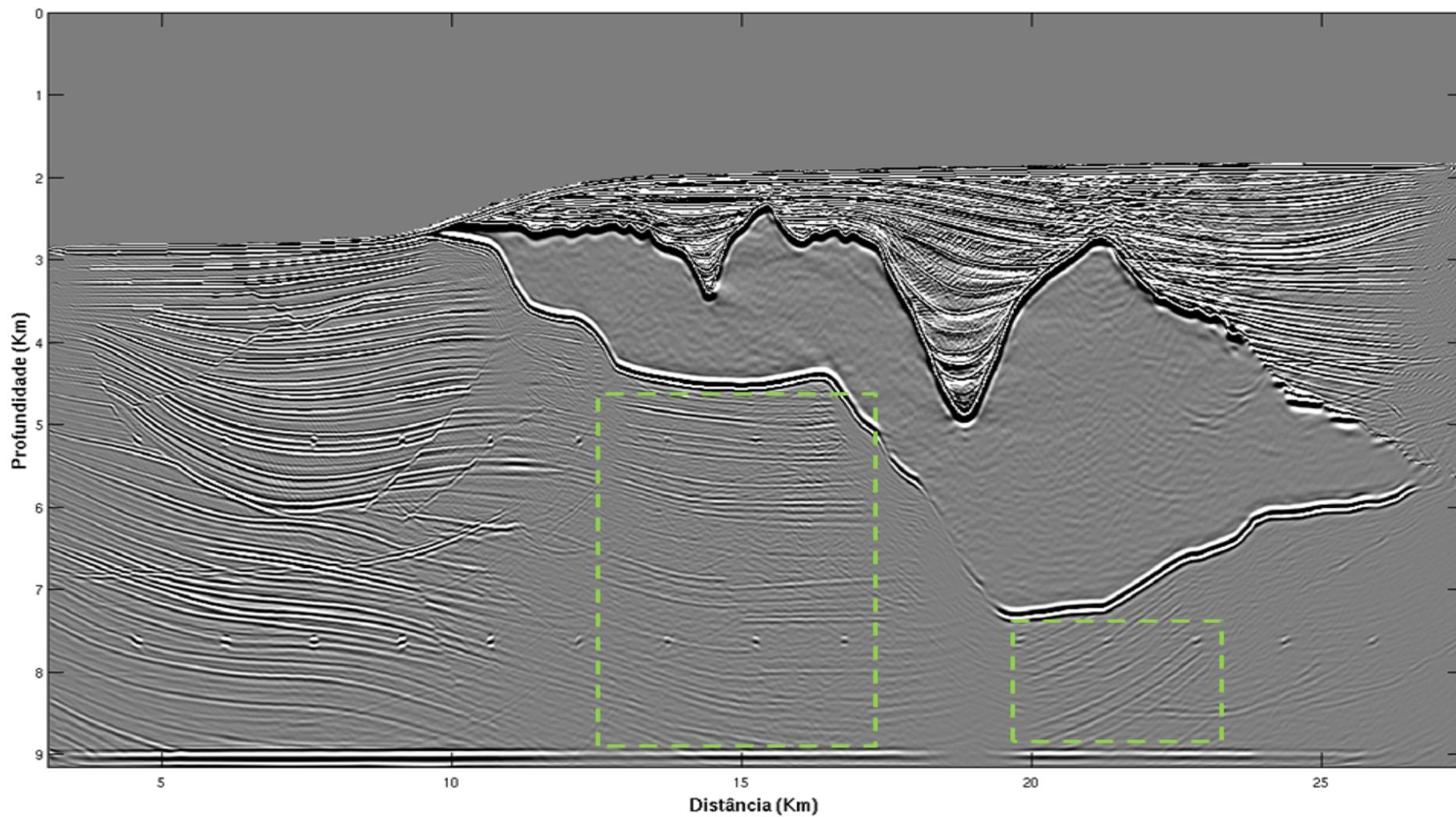
Fonte: A autora.

Figura 5.9: Migração reversa no tempo resultante da soma entre as migrações somente de primárias e apenas de múltiplas. Nota-se que houve um melhor imageamento dos pontos difratores indicados pelas setas verdes.



Fonte: A autora.

Figura 5.10: Migração reversa no tempo resultante da soma entre as migrações só de primárias e só de múltiplas. Nota-se que houve um resultado mais robusto do imageamento abaixo do domo de sal indicados pelas áreas retangulares verdes.



Fonte: A autora.

De acordo com essas Figuras, podemos fazer as seguintes observações:

Na Figura 5.6 existem regiões onde não há nenhuma informação (áreas dentro das elipses brancas). Alguns dos pontos difratores, que estão localizados entre 7 e 8 km, podem ser visualizados, entretanto os pontos logo abaixo do domo de sal aparecem bastante atenuados. Ainda na Figura 5.6, é possível ver algumas falhas e interfaces (na Figura 5.6 estão assinaladas por setas brancas). De uma maneira geral, a utilização apenas das reflexões primárias não foi capaz de imagear satisfatoriamente as regiões abaixo do sal.

Na Figura 5.7, as regiões abaixo do sal onde não se tem informações se mantêm como na Figura 5.6 (regiões dentro das elipses brancas em 5.7). Os pontos difratores logo abaixo do domo não são visualizados. Além disso, nessa migração verifica-se a presença de artefatos entre 6 e 7 km (setas amarelas). Acredita-se que a provável explicação para esses ruídos é que no processo de correlação, usado como condição de imagem, pode gerar artefatos causados pela correlação de eventos não correlacionados a reflexões (MUIJS et al., 2007).

Assim, verifica-se que como na migração só das primárias (Figura 5.6), o resultado da migração utilizando primárias e múltiplas, sem nenhum tipo de processamento (Figura 5.7), teve problemas de imagear abaixo do sal.

Na Figura 5.8 é apresentado o imageamento utilizando apenas as reflexões múltiplas. Assim como nas Figuras 5.6 e 5.7, os pontos difratores abaixo do domo de sal não são visualizados. Além disso, não se tem informações nem em regiões abaixo do domo de sal nem na parte rasa da seção (elipses brancas). Observa-se, também, assim como na Figura 5.7, a presença de artefatos, indicados por setas amarelas. Portanto, a utilização apenas das reflexões múltiplas apresentou baixa razão sinal-ruído e não foi capaz de imagear satisfatoriamente não só as regiões abaixo do domo de sal, como também a parte rasa da seção.

Para aumentar a razão sinal-ruído da migração RTM utilizando reflexões múltiplas (Figura 5.8), o resultado dessa migração foi somado ao resultado da migração RTM utilizando apenas as reflexões primárias (Figura 5.6). O resultado são as Figuras 5.9 e 5.10.

Apesar das Figuras 5.9 e 5.10 também sofrerem com artefatos criados por múltiplas internas e de superfície, tal como as Figuras 5.7 e 5.8, observa-se que elas obtiveram uma imagem mais precisa da subsuperfície, em dois aspectos fundamentais.

O primeiro deles é que a migração de reflexões múltiplas conseguiu imagear de modo mais efetivo os pontos difratores, ou seja, os pontos de espalhamento de energia, indicados pelas setas verdes na Figura 5.9.

Em segundo lugar, conforme mostra a Figura 5.10, a migração de múltiplas obteve uma

imagem mais robusta da subsuperfície, inclusive embaixo do domo de sal, região indicada pela área retangular verde da Figura 5.10.

Comparando a Figura 5.6 (migração utilizando reflexões primárias) com as Figuras 5.9 e 5.10 (migração utilizando reflexões múltiplas), observa-se que apesar da migração de reflexões primárias ter conseguido imagear melhor as falhas estruturais, a migração de reflexões múltiplas obteve uma imagem mais precisa da subsuperfície e um melhor imageamento embaixo do domo de sal. Além disso, imageou de modo mais satisfatório também os pontos difratores da subsuperfície. Sendo assim, verifica-se que a migração reversa no tempo de múltiplas pode ser uma ferramenta poderosa para fornecer uma maior iluminação de estruturas abaixo do sal.

Apesar do resultado utilizando múltiplas apresentar áreas que são mal iluminadas utilizando apenas reflexões primárias, esse método também apresenta algumas desvantagens; os ruídos presentes na imagem final e o fato das múltiplas precisarem ser previamente separadas das primárias, para serem utilizadas como campo-receptor (LIU et al., 2011). Essa separação deve ser feita com algum método de eliminação de múltiplas de superfície, preferencialmente o SRME (VERSCHUUR, 2006). Além disso, a metodologia apresenta um elevado custo computacional e exige um modelo de velocidade preciso da subsuperfície.

## 6 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Considerando que reflexões múltiplas se propagam através da terra em um tempo pelo menos duas vezes maior que as reflexões primárias, iluminam áreas que não são cobertas por reflexões primárias e podem portanto ter informações complementares sobre a subsuperfície, trabalhos recentes tem utilizado esses eventos como sinal construtivo para o imageamento da subsuperfície.

Dependendo da forma de como a múltipla é utilizada no imageamento, pode-se organizar os métodos em três grupos.

O primeiro grupo reúne os métodos que transformam as múltiplas preditas nas chamadas pseudoprimárias para posterior migração. Nesse grupo, destaca-se o trabalho que aplica pseudoprimárias na migração fonte-receptor (SHAN, 2003), que faz uso da equação da Dupla Raiz Quadrada (DSR), e cujos resultados se mostraram satisfatórios.

Alternativamente, Shan (2003) também testou gerar as pseudoprimárias por deconvolução. Esse processo eleva o custo computacional, mas fornece um balanceamento de amplitude, reduz o ruído e melhora resolução vertical.

No segundo grupo estão todos os métodos que utilizam primárias e múltiplas de forma conjunta na migração. Nesse sentido, Muijs et al. (2007) desenvolveram o DIPMR (Imageamento em Profundidade utilizando Reflexões Primárias e Múltiplas), um método que realiza uma migração pré-empilhamento, em profundidade, utilizando conjuntamente primárias e múltiplas. Esse processo evita a geração de duas imagens - o que diminuiu o tempo e o custo computacional - e a necessidade de separação entre primárias e múltiplas.

A condição de imagem do método consiste em uma deconvolução 2D, sobre a frequência e o número de onda da fonte. Essa etapa apresenta um alto custo computacional, assim como a etapa de extrapolação dos campos de ondas ascendentes e descendentes, e exige que as reflexões coincidam não apenas no tempo, mas também para cada fonte iluminando determinado ponto em subsuperfície.

O método apresentou ótimos resultados, com uma significativa redução de ruídos, especialmente os relacionados ao processo de correlação, como o *crossstalk*. Além disso, as imagens apresentaram alta razão sinal-ruído e resolução vertical.

No terceiro e último grupo, as múltiplas são preditas do dado total registrado (que contém reflexões primárias e diversas ordens de múltiplas) e são utilizadas diretamente no processo de imageamento.

Nesse sentido, em Reiter et al. (1991) a migração de Kirchhoff pré-empilhamento em profundidade, baseada na equação do raio, é usada para imagear reflexões primárias e “múltiplas do receptor” separadamente. Em seguida, os dois dados migrados são somados, resultando em uma imagem combinada, com maior razão sinal-ruído e maior extensão lateral.

Entretanto, o método se restringe a dados de águas profundas, com aquisição OBH, e necessita de um apurado modelo de velocidade da subsuperfície. Além disso, exige um conhecimento preciso das propriedades do meio e apresenta um elevado custo computacional, devido a geração das três imagens, o que caracteriza sérias desvantagens do método proposto.

Na migração por correlação utilizando múltiplas (SHENG, 2001), correlaciona-se dois traços sísmicos (um registrando a primária e outro registrando a múltipla de superfície livre correspondente), para remover o termo de fase comum entre eles e manter apenas o termo referente à reflexão múltipla.

Esse processo, entretanto, gera alguns artefatos indesejados, resultantes principalmente da correlação entre as primárias. Por isso, a imagem da migração por correlação utilizando as múltiplas deve ser combinada com a imagem da migração Kirchhoff utilizando as primárias, a fim de atenuar esses artefatos e realçar os verdadeiros refletores.

Portanto, devem ser geradas três imagens (uma pela migração por correlação de reflexões múltiplas, uma pela migração Kirchhoff de primárias e uma terceira resultante da combinação das anteriores), elevando o custo computacional do processo. Além disso, o método apresenta limitações para modelos geologicamente complexos, uma vez que desconsidera múltiplas de altas ordens e múltiplas internas.

A migração de múltiplas por perfis de tiro (BERKHOUT, 1999; BERKHOUT; VERSCHUUR, 1994b) é baseada na extrapolação direta do dado total, contendo primárias e múltiplas (campo da fonte), e na extrapolação inversa das múltiplas de superfície livre (campo do receptor). É feita, então, a correlação cruzada traço a traço entre os dois dados e seleciona-se a componente de tempo zero resultante desta correlação.

Apesar de apresentar resultados satisfatórios, o método apresenta problemas fundamentais, tais como a geração de imagens mais ruidosas, a necessidade da separação entre primárias e múltiplas e um modelo de velocidade preciso da subsuperfície.

Ainda no grupo de utilização direta das múltiplas, tem-se a migração reversa no tempo

- RTM (LIU et al., 2011), método aplicado no trabalho. Da mesma forma que na migração por perfis de tiro, nesse método, o campo da múltipla (já estimada do dado total) e o dado total são extrapolados (inverso e diretamente) para um determinado nível de profundidade em subsuperfície e a condição de imagem é a correlação cruzada desses campos.

A diferença para o método de Berkhout (1993) e Berkhout e Verschuur (1994b) é que a extrapolação é feita através da migração reversa no tempo.

Neste trabalho foi apresentado uma reprodução do método apresentado em Liu et al. (2011). A predição da múltipla foi feita através da aplicação do SRME e o RTM foi programado em Fortran 90 e aplicado as múltiplas. Os resultados mostram que a imagem migrada obtida a partir das múltiplas mostra regiões que não são iluminadas utilizando apenas primárias.

Entretanto, esse método depende fortemente do modelo de velocidade utilizado na migração e da predição da múltipla, além de apresentar um custo computacional elevado, uma vez que a imagem resultante da migração é a soma das imagens migradas resultante do uso somente das primárias e apenas das múltiplas.

Testes aplicados a dados reais mostraram resultados inconsistentes, o que pode ser devido ao modelo de velocidade usado.

O próximo passo desse trabalho é aprimorar o método RTM e aplicar a dados reais.

## REFERÊNCIAS

- ABMA, R. et al. Comparisons of adaptive subtraction methods for multiple attenuation. *The Leading Edge*, v. 24, p. 277–280, 2005.
- AMUNDSEN, L. Wavenumber-based filtering of marine point-source data. *Geophysics*, v. 58, n. 9, p. 1335–1348, Sep 1993.
- AMUNDSEN, L.; REITAN, A. Decomposition of multicomponent sea-floor data into upgoing and downgoing p- and s-waves depth imaging with multiples. *Geophysics*, n. 60, p. 563–572, 1995.
- ANSTEY, N. A.; NEWMAN, P. Part i: The sectional auto-correlogram and part ii: The sectional retro-correlogram. 1967.
- BERKHOUT, A. Migration of multiple reflections. *In: SEG Expanded Abstracts*, v. 12, p. 1022–1025, 1993.
- BERKHOUT, A.; VERSCHUUR, D. Multiple technology: Part 2, migration of multiple reflections. *64th Annual International Meeting, SEG, Expanded Abstracts*, p. 1497–1500, 1994b.
- BERKHOUT, A.; VERSCHUUR, D. Transformation of multiples into primary reflections. *73rd Annual International Meeting, SEG, Expanded Abstracts*, p. 1925–1928, 2003.
- BERKHOUT, A. J. Multiple removal based on the feedback model. *The Leading Edge*, v. 18, n. 1, p. 127–131, 1999.
- BERKHOUT, A. J.; VERSCHUUR, D. J. Estimation of multiple scattering by iterative inversion, part 1 theoretical consideration. *Geophysics*, v. 62, p. 1586–1595, 1997.
- BROWN, M. P.; GUITTON, A. Least-squares joint imaging of multiples and primaries. *Geophysics*, v. 70, n. 5, p. S79–S89, 2005.
- CHANG, W. F.; MCMECHAN, G. A. Elastic reverse-time migration. *Geophysics*, v. 52, p. 1365–1375, 1987.
- CLAERBOUT, J. F. Imaging the earth's interior. *Blackwell Scientific Publications*, Stanford, California, 1985.
- CLAERBOUT, J. F. Geophysical estimation by example: Environmental soundings image enhancement: Stanford exploration project. 1999.
- DRAGOSET, W. H. A practical approach to surface multiple attenuation. *68th Annual International Meeting, SEG, Expanded Abstracts*, p. 1230–1233, 1998.

- GLOGOVSKY, V.; LANDA, E.; PAFFENHOLZ, J. Integrated approach to subsalt depth imaging: Synthetic case study. *The Leading Edge*, v. 21, p. 1217–1223, 2002.
- GUITTON, A. Shot-profile migration of multiple reflections. *72nd Annual International Meeting, SEG, Expanded Abstracts*, p. 1296–1299, 2002.
- GUITTON, A. Multiple attenuation in complex geology with a pattern-based approach. *Geophysics*, v. 70, p. V97–V107, 2005.
- HUANG, T. et al. Subsalt imaging using tti reverse time migration. *The Leading Edge*, v. 28, p. 448–452, 2009.
- JIANG, Z. et al. Migration methods for imaging different-order multiples. *Geophysical Prospecting*, v. 55, p. 1–19, 2007.
- KELAMIS, P. G.; VERSCHUUR, D. J. Surface-related multiple elimination on land seismic data – strategies via case studies. *Geophysics*, v. 65, p. 719–734, 2000.
- KENNET, B. L. N. The suppression of surface multiples on seismic records. *Geophysical Prospecting*, v. 27, p. 584–600, 1979.
- KESSINGER, W.; RAMASWAMY, M. Subsalt imaging using mode converted energy and acoustic depth migration. *66th Annual International Meeting, SEG, Expanded Abstracts*, p. 566–569, 1996.
- LEITE, L. W. B. *Fundamentos da análise de sinais em geofísica*. [S.l.]: Editora da Universidade Federal do Pará, 2008.
- LIU, F. et al. An optimized wave equation for seismic modeling and reverse time migration. *Geophysics*, v. 74, n. 6, p. WCA153–WCA158, 2009.
- LIU, Y. et al. Reverse time migration of multiples for subsalt imaging. *Geophysics*, v. 76, n. 5, p. WB209–WB216, Sep-Oct 2011.
- LUO, Y.; KELAMIS, P. G.; WANG, Y. Simultaneous inversion of multiples and primaries: Inversion versus subtraction. *The Leading Edge*, v. 22, p. 814–818, 2003.
- MUIJS, R.; ROBERTSSON, O. A.; HOLLIGER, K. Prestack depth migration of primary and surface-related multiple reflections: Part i - imaging. *Geophysics*, v. 72, n. 2, p. S59–S69, March-April 2007.
- NEKUT, A. G.; VERSCHUUR, D. J. Minimum energy adaptive subtraction in surface-related multiple attenuation. *68th Annual International Meeting, SEG, Expanded Abstracts*, p. 1507–1510, 1998.
- O'BRIEN, M. J.; GRAY, S. H. Can we image beneath salt? *The Leading Edge*, v. 15, p. 17–22, 1996.

- PAFFENHOLZ, J. et al. Subsalt multiple attenuation and imaging: observations from the sigsbee2b synthetic data set. *72nd Annual International Meeting, SEG, Expanded Abstract*, p. 2122–2125, 2002.
- REITER, E. C. et al. Imaging with deep-water multiples. *Geophysics*, v. 56, n. 7, p. 1081–1086, July 1991.
- ROECK, Y. H. de et al. Free-surface multiple removing via iterative prestack migration. *EAGE 63rd Annual Meeting, Expanded Abstracts*, 2001.
- ROSENBERG, M. V. How much does salt obstruct the subsalt image? *70th Annual International Meeting, SEG, Expanded Abstracts*, p. 582–585, 2000.
- SCHUSTER, G. T.; RICKETT, J. Daylight imaging in  $v(x, y, z)$  media. in *Midyear reports of Stanford Exploration Project and UTAM.*, 2000.
- SHAN, G. Source-receiver migration of multiple reflections. *73rd Annual International Meeting, SEG, Expanded Abstracts*, p. 1008–1011, 2003.
- SHAN, G.; GUITTON, A. Migration of surface-related multiples: tests on the sigsbee2b dataset. *SEG Expanded Abstracts*, p. 1285–1288, 2004.
- SHENG, J. Migration of multiples and primaries in cdp data by crosscorrelogram migration. *71st Annual International Meeting, SEG, Expanded Abstracts*, p. 1297–1300, 2001.
- SPITZ, S. Pattern recognition, spatial predictability, and subtraction of multiple events. *The Leading Edge*, v. 18, p. 55–58, 1999.
- VASCONCELOS, I.; SNIEDER, R.; HORNBY, B. Imaging internal multiples from subsalt vsp data - examples of target-oriented interferometry. *Geophysics*, v. 73, n. 4, p. S157–S168, 2008.
- VERSCHUUR, D. J. *Seismic multiple removal techniques: past, present and future*. The Netherlands: EAGE Publications, 2006.
- VERSCHUUR, D. J.; BERKHOUT, A. J.; WAPENAAR, C. P. A. Adaptive surface-related multiple elimination. *Geophysics*, v. 57, p. 1166–1177, 1992.
- WHITMORE, N. D. Iterative depth migration by backward time propagation. *53rd Annual International Meeting, SEG, Expanded Abstracts*, p. 382, 1983.
- YILMAZ, O. *Seismic data analysis: processing, inversion, and interpretation of seismic data*. [S.l.]: Society Exploration Geophysicists, 2001.
- YOUNG, O.; ZHOU, H. W. Depth imaging with multiples. *Geophysics*, v. 66, n. 1, p. 246–255, Jan-Feb 2001.
- YU, J.; SCHUSTER, G. Joint migration of primary and multiple reflections in rvsp data. *72nd Annual International Meeting, SEG, Expanded Abstracts*, p. 2373–2376, 2002.