



UNIVERSIDADE FEDERAL DA BAHIA
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS
CURSO DE GRADUAÇÃO EM GEOFÍSICA

GEO213 – TRABALHO DE GRADUAÇÃO

ATENUAÇÃO DE MÚLTIPLAS DE
SUPERFÍCIE UTILIZANDO OS
MÉTODOS: SRME, RADON E F-K COM
O *SOFTWARE SEISSPACE*

Jeferson Borges Fonseca

SALVADOR – BAHIA
NOVEMBRO – 2016

Atenuação de Múltiplas de Superfície Utilizando Os Métodos: SMRE, Radon e
F-K com o *Software SeisSpace*

por

JEFERSON BORGES FONSECA

GEO213 – TRABALHO DE GRADUAÇÃO

DEPARTAMENTO DE GEOLOGIA E GEOFÍSICA APLICADA

DO

INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

DA

UNIVERSIDADE FEDERAL DA BAHIA

Comissão Examinadora

_____ Dr. Milton José Porsani (Orientador)

_____ Dr. Michelângelo Gomes da Silva

_____ Msc. Wilker Eduardo Souza

Data da aprovação: 01/11/2016

Dedico este trabalho á toda a minha
família que sempre esteve de meu
lado, principalmente nesses 5 anos.

RESUMO

Reflexões múltiplas são consideradas como os ruídos presentes e dominantes, principalmente quando se trata de dados marítimos. A presença das mesmas em um dado sísmico mascara as reflexões primárias e dificulta a interpretação das seções sísmicas. Desta forma, a atenuação de reflexões múltiplas representa um grande desafio ao processamento de dados sísmicos marítimos.

Os métodos de filtragem fk e Radon, visa diferença comportamental espacial entre as múltiplas e as reflexões primárias, e em seus respectivos domínios é feita a atenuação desse ruído. Dessa forma é possível manipular o dado tal que o comportamento espacial das múltiplas se torne diferente das reflexões primárias. Já a filtragem SRME se baseia na periodicidade e preditividade das múltiplas, sendo assim é possível fazer uma subtração da múltipla predita com o dado original.

No presente trabalho, teve por objetivo ser um manual de atenuação de múltiplas de superfície, utilizando o *software Seispace*, sendo este, desenvolvido pela Halliburton. O processamento foi aplicado na linha do Golfo do México.

Palavras-chave. Filtragem, FK, Radon, SRME, Múltiplas.

ABSTRACT

Multiple reflections are considered to be the dominant and noise present, especially when it comes to marine data. The presence of the same in a seismic data masks the primary reflections and complicates the interpretation of seismic sections. This way the attenuation of multiple reflections is a large challenge to the processing of marine seismic data.

The filtering method $F - K$ and Radon view the spatial behavioral difference between the multiple and primary reflections, and in their respective domain is made the attenuation of this noise. This way you can manipulate the data such that the spatial behavior of the multiple becomes different from the primary reflections. Already in SRME filtering is based on periodicity and predictability of multiple, so you can make a subtraction of the predicted multiple with the original data.

In this paper, aimed to be a surface multiple attenuation manual, using the Seispace software, which is developed by Halliburton. The processing was applied in the Gulf of Mexico line.

Keywords: filtering, F-K, Radon, SRME, multiple

ÍNDICE

RESUMO	iii
ABSTRACT	iv
ÍNDICE	v
ÍNDICE DE FIGURAS	vi
INTRODUÇÃO	1
CAPÍTULO 1 FUNDAMENTOS TEÓRICOS	3
1.1 Reflexão Primária	3
1.2 Múltiplas	5
CAPÍTULO 2 MÉTODOS DE FILTRAGEM	7
2.1 Filtragem FK	7
2.2 Filtragem Radon	9
2.2.1 Transformada Radon Linear	9
2.2.2 Transformada Radon Hiperbólica	11
2.2.3 Transformada Radon Parabólica	12
2.3 Surface Related Multiple Elimination - SRME	13
CAPÍTULO 3 METODOLOGIA E RESULTADOS	21
3.1 Aplicação da Filtragem $F - K$	23
3.2 Aplicação da Filtragem Radon Parabólica	32
3.3 Aplicação do SRME	39
3.3.1 Amostragem irregular de fontes e receptores	39
3.3.2 Ausência de pequenos <i>offsets</i>	40
3.3.3 Adição de informação além do <i>zero-offset</i>	41
3.4 Seções <i>Zero-offset</i>	48
CAPÍTULO 4 Conclusões	57
Agradecimentos	58
Referências Bibliográficas	59

ÍNDICE DE FIGURAS

1.1	Raios refletidos e transmitido associados a um raio normalmente incidente sobre uma interface de contraste de impedância acústica (Santos, 2014) . . .	4
1.2	Reflexões primárias têm somente uma reflexão ascendente (linhas verdes) e reflexões múltiplas têm pelo menos uma reflexão descendente (linhas vermelhas) (Maciel, 2007).	4
1.3	Classificação das múltiplas de acordo com o seu período. (a) Múltipla de longo período. (b) Múltipla de curto período (<i>peg-legs</i>) (Maciel, 2007).	6
1.4	Diferentes tipos de múltiplas. (a), (b) e (c) Múltiplas relacionadas a superfície. (d) e (e) Múltiplas internas. Note que (a) (b) e (d) são múltiplas de primeira ordem e (c) e (e) são múltiplas de segunda ordem (Maciel, 2007).	6
1.5	Reflexão fantasma (<i>ghost reflection</i>) causada pela posição do receptor, estando abaixo da superfície água-ar (Oliveira, 2011).	6
2.1	Mapeamento das múltiplas e primárias no domínio $F - K$. Em (a) aplicação da transformada dupla após a correção MMO. Em (b) aplicação da transformada dupla após a correção <i>moveout</i> utilizando as velocidades intermediárias.	8
2.2	Mapeamento de um evento de reflexão do domínio tempo-distância (a) para o domínio de Radon Linear (b). Retas com inclinações diferentes são definidas. O somatório do dado é feito ao longo destas retas. A reta tangente que corta o eixo $x = 0$ define o valor τ para $p_x = 0$ no domínio do Radon Linear.	10
2.3	Associação entre o domínio $F - K$ (a) e o domínio do Radon linear (b). As retas que passam pela origem no domínio $F - K$ são retas que estão paralelas, no domínio Radon, ao eixo da frequência, alterado pela transformada de Fourier.	11
2.4	Os eventos hiperbólicos são mapeados no domínio tempo-espaço (a) em pontos no domínio Radon Hiperbólico (b).	11
2.5	Transformada Radon parabólica mapeia os eventos de reflexão após a correção NMO do domínio espaço-tempo (a) para o domínio Radon parabólico (b), em pontos. (Verschuur, 2006)	12
2.6	Eventos sobrecorrigidos são localizados no quadrante negativo do plano q e eventos sub-corrigidos estão localizados no quadrante positivo do plano q	13
2.7	A múltipla de primeira ordem pode ser representada pela combinação de duas primárias, conectadas entre si por um ponto de reflexão na superfície (Verschuur, 2006)	14

2.8	Em (a) uma reflexão livre de múltipla. Em (b) um diagrama de retroalimentação no qual representa a geração das múltiplas. Após refletir contra a superfície, todas as primárias contidas na resposta do impulso $x_o(t)$ na subsuperfície tornam-se múltiplas de primeira ordem. Depois de mais uma reflexão contra a superfície se tornam de segunda ordem, etc. (Verschuur, 2006) . . .	15
2.9	Remoção da múltiplas de superfície a partir da autoconvolução da resposta total. Em (a) resposta com duas primárias e todas as múltiplas. (b) A primeira múltipla é predita, obtida pela auto convolução da resposta total. (c) A múltipla de segunda ordem é predita, obtida a partir da convolução da múltipla de primeira ordem com a resposta total. (d) A múltipla de terceira ordem. (e) O dado sem múltiplas de superfície, obtido pela soma da resposta com as predições de (a) a (d) (Verschuur, 2006).	17
2.10	Uma múltipla de superfície de primeira ordem é construída por meio da combinação de uma família de tiro comum do dado P com uma família de receptor comum da resposta primária X_o . Essas famílias são convolidas uma com a outra e somadas afim de se obter a múltipla predita (Verschuur, 2006). . . .	19
2.11	Estruturação das matrizes de dados (Verschuur, 1991).	19
2.12	Notação matricial para estururação do dado pré-empilhado $P(x_r, x_s, f)$ na matriz \mathbf{P} (a). Em (b) mostra a predição de múltiplas sendo descrita como uma multiplicação de matrizes (Verschuur, 2006).	20
3.1	Parametros de aquisição da linha marinha do Golfo do México.	21
3.2	Seção bruta empilhada com os principais eventos de reflexões múltiplas do Golfo do México.	22
3.3	Fluxo de processamento utilizado na linha do Golfo do México.	23
3.4	Fluxo para atenuação de múltiplas utilizando o método $F - K$	24
3.5	Pick de velocidade no seispace, o ponto branco indica onde foi feito o pick. Pick de velocidade da múltipla de superfície (a), e pick das velocidades intermediárias entre as múltiplas e primárias (b).	24
3.6	CDP 930 corrigido de MMO (dado de entrada). Ao lado direito da imagem temos o espectro $F - K$ do dado e o polígono de rejeito.	25
3.7	CDP 930 corrigido de MMO (dado de saída). Ao lado direito da imagem o espectro $F - K$ após aplicação do polígono de rejeito.	26
3.8	CDP 930 corrigido com a velocidade intermediária. Ao lado direito da imagem o espectro $F - K$ e o polígono de rejeito.	27
3.9	CDP 930 corrigido com a velocidade intermediária. Ao lado direito da imagem o espectro $F - K$ após a aplicação do polígono de rejeito.	28
3.10	CDP's 930 e 931 deconvolido antes da filtragem $F - K$ aplicada com o módulo <i>F-K Multiple Attenuation</i>	29

3.11	CDP's 930 e 931 após a filtragem $F-K$ aplicado com o módulo <i>F-K Multiple Attenuation</i> , utilizando a velocidade da múltipla.	30
3.12	CDP's 930 e 931 após a filtragem $F-K$ aplicado com o módulo <i>F-K Multiple Attenuation</i> , utilizando as velocidades intermediária.	31
3.13	Fluxo no <i>Seisspace</i> para filtragem Radon Parabólico.	32
3.14	CDP 930 corrigido com a velocidade intermediária. Na parte central da imagem o domínio Radon. A direita da imagem o dado após a transformada inversa.	33
3.15	CDP 930 corrigido com a velocidade intermediária. Na parte central da imagem o domínio Radon. A direita da imagem o dado após a transformada inversa com o filtro Radon aplicado.	34
3.16	CDP 930 corrigido de NMO. Na parte central da imagem o domínio Radon. A direita da imagem o dado após a transformada inversa.	35
3.17	CDP 930 corrigido de NMO. Na parte central da imagem o domínio Radon. A direita da imagem o dado após a transformada inversa com o filtro Radon Aplicado.	36
3.18	CDP's 930 e 931 após a filtragem Radon Parabólica aplicado com o módulo <i>Radon Filter</i> , utilizando as velocidades das reflexões primárias.	37
3.19	CDP's 930 e 931 após a filtragem Radon Parabólica aplicado com o módulo <i>Radon Filter</i> , utilizando as velocidades intermediárias.	38
3.20	Construção de múltipla de superfície de primeira ordem no caso em que o espaçamento da fonte é o dobro do espaçamento do receptor. As linhas tracejadas representam a falta da contribuição dos tiros, o que significa que somente metade dos receptores podem ser combinados com as fontes (Verschuur, 2006).	40
3.21	Módulo <i>Trace Header Math</i> usado para modificar os offsets de todo o dado.	41
3.22	(a) Fontes 2018 e 2019 antes da reamostragem dos tiros. (b) Fontes 2018 e 2019 após a reamostragem dos tiros utilizando o módulo <i>SRME Regularization</i> .	43
3.23	a) Estrutura que geram as múltiplas são lateralmente suaves, a fonte secundária (em laranja) que é necessário para construção da múltipla está contida dentro do arranjo. b) Quando a estrutura que geram as múltiplas são mais complexas, a fonte secundária (em laranja) pode ser localizada fora do arranjo, de tal forma que o caminho inicial (em azul) não é medido (Verschuur, 2006).	44

3.24	a) Para uma melhor predição das múltiplas de superfície em um arranjo, tipicamente marinho, <i>end-of-spread</i> , os <i>offsets</i> do dado original, indicado pela área cinza, precisam ser extrapolado para além do <i>zero-offset</i> . b) Localização dos traços no graico fonte-receptor. A área azul indica os dados medidos. A área em azul claro indica os dados que podem ser obtidos pelo princípio da reciprocidade. A área em rosa indica os dados extrapolados até o zero <i>zero-offset</i> . Para a predição da múltipla a área em vermelho tracejada é suficiente (Verschuur, 2006).	44
3.25	Múltipla predita a partir do dado deconvolvido. Para a realização da predição foi utilizado o módulo <i>SRME Macro</i>	45
3.26	Ajuste de fase, forma e amplitude da <i>wavelet</i> da múltipla estimada, utilizando o módulo <i>SRME Match Filter</i>	46
3.27	Resultado da filtragem SRME após a subtração do dado deconvolvido com a múltipla predita. O módulo utilizado para essa subtração é <i>SRME Adaptive Subtraction</i>	47
3.28	Campo de velocidade, obtido a partir da segunda análise de velocidade, tendo este como dado de entrada o dado filtrado com o SRME. O módulo utilizado para a geração deste campo é o <i>Velocity Viewer/Point Editor*</i>	49
3.29	Seção <i>zero-offset</i> do dado somente com a geometria.	50
3.30	Seção <i>zero-offset</i> do dado com a deconvolução <i>Spike</i>	51
3.31	Seção <i>zero-offset</i> após a filtragem $F - K$, utilizando a velocidade das múltiplas para a realização da filtragem.	52
3.32	Seção <i>zero-offset</i> após a filtragem $F - K$, utilizando as velocidades intermediárias para a realização da filtragem.	53
3.33	Seção <i>zero-offset</i> após a filtragem Radon Parabólica, utilizando a velocidade das primárias para a realização da filtragem.	54
3.34	Seção <i>zero-offset</i> após a filtragem Radon Parabólica, utilizando a velocidade intermediárias para a realização da filtragem.	55
3.35	Seção <i>zero-offset</i> após a filtragem SRME.	56

INTRODUÇÃO

O método sísmico, dentre os métodos geofísicos, é o mais empregado na indústria de exploração de petróleo, isto se deve pela sua grande capacidade de investigação da estrutura em subsuperfície e por proporcionar resultado com um alto nível de precisão e resolução. Portanto, é possível mapear feições litológicas associadas a acumulação de hidrocarbonetos, identificar litologias e entender as estruturas geológicas em subsuperfície.

Este método se divide em dois principais ramos: a sísmica de refração, no qual o foco são ondas refratadas, e a sísmica de reflexão, que no qual o foco são ondas refletidas em subsuperfície, sendo este a base para os assuntos discutidos neste trabalho. Assim como os outros métodos geofísicos, podemos dizer que a sísmica de reflexão se divide em três partes: aquisição de dados, processamento e interpretação dos dados processados.

O processamento de dados sísmicos de reflexão é uma atividade comum na indústria do petróleo e tem em seu propósito a obtenção de uma imagem representativa da geologia em subsuperfície. Para que este objetivo seja inteirado, os dados sísmicos são submetidos a um fluxo de processamento que pode ser subdividido em duas fases: o pré-processamento e o processamento avançado. A primeira, é uma etapa básica onde encontram-se técnicas simples para a preparação dos dados, na segunda, são aplicadas técnicas mais sofisticadas, que influenciam significativamente no aumento da resolução sísmica dos dados. Neste trabalho será abordada uma das etapas do processamento avançado, referente à atenuação de múltiplas.

O fluxo de processamento sísmico, varia de cada dado a ser processado:, se é um dado marítimo ou terrestre, se apresenta geologia simples ou complexa, dentre outros. Para o caso de dado marítimo, o principal problema a ser resolvido é a presença de eventos periódicos gerados devido à reverberação das ondas propagadas. Esses eventos também são conhecidos como reflexões múltiplas.

As reflexões múltiplas, como falado acima, representam reverberações da onda sísmica, ou seja, a energia aprisionada em duas interfaces. Ocorrem devido a presença da superfície livre ou entre camadas internas da Terra. São consideradas ruídos, pois atrapalham a interpretação, podendo até ser confundida com uma estrutura. Um dos objetivos do processamento marítimo é atenuar ao máximo sua ocorrência no dado.

Existem diferentes métodos para atenuação de múltiplas Verschuur (2006), divide em dois grandes grupos: os que se baseiam na diferença comportamental espacial entre as reflexões primárias e as múltiplas e os que se baseiam na periodicidade e preditividade das múltiplas.

Neste trabalho a Filtragem $F - K$ e a Filtragem Radon fazem parte do primeiro grupo e o *Surface-Related Multiple Elimination* (SRME) está no segundo grupo.

O texto deste trabalho está estruturado em quatro capítulos: no primeiro, é mostrado os conceitos básicos relacionados às reflexões múltiplas, tipos, sua importância; no segundo é apresentado a teoria e os fundamentos matemáticos dos métodos de filtragem utilizados; no terceiro, temos a metodologia e os resultados obtidos para cada método de filtragem; e o quarto, são feitas as considerações finais e conclusões obtidas.

CAPÍTULO 1

FUNDAMENTOS TEÓRICOS

1.1 Reflexão Primária

A Terra é composta por camadas de rochas de diferentes litologias e propriedades físicas. Sismicamente camadas de rochas são definidas pela densidade e velocidade que as ondas se propagam. A partir dessas duas grandezas, que definem uma rocha sismicamente, obtemos outra grandeza chamada - impedância acústica que está relacionado com dificuldade do meio à propagação da onda sísmica. Sendo assim, a impedância é dada pela equação:

$$I = \rho v, \quad (1.1)$$

onde,

- I é a impedância acústica da camada;
- ρ é a densidade da camada;
- v é a velocidade de propagação da onda.

Na aquisição sísmica, a onda gerada pela fonte é transmitida através das vibrações das moléculas do meio. Quando o pulso incide em uma interface de impedância acústica distinta, verifica-se a ocorrência de três eventos físicos: transmissão, refração e reflexão, sendo este último, o que mais importa no método sísmico de reflexão. Considerando um modelo plano paralelo, de velocidade constante, o coeficiente de reflexão de uma onda de incidência normal é dado por (Figura 1.1):

$$R = \frac{I_2 - I_1}{I_2 + I_1} \quad (1.2)$$

onde,

- R é o coeficiente de reflexão;
- I_1 é a impedância acústica da camada 1;
- I_2 é a impedância acústica da camada 2.

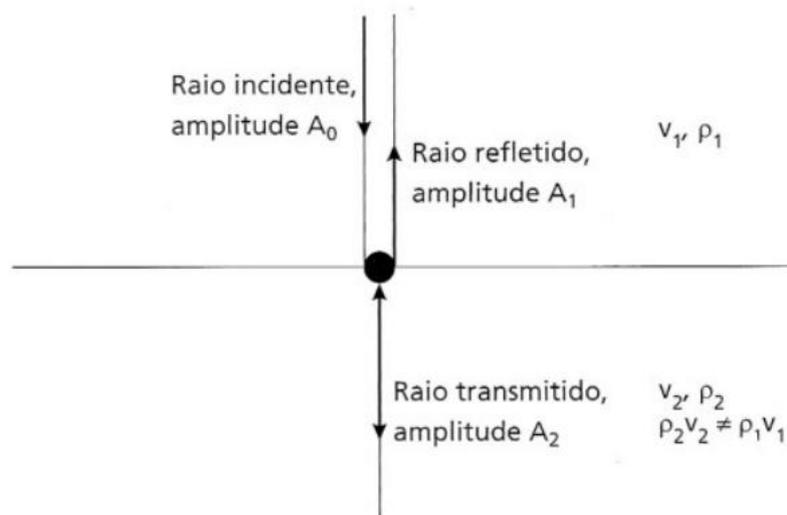


Figura 1.1: Raios refletidos e transmitido associados a um raio normalmente incidente sobre uma interface de contraste de impedância acústica (Santos, 2014)

A interface entre dois meios com diferentes impedância acústicas torna-se um forte refletor sísmico, como por exemplo a água e o ar. Como normalmente a interface entre o fundo oceânico e a água, possui também, um grande contraste de impedância acústica, a energia sísmica pode ficar aprisionada sofrendo duas ou mais reflexões. Essas reverberações em uma camada, neste caso a água, denominamos de múltiplas (Figura 2.1).

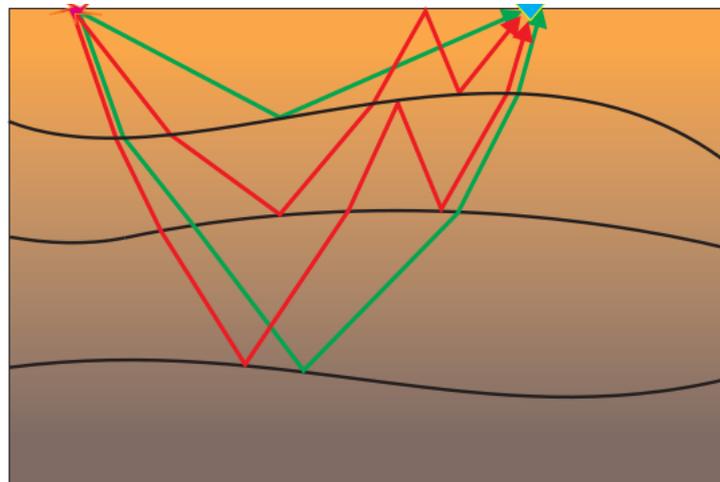


Figura 1.2: Reflexões primárias têm somente uma reflexão ascendente (linhas verdes) e reflexões múltiplas têm pelo menos uma reflexão descendente (linhas vermelhas) (Maciel, 2007).

1.2 Múltiplas

Múltiplas são eventos que sofreram mais de uma reflexão antes de atingirem o receptor. Uma vez que a amplitude das múltiplas é proporcional ao produto dos coeficientes de reflexões para cada uma das reflexões envolvidas e devido a estes serem muito pequenos para a maioria das interfaces, somente contrastes fortes de impedância geram múltiplas fortes o suficiente para ser reconhecidas como eventos (Telford, 1990). Assim sendo, podemos ter múltiplas internas, múltiplas de superfície ou a combinação das duas.

Múltiplas internas são aquelas na qual a reflexão descendente ocorre abaixo da superfície livre. Assim sendo, as múltiplas de superfície, a reflexão descendente ocorrerá na superfície.

Múltiplas de longo período são aqueles eventos cuja o caminho percorrido é muito maior quando comparado com reflexões primárias de interfaces de mesma profundidade, consequentemente possui tempos maiores que as reflexões primárias (Figura 1.3 a). Por outro lado múltiplas de curto período possui eventos superpostos aos eventos primários que lhe deram origem e estão associados às camadas pouco espessas essas são conhecidas como *peg-legs* (Pontes, 1985) (Figura 1.3 b).

Outra classificação é em termos das ordens (número) de reflexão. Desta forma estas são classificadas como múltiplas de primeira ordem, segunda ordem, terceira ordem, etc (Figura 1.4). Além disso, tem-se *ghost reflection*, que ocorre devido à geometria de aquisição, quando a fonte encontra-se abaixo da superfície. Desta forma, parte da energia é refletida na superfície, gerando reflexões defasadas em um curto período de tempo (Figura 1.5).

Conquanto, em um dado real, todos esses tipos de múltiplas ocorrem simultaneamente.

Vershuur (2006) divide as metodologias de atenuação em dois grandes grupos: os métodos que são baseados na diferença comportamental espacial entre as múltiplas e as reflexões primárias e os métodos que se baseiam na periodicidade e preditividade das múltiplas. O primeiro grupo tem como exemplo as filtragens $F - K$ e Radon e o segundo tem como exemplo a Deconvolução Preditiva e o SRME.

Neste trabalho, os métodos dito acima são aplicados na linha marinha 2d do Golfo do México com exceção da deconvolução preditiva.

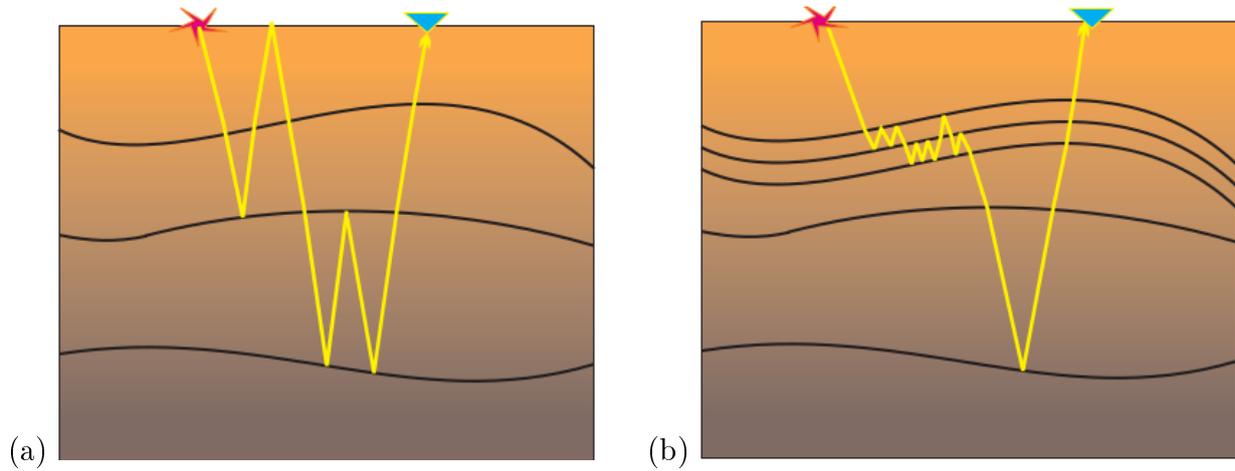


Figura 1.3: Classificação das múltiplas de acordo com o seu período. (a) Múltipla de longo período. (b) Múltipla de curto período (*peg-legs*) (Maciel, 2007).

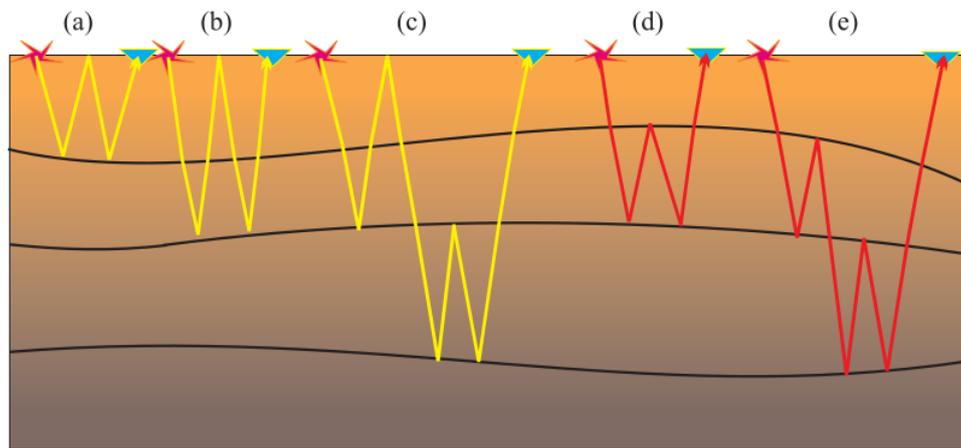


Figura 1.4: Diferentes tipos de múltiplas. (a), (b) e (c) Múltiplas relacionadas a superfície. (d) e (e) Múltiplas internas. Note que (a), (b) e (d) são múltiplas de primeira ordem e (c) e (e) são múltiplas de segunda ordem (Maciel, 2007).

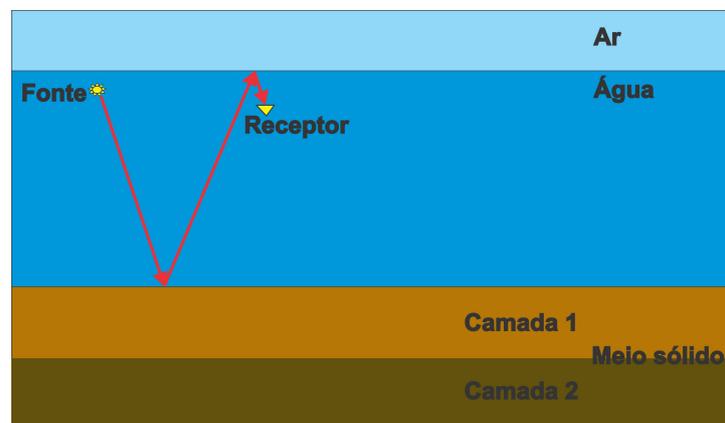


Figura 1.5: Reflexão fantasma (*ghost reflection*) causada pela posição do receptor, estando abaixo da superfície água-ar (Oliveira, 2011).

CAPÍTULO 2

MÉTODOS DE FILTRAGEM

2.1 Filtragem FK

A filtragem $F - F$ é amplamente usada na indústria de exploração de petróleo. No processamento de dados sísmico é utilizada para atenuação de ruídos coerentes como *ground roll* em dados terrestres e múltiplas de superfície em dados marítimo.

No método $F - K$, o dado é transformado do domínio tempo-distância para o domínio frequência-número de onda, por meio da transformada dupla de Fourier. Neste domínio, os eventos com o mesmo ângulo de inclinação podem ser isolados (Yilmaz, 1987), ou seja, reflexões primárias e múltiplas (eventos hiperbólicos) são mapeadas na mesma região do domínio $F - K$.

Devido a este problema, para utilização deste filtro na atenuação de múltiplas, é necessário que se aplique uma correção *moveout* antes da transformada dupla de Fourier, a fim de que as múltiplas e as reflexões primárias sejam mapeadas em regiões diferentes do plano $F - K$.

Sendo assim, há duas maneiras de se mapear as múltiplas e as reflexões primárias em partes distintas do plano $F - K$: a primeira é aplicar a correção MMO (*multiple moveout*) em todo o dado, desta forma a múltipla ficará horizontalizada e as primárias sobrecorrigidas (Figura 2.1 a). O evento de múltipla horizontalizado no domínio tempo-afastamento é mapeado em um evento paralelo ao eixo da frequência no domínio frequência-número de onda (Verchuur, 2006) e as primárias são mapeadas no quadrante negativo. A segunda maneira é fazer uma análise de velocidade intermediária entre a velocidade das múltiplas e a velocidade das primárias, assim sendo as primárias ficam sobrecorrigidas e as múltiplas subcorrigidas, por conseguinte, as primárias se concentrarão no quadrante negativo e as múltiplas no quadrante positivo (Figura 2.1 b).

Após a correção *moveout*, aplica-se a transformada dupla de Fourier. Como agora os eventos estão isolados, pode-se então desenhar um filtro para a atenuação da energia das múltiplas. O dado filtrado é mapeado para o domínio original, através da Transformada dupla de Fourier Inversa e por fim é aplicado a correção *moveout* inversa.

O fluxo abaixo mostra as etapas para filtragem $F - K$ para múltiplas:

1. No dado pré-processado, faz-se a estimativa da velocidade da múltipla (em torno de 1500 m/s ou 4921 pes/s), ou a estimativa da velocidade intermediária;
2. Aplica-se a correção MMO (no caso da velocidade da múltipla), ou a correção *moveout* da velocidade intermediária;
3. Mapeamento $F - K$ e aplicação de filtro para atenuação da região em torno do eixo de número de onda igual a (no caso da velocidade da múltipla), ou aplicação de filtro para atenuação da região do quadrante positivo;
4. Mapeamento inverso ao dado filtrado;
5. Correção MMO inversa (no caso da velocidade da múltipla), ou correção *moveout* inversa da velocidade intermediária.

Aplicação da filtragem $F - K$ gera resultados satisfatórios para atenuação em longos *offsets*, porém em curtos *offsets* a energia da múltipla é pouco atenuada, devido à dificuldade em separar as múltiplas das primárias. Além do que, essa filtragem pode produzir distorções no sinal filtrado. Esta distorção se deve, principalmente, porque a banda rejeitada se sobrepõe na região que possui o sinal de interesse.

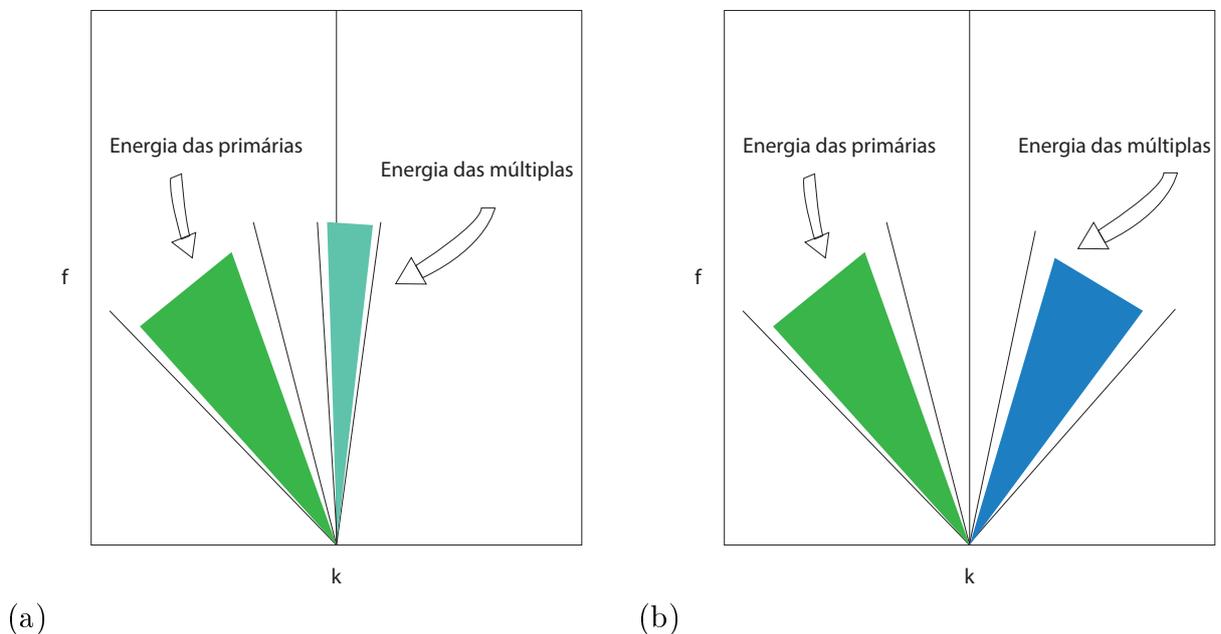


Figura 2.1: Mapeamento das múltiplas e primárias no domínio $F - K$. Em (a) aplicação da transformada dupla após a correção MMO. Em (b) aplicação da transformada dupla após a correção *moveout* utilizando as velocidades intermediárias.

2.2 Filtragem Radon

O nome da técnica da-se o nome do matemático austríaco Johann Radon, responsável, em 1917, pela implementação dos fundamentos matemáticos para a reconstituição de imagens tomográficas de um objeto através das projeções do mesmo (Duarte, 2009). De forma geral, a transformada de Radon é útil sempre que se deseja obter informações sobre a estrutura interna de um objeto através de seu contorno.

A filtragem Radon, similar a filtragem $F - K$, consiste na aplicação da transformada no dado sísmico e no novo domínio aplicar um filtro para atenuação de um evento qualquer.

A transformada Radon pode ser classificada como (Verschuur, 2006):

- Transformada Radon Linear (chamada também de transformada $\tau - p$ ou '*Slant Stack*'): O dado sísmico é somado ao longo de retas.
- Transformada Radon Hiperbólica: O dado sísmico é somado ao longo de hipérbolas. Essa transformada só mapeia eventos com *moveout* hiperbólico. Os eventos de reflexão no domínio tempo-espço, são mapeados em pontos, no domínio Radon.
- Transformada Radon Parabólica: É aplicado uma correção NMO ao dado no qual os eventos de reflexão estarão sobre ou sub-corrigidos e é somado ao longo de parábolas.

Diferente da transformada dupla de Fourier inversa, a transformada Radon inversa, não é tão simples. A utilização desta transformada inversa faz com que o dado perca resolução, isso devido às limitações no lançamento do levantamento e a discretização do dado (Oliveira, 2011). Desta forma uma estimativa da transformada Radon é feita tal que as perdas de resolução sejam mínimas. Esta estimativa é atingida através da inversão com mínimos quadrados (Yilmaz, 2001).

Ao minimizar a diferença entre os dados de entrada e os dados reconstruídos, medido pela energia da diferença de tempo para todas as amostras a todos os deslocamentos, as informações no espaço do modelo é modificado. Para esta aplicação se tornar eficaz, o processo de inversão é levada a cabo por componente de frequência (Verschuur, 2006).

2.2.1 Transformada Radon Linear

A transformada linear de Radon é similar a transformada $F - K$, ambas decompõe o sinal de entrada em eventos de ondas planas, no entanto a organização do dado no domínio da transformada é diferente. A transformada Radon linear a dada por:

$$m(p_x, \tau) = \int_{-\infty}^{+\infty} d(x, t = \tau + p_x x) dx \quad (2.1)$$

Em que τ é o tempo de interceptação e p_x parâmetro de raio horizontal, no qual é dependente de x (distância), a qual define uma linha de integração.

Usando a transformada linear de Radon, um evento hiperbólico no domínio do tempo-afastamento é mapeado como uma elipse no domínio Radon linear (Diebold; Stoffa, 1981) (Figura 2.2).

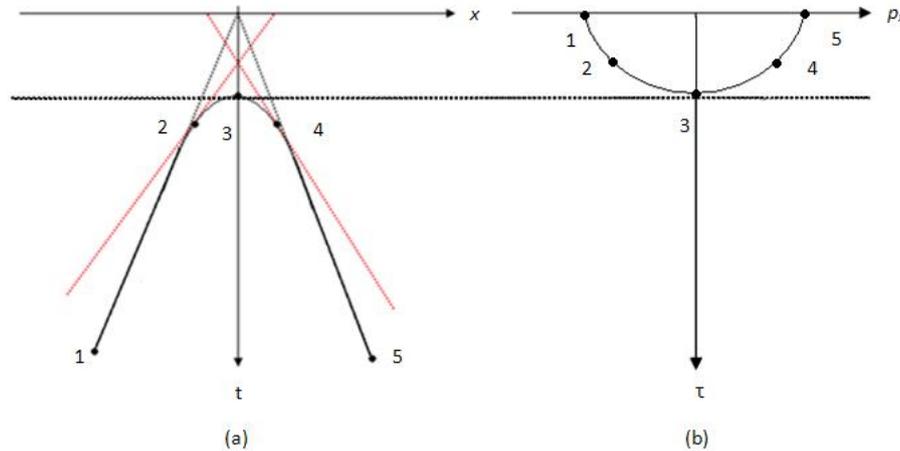


Figura 2.2: Mapeamento de um evento de reflexão do domínio tempo-distância (a) para o domínio de Radon Linear (b). Retas com inclinações diferentes são definidas. O somatório do dado é feito ao longo destas retas. A reta tangente que corta o eixo $x = 0$ define o valor τ para $p_x = 0$ no domínio do Radon Linear.

O parâmetro do raio é definido como a inclinação da linha tangente ao logo de um evento no domínio tempo-espaço o qual segue uma função tempo de trânsito $t(x)$ (Verschuur, 2006).

$$p_x = \frac{\partial(t)}{\partial x} \quad (2.2)$$

Isto significa que, para grandes inclinações de um evento hiperbólico com velocidade C , a transformada Radon linear, irá mapear este evento com o parâmetro do raio entre $-1/C$ a $1/C$. Desta forma o valor máximo do parâmetro do raio depende da máxima inclinação no domínio tempo-espaço.

Há também uma relação com o domínio $F - K$. Esta relação é obtida através da transformação do dado no domínio Radon Linear por meio da transformação de Fourier, no domínio do tempo de interceptação para frequência (Verschuur, 2006) dado por:

$$M(p_x, f) = \int_{-\infty}^{+\infty} m(p_x, t) e^{-j2\pi ft} d\tau \quad (2.3)$$

Considerando o fato que tanto o número de ondas planas k_x e do parâmetro do raio plano p_x estão relacionados com o ângulo de um evento plano. Esta relação pode ser expressa como:

$$k_x = \frac{f}{c} \text{sen}\alpha = \omega p_x \quad (2.4)$$

O número de onda plana é uma versão com um fator de escala do parâmetro do raio plano (Figura 2.3).

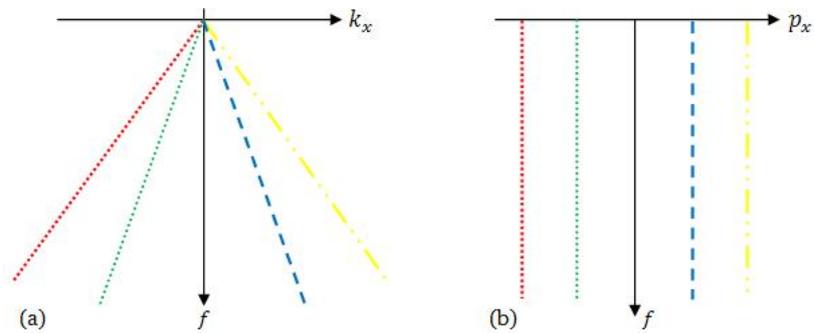


Figura 2.3: Associação entre o domínio $F - K$ (a) e o domínio do Radon linear (b). As retas que passam pela origem no domínio $F - K$ são retas que estão paralelas, no domínio Radon, ao eixo da frequência, alterado pela transformada de Fourier.

2.2.2 Transformada Radon Hiperbólica

Na transformada Radon hiperbólica, o dado sísmico é somado ao longo de hipérboles definida matematicamente como (Verschuur, 2006):

$$m(v, \tau) = \int_{-\infty}^{+\infty} d(x, t = \sqrt{\tau^2 + \frac{x^2}{v^2}}) dx \quad (2.5)$$

Esta transformada mapeia somente eventos hiperbólicos. A Figura 2.4, mostra o evento hiperbólico sendo mapeado, no domínio tempo afastamento, no domínio de Radon hiperbólico, em pontos.

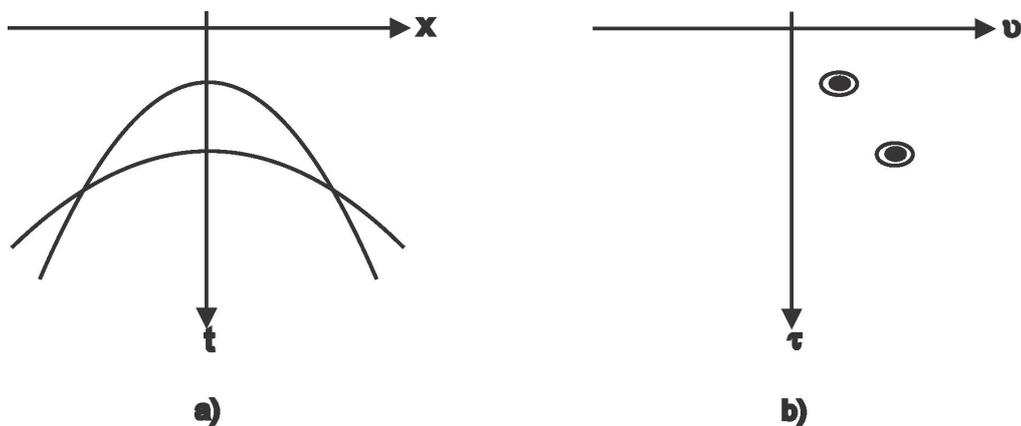


Figura 2.4: Os eventos hiperbólicos são mapeados no domínio tempo-espaco (a) em pontos no domínio Radon Hiperbólico (b).

2.2.3 Transformada Radon Parabólica

A transformada aplicada ao resíduo da correção NMO que é somado ao longo da parábola, definida matematicamente por (Verschuur, 2006):

$$m(q, \tau) = \int_{-\infty}^{+\infty} d(x, t = \tau + qx^2) dx \quad (2.6)$$

No qual o parâmetro q é o parâmetro de curvatura. Assim sendo, eventos com forma de parábola no domínio espaço-tempo, serão mapeadas em pontos no domínio Radon, agora parabólico (Figura 2.5).

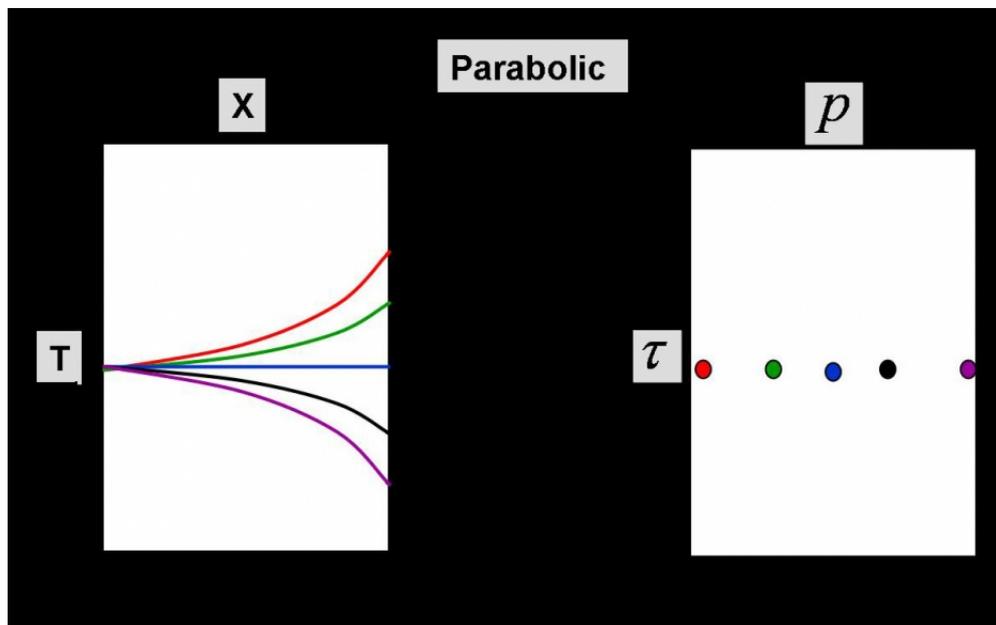


Figura 2.5: Transformada Radon parabólica mapeia os eventos de reflexão após a correção NMO do domínio espaço-tempo (a) para o domínio Radon parabólico (b), em pontos. (Verschuur, 2006)

No entanto, os eventos que têm um caráter linear no domínio do espaço-tempo não vão ser mapeados em uma área localizada no domínio Radon parabólico, ficando disperso em todo o domínio.

A razão na qual a transformada Radon parabólica é atrativa para compressão da energia sísmica em uma pequena área, está na circunstância que a relação linear entre o tempo t e o tempo de interceptação τ do operador de transformada Radon parabólico permite uma eficiência no cálculo da transformada pelo domínio da frequência.

$$m(q, f) = \int_{-\infty}^{+\infty} D(x, f) e^{-j2\pi f q x^2} dx \quad (2.7)$$

A desvantagem dessa transformação é que as reflexões sísmicas não exibem um *moveout* parabólico, mas um *moveout* hiperbólico. Isto é resolvido fazendo uma aproximação da correção *moveout* aos dados antes da aplicação da transformada Radon parabólica. O *moveout* residual dos eventos pode ser melhor aproximado para a forma parabólica.

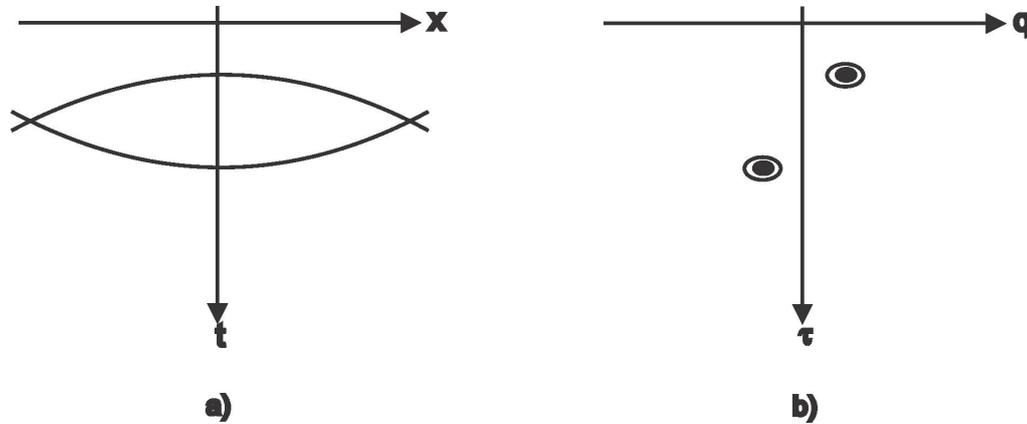


Figura 2.6: Eventos sobrecorrigidos são localizados no quadrante negativo do plano q e eventos sub-corrigidos estão localizados no quadrante positivo do plano q .

Ao fazer a hipótese de que após uma correção NMO, utilizando velocidades intermediárias (velocidade entre as primárias e as múltiplas) o sobretempo residual das reflexões primárias e múltiplas podem ser descritos por parábolas, desta forma, são mapeados em diferentes regiões no domínio Radon, propiciando assim, uma melhor filtragem da múltipla em comparação com o processo de filtragem $F - K$ (Figura 2.6).

2.3 Surface Related Multiple Elimination - SRME

O SRME faz parte grupo de métodos de filtragem que se baseiam na periodicidade das múltiplas de superfície, ou seja, múltiplas que são geradas na superfície livre (interface água-ar). Ainda que seja aplicado principalmente para atenuação deste tipo de múltipla, também é possível aplicá-lo para atenuação de múltiplas internas, porém, não é o foco deste trabalho.

Ao invés da necessidade do conhecimento do campo de onda para aplicação do filtro, tais como os métodos os de deconvolução preditiva, extrapolação do campo de onda, etc, o SRME dispensa informações acerca da subsuperfície, por exemplo, campo de velocidade, profundidade das camadas, porém informações sobre a interface, como por exemplo, refletividade da superfície e característica da fonte e receptor são necessárias.

Ao olhar o percurso do raio de uma múltipla podemos relaciona-lá com a superfície. Observa-se que a múltipla de primeira ordem pode ser considerada como constituída por dois caminhos primários (Figura 2.7), que estão ligados no ponto de superfície de reflexão (Verschuur, 2006). Desta forma, é possível combinar reflexões primárias que já estão disponíveis nos dados para

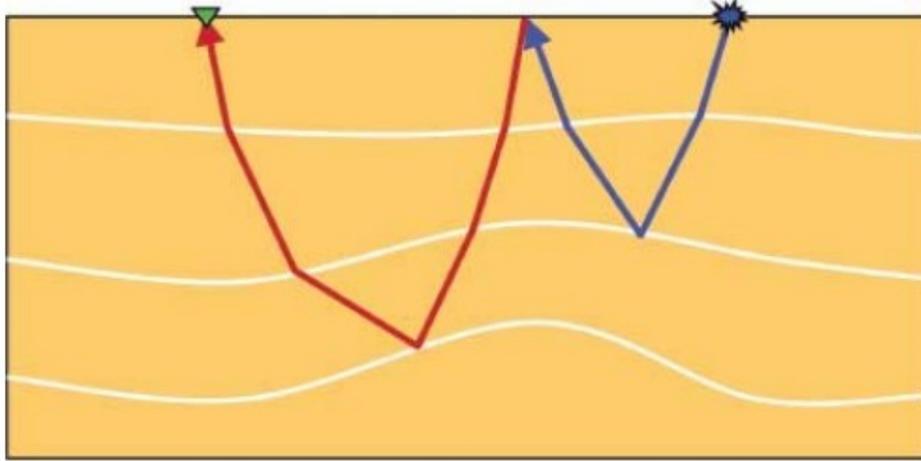


Figura 2.7: A múltipla de primeira ordem pode ser representada pela combinação de duas primárias, conectadas entre si por um ponto de reflexão na superfície (Verschuur, 2006)

construir múltiplas de primeira ordem, obedecendo à lei de Snell no ponto de reflexão. Isto significa que o ângulo de incidência de chegada da primeira primária ao receptor deve ser o mesmo ângulo de emissão da segunda primária.

O desenvolvimento deste método começou quando Anstey e Newman, em 1966, observaram que era possível modelar múltiplas através da autoconvolução do traço sísmico. Para chegar a essa conclusão, Anstey, em 1966, partiu da ideia da autocorrelação de traços. Em seu trabalho, ele afirma que a função de autocorrelação contém informações acerca de toda a atividade das reflexões múltiplas presentes em um traço, auxiliando, inclusive, na escolha do método de atenuação (Barreto, 2016).

Considerando uma resposta sísmica de um impulso da terra, sem o efeito da superfície, é definida por $x_o(t)$ e contém todas as reflexões primárias e múltiplas internas (Verschuur, 2006). Se todos estes eventos atingiram a superfície livre, todos eles irão refletir de volta para o meio. Assim sendo, cada evento da resposta primária irá atuar como uma nova fonte. Dessa maneira, obtêm-se uma sequência de múltiplas de primeira ordem, envolvendo com a própria resposta impulsiva, de acordo com a equação 2.8: (Verschuur, 2006):

$$m_1(t) = -x_o(t) * (t), \quad (2.8)$$

o sinal negativo indica que houve reflexão na superfície (inversão de polaridade). Todos estes eventos irão chegar novamente a superfície, e cada múltipla de primeira ordem irá atuar como uma nova fonte. Assim, múltiplas de segunda ordem podem ser escritas como:

$$m_2(t) = -x_o(t) * m_1(t) = x_o(t) * x_o(t) * x_o(t), \quad (2.9)$$

e assim para as outras ordens. À vista disso, a resposta total $x(t)$, possuindo todas as múltiplas de superfície é escrita como:

$$x(t) = x_o(t) - x_o(t) * x_o(t) + x_o(t) * x_o(t) * x_o(t) - \dots \quad (2.10)$$

Esta resposta pode ser visualizada no diagrama de realimentação, como mostra a Figura 2.8.

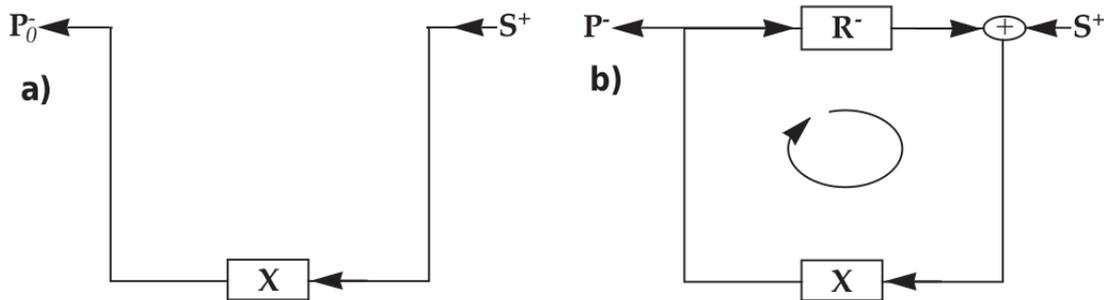


Figura 2.8: Em (a) uma reflexão livre de múltipla. Em (b) um diagrama de retroalimentação no qual representa a geração das múltiplas. Após refletir contra a superfície, todas as primárias contidas na resposta do impulso $x_o(t)$ na subsuperfície tornam-se múltiplas de primeira ordem. Depois de mais uma reflexão contra a superfície se tornam de segunda ordem, etc. (Verschuur, 2006)

A resposta impulsiva $x(t)$ é detectada na superfície, mas também é refletida de volta para a subsuperfície gerando uma ordem maior de múltiplas (Verschuur, 2006). Olhando o diagrama de realimentação, pode se obter uma relação implícita para essa resposta. O campo descendente total é a fonte original, $\delta(t)$, combinado com a resposta total refletida $-x(t)$, e este campo de onda irá refletir na subsuperfície por meio da resposta da terra $x_o(t)$. Isto pode ser escrito como:

$$x(t) = x_o(t) * [\delta - x(t)] = x_o(t) - x_o(t) * x(t) \quad (2.11)$$

Isto significa que todas as múltiplas de superfície podem ser geradas pela convolução da resposta primária com a resposta total. Essas expressões (2.10 e 2.11) no domínio da frequência ficam:

$$X(f) = X_o(f) - X_o^2(f) + X_o^3(f) - X_o^4(f) + \dots, \quad (2.12)$$

$$X(f) = X_o(f) - X_o(f)X(f), \quad (2.13)$$

Explicitando $X(f)$ e $X_o(f)$, temos, as equações 2.13 e 2.14, respectivamente:

$$X(f) = X_o(f)[1 + X_o(f)]^{-1}, \quad (2.14)$$

$$X_o(f) = X(f)[1 - X(f)]^{-1}. \quad (2.15)$$

Desta forma obtemos uma equação onde temos a resposta impulsiva sem a presença de múltiplas de superfície a partir da resposta total. Expandindo a equação temos:

$$X_o(f) = X(f) + X_o^2(f) + X_o^3(f) + X_o^4(f) + \dots \quad (2.16)$$

Retornando para o domínio do tempo:

$$x_o(t) = x(t) + x(t) * x(t) + x(t) * x(t) * x(t) + \dots \quad (2.17)$$

A equação acima diz que auto-convolução da resposta total nos fornece a resposta impulsiva livre de múltiplas.

As equações acima desconsidera as características da fonte sísmica, ou seja, é a resposta a um impulso perfeito. Considerando a assinatura fonte, temos:

$$p_o(t) = x_o(t) * s(t) \quad (2.18)$$

$$p(t) = x(t) * s(t), \quad (2.19)$$

a equação 2.10 torna-se:

$$p(t) = x_o(t) * [s(t) - p(t)] = p_o(t) - x_o(t) * p(t). \quad (2.20)$$

Definindo um operador $a(t)$, sendo ele igual á:

$$a(t) * s(t) = -\delta(t), \quad (2.21)$$

Reescrevendo a equação 2.19, temos:

$$p(t) = p_o(t) + p_o(t) * a(t) * p(t) \quad (2.22)$$

No qual o operador $a(t)$ atua como o filtro de deconvolução da fonte. O fator de escala -1 é incluído para descrever o efeito da refletividade da superfície. A equação 2.16 pode ser escrita agora, incluindo o efeito da fonte:

$$p_o(t) = p(t) - a(t) * p(t) * p(t) + a(t) * a(t) * p(t) * p(t) * p(t) - \dots \quad (2.23)$$

A Figura 2.9 mostra a remoção de múltiplas de superfície de acordo com a equação 2.22 para o meio com apenas um refletor. A Figura 2.9a com todas as reflexões, tanto primárias quanto múltiplas. As Figuras 2.9b a 2.9d mostram o resultado da convolução do traço com ele mesmo. Veja que a Figura 2.9b mostra o resultado da primeira convolução, representando as múltiplas de primeira ordem, a 2.9c mostra o resultado de 2.9b convolvido com a resposta total, representando as múltiplas de segunda ordem e assim por diante. Por causa da presença da assinatura da fonte, as múltiplas previstas não se igualam às múltiplas originais, portanto, faz-se necessário a modelagem e aplicação da *wavelet*, como descrita na equação 2.22, uma vez para 2.8b, duas vezes para 2.8c e assim por diante. E então os resultados das "convoluções deconvolidas" podem ser somados ao dado e a estimativa de um dado sem múltiplas é produzida, vide Figura 2.8e (Verschuur, 2006).

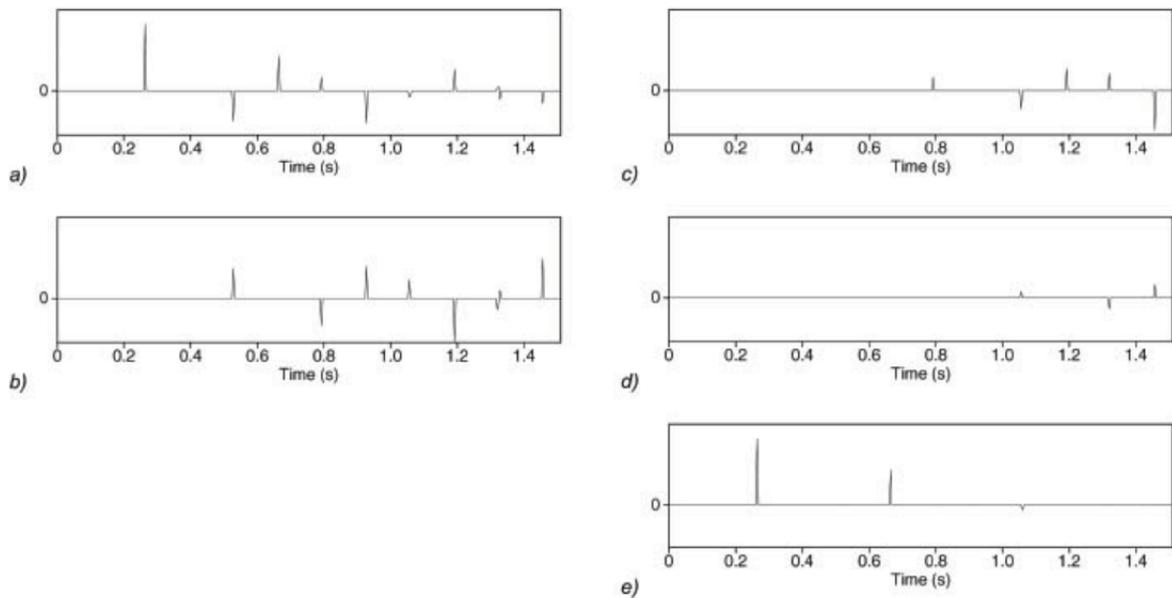


Figura 2.9: Remoção da múltiplas de superfície a partir da autoconvolução da resposta total. Em (a) resposta com duas primárias e todas as múltiplas. (b) A primeira múltipla é prevista, obtida pela auto convolução da resposta total. (c) A múltipla de segunda ordem é prevista, obtida a partir da convolução da múltipla de primeira ordem com a resposta total. (d) A múltipla de terceira ordem. (e) O dado sem múltiplas de superfície, obtido pela soma da resposta com as previsões de (a) a (d) (Verschuur, 2006).

Representando a remoção de múltiplas definida pela equação 2.22 temos:

$$P_o(f) = P(f) - A(f)P^2(f) + A^2(f)P^3(f) - A^3(f)P^4(f) + \dots \quad (2.24)$$

Onde o operador de superfície $A(f)$ é definido como:

$$A(f) = -[S(f)^{-1}], \quad (2.25)$$

Sendo $S(f)$ a transformada temporal direta de Fourier da assinatura da fonte $s(t)$. As equações obtidas até o momento foi para uma propagação unidimensional, no qual as ondas planas e horizontais interagem com um meio sem variação lateral. Porém sabemos que em subsuperfície há variações laterais, fazendo-se necessário uma reformulação de forma que possa se aproximar um pouco mais da realidade em subsuperfície. Observando a equação 2.19, é notado que as múltiplas de superfície pode ser descritas como a combinação do dado total $p(t)$ com $x_o(t)$, que no domínio da frequência equivale a multiplicação dos mesmos. Desta forma, supõe-se, na predição de múltiplas de superfície como sendo uma extrapolação do campo de onda, onde a resposta impulsiva primária, $X_o(f)$, pode ser utilizada para descrever a trajetória da extrapolação para prever todas as múltiplas de superfície. Em modelos 2D, a predição de múltiplas de superfície parte da integral de *Rayleigh* (Verschuur, 2006):

$$M_o(x_r, x_s, f) = - \int_{x_k} X_o(x_r, x_k, f) P(x_k, x_s, f) dx_k, \quad (2.26)$$

Onde M_o corresponde à múltipla predita para uma combinação de fonte na posição x_s e receptor na posição x_r para uma frequência f , e x_k corresponde à coordenada lateral sobre a qual o somatório acontece (vide Figura 2.10). É importante notar que somente trajetórias de raio para um evento em X_o e um evento em P são considerados. Fazendo o somatório ao longo da coordenada x_k significa que todas as trajetórias possíveis estão sendo consideradas (Verschuur, 2006), e o sinal negativo indica que houve reflexão na superfície. Na prática, sabemos que dados sísmicos são discretos, portanto fazendo a discretização da Eq. 2.19, temos:

$$M_o(x_r, x_s, f) = - \sum_{x_k} X_o(x_r, x_k, f) P(x_k, x_s, f). \quad (2.27)$$

Ou seja, todo dado pré-empilhado para um tal componente de frequência pode ser organizado na forma de matriz (Berkhout, 1982). Essa matriz pode ser obtida através do processo ilustrado da Figura 2.11. A transformada de Fourier é aplicada em cada tiro, selecionando uma componente de frequência $f = \omega k$, em cada tiro, dos quais é obtido um vetor coluna onde cada número complexo é a medida do receptor.

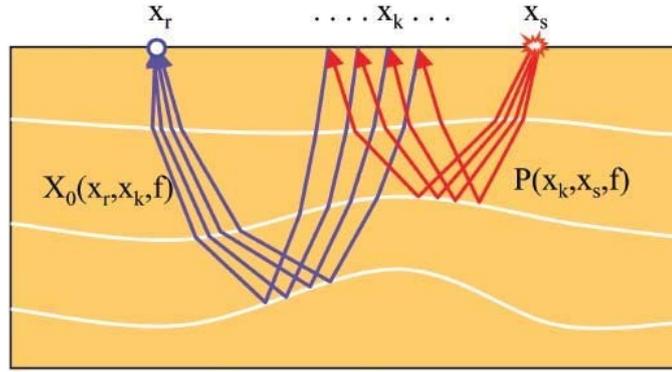


Figura 2.10: Uma múltipla de superfície de primeira ordem é construída por meio da combinação de uma família de tiro comum do dado P com uma família de receptor comum da resposta primária X_o . Essas famílias são convolvidas uma com a outra e somadas afim de se obter a múltipla predita (Verschuur, 2006).

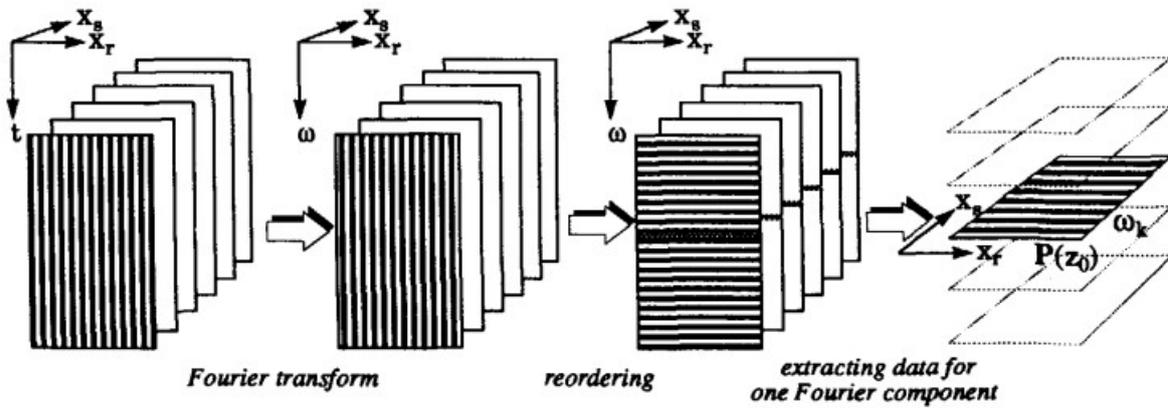


Figura 2.11: Estruturação das matrizes de dados (Verschuur, 1991).

Se o processo se repetir para todas as combinações de fonte e receptor para uma certa frequência, podemos descrevê-lo como:

$$M_o = -X_o P \quad (2.28)$$

A equação 2.27 representa um elemento de matriz M , na qual é construída a partir da notação da Figura 12b, portando, cada elemento em M é obtido pela combinação de uma linha X_o com uma coluna de P . Na Figura 12a cada coluna contém famílias de tiro comum, cada linha possui famílias de receptor comum e cada interseção indica um número complexo que é a resposta sísmica para uma combinação fonte-receptor. Onde esse processo ocorre de forma iterativa partindo como estimativa inicial o próprio dado total.

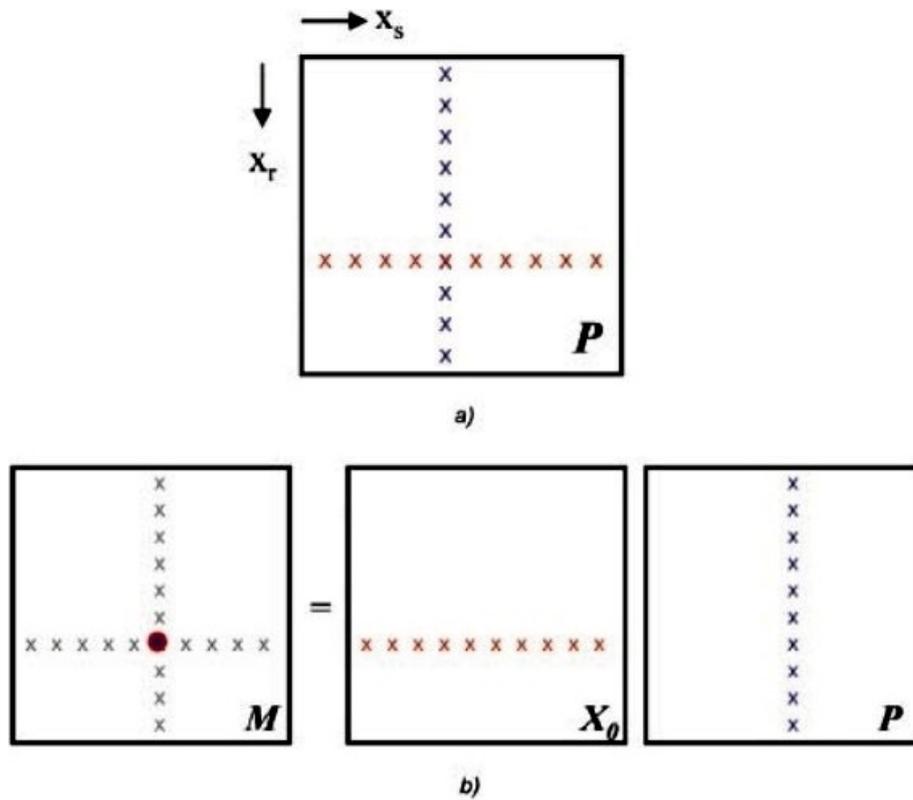


Figura 2.12: Notação matricial para estururação do dado pré-empilhado $P(x_r, x_s, f)$ na matriz P (a). Em (b) mostra a predição de múltiplas sendo descrita como uma multiplicação de matrizes (Verschuur, 2006).

CAPÍTULO 3

METODOLOGIA E RESULTADOS

O dado utilizado foi do Golfo do México, no qual se constitui de uma linha sísmica 2D, adquirida em região de lâmina d'água 1500 metros. Os parâmetros de aquisição foram (Figura 3.1):

Parâmetros de Aquisição	
Nº de Tiros	1001
Nº de Canais	180
Distância entre Tiros	88 pés
Distância entre Canais	88 pés
Lanço	0 - 330 - 16082 (em pés)
Multiplicidade	90
Distância entre CMP	44 pés

Figura 3.1: Parametros de aquisição da linha marinha do Golfo do México.

Em subsuperfície apresenta uma estrutura salina em forma de domo na porção central do dado. Há eventos de reflexões múltiplas referentes a reverberação da sísmica na lâmina d'água e ainda reverberação referentes ao topo e a base da estrutura salina descrita (Maciel, 2007) (vide Figura 3.2).

O processamento da linha foi realizado utilizando o *software Seispace* desenvolvido pela *Landmark Graphics Corporation*. Este software dispõe de módulos que organizam o fluxograma contendo os processos desejados para cada etapa do processamento. O fluxo de processamento utilizado foi (Figura 3.3):

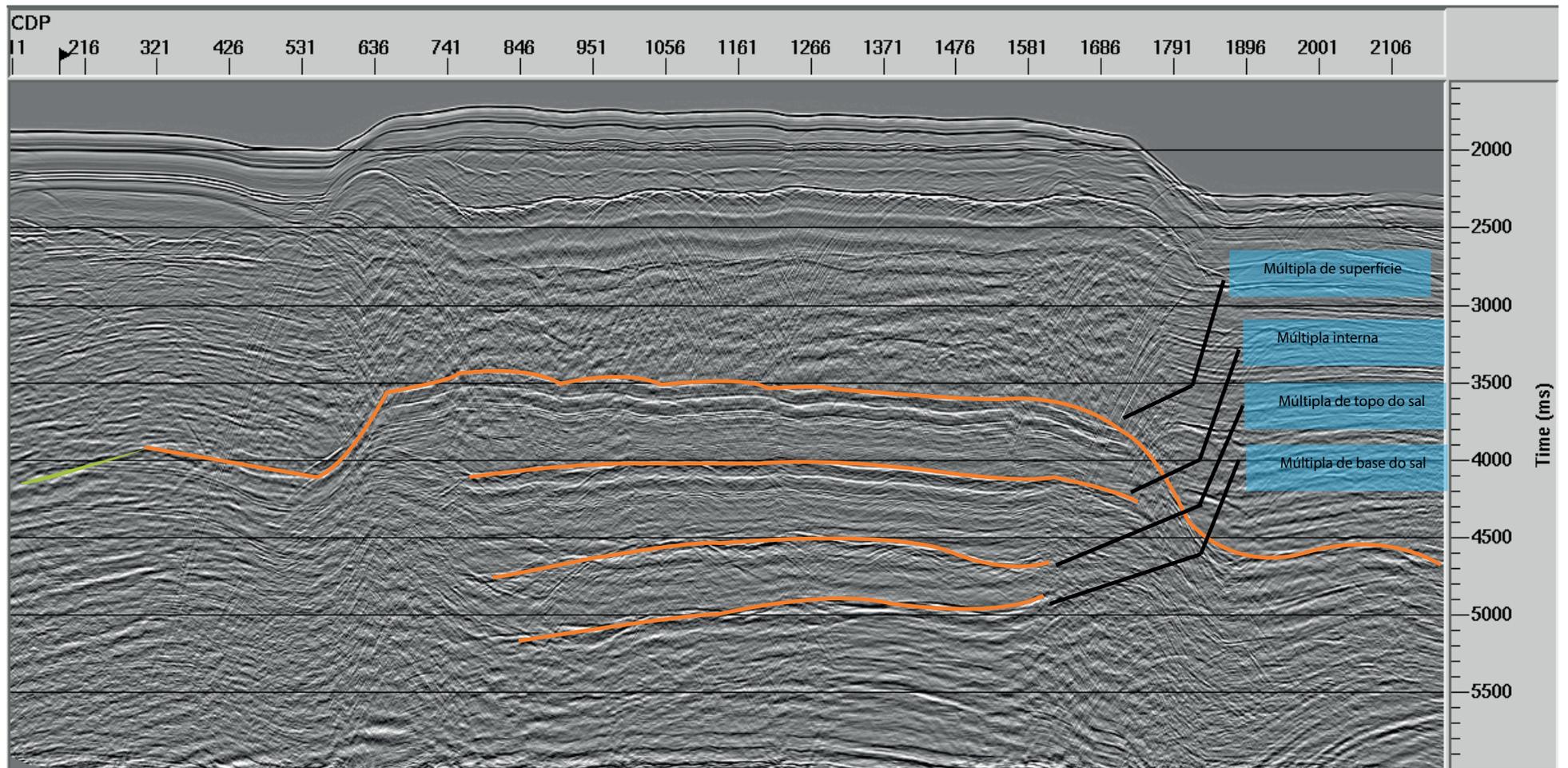


Figura 3.2: Seção bruta empilhada com os principais eventos de reflexões múltiplas do Golfo do México.

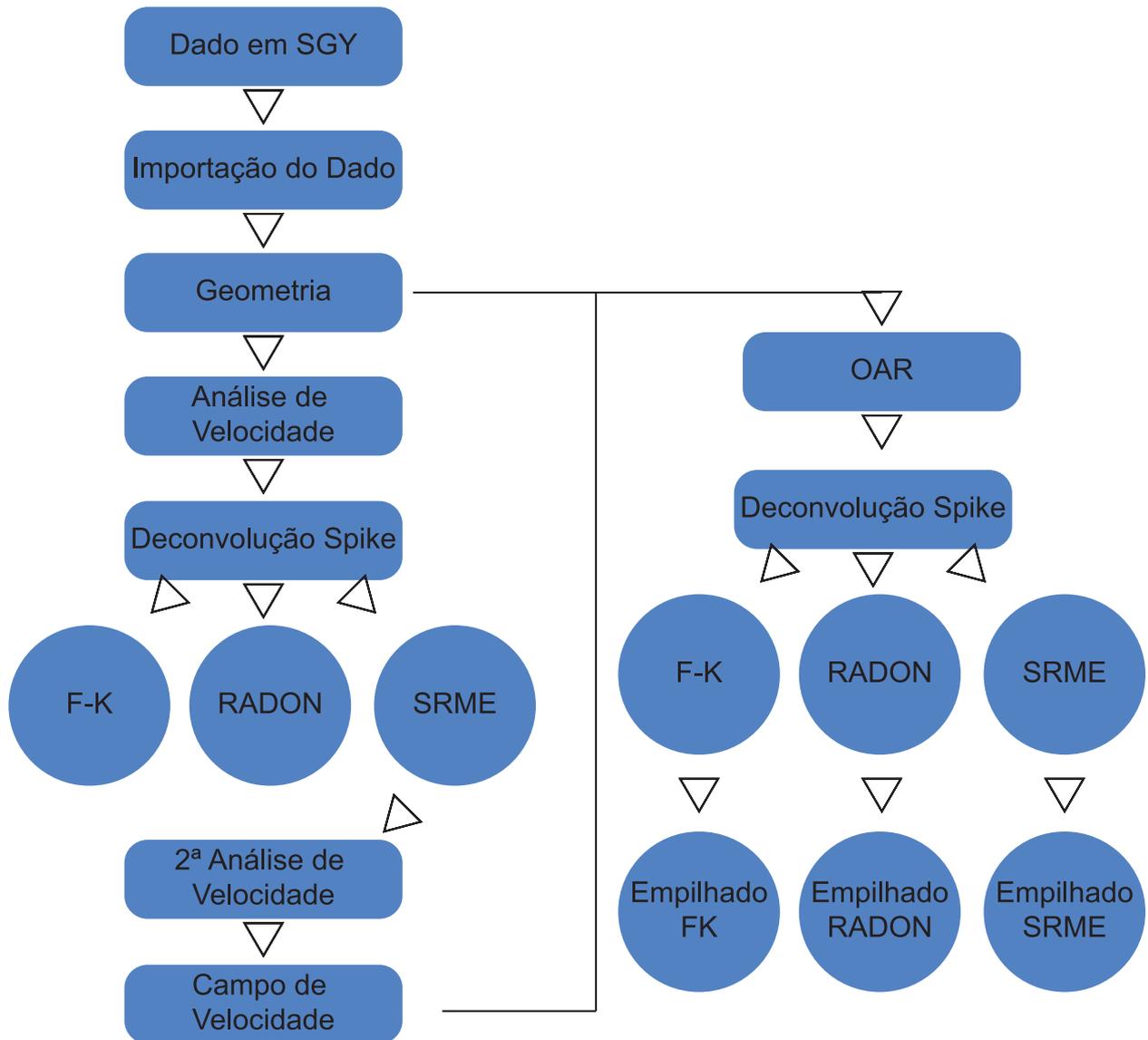


Figura 3.3: Fluxo de processamento utilizado na linha do Golfo do México.

3.1 Aplicação da Filtragem $F - K$

No *Seispace* aplicação é feita em duas etapas. A primeira utiliza-se o módulo ***F-K Analysis*** para determinar o polígono passante ou de rejeito. A segunda etapa é a aplicação do filtro com o módulo ***F-K Multiple Attenuation*** (Figura 3.4).

O dado de entrada é corrigido com a velocidade das múltiplas ou com a velocidade intermediária entre as múltiplas e primárias (Figura 3.5). Desta forma as múltiplas e as primárias são mapeadas em regiões diferentes (ver Capítulo 2).

Durante a geração do polígono de rejeito (ou passante), o programa oferece uma estimativa do dado filtrado.

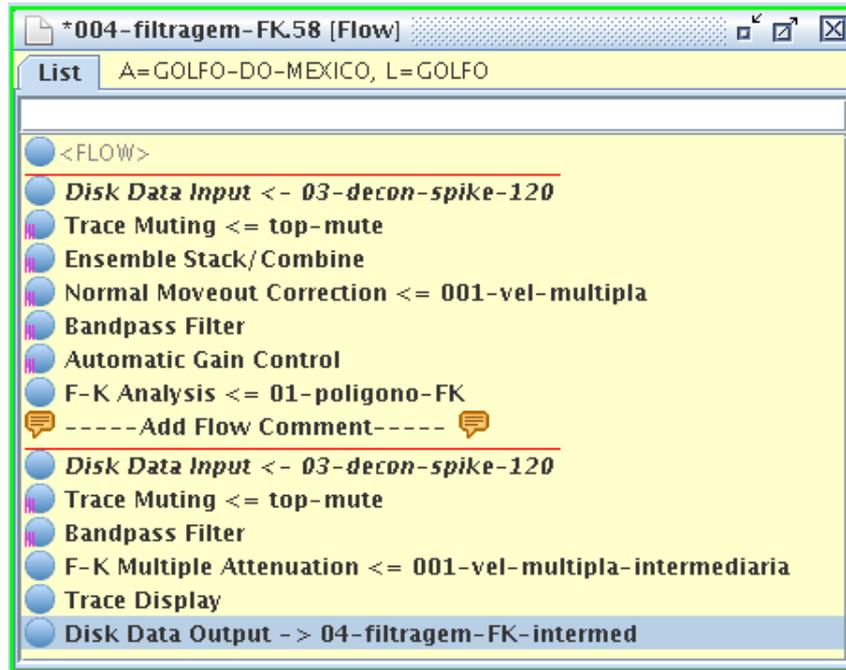


Figura 3.4: Fluxo para atenuação de múltiplas utilizando o método $F - K$.

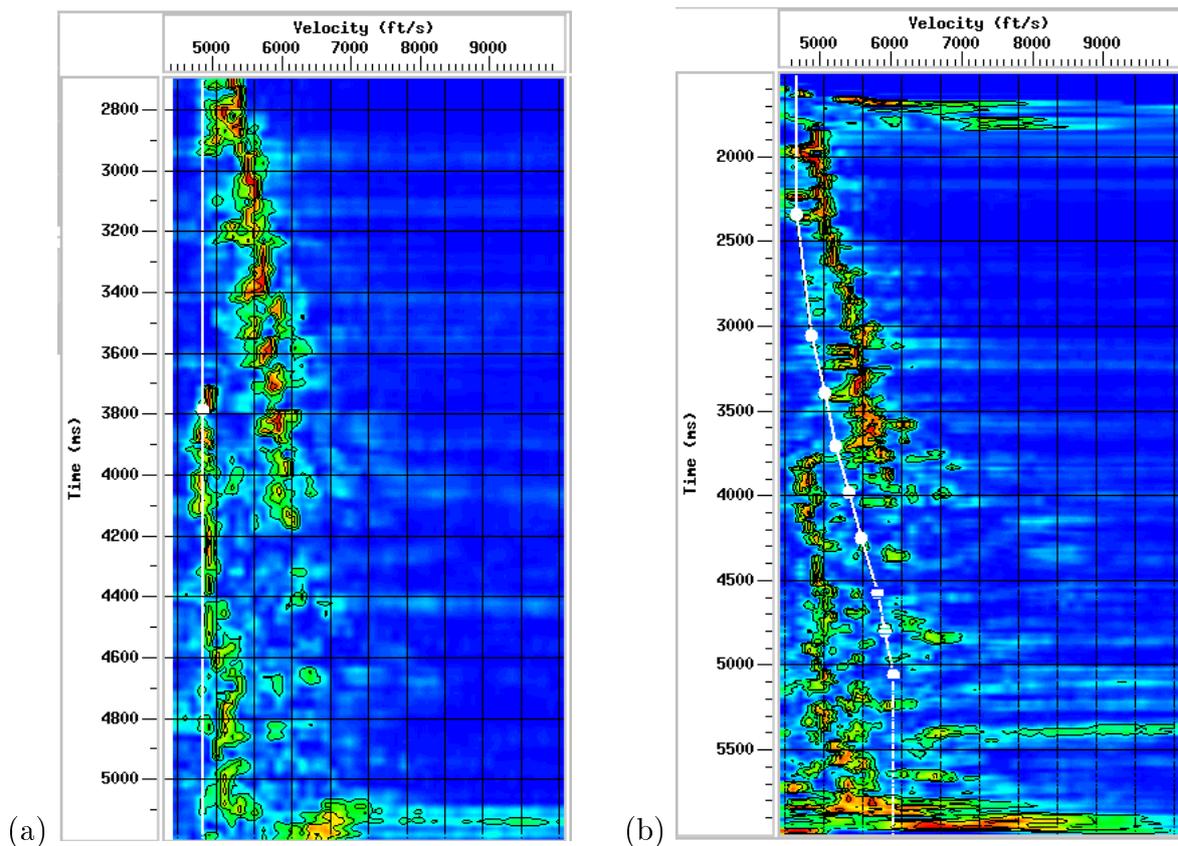


Figura 3.5: Pick de velocidade no seispase, o ponto branco indica onde foi feito o pick. Pick de velocidade da múltipla de superfície (a), e pick das velocidades intermediárias entre as múltiplas e primárias (b).

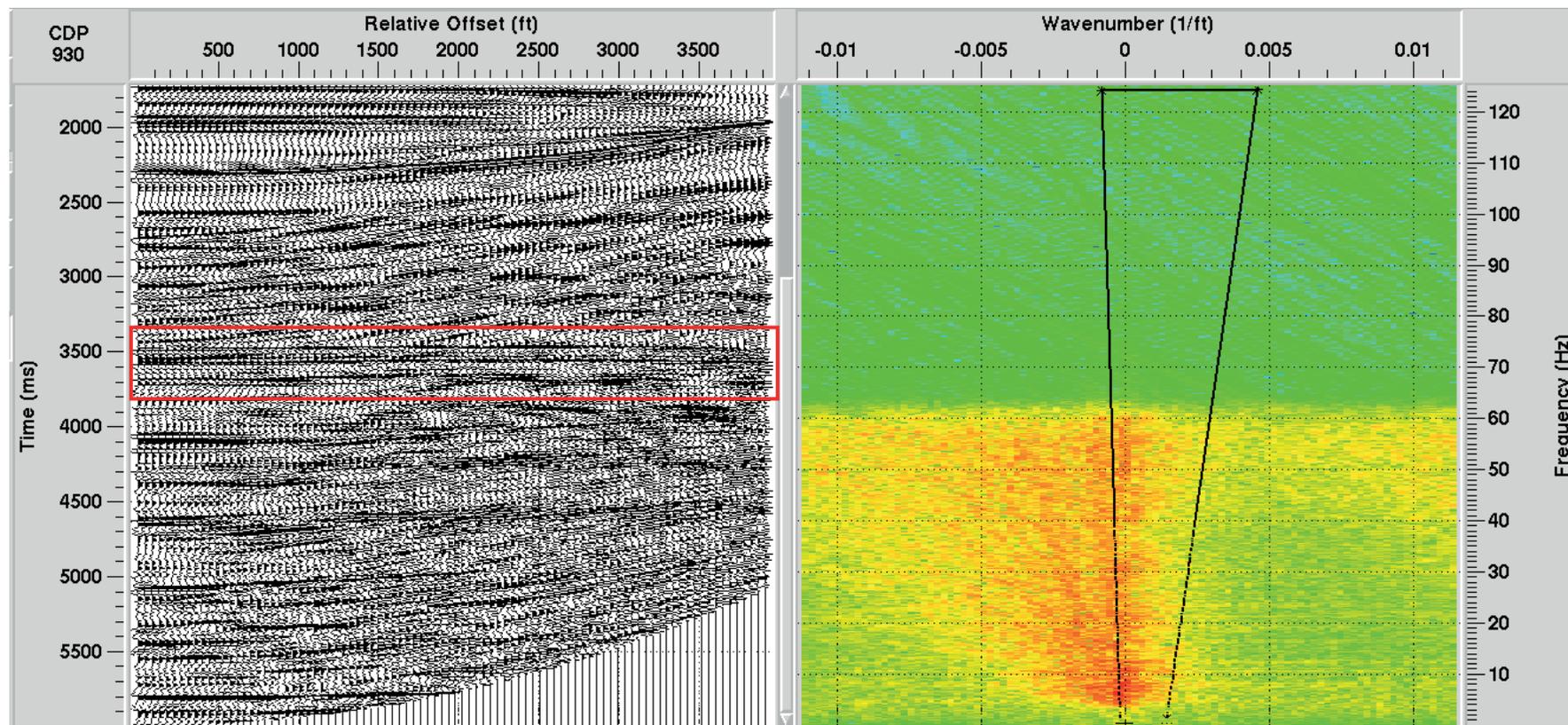


Figura 3.6: CDP 930 corrigido de MMO (dado de entrada). Ao lado direito da imagem temos o espectro $F - K$ do dado e o polígono de rejeito.

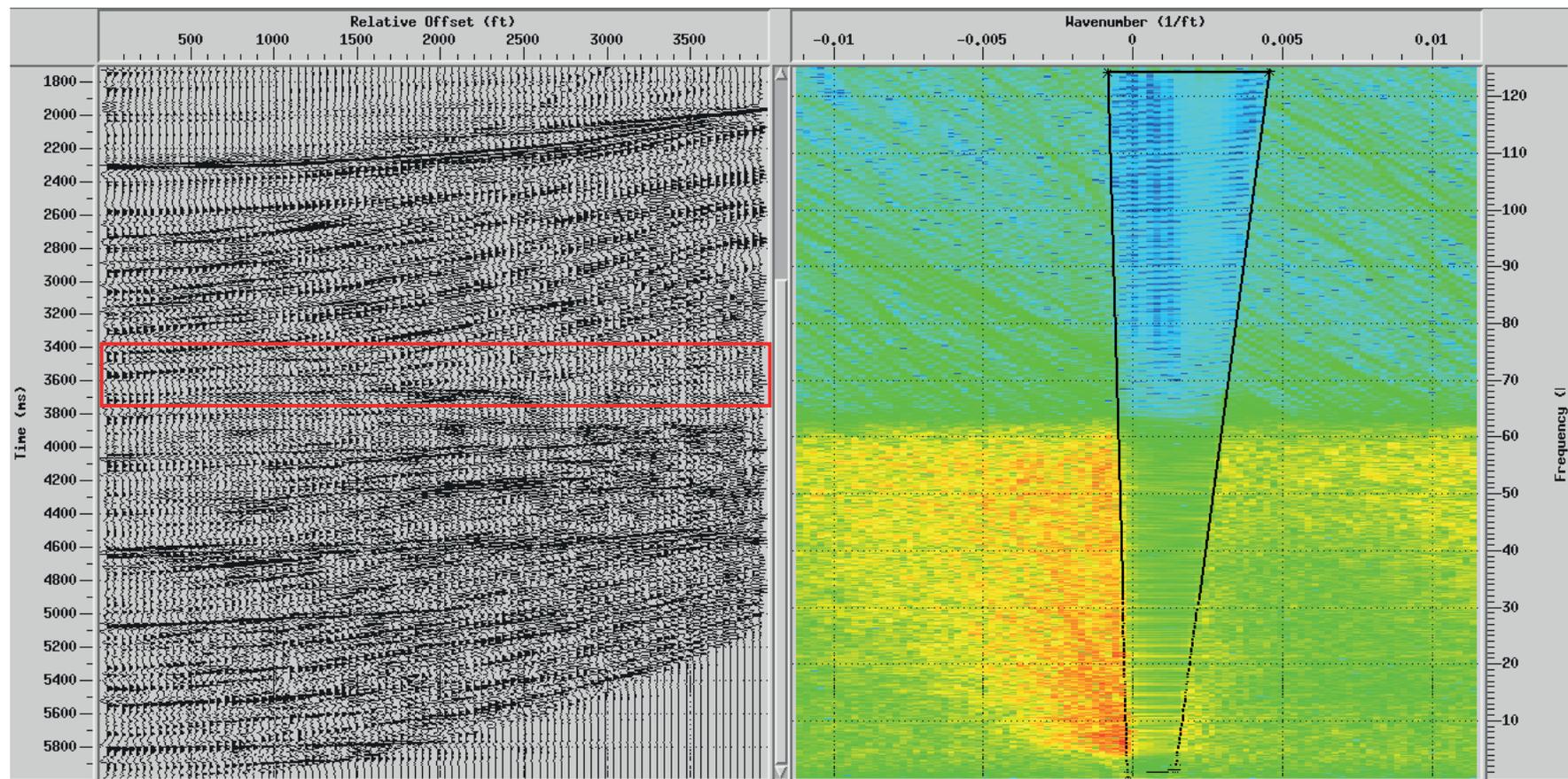


Figura 3.7: CDP 930 corrigido de MMO (dado de saída). Ao lado direito da imagem o espectro $F - K$ após aplicação do polígono de rejeito.

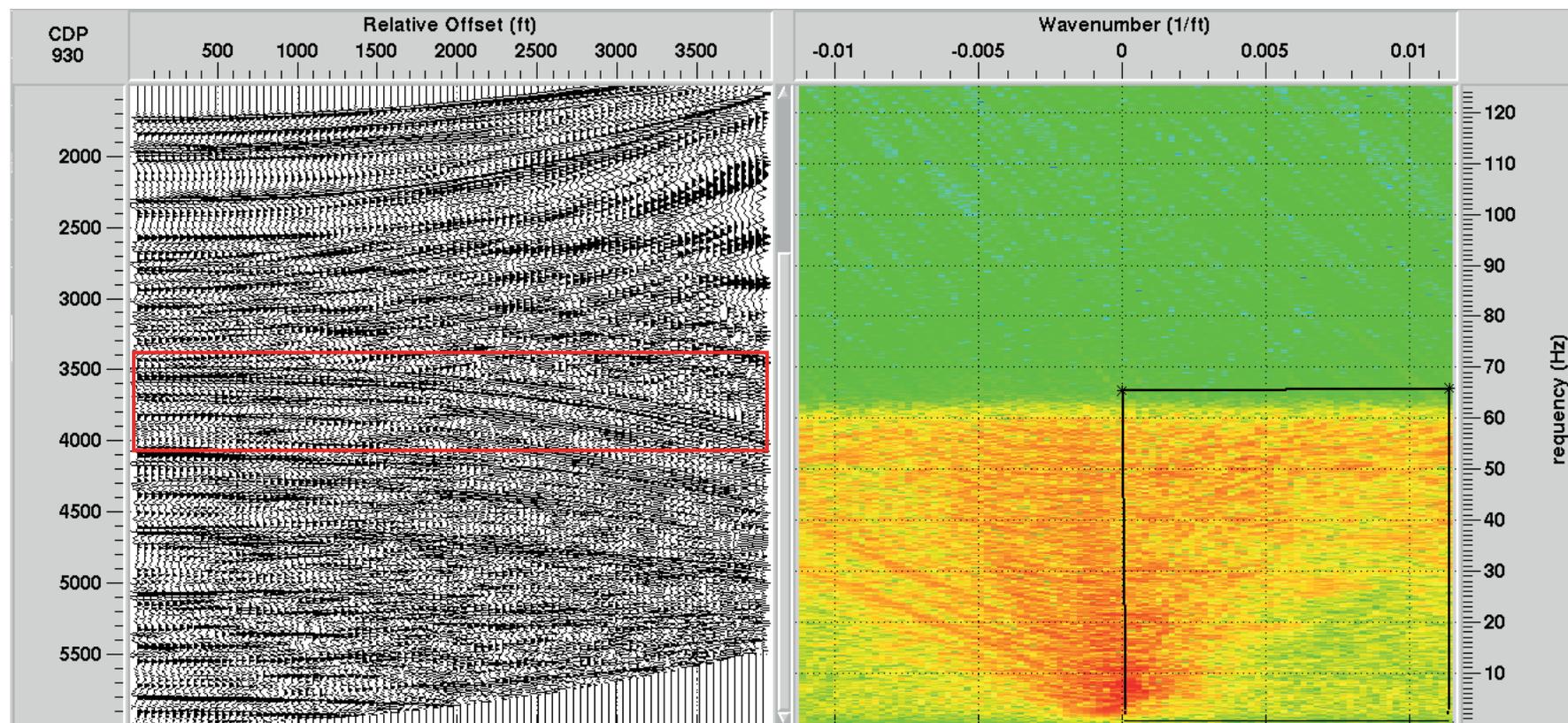


Figura 3.8: CDP 930 corrigido com a velocidade intermediária. Ao lado direito da imagem o espectro $F - K$ e o polígono de rejeito.

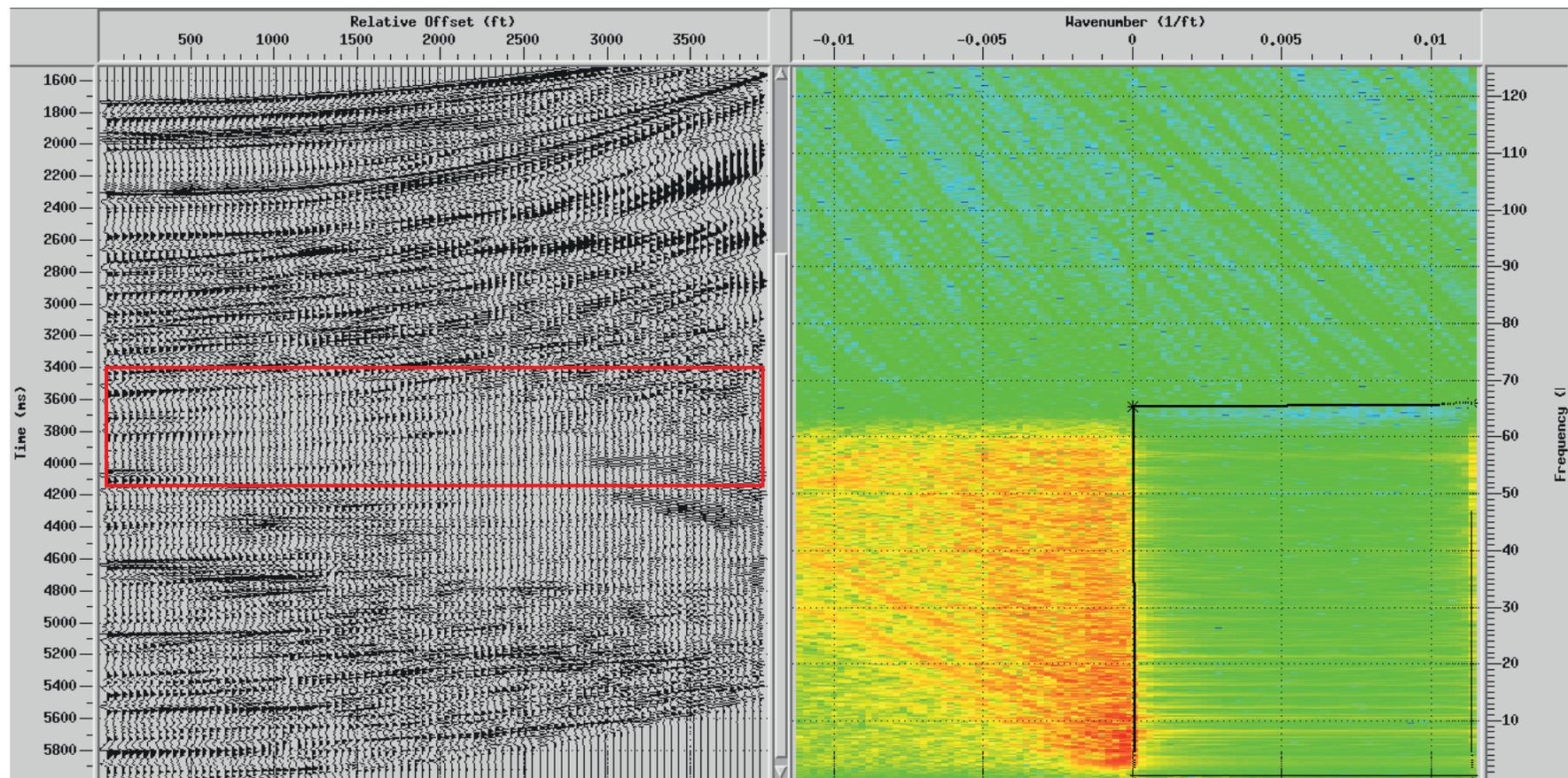


Figura 3.9: CDP 930 corrigido com a velocidade intermediária. Ao lado direito da imagem o espectro $F - K$ após a aplicação do polígono de rejeito.

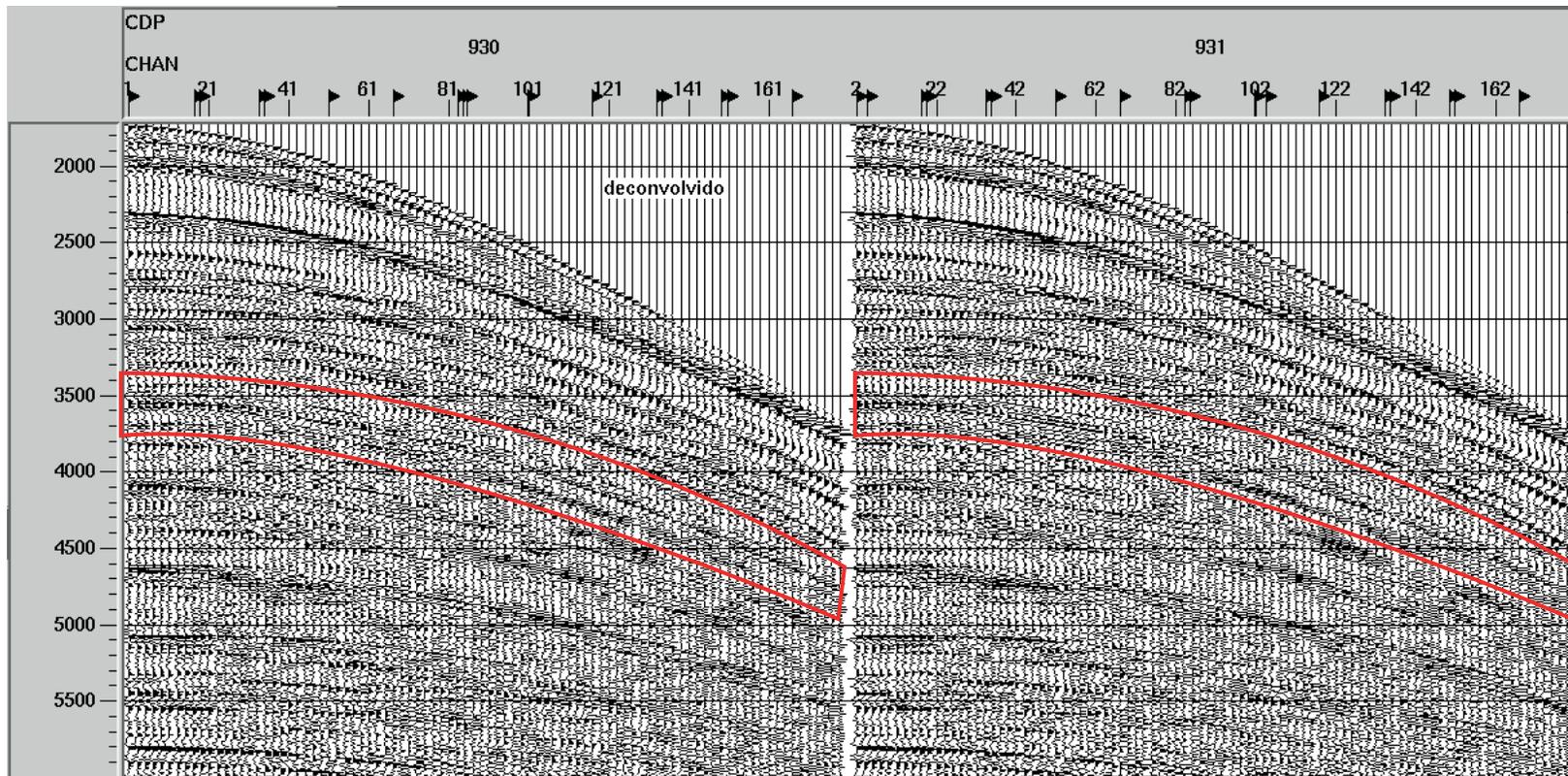


Figura 3.10: CDP's 930 e 931 deconvolvido antes da filtragem $F - K$ aplicada com o módulo $F-K$ *Multiple Attenuation*.

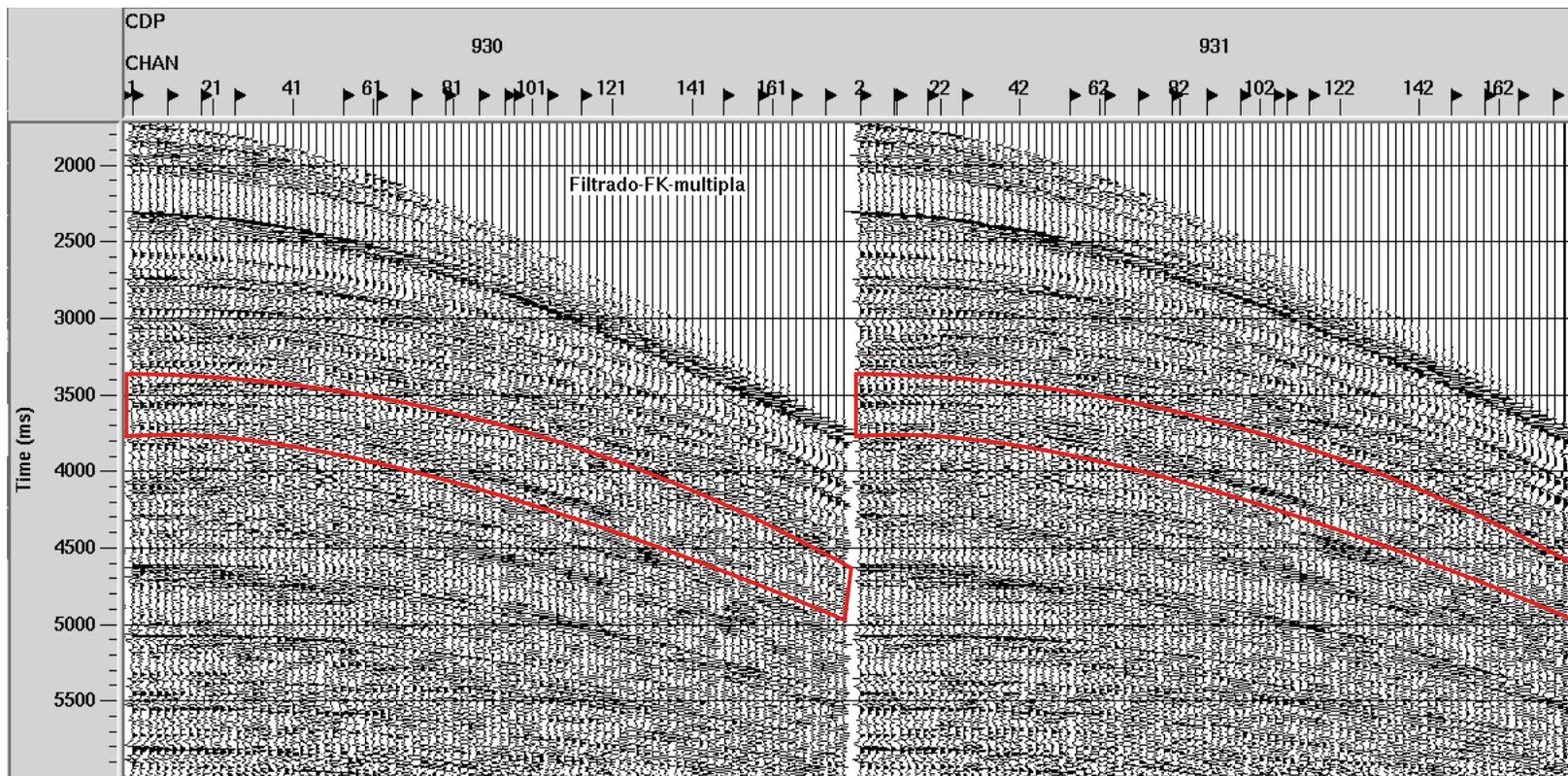


Figura 3.11: CDP's 930 e 931 após a filtragem $F - K$ aplicado com o módulo *F-K Multiple Attenuation*, utilizando a velocidade da múltipla.

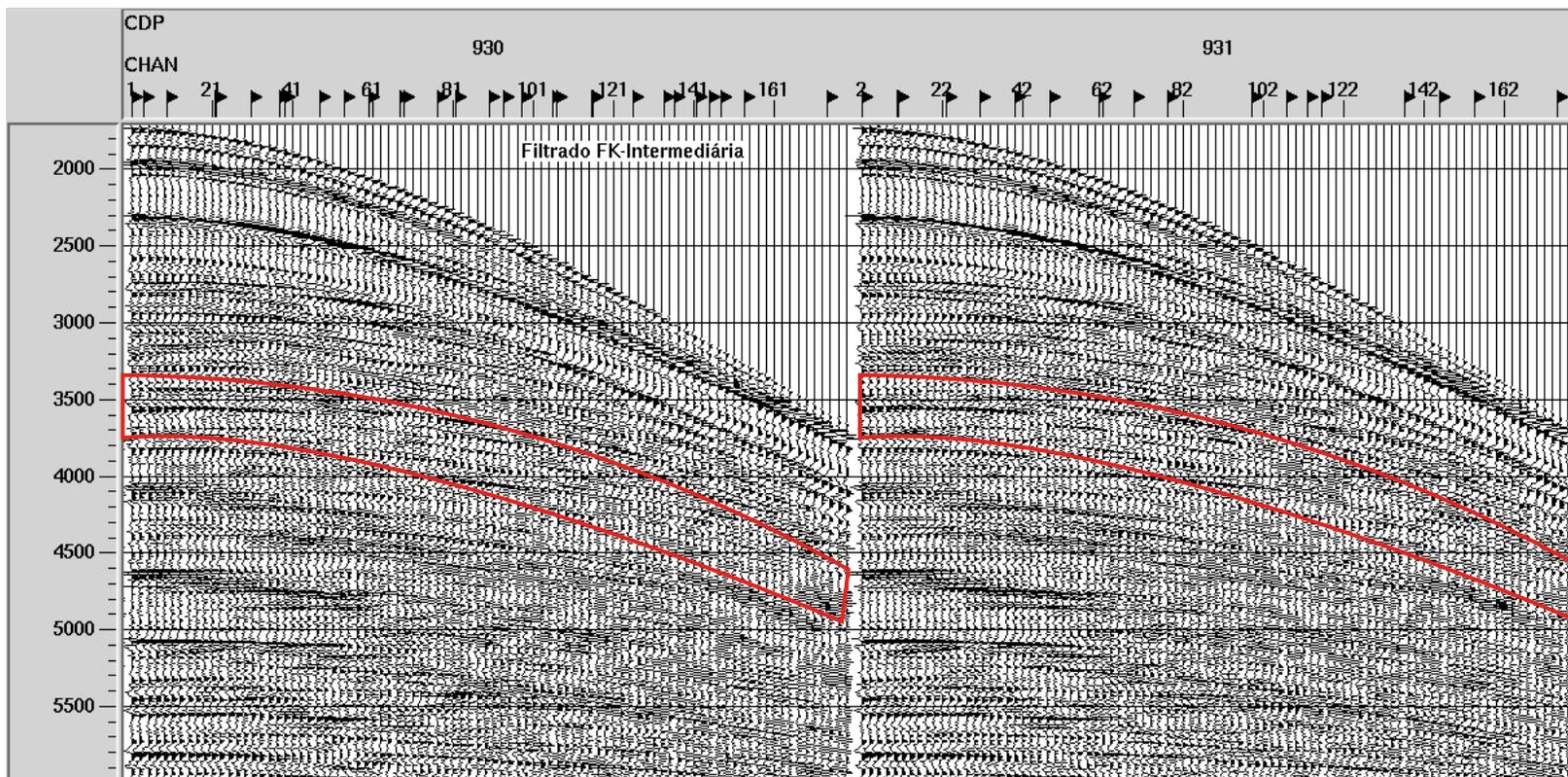


Figura 3.12: CDP's 930 e 931 após a filtragem $F - K$ aplicado com o módulo *F-K Multiple Attenuation*, utilizando as velocidades intermediária.

Após a geração dos polígonos, utiliza-se o módulo *F-K Multiple Attenuation* para aplicação da filtragem, fornecendo ao módulo além do dado de entrada, a tabela de velocidades para correção *moveout* e os polígonos de rejeito.

Como pode ser observado, tanto com a velocidade da múltipla (Figura 3.6 e 3.7) como as velocidades intermediárias (Figura 3.8 e 3.9), a filtragem $F - F$ não é tão eficiente em curtos *offsets*, isto ocorre, pois as primárias e as múltiplas possuem atrasos curtos no tempo nesses *offsets*, sendo os dois praticamente horizontais. Devido a isso os dois eventos são mapeados na mesma região do domínio $F - K$. Uma outra observação é que utilizando somente a velocidade da múltipla, a reflexão de fundo marinho também é atenuada (Figura 3.10, 3.11 e 3.12), isto porque possui velocidade próximas (1500 m/s ou 4921 pés/s) que é a velocidade da onda P na água. No caso das velocidades intermediárias isso não ocorre.

3.2 Aplicação da Filtragem Radon Parabólica

Semelhante ao filtro $F - K$, a aplicação da filtragem Radon Parabólica são feitas em duas etapas. Inicialmente utiliza o módulo *Interactive Radon/Tau-P Analysis* para determinar a banda de rejeito (ou passante). E na segunda etapa faz aplicação da transformada utilizando o módulo *Radon Filter* (Figura 3.13).

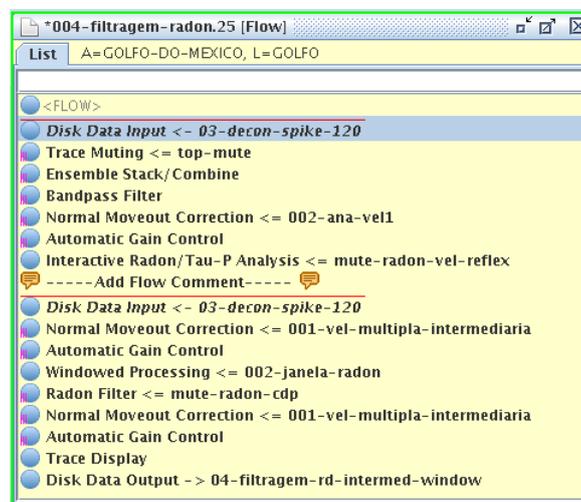


Figura 3.13: Fluxo no *Seispace* para filtragem Radon Parabólico.

Diferente da filtragem $F - K$, a transformada Radon parabólica não mapeia os eventos lineares não horizontais em uma única região do domínio Radon Parabólico, desta forma o dado de entrada deve estar com a correção NMO (velocidade das primárias) ou o *moveout* corrigido com as velocidades intermediárias entre as múltiplas e primárias.

Como no $F - K$, o programa oferece uma estimativa do dado filtrado durante a geração do polígono de rejeito (ou passante) (Figura 3.14, 3.15, 3.16 e 3.17).

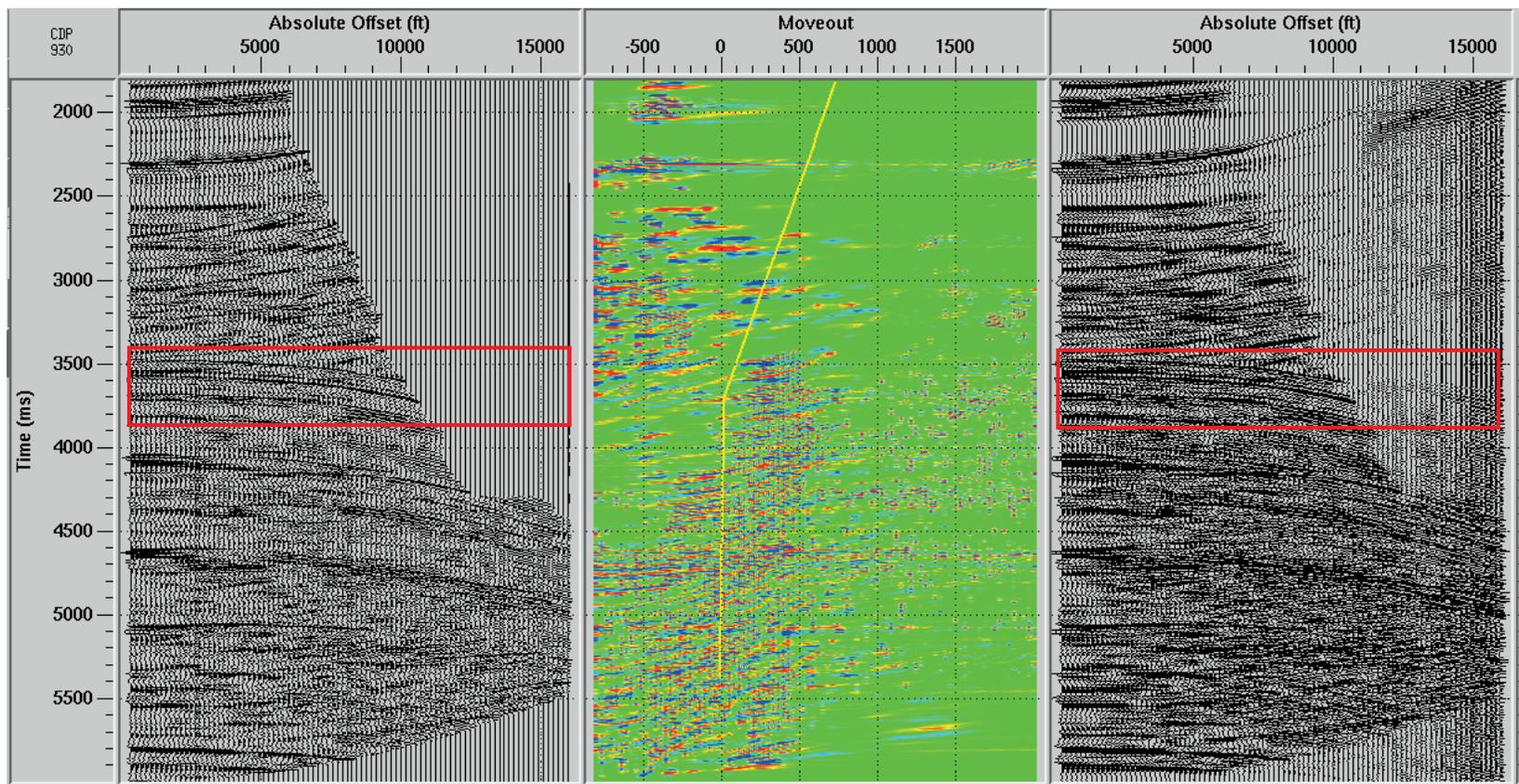


Figura 3.14: CDP 930 corrigido com a velocidade intermediária. Na parte central da imagem o domínio Radon. A direita da imagem o dado após a transformada inversa.

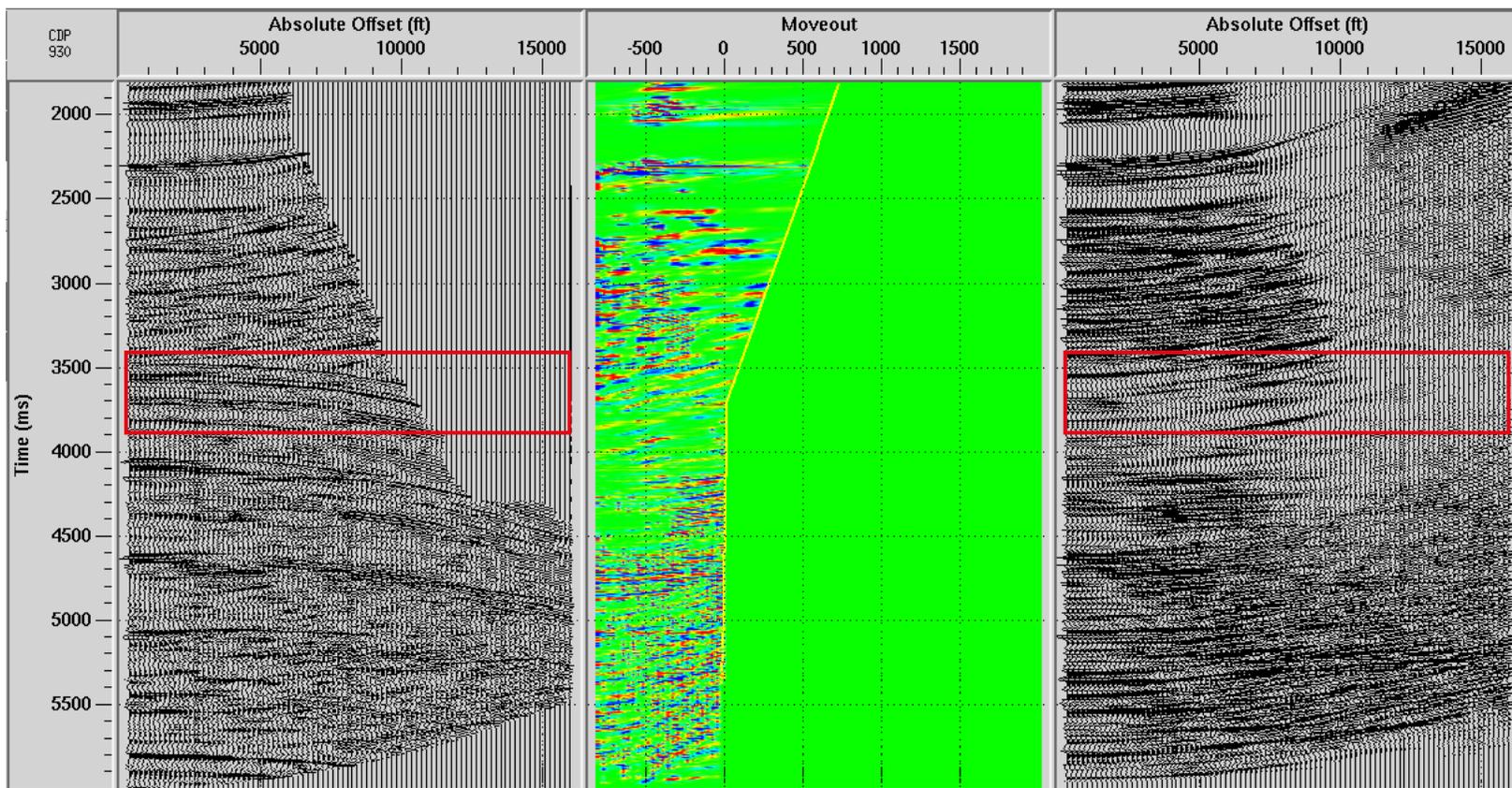


Figura 3.15: CDP 930 corrigido com a velocidade intermediária. Na parte central da imagem o domínio Radon. A direita da imagem o dado após a transformada inversa com o filtro Radon aplicado.

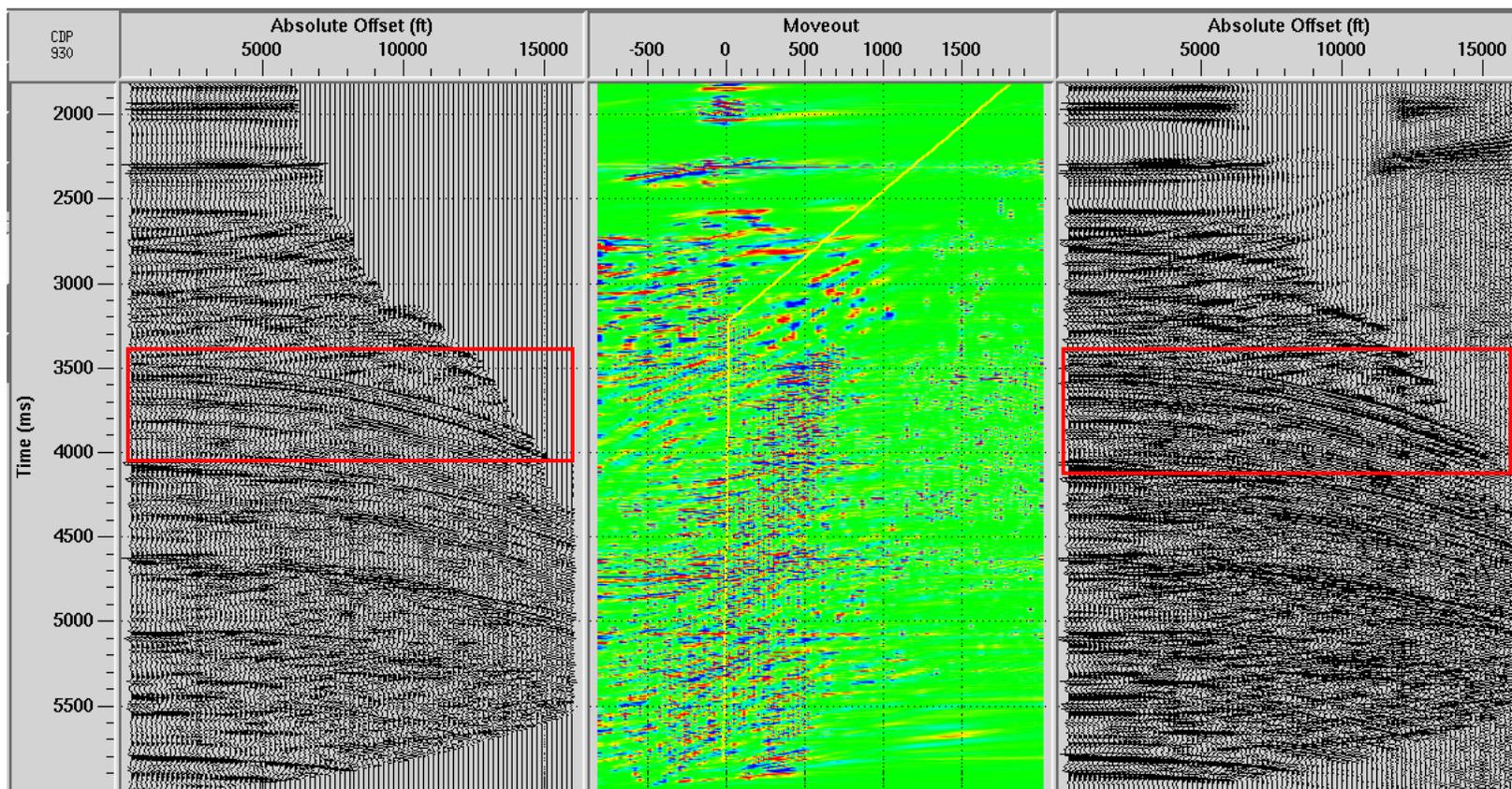


Figura 3.16: CDP 930 corrigido de NMO. Na parte central da imagem o dominio Radon. A direita da imagem o dado após a transformada inversa.

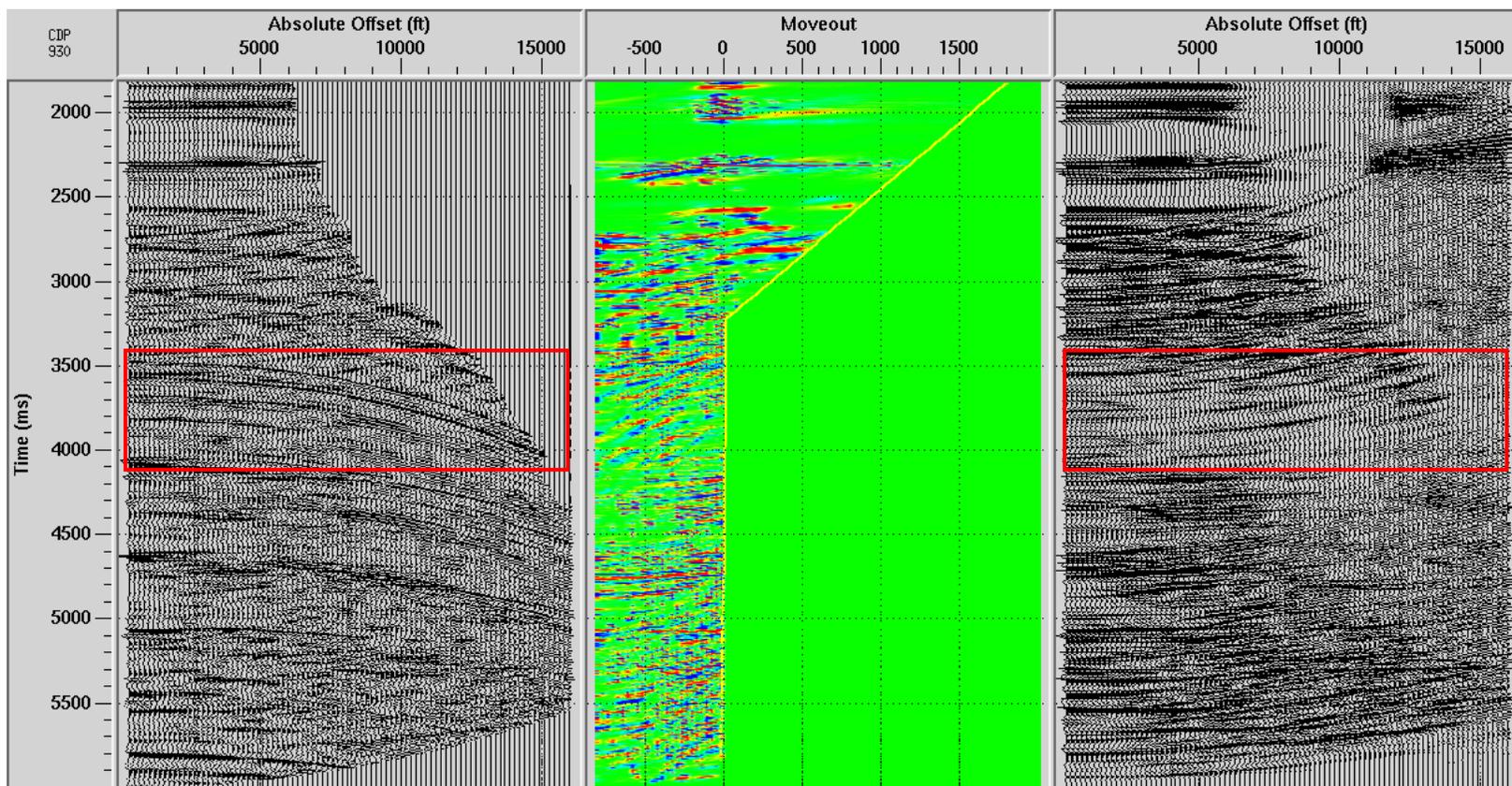


Figura 3.17: CDP 930 corrigido de NMO. Na parte central da imagem o dominio Radon. A direita da imagem o dado após a transformada inversa com o filtro Radon Aplicado.

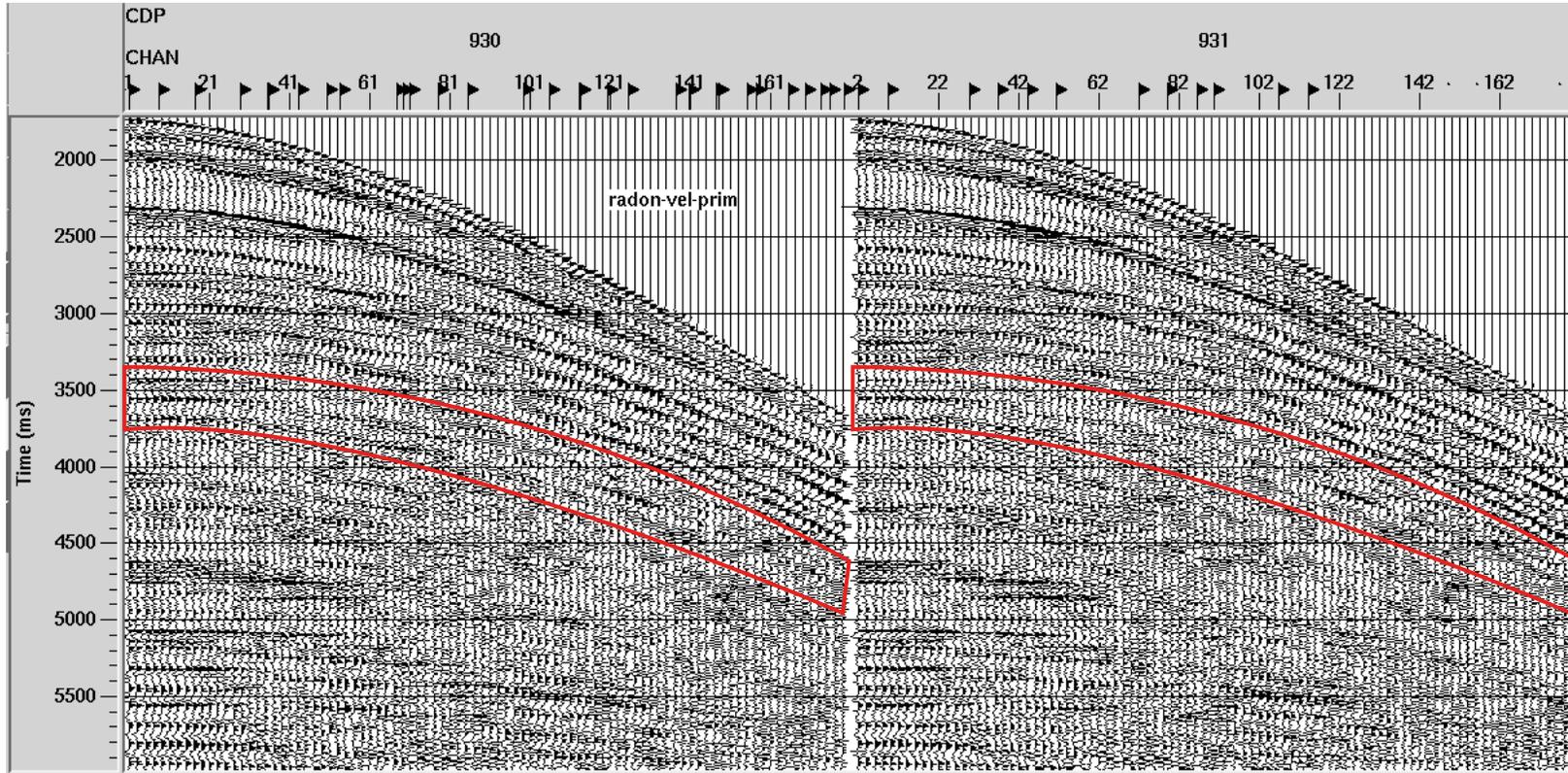


Figura 3.18: CDP's 930 e 931 após a filtragem Radon Parabólica aplicado com o módulo *Radon Filter*, utilizando as velocidades das reflexões primárias.

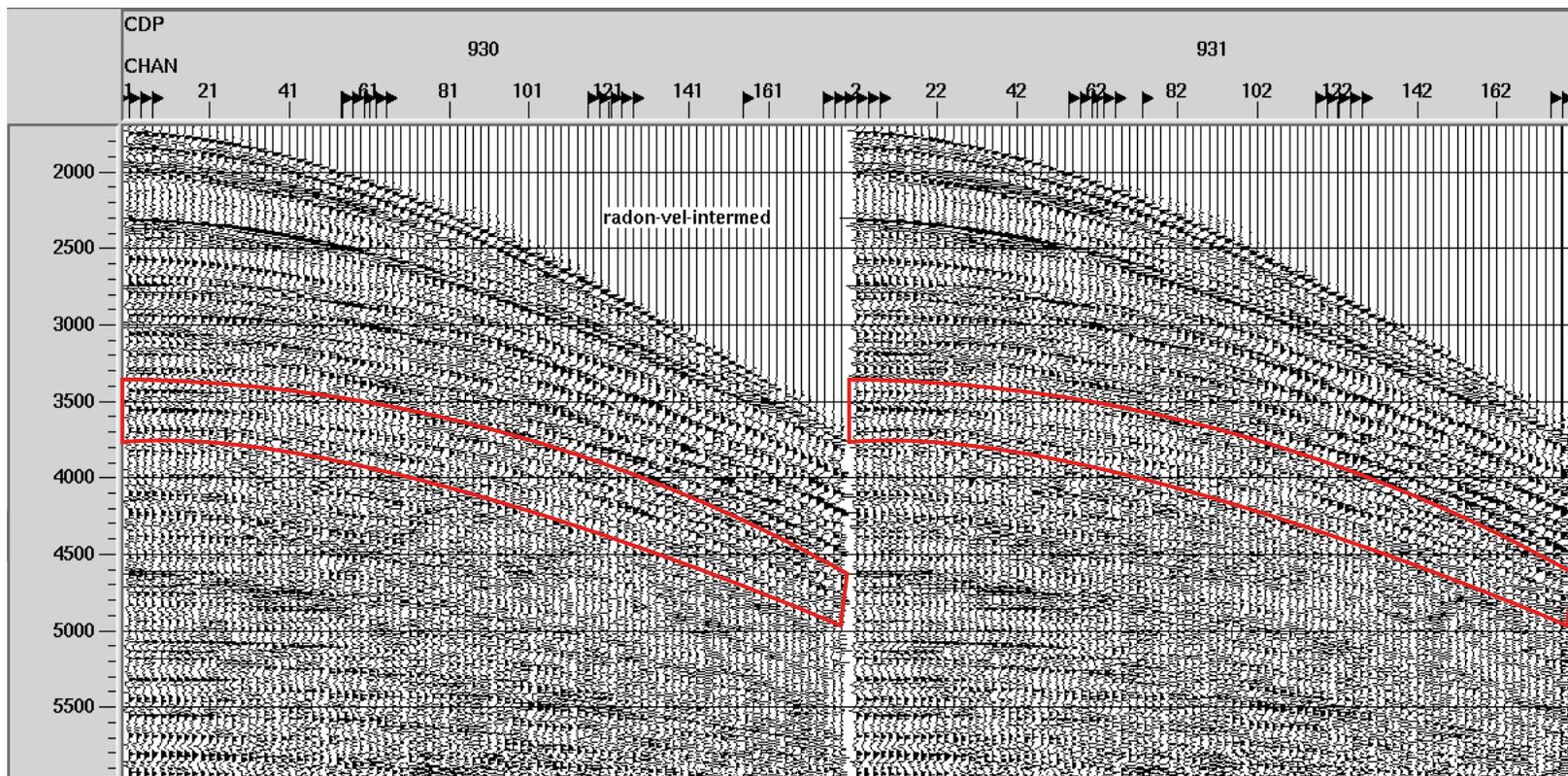


Figura 3.19: CDP's 930 e 931 após a filtragem Radon Parabólica aplicado com o módulo *Radon Filter*, utilizando as velocidades intermediárias.

Após a geração da banda de rejeito (ou passante), utiliza-se o módulo *Radon Filter* para a aplicação da filtragem, assim como no $F - K$ é fornecido ao módulo além do dado de entrada, a tabela de velocidades para correção *moveout*, sendo aqui as velocidades intermediárias e as velocidades das primárias e os pólígonos de rejeito.

Assim como na filtragem $F - K$, em curtos *offsets* a filtragem Radon Parabólica não é eficiente, devido ao mesmo problema, em curtos *offsets* os eventos são praticamente horizontais, sendo mapeados na mesma região no domínio Radon Parabólico. Como aqui não utilizamos velocidade das múltiplas a reflexão de fundo marinho não é afetada (Figura 3.18 e 3.19).

3.3 Aplicação do SRME

Como foi falado no capítulo 2, o SRME é um método no qual as informações necessárias para sua aplicação encontra-se no próprio dado em processamento. Desta forma isso apresenta-se como uma grande vantagem, porém, também pode se apresentar como uma fraqueza. Se o dado não for ideal em algum sentido, isso significa que as múltiplas não podem ser estimadas devidamente, assim a supressão de múltiplas torna-se limitada e artefatos podem ser introduzidos. Exemplos dessas circunstâncias não ideais são: falta de *offsets*, amostragem da fonte espaçada, dados ruidosos (Verschuur, 2006). Essas limitações serão comentadas a seguir e como foram contornadas.

3.3.1 Amostragem irregular de fontes e receptores

Considerando a equação 2.26, e utilizando a estimativa do dado livre de múltiplas, \hat{P}_o , temos:

$$\hat{M}(x_r, x_s, f) = - \sum_{x_k} \hat{P}_o(x_r, x_k, f) P(x_k, x_s, f). \quad (3.1)$$

Para que este somatório exista, requer que os dados sejam adquiridos com posições de fonte e receptor coincidentes, ou seja, as fontes e receptores devem ter amostragens regulares e iguais. A Figura 3.20 mostra uma situação na qual o espaçamento da fonte é o dobro do espaçamento de receptor. Sendo assim, apenas metade das combinações podem ser feitas. Por consequência, a família de contribuições das múltiplas contém metade da quantidade de traços que teria caso o dado fosse densamente amostrado (Verschuur, 2006). Na prática, isto gera efeitos *aliasing* no somatório. Para superar este problema uma interpolação dos tiros é recomendada, resultando em traços regularmente amostrados tanto para fontes quanto para receptores.

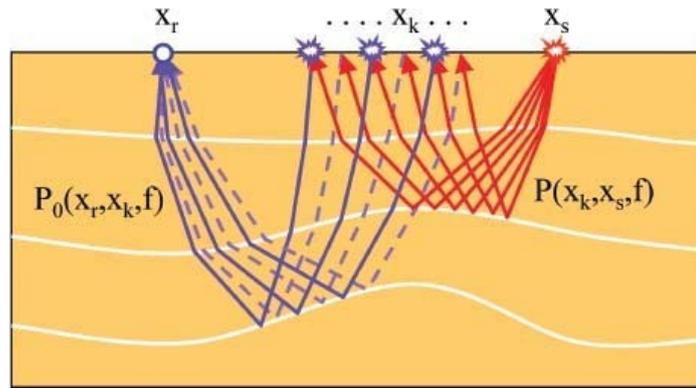


Figura 3.20: Construção de múltipla de superfície de primeira ordem no caso em que o espaçamento da fonte é o dobro do espaçamento do receptor. As linhas tracejadas representam a falta da contribuição dos tiros, o que significa que somente metade dos receptores podem ser combinados com as fontes (Verschuur, 2006).

3.3.2 Ausência de pequenos *offsets*

Uma característica das aquisições marinhas é a não aquisição de dados até o *zero-offset* (Verschuur, 2006), isso devido à operacionalidade da aquisição. Verschuur et al. (1992) destacaram que os pequenos *offsets* deveriam ser preenchidos antes da realização da predição de múltiplas, do contrário, a mesma não seria efetiva. Dragoset e Jericevic (1998) demonstrou o efeito que a ausência de pequenos *offsets* pode causar na supressão de múltiplas, especialmente em águas rasas. Sendo assim, uma interporlação para os pequenos *offset* pode ser determinante para o sucesso do SRME. É relevante pontuar que incoerência lateral no dado resultará na aparição de artefatos no dado predito. Verschuur, em 2006, propôs aplicar uma correção NMO no domínio CPM, repetir o *offset* mínimo até o *zero-offset* e aplicar o NMO inverso, isso, considerando, variações laterais e verticais suaves e que o *offset mínimo* não seja muito grande. Reorganizando o dado, após esse procedimento, temos o dado no domínio do tiro interpolado até o *zero-offset*.

No caso da linha do Golfo do México, o espaçamento entre tiros e o espaçamento entre receptores são iguais (88 pés), porém o *offset* mínimo é 330 pés. Ao fazer o preenchimento do dado até o *zero-offset*, os espaçamentos entre receptores ficará diferente de 88 pés, pois o *offset* mínimo não é múltiplo do espaçamento entre receptores. Desta forma foi necessário um acréscimo de 22 pés em todos os *offsets* (o *offset* mínimo agora é $352 = 4$ vezes o espaçamento entre *offsets*) para que o *offset* mínimo torna-se múltiplo do espaçamento entre receptores, e ao fazer o preenchimento não mudasse o espaçamento entre receptores. Para fazer esta modificação foi utilizado o módulo **Trace Header Math** (Figura 3.21).

Após a mudança nos *offsets* faz-se o preenchimento dos traços até o *zero-offset* com o módulo **SRME Regularization**. Esta ferramenta aplica a correção NMO, faz a reamostragem do dado *zero-offset* ao *offset* máximo e então aplica a correção NMO inversa.

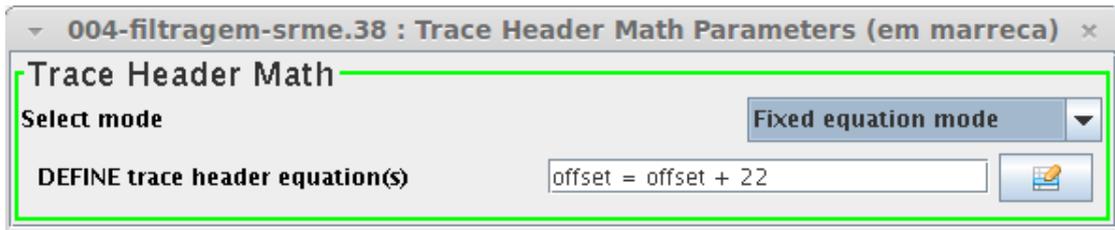


Figura 3.21: Módulo *Trace Header Math* usado para modificar os offsets de todo o dado.

3.3.3 Adição de informação além do *zero-offset*

Após a interpolação até o *zero-offset* o dado pode não se encontrar na forma ideal para a utilização do SRME. Isto porque, normalmente dados marinhos (que é o caso deste trabalho), possui arranjo *end-on*, em sua aquisição (Figura 3.22). Em uma situação de camadas horizontais, isto não se apresentará como um problema, contudo para meios geológicos mais complexos, não será da mesma forma. Considere o modelo descrito na Figura 3.23a, o ponto de reflexão na superfície está entre as posições da fonte do receptor considerados, ou seja, esta múltipla pode ser predita pela combinação de um receptor do tiro em questão com um traço localizado na posição indicada pela estrela laranja (Verschuur, 2006). Assim, os traços necessário para a obtenção da predição estão presentes no intervalo de *offsets* medidos.

Porém, em uma estrutura mais complexa, pode ocorrer que o ponto de reflexão na superfície, esteja fora do arranjo de aquisição, do outro lado da fonte, como mostra a Figura 3.23b. Assim sendo, o traço da fonte secundária (laranja) está no intervalo de aquisição, contudo, o tajeito (em azul) da fonte principal até a secundária não está presente no dado (Verschuur, 2006). Ou seja, para ocorrer a predição de forma mais adequada é necessário traços além do *zero-offset* (Figura 3.24a). Porém, estes traços podem ser obtidos a partir da fonte secundária pelo princípio da reciprocidade.

O princípio da reciprocidade diz que o dado seja espelhado em relação à diagonal principal (área azul claro). Colocando as coordenadas dos traços em função da fonte e do receptor, o gráfico gerado será similar ao da Figura 3.24b. Este gráfico remete a matriz da Figura 2.12. A região central, próxima aos *zero-offsets*, necessita ser interpolada (região rosa), porém apenas uma pequena porção dos traços (incidados pela linha tracejada) é necessária para predição de múltiplas nos *offsets* originais.

No caso da linha do golfo do México, não foi feita extrapolação além do *zero-offset*, pois ela é bem próxima do modelo mostrado na Figura 3.23a.

Aplicação do SRME no *Seisspace*

Após a regularização do dado é feita a predição da múltipla. Para isso é utilizado o módulo *SRME Macro*. O dado de entrada são os tiros regularizados e a saída é a estimativa múltipla (Figura 3.25) com sua geometria igual ao dado de entrada, ou seja, regularizada.

Depois de obtermos a múltipla predita é posto o dado original e a múltipla predita em um mesmo fluxo. Utilizando os módulos *Disk Data Input* e *Disk Data Insert*. A múltipla é então trazida para a geometria original da aquisição. Esta etapa é feita utilizando o módulo *SRME Un-Regularization*. Este módulo funciona igual ao módulo *SRME Regularization*, só que agora estamos retirando os traços do *zero-offset* ao *offset* mínimo.

O dado de entrada para o SMRE pode não ser ideal devido a vários razões: variação da forma *wavelet*, efeitos residuais de fonte/receptor fantasma, etc. Essas imperfeições no dado de entrada irá resultar em uma amplitude estimada falsa quando comparada com a múltipla do dado original com respeito a amplitude, fase e forma da *wavelet*. Para compensar esses defeitos é utilizado o *SRME Match Filter* para determinar e aplicar um filtro correspondente a cada tiro na estimativa do ruído.

Após a aplicação do *SRME Match Filter* (Figura 3.26) é feito a subtração do dado original pela múltipla predita utilizando o *SRME Adaptive Subtraction* (Figura 3.27). Neste módulo envolve a cocepção e aplicação de filtros temporais ao ruído de tal forma que a estimativa resultante do sinal tenha energia mínima. Porém é muito importante usar essa abordagem com alguma cautela. Uma vez que o critério básico é a minimização da energia resultante do "sinal", uma escolha infeliz dos parâmetros tem o perigo de atenuar o sinal de reflexão de interesse. Ou seja, na prática, recomenda-se testar os parâmetros e é claro, escolher aqueles que preservem o sinal desejado e atenuem as múltiplas. Afim de ajudar a garantir que o o filtro adaptativo estar escolhendo o ruído na estimativa do ruído no dado original, ele pode ser útil para projetar o filtro pela média das correlações necessárias espacialmente. Isto é fornecido com o parâmetro *Spatial averaging size*. Se o dado contém alta amplitude e energia anômalas, o filtro adaptativo pode tentar reduzir esta energia e distorcer serveremente a estimativa do ruído. Para reduzir esta possibilidade desta distorção significativamente do sinal estimado, pode ser prudente a restrição da magnitude permitida dos coeficientes do filtro. Este parâmetro é o *Maximum filter coefficient*. Os outros parâmetros são: o *Temporal window length*, este parâmetro não pode exceder o período da múltipla, nem dever ser muito pequeno pós terá uma grande chance de escolher a energia da múltipla para subtrair do sinal; e o último parâmetro é o *Filter length*, este não pode ser maior que 20% do *Temporal window length*. Segundo o *help* do *Seisspace* a largura do filtro maior que 100 ms degrada o resultado.

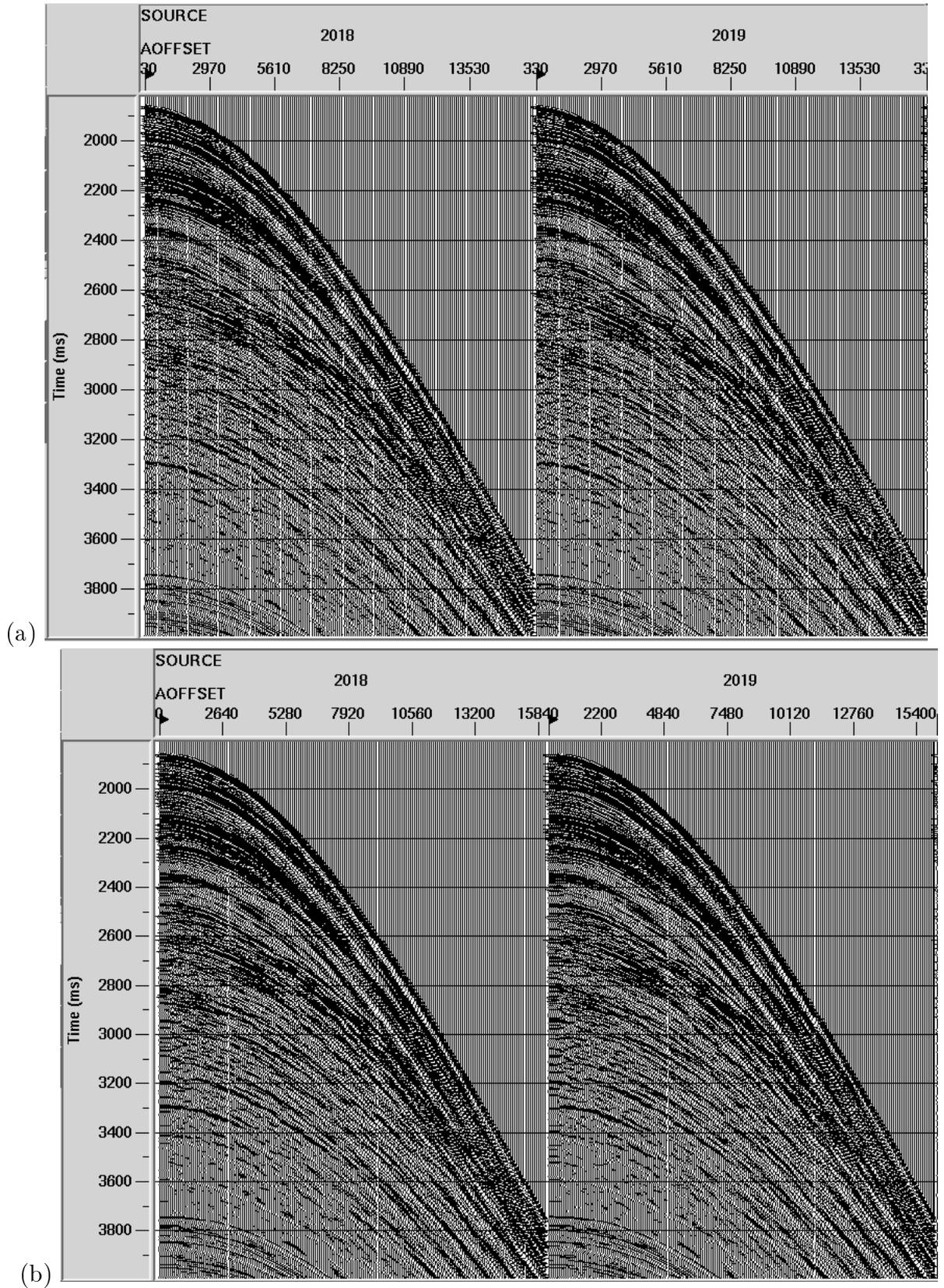


Figura 3.22: (a) Fontes 2018 e 2019 antes da reamostragem dos tiros. (b) Fontes 2018 e 2019 após a reamostragem dos tiros utilizando o módulo *SRME Regularization*.

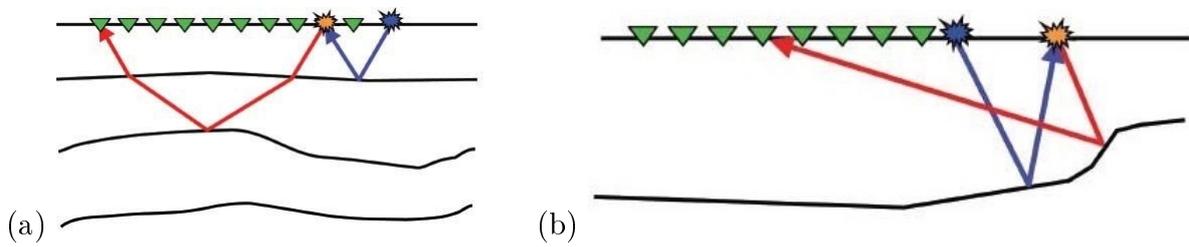


Figura 3.23: a) Estrutura que geram as múltiplas são lateralmente suaves, a fonte secundária (em laranja) que é necessário para construção da múltipla está contida dentro do arranjo. b) Quando a estrutura que geram as múltiplas são mais complexas, a fonte secundária (em laranja) pode ser localizada fora do arranjo, de tal forma que o caminho inicial (em azul) não é medido (Verschuur, 2006).

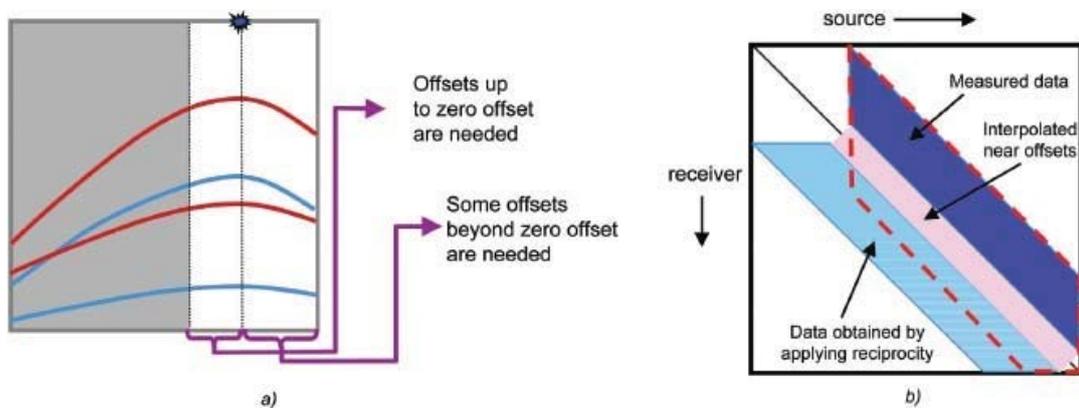


Figura 3.24: a) Para uma melhor predição das múltiplas de superfície em um arranjo, tipicamente marinho, *end-of-spread*, os *offsets* do dado original, indicado pela área cinza, precisam ser extrapolado para além do *zero-offset*. b) Localização dos traços no graico fonte-receptor. A área azul indica os dados medidos. A área em azul claro indica os dados que podem ser obtidos pelo princípio da reciprocidade. A área em rosa indica os dados extrapolados até o *zero zero-offset*. Para a predição da múltipla a área em vermelho tracejada é suficiente (Verschuur, 2006).

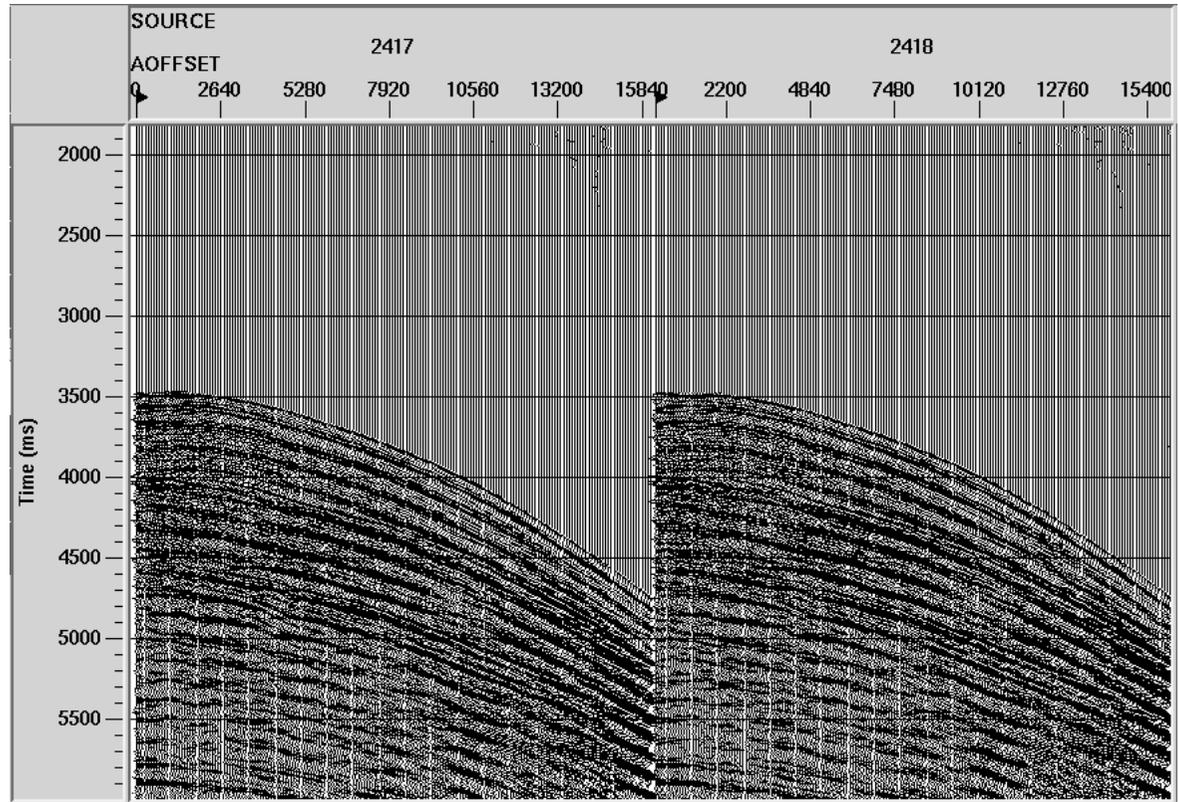


Figura 3.25: Múltipla predita a partir do dado deconvolvido. Para a realização da predição foi utilizado o módulo *SRME Macro*.

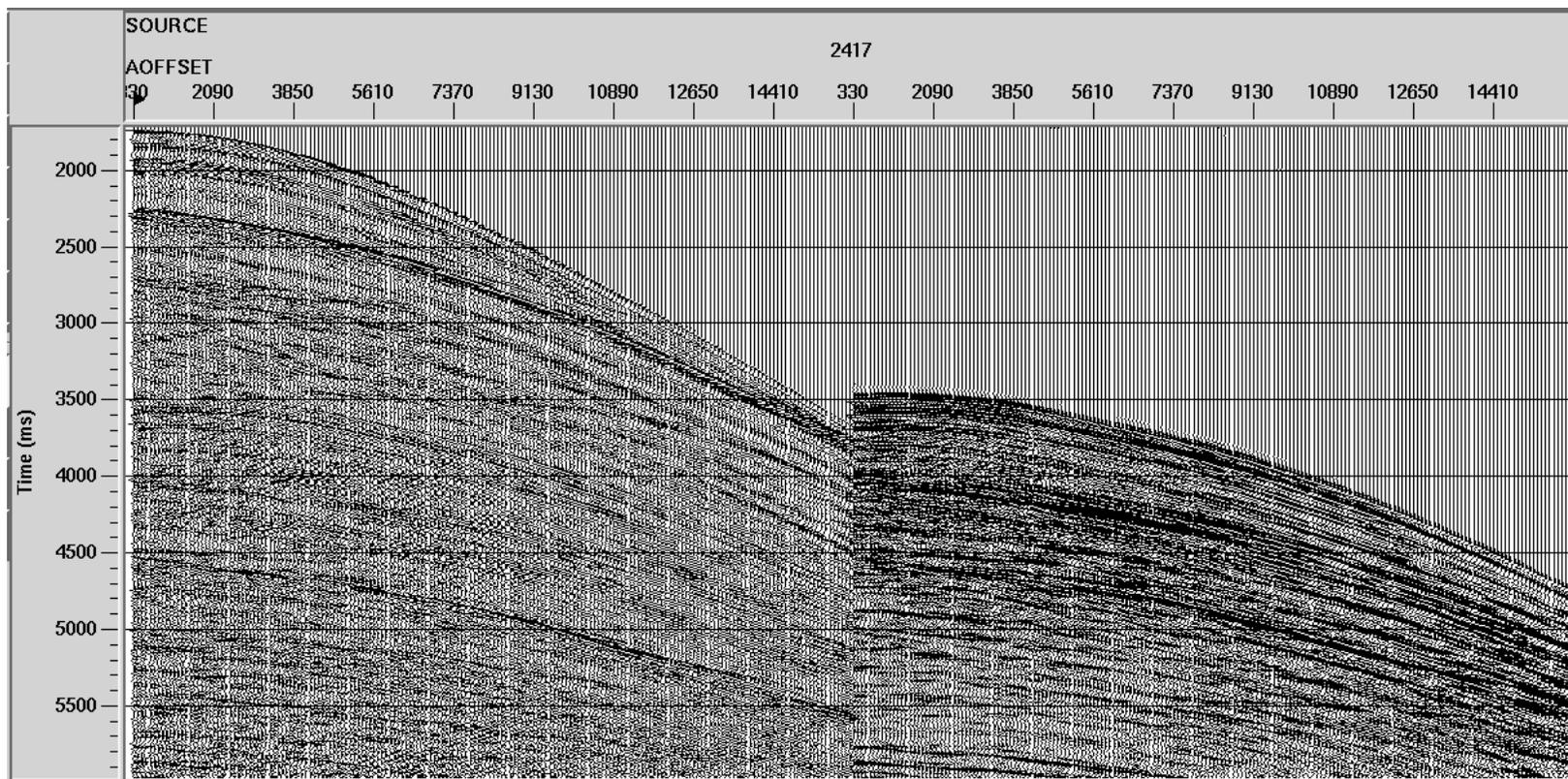


Figura 3.26: Ajuste de fase, forma e amplitude da *wavelet* da múltipla estimada, utilizando o módulo *SRME Match Filter*.

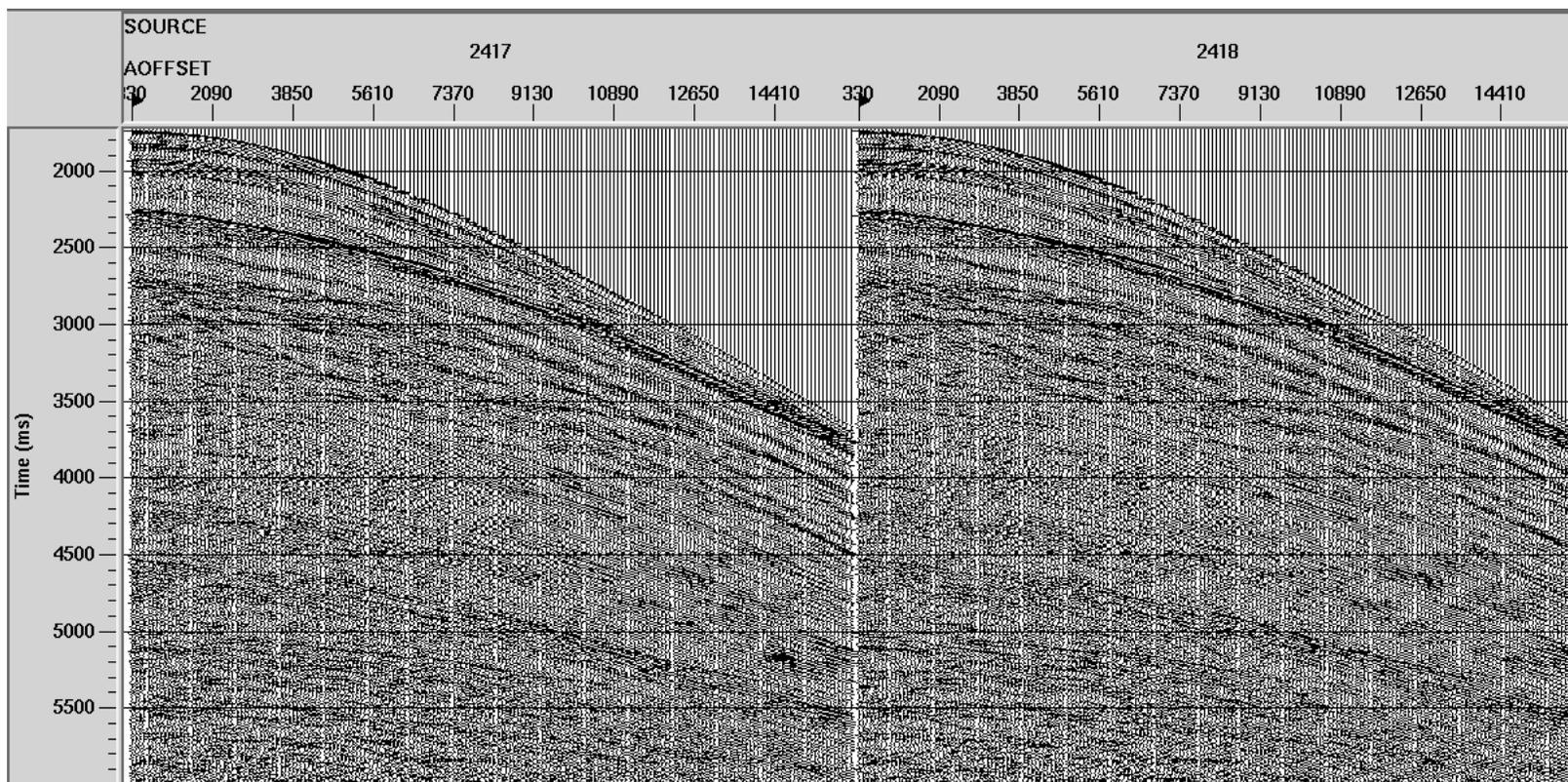


Figura 3.27: Resultado da filtragem SRME após a subtração do dado deconvolvido com a múltipla predita. O módulo utilizado para essa subtração é *SRME Adaptive Subtraction*.

3.4 Seções *Zero-offset*

Todas as seções foram empilhadas com o campo de velocidade gerado a partir da segunda análise de velocidade, utilizando como o dado de entrada para esta análise, o dado filtrado de SRME. Este campo é gerado com o módulo *Velocity Viewer/Point Editor** (Figura 3.28) no qual ocorreu uma interpolação linear dos valores de velocidades, analisados durante o "*picks*" de velocides.

Realizada a descrição das etapas de cada método de filtragem executado no *Seispace*, segue a ilustração dos resultados obtidos nas seções *zero-offset*. O objetivo é mostrar os efeitos dos métodos de filtragem abordados neste trabalho comparando-os.

A Figura 3.29 apresenta a seção sísmica da região do Golfo do México empilhada. Nesta figura podemos notar nitidamente a presença de múltipla de superfície, além das múltipla de topo e base do corpo salino e a múltipla interna como descrita na Figura 3.2. A Figura 3.30 mostra a seção a após deconvolução *spike* esse dado foi o dado de entrada para os três métodos de filtragem, sendo imprescindível para o método de SRME.

A Figura 3.31 e na Figura 3.32 pode ser observado o resultado do método $F - K$ utilizando a velocidade das múltiplas e as velocidades intermediárias respectivamente, aplicado à família CMP, percebe-se que o método não atuou muito bem na ateunação das múltiplas, além de acrescentar alguns ruídos a seção devido as transformações tempo-espaco para frequência-número de onda e vice-versa.

Na Figura 3.33 e a Figura 3.34, podemos observar o resultado do método Radon Parabólico, utilizando a velocidade das primárias e a velocidades intermediárias respectivamente, aplicado também à família CMP, comparando com o resultado obitido pelo método $F - K$ percebe-se uma diferença significativa, a múltipla de superfície, topo e base do sal e a múltipla interna, foi consideravelmente atenuada, porém percebe-se também que o conteúdo de frequência do dado foi modificado ressaltando a baixa frequência.

Na Figura 3.35, pode-se observar o resutado do método SRME. Comparando-o com os outros dois métodos foi o melhor que atenuou, tanto a múltipla interna quanto múltiplas de topo e base do sal, principalmente a múltipla de superfície. E diferente da filtragem Radon, o método SRME fez a filtragem da múltipla sem altearar bruscamente o conteúdo de frequência do dado.

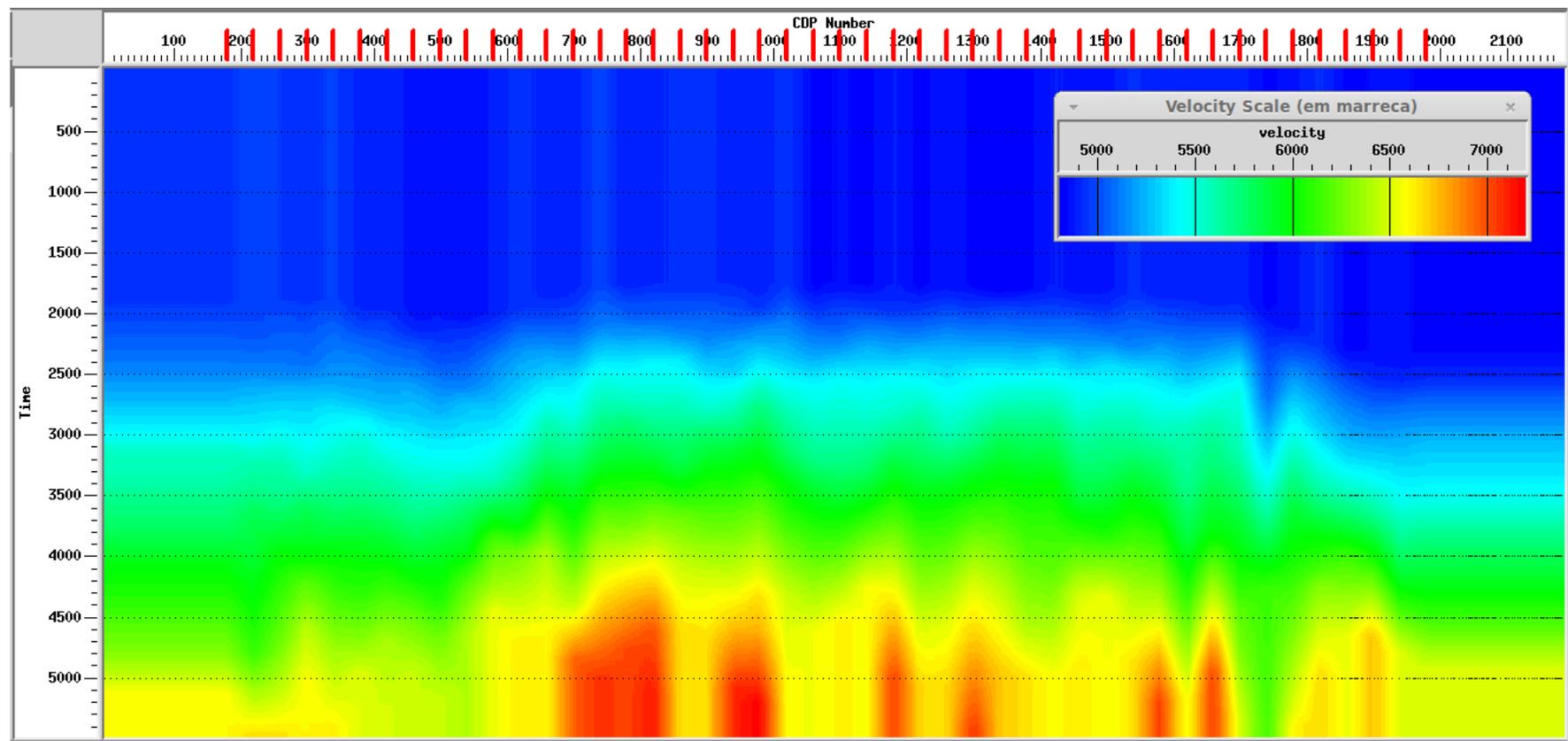


Figura 3.28: Campo de velocidade, obtido a partir da segunda análise de velocidade, tendo este como dado de entrada o dado filtrado com o SRME. O módulo utilizado para a geração deste campo é o *Velocity Viewer/Point Editor**.

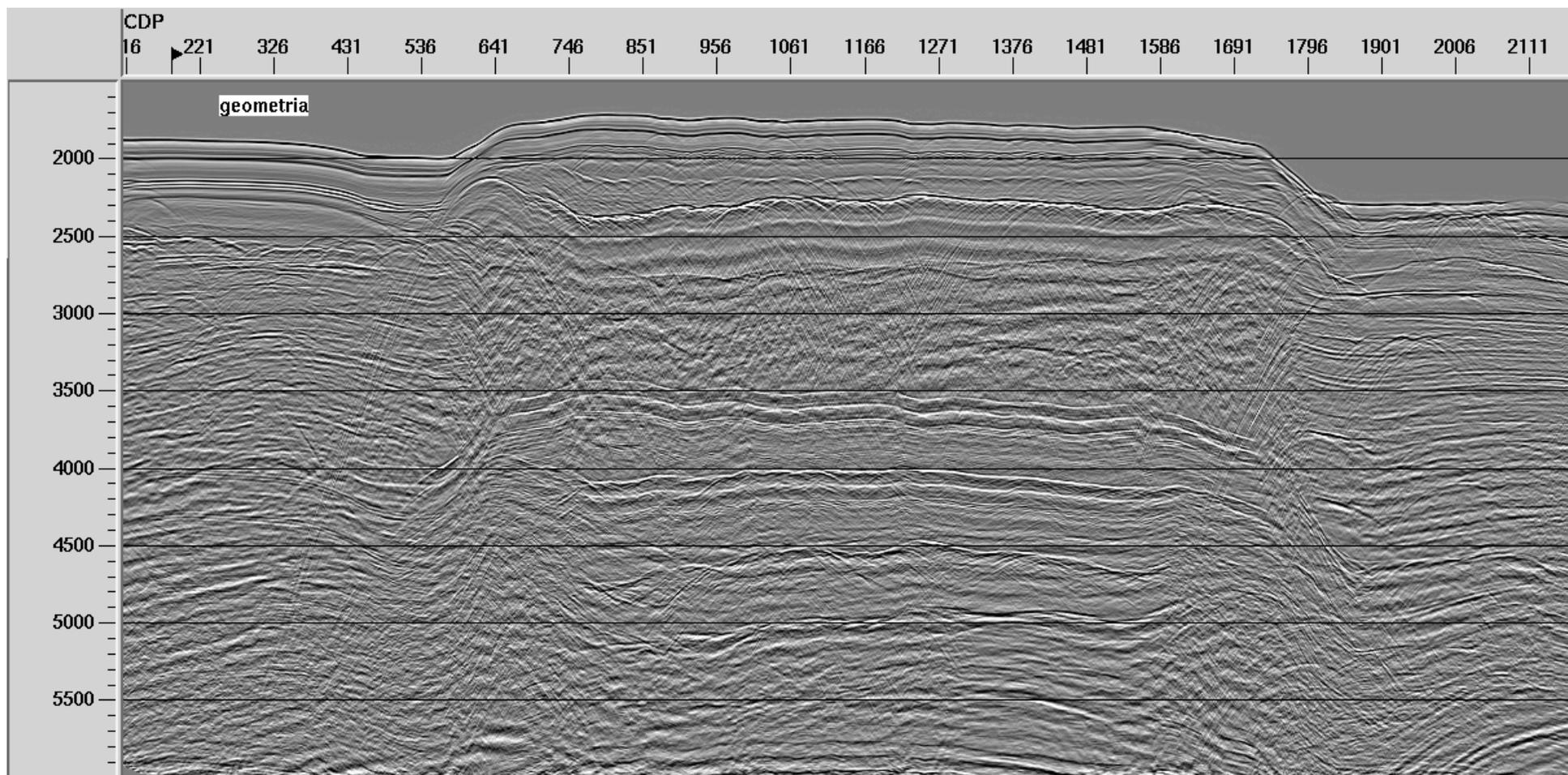


Figura 3.29: Seção *zero-offset* do dado somente com a geometria.

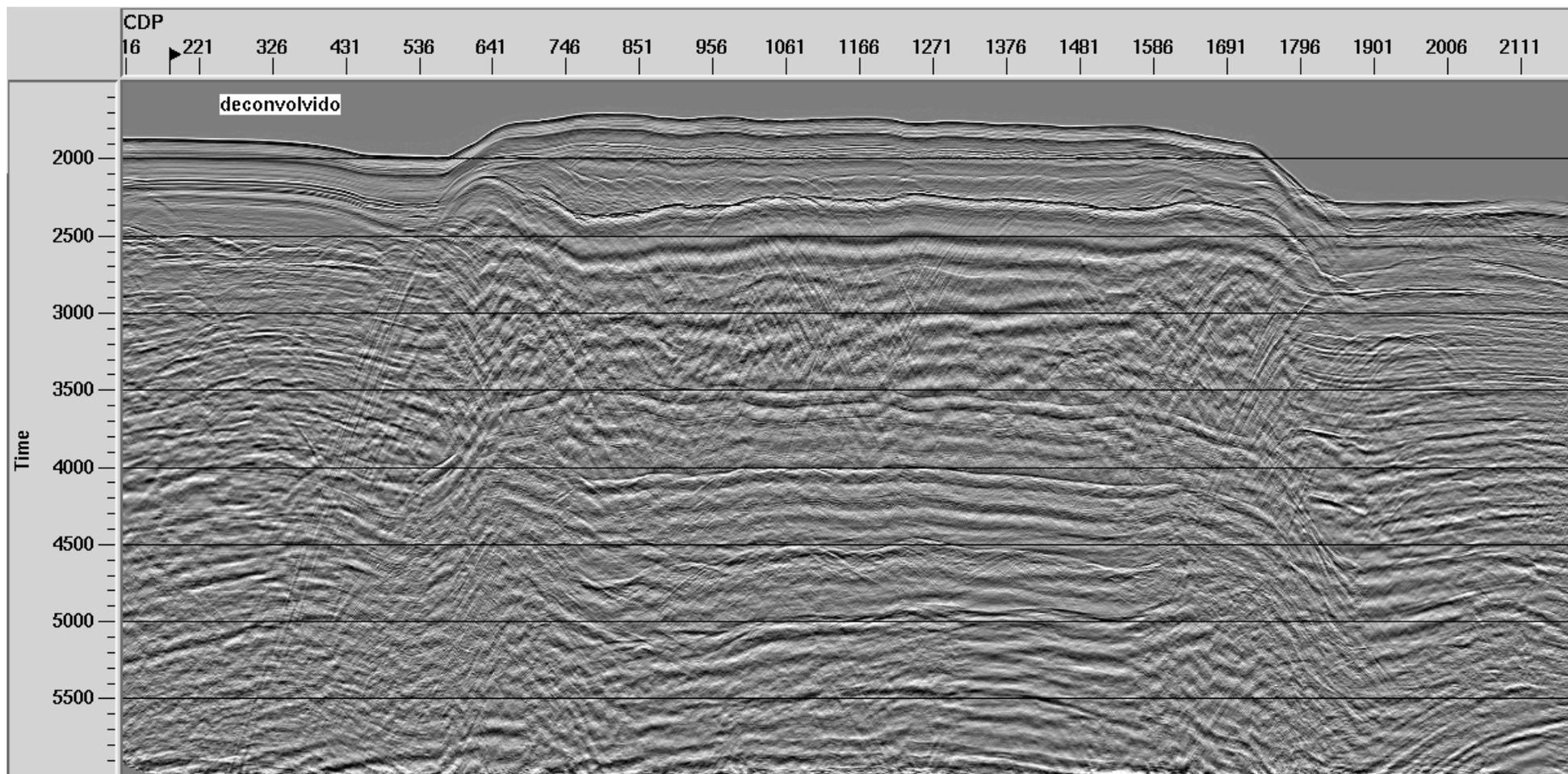


Figura 3.30: Seção *zero-offset* do dado com a deconvolução *Spike*.

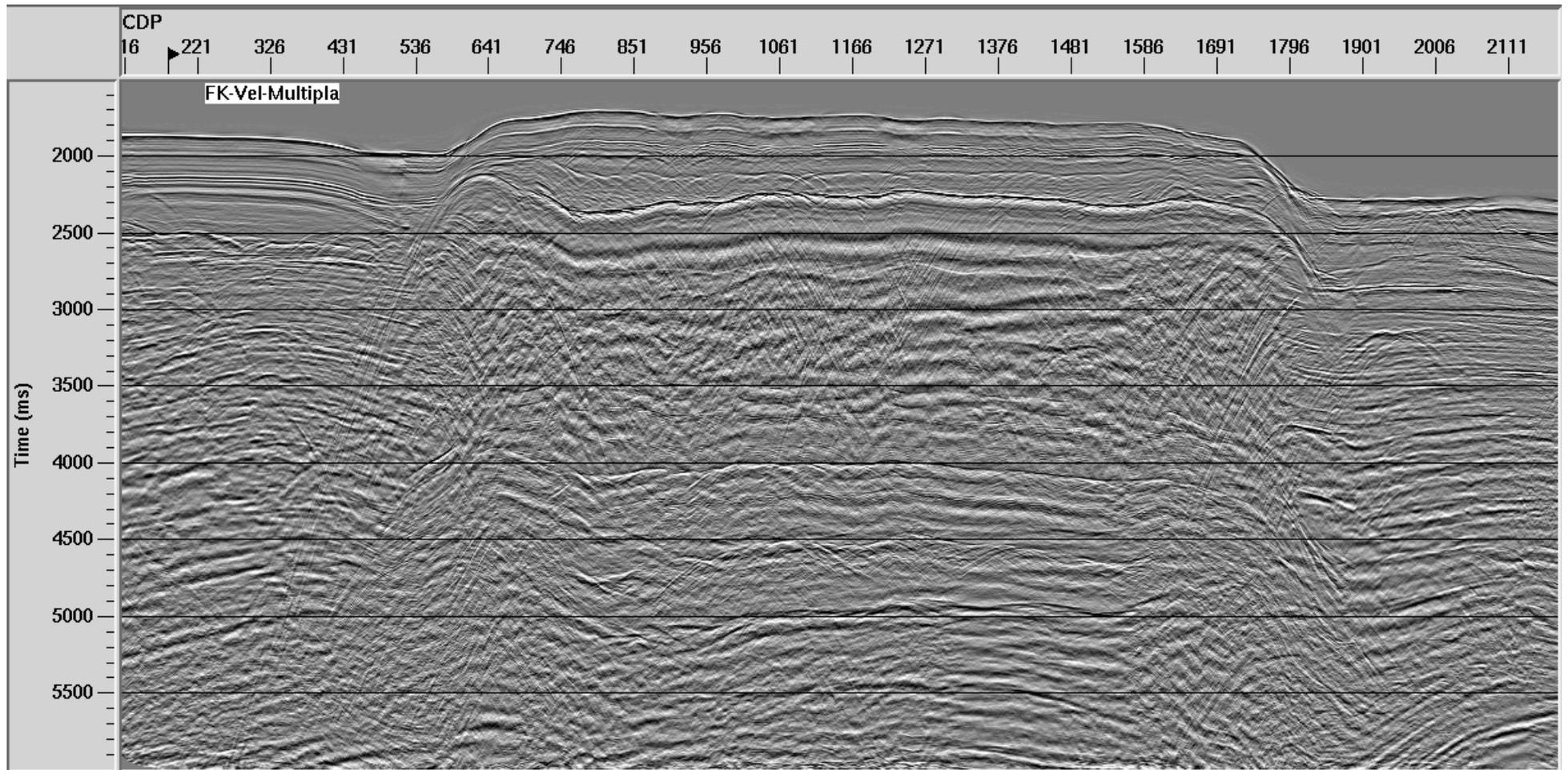


Figura 3.31: Seção *zero-offset* após a filtragem $F - K$, utilizando a velocidade das múltiplas para a realização da filtragem.

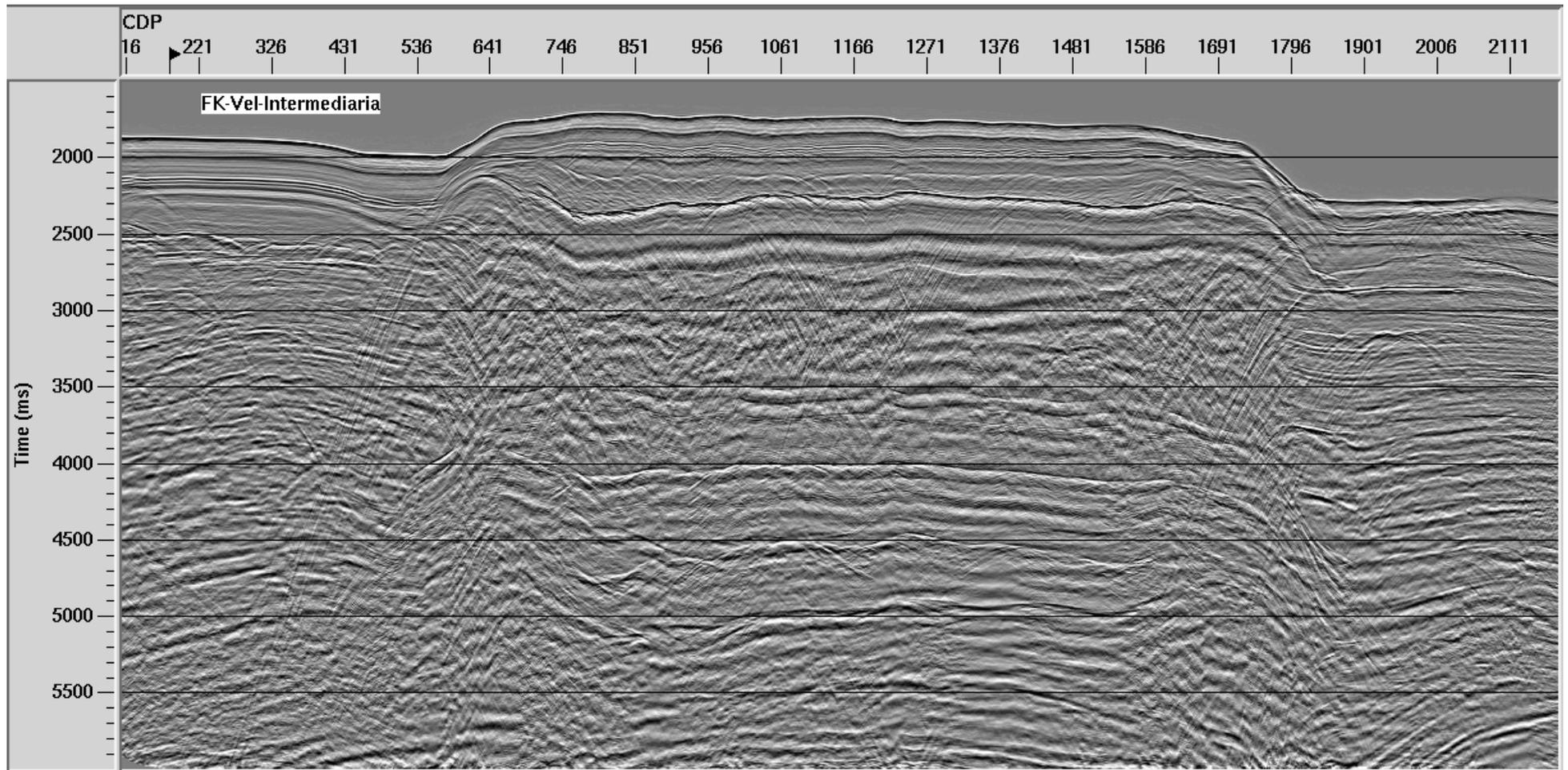


Figura 3.32: Seção *zero-offset* após a filtragem $F - K$, utilizando as velocidades intermediárias para a realização da filtragem.

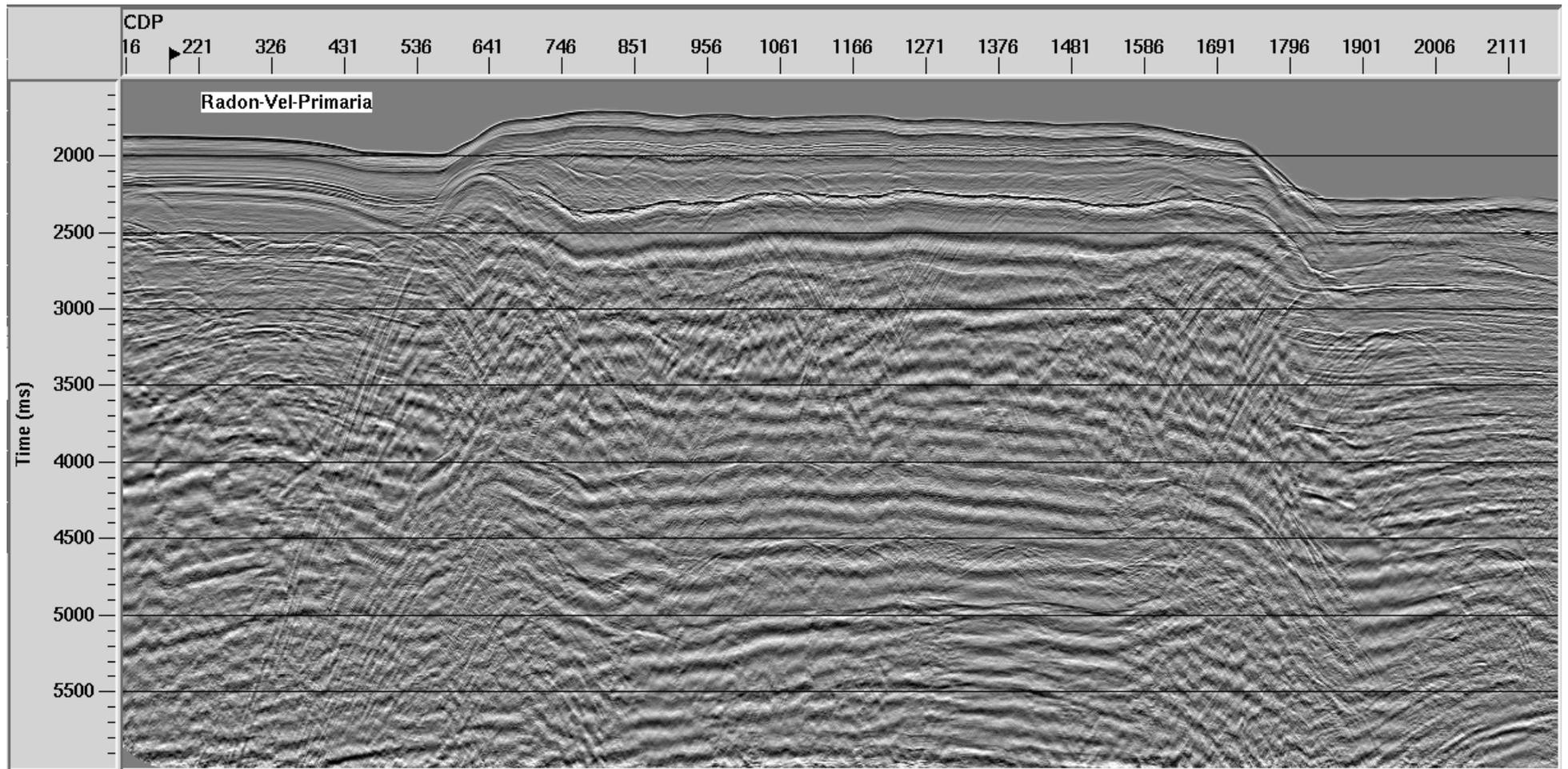


Figura 3.33: Seção *zero-offset* após a filtragem Radon Parabólica, utilizando a velocidade das primárias para a realização da filtragem.

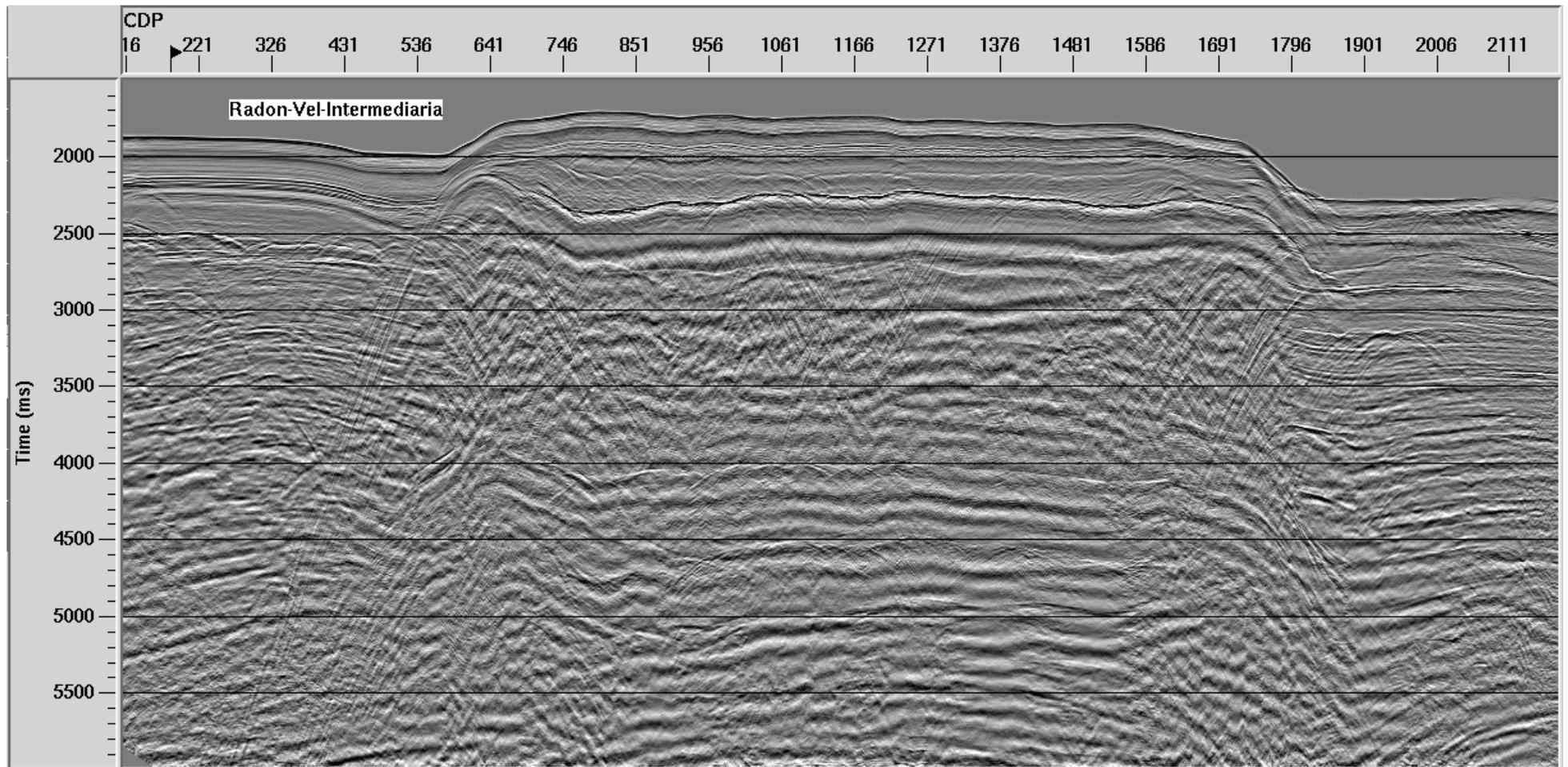


Figura 3.34: Seção *zero-offset* após a filtragem Radon Parabólica, utilizando a velocidade intermediárias para a realização da filtragem.

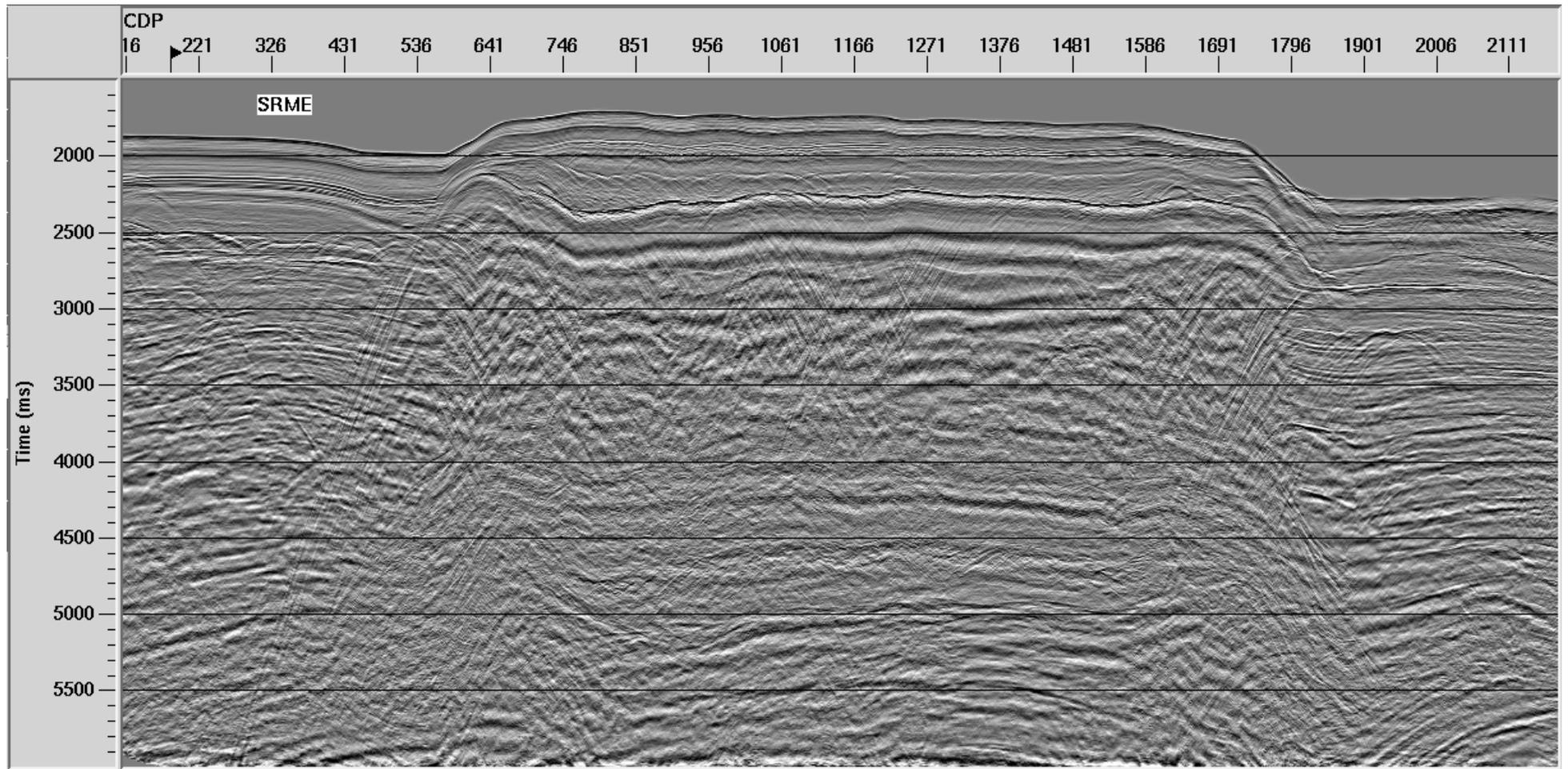


Figura 3.35: Seção *zero-offset* após a filtragem SRME.

CAPÍTULO 4

Conclusões

Como o objetivo do processamento sísmico é a geração de uma imagem de qualidade que represente a geologia de subsuperfície. O processamento da linha do Golfo do México apresentou resultados satisfatórios gerando um seção sísmica de qualidade com refletores nítidos e as múltiplas atenuadas.

Fazer o processamento sísmico em unidade que não estamos habituados pode se tornar um problema. No caso desta linha a unidade distância utilizada foi o pés. Grande variações em pés não são tão grande em metros e isso pode atrapalhar na hora do processamento, principalmente na etapa de análise de velocidade. Porém sugiro que não faça a conversão da unidade, pois pode gerar valores com muitos decimais e isso pode se tornar um problema na implementação de alguma etapa do processamento como no caso do SRME.

Como não há grande variação lateral no modelo de velocidade de subsuperfície, não houve dificuldade de aplicar os métodos que se baseiam na diferença moveout (filtragem $f - k$ e Radon Parabólica). Porém ainda assim com o SRME, que se baseia na periodicidade e preditividade da múltipla, se obteve resultados melhores que os outros dois métodos.

Colocando em ordem de eficiência temos: a filtragem $f - k$, filtragem Radon e o SRME. A filtragem $f - k$ não obteve bons resultados, isso se deve principalmente em que em curtos *offsets* a filtragem não é eficiente, além de acresção de ruído no mapeamento direto e inverso do dado. A filtragem Radon Parabólica teve os mesmo problemas que o $f - k$ porém conseguiu um resultado melhor que o mesmo. Entretanto, a filtragem Radon Parabólica modificou muito o conteúdo de frequência do dado atenuando a alta frequência e realçando as baixas frequências. A filtragem SRME foi o melhor dos três métodos, retirando a múltipla sem muito acrescimo de ruído e sem alterar o conteúdo de frequência do dado.

Para futuros trabalhos fica como sugestão a aplicação e teste do SRME em lâminas d'água rasa, já que o método obteve resultados satisfatórios em lâmina d'água profunda (1500 m).

Agradecimentos

Primeiramente agradeço a minha família, meus pais: Ivã Carvalho Fonseca e Maria Helena Borges e meus irmãos: Emerson Borges Fonseca, Cristiano Borges Fonseca e Herbert Borges Fonseca, que estiveram sempre me apoiando por todos esses anos.

Ao professor Milton José Porsani, por sua orientação.

Ao CNPq, pelo apoio financeiro durante o curso deste trabalho e ao CPGG-UFBA, pela infraestrutura oferecida.

Ao NProS, por ter me recebido no projeto, especialmente a Wilker Eduardo Souza e Rafael Manenti, por ter me ensinado muito do que eu sei hoje, e pelo modelo de trabalho implantado no projeto.

Ao Npós (Paloma e Juliana), por nossas reuniões, pós reuniões do NProS.

A Adevilson (Balota), Artur e Diego (os Buzas), pela irmandade, amizade e companherismo durante todo o curso.

A todos os membros do ano de 2012.

Por fim agradeço a todos que me ajudaram durante todos esses anos de forma direta ou indireta.

Referências Bibliográficas

- Anstey, N. A. (1966) The sectional auto-correlogram and the sectional retro-correlogram. part i: The sectional auto-correlogram., *Geophysical Prospecting*, 14 :389-411.
- Anstey, N. A. e Newman, P. (1966) The sectional auto-correlogram and the sectional retro-correlogram. part ii: The sectional retro-correlogram., *Geophysical Prospecting*, 14 :411-426.
- Barreto D. R. (2016) Atenuação de Múltiplas Utilizando O Método Surface-Related Multiple Elimination. Trabalho de Conclusão de Curso, Universidade Federal da Bahia, Instituto de Geociências, Salvador, Brasil.
- Berkhout, A. J. (1982) Seismic migration: Imaging of acoustic energy by wave field extrapolation. A. Theoretical aspects, Elsevier Scientific Publishing Company.
- Berkhout, A. J. (1999). Multiple removal based on the feedback model. *The Leading Edge*, 18(1), 127-131.
- Diebold, J.B. and P.L. Stoffa (1981) The travelttime equation tau-p mapping and inversion of common midpoint data. *Geophysics*, 46, 238-254.
- Dragoset, W.H and Z. Jericevic (1998) Some remarks on surface multiple attenuation. *Geophysics*, 63, 772-789.
- Duarte, O. O. Dicionário enciclopédico inglês-português de geofísica e geologia. 4. ed. Rio de Janeiro: Sociedade Brasileira de Geofísica, 2009. 383 p. (23).
- Einsiedler H. C. (2009) Atenuação de Reflexões Múltiplas Utilizando Deconvolução Preditiva Multicanal e as Transformadas Radon Parabólica e Hiperbólica - Trabalho de Conclusão de Curso, Universidade Federal da Bahia, Instituto de Geociências, Salvador, Brasil.
- Maciel, R.C. 2007. Deconvolução Preditiva Multicanal de Reflexões Múltiplas no Domínio CRS. Tese de Doutorado. Universidade Federal da Bahia, Salvador, Brasil. 82 p.
- Oliveira A. G. (2011) Uma Análise de Métodos de Supressão de Múltiplas de Superfície Livre Aplicados a um Dado Real. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Pará, Salvador, Brasil. 129p.
- Pontes C. E. S. (1985) Algumas Técnicas de Supressão de Reflexões Múltiplas e Aplicação ao Alto de Macau, Bacia Potiguar. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal da Bahia, Salvador, Brasil. 137p.

Santos D. A. (2014) Atenuação de Reflexões Múltiplas de Curto Período Utilizando Deconvolução Preditiva Adaptativa. Trabalho de Conclusão de Curso, Universidade Federal da Bahia, Instituto de Geociências, Salvador, Brasil.

Silva, M.G. (2004) Processamento de Dados Sísmicos da Bacia do Tacutu. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal da Bahia, Salvador, Brasil. 126 p.

Souza W. E. (2014) Processamento CMP de Dados Sísmicos Levantados no Norte da Bacia do São Francisco Utilizando o *Software SeisSpace*. Trabalho de Conclusão de Curso, Universidade Federal da Bahia, Instituto de Geociências, Salvador, Brasil.

Telford, W. M.; Geldart, L. P. e Sheriff, R. E. (1990) Applied Geophysics, Cambridge University Press.

Verschuur, D. J. (1991) Surface-related multiple elimination: an inversion approach, Tese de Doutorado, Delft University of Technology, Delft, Netherlands.

Verschuur, D. J.; Berkhout, A. J. e Wapenaar, C. P. A. (1992) Adaptive surface-related multiple elimination, *Geophysics*, 57:1166-1177.

Verschuur, D. J. (2006) Seismic multiple removal techniques: past, present and future, EAGE Publications.

Yilmaz, O. (1987) Seismic Data Processing, Society of Exploration Geophysicists.

Yilmaz, O. 2001. Seismic Data Analysis: processing, inversion and interpretation of seismic data, Society of Exploration Geophysicists - SEG, Tulsa.