UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS
FACULDADE DE GEOFÍSICA

Trabalho de Conclusão de Curso

Fernando de Tássio Barros de Andrade

A TRANSFORMADA DE RADON PARABÓLICA E SUAS APLICAÇÕES

Belém

2015

Fernando de Tássio Barros de Andrade

A TRANSFORMADA DE RADON PARABÓLICA E SUAS APLICAÇÕES

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Faculdade de Geofísica da Universidade Federal do Pará, do Instituto de Geociências, para obtenção do título de Bacharel em Geofísica.

Orientador: Dr. Jessé Carvalho Costa

Belém

2015

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

Andrade, Fernando de Tássio Barros de 1991-
A Transformada de radon parabólica e suas aplicações / Fernando de Tássio Barros de Andrade. – 2015.
88 f : il. ; 30 cm

Inclui bibliografias
Orientador: Jessé Carvalho Costa

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Universidade Federal do Pará, Instituto de Geociências, Faculdade de Geofísica, Belém, 2015.

1. Modelo de reflexão sísmica. 2. Atenuação (Física). I. Título.

CDD 22 ed. 622.1592

FERNANDO DE TÁSSIO BARROS DE ANDRADE

A TRANSFORMADA DE RADON PARABÓLICA E SUAS APLICAÇÕES

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Faculdade de Geofísica do Instituto de Geociências da Universidade Federal do Pará, como requisito parcial à obtenção de grau de Bacharel em Geofísica.

Data da defesa: 11 de fevereiro de 2015
Conceito: BOM
Banca Examinadora:

Prof. Jessé Carvalho Costa - Orientador
Doutor em Geofísica
Universidade Federal do Pará

Profª. Ellen de Nazaré Souza Gomes - Membro
Doutora em Geofísica
Universidade Federal do Pará

Prof. José Jadsom Sampaio de Figueiredo - Membro
Doutor em Geofísica
Universidade Federal do Pará

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, pelo dom da vida.

Ao meu orientador, Professor Jessé Costa, pelos inúmeros conhecimentos e conselhos, os quais levarei por toda a vida. Também pela imensa paciência com um aluno tão complicado.

Aos meus pais, Joaquim e Osvaldina, por todo o esforço exercido ao longo de minha criação. Não tenho palavras para resumir toda uma vida de dedicação a mim concedida. Todas as minhas vitórias também serão suas.

À minha irmã Danyelly, por todo amor, incentivo e conselhos quando precisei.

A minha namorada, Marcella, por todo amor, companheirismo e por acreditar em mim nas horas mais difíceis.

À turma de 2009, pelo incrível ambiente de estudo e boas lembranças que guardarei de minha graduação. Por compartilharmos juntos risadas de alegria e desespero.

À Isadora, minha dupla em quase todos os trabalhos, pela grande amizade que o curso me presenteou.

Aos amigos da Geofísica, em especial Léo Santos, Matheus Lopes, Alex, Thelson, Lia, Ingrid, Celina, Érico e Bruce, pela inúmeras palavras de encorajamento e amizade.

Aos amigos da pós-graduação em Geofísica, Wildney, Andrei, Jonathas e Buja, pela amizade e imensas ajudas em fases difíceis do meu trabalho.

Aos meus amigos do Movimento dos Focolares, pela motivação e torcida quando minha esperança estava pequena. Tenho sorte por tê-los em minha vida.

"Maravilhar-se é o primeiro passo para um descobrimento."
(Louis Pasteur)

RESUMO

A atenuação de reflexões múltiplas é um dos principais desafios na geração de uma imagem sísmica de qualidade da subsuperfície. Ao longo dos anos, diversas abordagens foram propostas com o objetivo de atenuar esse tipo de evento. O presente trabalho é dedicado ao estudo e implementação da Transformada de Radon Parabólica, uma das metodologias mais utilizadas na filtragem de múltiplas. Aplicações do algoritmo em dados sintéticos e reais da Bacia do Jequitinhonha demonstram aspectos teóricos e práticos da filtragem Radon Parabólica, como propriedades de focalização, critérios de falseamento, regularização de dados e melhoria da relação sinal-ruído. O conhecimento de aspectos computacionais abordados nesse estudo apresentam-se como passo inicial para implementações de técnicas mais avançadas utilizadas atualmente.

Palavras-chave: Sísmica de Reflexão. Atenuação de múltiplas. Filtragem Radon Parabólica.

ABSTRACT

The multiple reflection attenuation is a main challenges in generating of a seismic image of quality of subsurface. Over the years, several approaches have been proposed in order to attenuate this type of event. This work is dedicated to the study and implementation of Parabolic Radon Transform, one of the most used demultiple methods. Applications of the algorithm in synthetic data and Jequitinhonha real data set demonstrate theoretical and pratical aspects of Parabolic Radon filtering, as focusing properties, aliasing criteria, data regularization and improvement signal-noise ratio. The knowledge of computational aspects discussed in this study present as an initial step for implementations of more advanced techniques currently used.

Keywords: Seismic Refletion. Multiple Attenuation. Parabolic Radon Filtering.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Geometria associada a um evento de reflexão primária em um meio homogêneo. O tempo de trânsito para este evento obedece a equação (2.3). A letra S indica a fonte, G o receptor, M o ponto médio e D o ponto médio em profundidade. 18

Figura 2 – Múltiplas classificadas quanto à origem. (a) Geometria exibindo a trajetória de uma múltipla interna; (b) Geometria exibindo a trajetória de uma múltipla de superfície livre. 20

Figura 3 – Subdivisões das múltiplas de superfície livre. (a) Geometria exibindo a trajetória de uma múltipla de primeira camada. (b) Geometria exibindo a trajetória de uma reverberação de primeira camada. (c) Geometria exibindo a trajetória de "outra múltipla de superfície livre". 21

Figura 4 – Múltiplas classificadas quanto à simetria. (a) Geometria exibindo uma múltipla simétrica. (b) Geometria exibindo uma múltipla assimétrica. . 22

Figura 5 – Múltiplas classificadas quanto ao período. (a) Geometria exibindo a trajetória de uma múltipla de longo período. (b) Geometria exibindo a trajetória de uma múltipla de curto período. 23

Figura 6 – Múltiplas classificadas quanto ao período. (a) Geometria exibindo a trajetória de uma múltipla de primeira ordem. (b) Geometria exibindo a trajetória de uma múltipla de segunda ordem. 23

Figura 7 – Etapas da atenuação de múltiplas no domínio f - k. (a) CMP contendo uma reflexão primária de 2500 m/s e uma múltipla de 2000 m/s. (b) Correção NMO de (a) utilizando uma velocidade de 2250 m/s. (c) Espectro f - k de (b). (d) Silenciamento da faixa do espectro f - k correspondente à múltipla. (e) CMP filtrado com correção NMO após a Transformada f - k inversa; (f) CMP filtrado em (e) após a correção NMO inversa. 27

Figura 8 – Ilustração da periodicidade das múltiplas ao longo de traços radiais OR e ao longo de traços p. 30

Figura 9 – Diagrama de feedback exibindo a geração de múltiplas de superfície. . . 32

Figura 10 – Geometria da Transformada de Radon. 33

Figura 11 – Esquema representando o mapeamento de hipérboles como elipses no domínio $\tau - p$. 37

Figura 12 – Esquema representando o mapeamento de parábolas no domínio $\tau - q$ após correção NMO utilizando um valor intermediário entre dois eventos. 38

Figura 13 – Fluxograma com as etapas do Processamento Sísmico Convencional aplicadas na atenuação de múltiplas da Bacia do Jequitinhonha. As setas em azul destacam a fase pré-processamento, em vermelho a fase pré-empilhamento e em verde o empilhamento. Os blocos amarelos destacam as etapas principais da atenuação de múltiplas. 40
Figura 14 – Senóide com frequência de 50 Hz, amostrada em 4ms (pontos azuis) e em 16ms (pontos vermelhos). Note que o evento registrado em vermelho possui mais baixa frequência, caracterizando o *aliasing* temporal. Fonte: Do Autor. 41
Figura 15 – Ilustração dos possíveis *moveouts* resultantes da correção NMO. (a) Hipérbole com velocidade de 1500 m/s; (b) Subcorreção do evento utilizando v_{NMO} = 1750 m/s; (c) Sobrecorreção do evento utilizando v_{NMO} = 1400 m/s; (d) Correção utilizando a velocidade correta do evento. As setas vermelhas em (c) e (d) indicam o estiramento. provocado pela correção NMO. Fonte: Do Autor. 45
Figura 16 – Diagrama de fluxo com todas as etapas necessárias para execução da Filtragem Radon Parabólica. 51
Figura 17 – (a) CMP Sintético; (b) CMP Sintético após a aplicação da correção NMO com velocidade intermediária de 1750 m/s; (c) Painel Radon do CMP após a correção NMO; (d) Painel Radon com filtragem total das múltiplas; (e) CMP com correção NMO após a filtragem; (f) CMP filtrado após a correção NMO inversa. 53
Figura 18 – (a) Painel Radon com supressão das curvaturas negativas; (b) CMP com correção NMO após a filtragem; (c) CMP filtrado após a correção NMO inversa. As setas vermelhas indicam a presença de resquícios de múltiplas em baixos e altos afastamentos. 54
Figura 19 – (a) CMP Sintético original; (b) CMP após a correção NMO com velocidade 1750 m/s; (c) Painel Radon com efeitos de baixa amostragem; (d) Painel Radon em *aliasing* após a supressão da múltipla; (e) CMP reconstruindo com NMO e artefatos de *aliasing*; (f) CMP com correção NMO inversa e artefatos de *aliasing*. 55
Figura 20 – (a) Espectro de amplitude do CMP sintético sem ruído; (b) Espectro de amplitude em (a) com razão sinal-ruído igual a 2; (c) Espectro de amplitude em (a) com razão sinal-ruído igual a 1; (d) Família CMP com razão sinal-ruído igual a 2; (e) Filtragem de (d); (f) Família CMP com razão sinal-ruído igual a 1; (g) Filtragem de (f). 57
Figura 21 – (a) CMP sintético com amostragem espacial irregular; (b) Painel Radon do CMP em (a); (c) CMP reconstruído após regularização por suavização. 58

Figura 22 – Seção Geológica esquemática da Bacia do Jequitinhonha. 59
Figura 23 – Mapa do litoral baiano exibindo a localização da linha sísmica 0214-0266. O levantamento foi realizado ao longo da linha vermelha. 61
Figura 24 – Linha 0214-0266 editada, organizada em afastamento mínimo. O trecho 1, composto pela região de talude, apresenta múltiplas de superfície livre de até segunda ordem (setas em vermelho). No trecho 2, temos a predominância de múltiplas de superfície livre de primeira ordem (setas em azul) com forte amplitude. 63
Figura 25 – Trecho 1 com os CDPs marcados para análise de velocidade. Em vermelho, os CDPs utilizados para análise das etapas da Transformada de Radon. 64
Figura 26 – Etapas pré-filtragem Radon. (a) CDP 1630 pré-processado. A seta em verde assinala o evento primário em 900 ms. Em azul, a múltipla em 1750 ms e em vermelho a múltipla de segunda ordem em 2600 ms. (b) Indicações dos eventos em (a) no espectro de velocidades, com o perfil de velocidades intermediário em branco. (c) Correção NMO do CDP em (a) utilizando o perfil de velocidades em (b). Em (d), o domínio Radon de (c) com os eventos primários mapeados com curvatura positiva e as múltiplas com curvaturas negativas. 65
Figura 27 – Etapas pré-filtragem Radon. (a) CDP 2230 pré-processado. As setas em verde indicam as primárias em 1450 ms e 1800 ms. Em azul as múltiplas em 2870 ms e 3200 ms. Em vermelho, as múltiplas de segunda ordem em 4600 ms e 4900 ms. (b) Indicações dos eventos em (a) no espectro de velocidades, com o perfil de velocidades intermediário em branco. (c) Correção NMO do CDP em (a) utilizando o perfil de velocidades em (b). Em (d), o domínio Radon de (c) com os eventos primários mapeados com curvatura positiva e as múltiplas com curvaturas negativas. 66
Figura 28 – Etapas pós-filtragem Radon. (a) Domínio $\tau - q$ com curvaturas negativas zeradas e as indicações dos antigos eventos primários e de múltiplas (b) CDP 1630 filtrado com correção NMO. As setas em azul e vermelho indicam os resquícios das múltiplas de primeira e segunda ordem, respectivamente. (c) CDP 1630 filtrado e com correção NMO inversa. (d) Painel de velocidades de (c) com as indicações dos resquícios de múltiplas nas setas azul e vermelha. 68

Figura 29 – Etapas pós-filtragem Radon. (a) Domínio $\tau - q$ com curvaturas negativas zeradas e as indicações dos antigos eventos primários e de múltiplas (b) CDP 2230 filtrado com correção NMO. As setas em azul e vermelho indicam os resquícios das múltiplas de primeira e segunda ordem, respectivamente. (c) CDP 2230 filtrado e com correção NMO inversa. (d) Painel de velocidades de (c) com as indicações dos resquícios de múltiplas nas setas azul e vermelha. 69
Figura 30 – (a) CDP 1630 antes da filtragem Radon. (b) CDP 1630 após a filtragem Radon. As setas azul e vermelha indicam os resquícios de múltiplas ainda presentes em baixos offsets. (c) CDP 2230 antes da filtragem Radon. (d) CDP 2230 após a filtragem Radon. Nesse CDP, a filtragem foi mais eficaz em baixos offsets, devido a uma melhor continuidade dos eventos. 70
Figura 31 – Seções organizadas com afastamento mínimo entre fonte e receptor (150m). (a) Seção original antes da filtragem Radon. As setas em azul indicam as múltiplas de superfície livre de primeira ordem e as setas em vermelho indicam as múltiplas de segunda ordem. (b) Seção filtrada. Verifica-se uma discreta atenuação das múltiplas e poucos eventos realçados (setas em verde). 71
Figura 32 – Seções organizadas com afastamento entre fonte e receptor de 1500m. (a) Seção original antes da filtragem Radon. (b) Seção filtrada. Verifica-se uma completa atenuação das múltiplas de primeira e segunda ordem e o realçamento de diversos eventos (setas em verde). 72
Figura 33 – Seções organizadas com afastamento entre fonte e receptor de 3000m. (a) Seção original antes da filtragem Radon. (b) Seção filtrada. Verifica-se ainda uma atenuação eficaz das múltipla de segunda ordem e fracas amplitudes de múltiplas de primeira ordem, indicadas na seta azul. Nessa seção, nota-se a forte retirada de *stretching* causado pela correção NMO, prejudicando a resolução do fundo oceânico. 73
Figura 34 – Comparação dos Painéis de Velocidade dos CDP's 1630 e 2230 antes e após a filtragem Radon. (a) Painel de Velocidades do CDP 1630 pré-processado, com o perfil de velocidades indicado na linha preta pontilhada. (b) Painel de. 74
Figura 35 – Modelos de Velocidade RMS interpolados a cada 100 CDP's. (a) Modelo de Velocidade RMS gerado a partir do dado pré-processado. (b) Modelo de Velocidade RMS gerado na análise de velocidade pós-filtragem. . . . 75
Figura 36 – (a) Seção empilhada antes da filtragem Radon, utilizando o modelo de velocidade presente em 35-(a). (b) Seção empilhada após a filtragem Radon, utilizando o modelo de velocidade presente em 35-(b). 76

Figura 37 – Trecho 2 com os CDPs marcados para análise de velocidade. Em vermelho, os CDPs utilizados para análise das etapas da Filtragem Radon. 77
Figura 38 – Etapas pré-filtragem Radon. (a) CDP 2530 pré-processado. A seta em verde indica o primeiro evento relacionado ao fundo oceânico em 2180 ms. Em azul a múltipla de primeira ordem em 4360 ms. Em vermelho, a múltipla de segunda ordem em 6470 ms. (b) Indicações dos eventos em (a) no espectro de velocidades, com o perfil de velocidades intermediário em branco. (c) Correção NMO do CDP em (a) utilizando o perfil de velocidades em (b). Em (d), o domínio Radon de (c) com os eventos primários mapeados com curvatura positiva e as múltiplas com curvaturas negativas. 78
Figura 39 – Etapas pré-filtragem Radon. (a) CDP 3030 pré-processado. As setas em verde indicam as primárias em 2500 ms, 3070 ms e 3800 ms. Em azul, as suas respectivas múltiplas de primeira ordem em 4930 ms, 5560 ms e 6270 ms. (b) Indicações dos eventos em (a) no espectro de velocidades, com o perfil de velocidades intermediário em branco. (c) Correção NMO do CDP 3030 utilizando o perfil de velocidades em (b). Em (d), o domínio Radon de (c) com os eventos primários mapeados com curvatura positiva e as múltiplas com curvaturas negativas. 79
Figura 40 – Etapas pós-filtragem Radon. (a) Domínio $\tau - q$ com curvaturas negativas zeradas e as indicações dos antigos eventos primários e das múltiplas (b) CDP 2530 filtrado com correção NMO. As setas em azul e vermelho indicam os resquícios das múltiplas de primeira e segunda ordem, respectivamente. (c) CDP 2530 filtrado e com correção NMO inversa. (d) Painel de velocidades de (c) com as indicações dos resquícios de múltiplas nas setas azul e vermelha. 80
Figura 41 – Etapas pós-filtragem Radon. (a) Domínio $\tau - q$ com curvaturas negativas zeradas e as indicações dos antigos eventos primários e de múltiplas (b) CDP 3030 filtrado com correção NMO. As setas em azul e vermelho indicam os resquícios das múltiplas de primeira e segunda ordem, respectivamente. (c) CDP 3030 filtrado e com correção NMO inversa. (d) Painel de velocidades de (c) com as indicações dos resquícios de múltiplas nas setas azul e vermelha. 81
Figura 42 – Seções organizadas com afastamento mínimo entre fonte e receptor (150m). (a) Seção original antes da filtragem Radon. As setas em azul indicam as múltiplas de superfície livre de primeira ordem e as setas em vermelho indicam as múltiplas de segunda ordem. (b) Seção filtrada. Verifica-se uma discreta diminuição da amplitude das múltiplas de primeira e segunda ordem. 82

Figura 43 – Seções organizadas com afastamento entre fonte e receptor de 1500m. (a) Seção original antes da filtragem Radon. (b) Seção filtrada. Verifica-se uma atenuação eficaz das múltiplas tanto de primeira quanto de segunda ordem, realçando diversos eventos, indicados nas setas verdes. 83
Figura 44 – Seções organizadas com afastamento entre fonte e receptor de 3000m. (a) Seção original antes da filtragem Radon. (b) Seção filtrada. Verifica-se uma atenuação eficaz de múltiplas relacionadas a camadas abaixo do fundo oceânico. A múltipla indicada pela seta azul apresentou apenas uma discreta diminuição de amplitude. 84
Figura 45 – Comparação dos Painéis de Velocidade dos CDP's 2530 e 3030 antes e após a filtragem Radon. (a) Painel de Velocidades do CDP 2530 pré-processado, com o perfil de velocidades indicado na linha preta pontilhada. (b) Painel de Velocidades do CDP 2530 após a filtragem com uma nova análise de velocidade, indicada pela linha branca. (c) Painel de Velocidades do CDP 3030 antes da filtragem Radon. (d) Painel de Velocidades do CDP 3030 após a filtragem Radon. Note que após a filtragem, temos um realce de eventos antes mascarados pelas múltiplas. 85
Figura 46 – Modelos de Velocidade RMS interpolados a cada 100 CDP's. (a) Modelo de Velocidade RMS gerado a partir do dado pré-processado. (b) Modelo de Velocidade RMS gerado na análise de velocidade pós-filtragem. . . . 86
Figura 47 – (a) Seção empilhada antes da filtragem Radon. (b) Seção empilhada após a filtragem Radon. Note que ainda existem amplitudes de reflexões primárias bem fortes no empilhamento sem filtragem. 87

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO 16

2 PRINCÍPIOS FUNDAMENTAIS 17
2.1 A REFLEXÃO PRIMÁRIA 17
2.2 A REFLEXÃO MÚLTIPLA 18
2.2.1 **Características das múltiplas** 18
2.2.2 **Tipos de múltiplas** 19
2.2.3 **A importância da atenuação de múltiplas** 24
2.3 MÉTODOS DE ATENUAÇÃO DE MÚLTIPLAS 24
2.3.1 **Filtragem $f-k$** 25
2.3.2 **Filtragem Radon** 28
2.3.3 **Deconvolução preditiva no domínio $\tau-p$** 28
2.3.4 **Eliminação de Múltiplas Relacionadas à Superfície - SRME** 29

3 A TRANSFORMADA DE RADON 33
3.1 A TRANSFORMADA DE RADON NA FORMA DISCRETIZADA . 35
3.1.1 **Transformada de Radon linear** 36
3.1.2 **Transformada de Radon parabólica** 37

4 METODOLOGIA 39
4.1 PROCESSAMENTO CONVENCIONAL DE DADOS SÍSMICOS . . 39
4.2 AMOSTRAGEM E ALIASING NO DOMÍNIO $t-x$ 40
4.3 AMOSTRAGEM E ALIASING NO DOMÍNIO $\tau-q$ 42
4.4 METODOLOGIA DA TRANSFORMADA DE RADON PARABÓLICA 43
4.4.1 **Correção NMO** 44
4.4.2 **Cálculo do domínio $\omega-x$** 46
4.4.3 **Solução por mínimos quadrados** 47
4.4.4 **Filtragem no domínio $\tau-q$** 50

5 EXPERIMENTOS NUMÉRICOS 52
5.1 ETAPAS DA FILTRAGEM RADON 52
5.2 ALIASING NO DOMÍNIO $\tau-q$ 54
5.3 TESTES COM RUÍDO ALEATÓRIO 55
5.4 REGULARIZAÇÃO DE DADOS 58

6 APLICAÇÃO EM DADOS REAIS 59
6.1 APRESENTAÇÃO DA BACIA 59

6.2 GEOMETRIA DE AQUISIÇÃO 60
6.3 APRESENTAÇÃO DAS MÚLTIPLAS 61
6.4 RESULTADOS 64
6.4.1 **Trecho 1** 64
6.4.2 **Trecho 2** 77

CONCLUSÃO 88

REFERÊNCIAS 89

1 INTRODUÇÃO

A sísmica de reflexão constitui um dos principais métodos geofísicos para exploração de hidrocarbonetos, utilizando as reflexões de ondas elásticas para gerar modelos aproximados da subsuperfície. Na etapa de aquisição sísmica, é realizado o registro dessas reflexões através de receptores, geralmente posicionados na superfície terrestre ou no mar. Porém, além do registro das reflexões primárias, consideradas eventos de interesse, são registradas também as suas repetições, conhecidas como reflexões múltiplas.

Durante o processamento sísmico, uma das etapas fundamentais é a atenuação das reflexões múltiplas, pois elas podem ser confundidas como possíveis refletores na etapa de interpretação dos dados. Ao longo dos anos, várias abordagens foram propostas com o objetivo de atenuar as reflexões múltiplas, onde destacam-se (TATHAM; KEENEY; NOPONEN, 1983), (RILEY; CLAERBOUT, 1976), (VERSCHUUR; BERKHOUT; WAPENAAR, 2003) e (SACCHI; ULRYCH, 1995).

Dentre as diversas técnicas desenvolvidas, destaca-se a Transformada de Radon Parabólica, caracterizada por suas propriedades de focalização de eventos associados às reflexões primárias e múltiplas no domínio Radon, facilitando a retirada dos eventos indesejados. Tal atributo faz dessa ferramenta uma das mais utilizadas na atenuação de múltiplas.

O presente trabalho tem por objetivo abordar a metodologia para implementação do algoritmo padrão da Transformada de Radon Parabólica, utilizando a solução por mínimos quadrados otimizada pela decomposição em valores singulares. Além disso, são analisados os aspectos matemáticos de sua implementação computacional e aspectos práticos na atenuação de reflexões múltiplas em dados gerados sinteticamente e dados reais da Bacia de Jequitinhonha.

O trabalho está estruturado da seguinte forma: no Tópico (2) são mostrados os princípios fundamentais para o entendimento das reflexões sísmicas, abordando as reflexões primárias e múltiplas. São apresentados os tipos de múltiplas, as suas características, a importância da atenuá-las e as técnicas mais utilizadas. No Tópico (3) é apresentada a teoria da Transformada de Radon em sua forma contínua e discretizada, dando ênfase ao último caso, devido a sua utilização para implementação computacional. Além disso, também são abordadas os tipos de Transformadas de Radon mais utilizadas nos métodos sísmicos. O Tópico (4) descreve a metodologia aplicada no trabalho, detalhando os passos para implementação do algoritmo da Transformada de Radon Parabólica. No Tópico (5) são apresentados os resultados da aplicação do algoritmo em dados gerados sinteticamente. Por sua vez, o Tópico (6) apresenta os resultados da aplicação em dados reais.

2 PRINCÍPIOS FUNDAMENTAIS

2.1 A REFLEXÃO PRIMÁRIA

A sísmica de reflexão constitui um dos métodos geofísicos mais utilizados na investigação de hidrocarbonetos, proporcionando levantamentos com alto nível de resolução. Esse método utiliza a reflexão de pulsos sísmicos em interfaces entre meios com contraste de impedância, obtendo informações sobre seus respectivos refletores através dos tempos de trânsito dessas ondas. Portanto, a impedância acústica de um meio torna-se uma grandeza muito relevante nesse método, podendo ser representada por:

$$I = \rho V \tag{2.1}$$

onde ρ é a densidade do meio e V é a velocidade de propagação da onda compressional nesse meio.

A partir da impedância acústica, define-se um outro parâmetro muito importante, chamado de coeficiente de reflexão. Para uma onda plana, este parâmetro é a razão entre a amplitude da onda refletida e a amplitude da onda incidente. Para uma incidência normal, o coeficiente de reflexão é dado pela relação:

$$R = \frac{I_2 - I_1}{I_2 + I_1} \tag{2.2}$$

no qual I_1 e I_2 são as impedâncias acústicas entre os meios sobrejacentes.

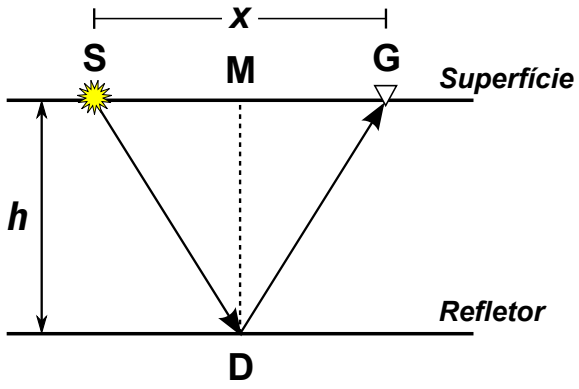
A reflexão primária corresponde ao evento sísmico cuja energia foi refletida apenas uma vez, sendo considerada o evento de interesse na sísmica de reflexão, pois possuem maior energia e, posteriormente, serão interpretadas como interfaces reais na subsuperfície.

Após a reflexão do pulso sísmico em uma dada interface da subsuperfície, ele pode ser registrado na superfície por algum receptor, podendo ser um hidrofone, no caso de um levantamento marinho, ou um geofone, no caso de um levantamento terrestre. No contexto do processamento de dados sísmicos em tempo, em que se pressupõe meios aproximadamente homogêneos verticalmente na escala do lanço sísmico e considerando um refletor plano a uma profundidade h, o tempo de trânsito de um evento de reflexão, t, em uma família de ponto médio comum (*common midpoint* ou *CMP*), pode ser aproximado pela expressão:

$$t^2(x) = t_0^2 + \frac{x^2}{v^2} \tag{2.3}$$

na qual t_0 indica o tempo de trânsito para afastamento nulo, período necessário para percorrer duas vezes a distância MD, representada na Figura (1), x a distância entre a fonte e o receptor e v é a velocidade do meio acima da interface de reflexão. Este resultado mostra que eventos de reflexão têm curva tempo × afastamento (moveout) hiperbólica.

Figura 1 – Geometria associada a um evento de reflexão primária em um meio homogêneo. O tempo de trânsito para este evento obedece a equação (2.3). A letra S indica a fonte, G o receptor, M o ponto médio e D o ponto médio em profundidade.



Fonte: (YILMAZ, 2001).

O objetivo principal do processamento sísmico de reflexão é produzir uma imagem representiva da subsuperfície. No contexto do processamento em tempo, essa imagem é produzida pela migração de eventos associados à reflexões primárias. Entretanto, o registro sísmico de eventos de reflexão contém além das reflexões primárias, eventos de reflexão múltipla. Portanto, o sucesso do processamento necessita de um algoritmo de atenuação dos eventos associados à reflexões múltiplas para evitar que a imagem migrada apresente falsas estruturas em subsuperfície.

2.2 A REFLEXÃO MÚLTIPLA

Na prática, a aquisição de dados sísmicos de reflexão não registra apenas os tempos de trânsito das reflexões primárias. Infelizmente, nem toda a energia propagada é refletida apenas uma vez, pois uma onda pode encontrar condições favoráveis para uma segunda propagação descendente, como uma heterogeneidade superficial, gerando as reflexões múltiplas. Diferente das reflexões primárias, que possuem apenas uma reflexão ascendente, as múltiplas podem ter uma ou mais reflexões descendentes.

2.2.1 **Características das múltiplas**

Antes de remover as múltiplas, é importante identificar seus efeitos sobre o dado sísmico. Quando analisamos uma seção sísmica, seja empilhada ou migrada, as seguintes

características das múltiplas podem ser observadas (VERSCHUUR, 2006):

- Repetições periódicas de eventos de reflexão;

  Os eventos são registrados com intervalos de tempo regulares. Além disso, geralmente apresentam crescimento ou decrescimento na amplitude de maneira regular.

- Aumento da inclinação para múltiplas de altas ordens, conflitando com a inclinação das primárias;

  As interfaces que geram as reflexões múltiplas têm orientações e formas diferentes das que geram as primárias mais profundas, gerando conflito entre os seus mergulhos. Tal inclinação é somada a cada trajetória múltipla, aumentando o efeito para múltiplas de altas ordens.

- Efeitos de focalização e desfocalização devido a efeitos estruturais em camadas geradoras de múltiplas;

  Pequenas variações nos refletores geradores de múltiplas, como estruturas anticlinais e sinclinais, afetarão o tempo de trânsito e amplitude das reflexões. Esse efeito é amplificado para múltiplas de altas ordens.

- Aumento de efeitos de amplitude para múltiplas de altas ordens;

  As variações laterais dos refletores geradores de múltiplas são amplificadas a cada ordem da múltipla, resultando em bandas verticais de alta e baixa energia que variam lateralmente ao longo da seção sísmica.

- Efeitos de interferência de múltiplas e primárias ou entre diferentes múltiplas;

  Ocorre na presença de várias ordens e tipos de múltipla, resultando em padrões complexos de interferência que podem combinar todas as características anteriormente citadas.

2.2.2 Tipos de múltiplas

Existem várias maneiras de classificar as reflexões múltiplas, podendo variar de acordo com a origem, simetria, tempo de trânsito ou número de reflexões. Considerando uma aquisição sísmica marinha, as reflexões múltiplas podem ter as seguintes classificações (VERSCHUUR, 2006):

1. **Quanto à origem**

   Definida de acordo com a interface mais rasa causadora da reflexão descendente. Podem ser dos seguintes tipos:

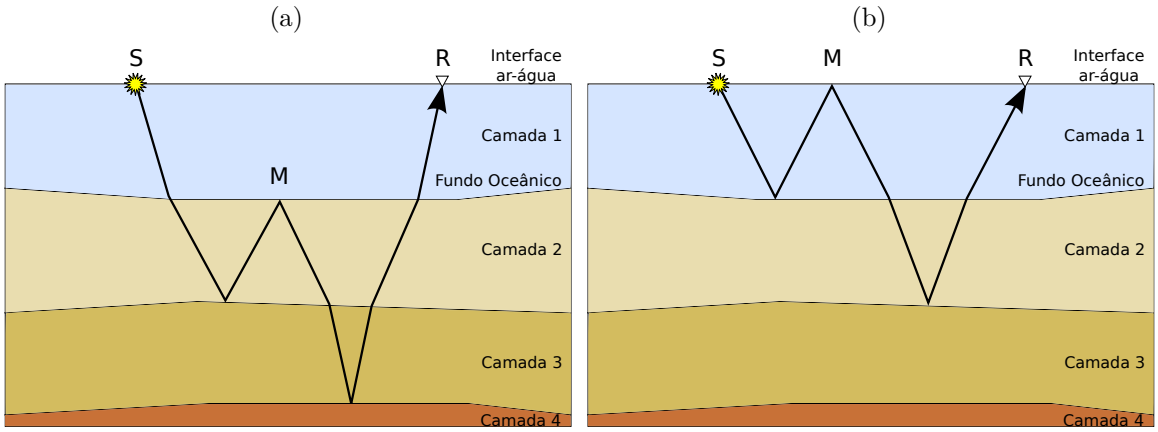
   a) Múltiplas internas

   São todas as múltiplas que não apresentam reflexão descendente na superfície, ou seja, elas ocorrem na interface entre o fundo oceânico e o meio sólido ou em interfaces mais profundas.

   b) Múltiplas de superfície livre

   São aquelas relacionadas à primeira interface. No caso marinho, é originada na interface água/ar.

Figura 2 – Múltiplas classificadas quanto à origem. (a) Geometria exibindo a trajetória de uma múltipla interna; (b) Geometria exibindo a trajetória de uma múltipla de superfície livre.



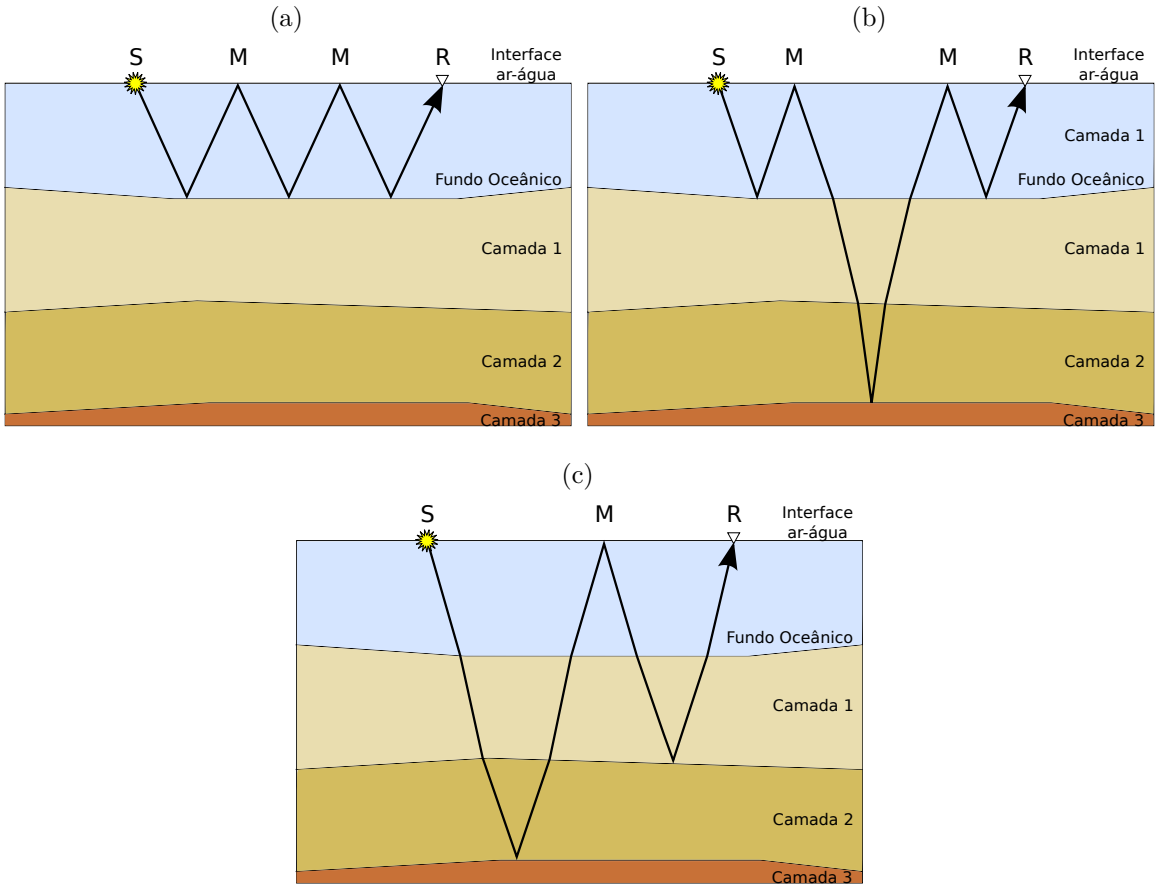
Fonte: Do Autor.

Dependendo da camada com a qual esse tipo de múltipla interage, as múltiplas de superfície livre ainda podem ser subdivididas em: múltiplas de primeira camada, reverberações de primeira camada (peg-legs) ou outras múltiplas de superfície livre.

- Múltiplas de primeira camada
  Também conhecidas como múltiplas de camada-d'água ou múltiplas de fundo oceânico, são aquelas que possuem reflexões tanto ascendentes quanto descendentes restritas à lâmina d'água. Devido ao fundo oceânico ser razoavelmente plano, essas múltiplas são reconhecidas no sismograma como eventos horizontais que atravessam as reflexões de estruturas geológicas abaixo do fundo oceânico.

- Reverberações de primeira camada
  São aquelas que apresentam uma reflexão abaixo da fundo oceânico e têm uma ou mais reflexões na lâmina d'água.
- Outras múltiplas de superfície livre
  Incluem as múltiplas que possuem duas ou mais reflexões abaixo da lâmina d'água. Essa subcategoria não possui nome específico, sendo chamada apenas de "outras múltiplas de superfície livre". Essas múltiplas são importantes no caso de haver uma ou mais estruturas de fortes reflexões abaixo da camada de água, como o topo de uma camada de sal.

Figura 3 – Subdivisões das múltiplas de superfície livre. (a) Geometria exibindo a trajetória de uma múltipla de primeira camada. (b) Geometria exibindo a trajetória de uma reverberação de primeira camada. (c) Geometria exibindo a trajetória de "outra múltipla de superfície livre".



Fonte: Do Autor.

2. **Quanto à simetria**

   Organizada de acordo com a simetria entre a trajetória descendente e ascendente da múltipla.

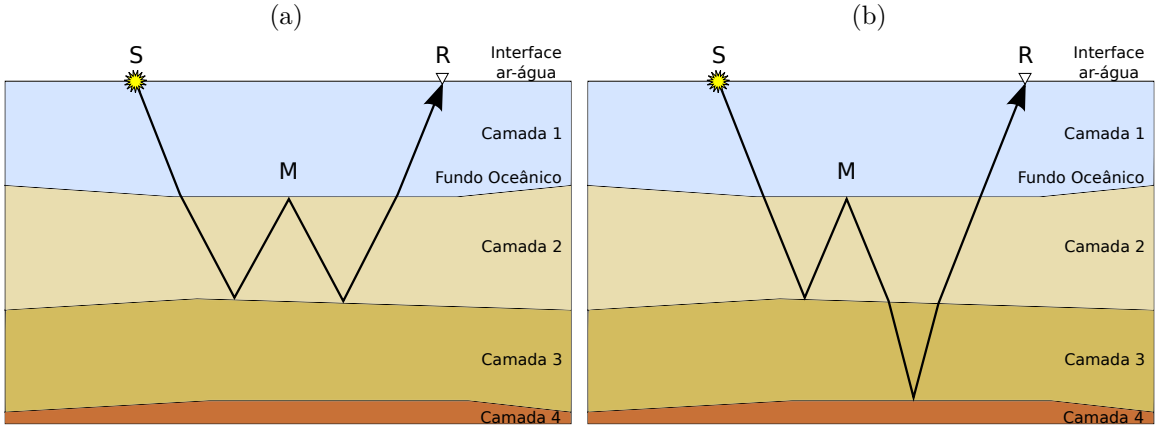
   a) Múltiplas simétricas

      São aquelas que apresentam trajetória descendente simétrica à trajetória ascendente.

   b) Múltiplas assimétricas

      Não apresentam simetria entre a trajetória descendente e ascendente.

Figura 4 – Múltiplas classificadas quanto à simetria. (a) Geometria exibindo uma múltipla simétrica. (b) Geometria exibindo uma múltipla assimétrica.



Fonte: Do Autor.

3. **Quanto ao tempo de trânsito**

   Definida de acordo com o tempo de trânsito das múltiplas em relação às reflexões primárias.

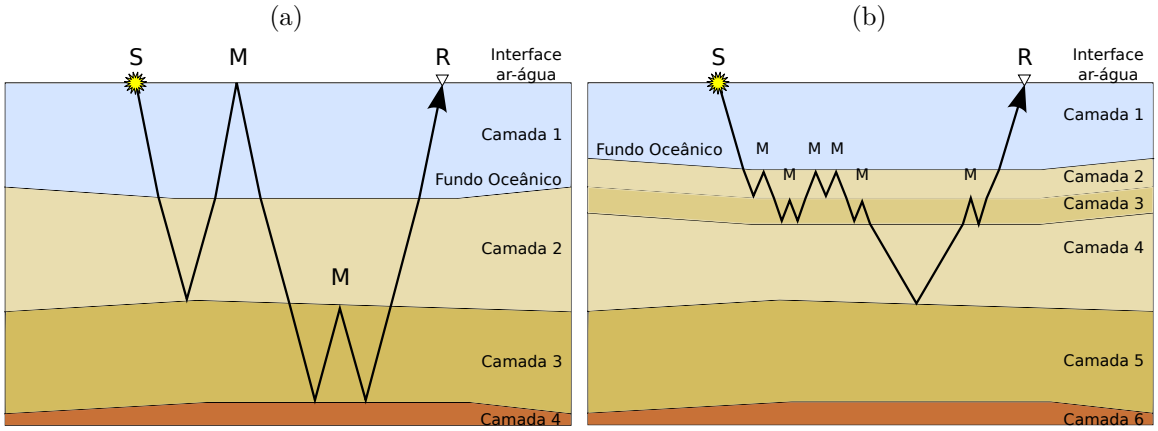
   a) Múltiplas de longo período

      São múltiplas que apresentam tempo de trânsito consideralvemente maior que o tempo das primárias, fazendo com que as reflexões múltiplas sejam distinguidas facilmente no registro sísmico, visto que aparecem como eventos separados.

   b) Múltiplas de curto período

      As múltiplas de curto período são aquelas que possuem tempo de trânsito muito próximo ao tempo das primárias, não sendo possível observá-las separadas das múltiplas. Nesse caso, as múltiplas são geradas em camadas finas que são interferidas pela chegada das primárias. Além disso, as finas camadas também causam mudanças na wavelet original, efeitos de dispersão e atraso total da energia acústica. Tais efeitos são conhecidos como filtro estratigráfico.

Figura 5 – Múltiplas classificadas quanto ao período. (a) Geometria exibindo a trajetória de uma múltipla de longo período. (b) Geometria exibindo a trajetória de uma múltipla de curto período.



Fonte: Do Autor.

4. **Quanto ao número de reflexões**

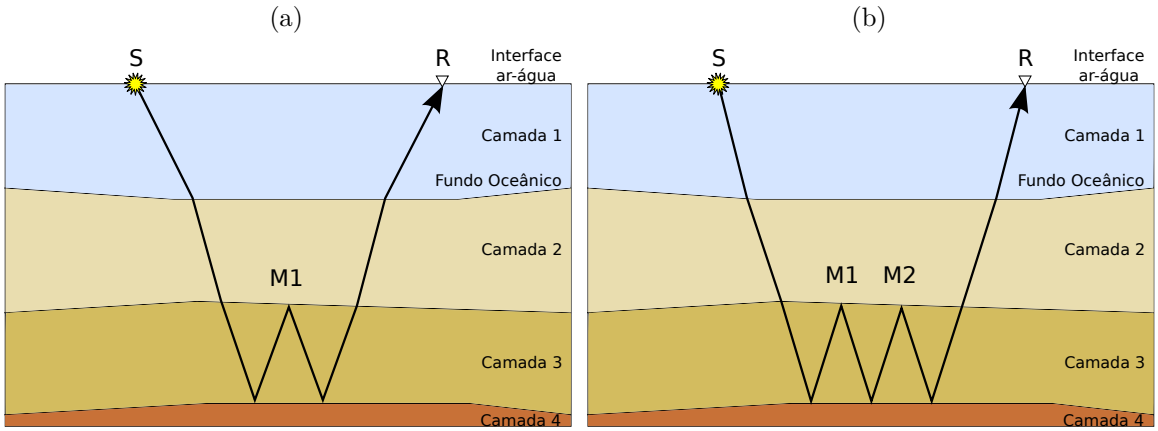
a) Múltiplas de 1ª ordem

São aquelas que possuem uma reflexão descendente.

b) Múltiplas de 2ª ordem

São aquelas que possuem duas reflexões descendentes. Assim, para uma múltipla de ordem n, teremos n reflexões.

Figura 6 – Múltiplas classificadas quanto ao período. (a) Geometria exibindo a trajetória de uma múltipla de primeira ordem. (b) Geometria exibindo a trajetória de uma múltipla de segunda ordem.



Fonte: Do Autor.

2.2.3 **A importância da atenuação de múltiplas**

No sismograma, as múltiplas são registradas como eventos repetitivos e normalmente são consideradas ruído, necessitando serem retiradas do dado sísmico, já que elas podem deformar, defasar ou degradar os eventos primários de mesmo tempo de trânsito. No processamento sísmico, as múltiplas podem dificultar a obtenção da função de velocidade na análise do espectro de velocidades, dificultando também a identicação de seções sismo-estratigráficas em etapas posteriores. Portanto, é recomendado ter cautela ao atenuar ou remover as múltiplas, pois as técnicas aplicadas podem acarretar prejuízos nas informações de amplitude e conteúdo de frequência e fase das reflexões primárias.

No contexto do processamento de dados sísmicos em tempo na fase pré-empilhamento, a atenuação de múltipla torna-se essencial, pois algumas etapas posteriores como novas análises de velocidade ou a correção *DMO* (*dip-moveout corretion*), necessária para corrigir efeitos de mergulho dos refletores, exigem que o dado esteja livre de múltiplas para serem bem sucedidas. Na fase pós-empilhamento, especificamente na migração, dados com a presença de múltiplas serão tratados como possíveis refletores, o que acarretará na geração de uma imagem sísmica incorreta, prejudicando todo um processamento sísmico.

A presença de múltiplas geralmente tem um efeito obscuro na interpretação de reflexões alvo na seção sísmica. Pequenas mudanças estratigráficas ao longo de um potencial reservatório podem ser amplamente pertubadas pela ocorrência de reflexões múltiplas (VERSCHUUR, 2006). Além disso, elas podem mascarar ou até serem confundidas com eventos primários, dificultando a interpretação sísmica.

2.3 MÉTODOS DE ATENUAÇÃO DE MÚLTIPLAS

Diversas técnicas de atenuação de múltiplas são aplicadas em diferentes casos, não existindo apenas uma que funcione para todos os casos. Nessa seção é dada uma breve explicação sobre os métodos mais utilizados, englobando-os em duas categorias (VERSCHUUR, 2006):

1. **Métodos baseados na diferença de comportamento espacial de primárias e múltiplas.**

   Essa categoria explora o fato que as múltiplas viajam ao longo de diferentes trajetórias na subsuperfície, e assim possuem diferentes velocidades sísmicas e/ou diferentes estruturas refletoras. Assim, técnicas de filtragem são aplicadas para separar as múltiplas das primárias, baseado em conhecimento *a priori* ou interpretação do usuário. Essas técnicas são conhecidas como filtros multicanais e podem ser aplicadas no dado pré-empilhado, como por exemplo diferenciação no moveout em famílias

de CDP, ou pós-empilhado, como diferenças em mergulhos locais entre primárias e múltiplas. Nessa categoria encaixam-se a filtragem f - k e a filtragem Radon.

2. **Métodos baseados na periodicidade e preditividade das múltiplas.**

   Essa categoria explora o padrão repetitivo em que as múltiplas aparecem no sismograma e utilizam suposições estatísticas para suprimir esse padrão. De forma mais aprofundada, ocorre o uso implícito ou explícito da equação da onda como forma de conectar as primárias e as múltiplas. Em geral, pode-se afirmar que essas técnicas contém um passo de predição e outro de subtração. Primeiro ocorre a predição das múltiplas a partir de suas primárias e, em seguida, elas são subtraídas do dado de entrada. Essas técnicas podem ser aplicadas no dado pré-empilhado sob determinadas condições, geralmente que a terra se comporte como um modelo 1D, e também no dado pós-empilhado ou pós-migrado. Nessa categoria estão presentes técnicas como a deconvolução preditiva no domínio $\tau - p$ e o método SRME.

2.3.1 Filtragem $f - k$

Além da atenuação de múltiplas, a filtragem $f - k$ é amplamente utilizada na separação de ruídos coerentes lineares, permitindo eliminar eventos indesejáveis como *ground-roll*, ondas guiadas e energia espalhada lateralmente, os quais costumam mascarar o registro das reflexões primárias. Essa filtragem baseia-se na utilização da Transformada de Fourier, bastante utilizada no processamento sísmico por decompor sinais em funções senoidais com diferentes frequências.

O domínio $f - k$ representa, respectivamente, a frequência temporal e a frequência espacial, também conhecida como número de onda. Tais grandezas são definidas pelas seguintes expressões:

$$f = \frac{1}{T} \tag{2.4}$$

$$k = \frac{2\pi}{\lambda} \tag{2.5}$$

onde T é o período da evento e λ é o comprimento de onda. Esse domínio é equivalente ao $t - x$ no domínio de Fourier e pode ser obtido através da Transformada de Fourier 2D, ou seja, a Transformada de Fourier aplicada tanto no tempo quanto no espaço:

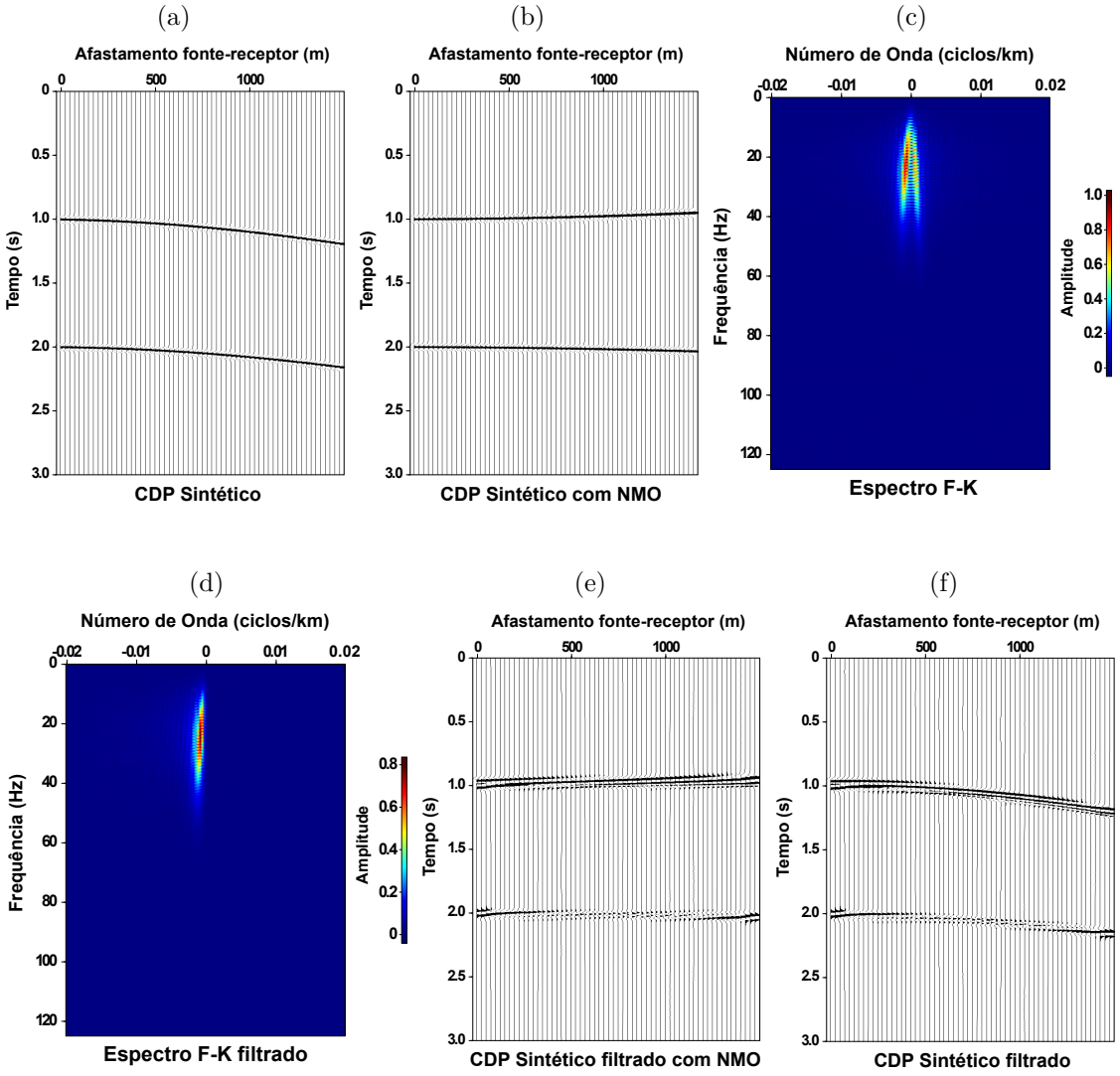
$$D(k, f) = \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} d(x, t) e^{i\,2\pi(kx - ft)}\, dx\, dt. \tag{2.6}$$

Essa aplicação tem como resultando um mapeamento dos eventos a partir de seus mergulhos, o que faz com que os ruídos coerentes lineares sejam facilmente distinguidos,

pois aparecem com vagarosidade menor que as reflexões primárias no domínio $f - k$. As múltiplas, por sua vez, podem ser mapeadas em quadrantes diferentes de suas primárias. Isso é alcançado realizando uma correção *NMO* com velocidade entre a das primárias e das múltiplas, gerando uma separação entre os eventos e um mapeamento com vagarosidades distintas.

Com os eventos mapeados, a filtragem é realizada zerando-se a porção do espectro 2D em que se encontram a faixa de mergulhos indesejáveis. É importante destacar que a zona silenciada pode apresentar diferentes formas dependendo do objetivo em mente. A filtragem de eventos lineares, por exemplo, apresentará a zona silenciada em forma de leque. No caso da atenuação de múltiplas, a zona rejeitada deve ser definida como seu quadrante correspondente no plano $f - k$.

Figura 7 – Etapas da atenuação de múltiplas no domínio f - k. (a) CMP contendo uma reflexão primária de 2500 m/s e uma múltipla de 2000 m/s. (b) Correção NMO de (a) utilizando uma velocidade de 2250 m/s. (c) Espectro f - k de (b). (d) Silenciamento da faixa do espectro f - k correspondente à múltipla. (e) CMP filtrado com correção NMO após a Transformada f - k inversa; (f) CMP filtrado em (e) após a correção NMO inversa.



Fonte: Do Autor.

Analisando o resultado obtido, é importante observar a perda de dados ao longo de pequenos offsets. Isso acontece devido ao corte da faixa do espectro $f - k$ ter englobando também parte dos eventos primários, não reconstruindo perfeitamente a seção no domínio $t - x$.

2.3.2 Filtragem Radon

Baseada na Transformada de Radon, essa aplicação matemática é bastante usada na sísmica para mapear diferentes eventos em novos domínios, conhecidos como domínios Radon. O objetivo desses novos domínios é tornar clara a identicação dos eventos, facilitando a filtragem do dado. A seguir, é dada uma breve explicação sobre os dois tipos de Transformada de Radon mais utilizados, os quais são explicados com mais detalhes no capítulo (3).

1. **Radon Linear:** essa transformada mapeia os eventos através de somatórios ao longo de linhas retas. Os eventos mapeados possuem coordenadas $\tau - p$, as quais são, respectivamente, o tempo de dupla trajetória em afastamento nulo e o mergulho do evento. Assim, teremos as retas mapeadas como pontos e as hipérboles como elipses. Esse tipo de transformada foi proposto inicialmente por (SCHULTZ; CLAERBOUT, 1978).

2. **Radon Parabólico:** muito utilizada na atenuação de múltiplas, esse tipo de transformada mapeia os eventos através de somatórios ao longo de parábolas. Inicialmente, é aplicada uma correção NMO aos eventos hiperbólicos, cujo objetivo é retirar o atraso causado pelo afastamento fonte-receptor. Após essa correção, os eventos tornam-se aproximadamente parabólicos, sendo mapeados como pontos no domínio Radon e localizados a partir de suas curvaturas e tempos de trânsito. Proposta inicialmente por (HAMPSON, 1986).

2.3.3 Deconvolução preditiva no domínio $\tau - p$

A técnica da deconvolução preditiva utilizada para atenuação de múltiplas tem como pressuposto o modelo de camadas horizontalmente sobrepostas. Nesses meios, observa-se uma estrita periodicidade de múltiplas próximo a pequenos afastamentos fonte-receptor. Tal característica não é observada para grandes afastamentos, pois cada múltipla de alta ordem chega em um ângulo diferente e, além disso, a diferença entre os tempos de trânsito tende a diminuir a cada ordem de múltiplas advindas de uma mesma primária.

A principal ideia por trás da deconvolução preditiva é utilizar a periodicidade das múltiplas para prevê-las e atenuá-las. Para isso, é necessário organizar o dado pelo ângulo de chegada, utilizando a Transformada de Radon linear para mapear os eventos no domínio $\tau - p$. Após essa transformação, eventos de reflexão, inicialmente hiperbólicos, aparecem como elipses periódicas ao longo de mesmos valores de parâmetros do raio p, como mostrado na figura (8). Após isso, para aplicação da deconvolução preditiva é necessário estabelecermos uma distância de predição α, a qual será diferente para cada parâmetro do raio. A distância de predição deverá marcar o tempo de propagação ao longo

da primeira camada para o parâmetro do raio, ou seja, a primeira elipse. Considerando o valor do parâmetro do raio igual a zero, a primeiro tempo de predição é equivalente a:

$$\alpha(0) = 2\Delta z/v_p, \tag{2.7}$$

onde Δz é a espessura da primeira camada e v_p é a velocidade da reflexão primária. O tempo de predição generalizado para outros parâmetros do raio é dado por:

$$\alpha(p) = \alpha(0)\sqrt{1 - v_p^2\, p^2}. \tag{2.8}$$

Considerando a equação (2.8), podemos perceber que a distância de predição varia ao longo do parâmetro do raio, comportando-se como uma função elíptica. Utilizando essa equação, realizamos a deconvolução preditiva aplicando o comportamento elíptico no domínio $\tau - p$ e combinando o domínio Radon com seus valores equivalentes em distância de predição, através de um filtro adaptivo, como pode ser visto na seguinte equação:

$$p_0(p, \tau) = p(p, \tau) + f(\tau) * p(p, \tau - \alpha(p)) \tag{2.9}$$

O filtro adaptivo utilizado na realização da deconvolução preditiva possui o seguinte modelo com $m + n$ amostras:

$$f(\tau) = (1, \underbrace{0, 0, \ ...}_{m-1 \ zeros}, \underbrace{-\alpha_0, -\alpha_1, \ ..., -\alpha_n}_{n+1 \ coeficientes}) \tag{2.10}$$

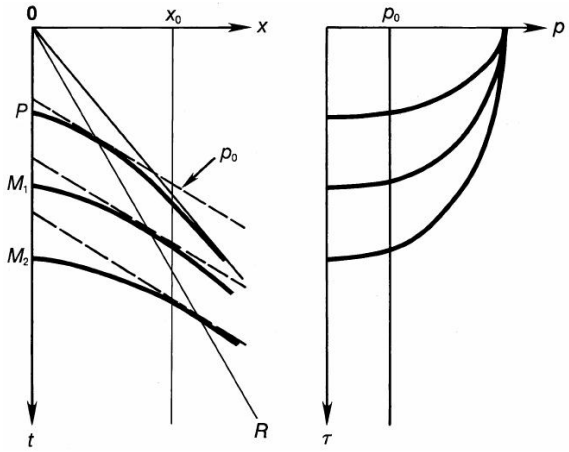
O filtro adaptativo $f(\tau)$ é responsável por atenuar os eventos cuja periodicidade estejam dentro do intervalo compreendido pela distância de predição, ou seja, entre m e $n + m$ amostras. Enquanto isso, ele preserva intervalo de amostras compreendido entre 1 e $m - 1$ amostras. Esta é uma característica garantida pelo impulso unitário na origem, aliado aos $m - 1$ zeros e ao sinal negativo que multiplica α_τ (ROMANELLI, 2010).

Após atenuação das amostras desejadas dos traços, é aplicada Transformada de Radon linear inversa, retornando ao domínio do tempo-afastamento sem os eventos múltiplos. Para o caso de atenuação de reverberações, a deconvolução preditiva no próprio domínio tempo-afastamento produz resultados satisfatórios. Porém, se as múltiplas forem de longo período, a deconvolução preditiva no domínio $\tau - p$ produz melhores resultados.

2.3.4 Eliminação de Múltiplas Relacionadas à Superfície - SRME

O método SRME é um algoritmo que prediz as múltiplas de superfície por um processo convolucional aplicado ao dado sísmico. Após a predição, as múltiplas são removidas do dado por subtração adaptativa. Diferente dos outros métodos de atenuação,

Figura 8 – Ilustração da periodicidade das múltiplas ao longo de traços radiais OR e ao longo de traços p.



Fonte: (YILMAZ, 2001).

essa técnica exige o mínimo de pré-processamento, além de não depender de pressupostos ou conhecimento sobre a subsuperfície, nem usar as propriedadades de eventos para distinguir primárias ou múltiplas. Ao invés disso, o método SRME requisita o conhecimento da *wavelet* de aquisição e uma densa distribuição espacial entre fontes e receptores.

A proposta inicial do método SRME foi dada por (ANSTEY; NEWMAN, 1966), os quais observaram que durante o processo da retrocorrelação de um traço, ou seja, o traço correlacionado com ele mesmo reverso no tempo, cada interação de um evento primário no traço sísmico com ele mesmo reverso no tempo gerava um evento múltiplo de superfície de primeira ordem. A partir desse conhecimento, era possível realizar a subtração dessas múltiplas.

O fato de o método SRME não necessitar de informação *a priori* sobre a superfície faz com que ele seja considerado uma técnica de atenuação de múltiplas *data-driven*, ou seja, conduzido pelo dado. Isso significa que o resultado é obtido apenas por manipulações matemáticas, sem passos intermediários, intervenções ou análises interpretativas. A história dos métodos de atenuação de múltiplas *data-driven* iniciou baseada na relação existente entre as reflexões primárias e as múltiplas de superfície, a qual pode ser escrita na forma (WATSON, 1965):

$$M_{s1}(t) = -R_0 P(t) * r(t), \tag{2.11}$$

onde $M_{s1}(t)$ representa uma múltipla de superfície de primeira ordem, $-R_0$ é o coeficiente de reflexão da superfície, $P(t)$ é sequência de trajetórias ascendentes de reflexões primárias e $r(t)$ é a série de refletividade da Terra.

Para obtermos um modelo de múltiplas relacionadas à superfície, consideremos

uma resposta sísmica para um onda plana horizontal interagindo com a terra. A resposta ao impulso da terra, excluindo o efeito de sua superfície é definida como $x_0(t)$:

$$x_0(t) = x_0(t) * \delta(t), \tag{2.12}$$

onde $x_0(t)$ é uma série de impulsos que incluem apenas reflexões primárias e múltiplas internas, pois não existem efeitos da superfície. A função $\delta(t)$ representa uma fonte impulsiva, a qual será convolvida com o impulso a cada nova reflexão.

Agora, se considerarmos que todos esses eventos atingem a superfície livre, então eles serão refletidos de volta ao meio, fazendo com que as respostas primárias atuem agora como novas fontes de onda. Assim, cada nova resposta ao impulso será convolvida com a todas as respostas ao impulso anteriores, gerando uma sequência de múltiplas representada como:

$$M_1 = -x_0(t) * x_0(t) \tag{2.13}$$

$$M_2 = -x_0(t) * M_1(t) = x_0(t) * x_0(t) * x_0(t) \tag{2.14}$$

$$\vdots$$

$$M_n = -x_0(t) * M_{n-1}(t) = x_0(t) * x_0(t) * x_0(t) * x_0(t) * \cdots * x_0(t) \tag{2.15}$$

onde M_1 representa uma múltipla de primeira ordem, M_2 representa uma múltipla de segunda ordem e M_n representa uma múltipla de ordem n. O sinal negativo representa uma reflexão contra a superfície. Assim, teremos a seguinte série $x(t)$ com a resposta total contendo todas as múltiplas de superfície:

$$x(t) = x_0(t) - x_0(t) * x_0(t) + x_0(t) * x_0(t) * x_0(t) - ... \tag{2.16}$$

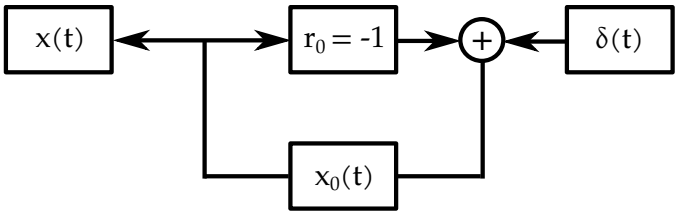
A resposta total aos impulsos é registrada pelos receptores na superfície, mas também é refletida à subsuperfície para gerar múltiplas de altas ordens. Isso pode ser visualizado no diagrama de feedback proposto por Berkhout (1999), exibido na figura (9).

Através desse diagrama, é possível tirar uma relação para resposta ao impulso com todas as múltiplas, escrita como:

$$x(t) = x_0(t) * [\delta(t) - x(t)] = x_0(t) - x_0(t) * x(t). \tag{2.17}$$

A equação (2.17) significa que todas as múltiplas relacionadas à superfície podem ser geradas convolvendo a resposta primária com a resposta total. Analogamente, as

Figura 9 – Diagrama de feedback exibindo a geração de múltiplas de superfície.



Fonte: (VERSCHUUR, 2006).

equações (2.16) e (2.17) também podem ser escritas no domínio da frequência:

$$X(f) = X_0(f) - X_0^2(f) + X_0^3(f) - X_0^4(f) + \dots \,, \tag{2.18}$$

$$X(f) = X_0(f) - X_0(f)X(f), \tag{2.19}$$

onde a equação (2.19) representa a relação entre a resposta com múltiplas e sem múltiplas de superfície no domínio de Fourier.

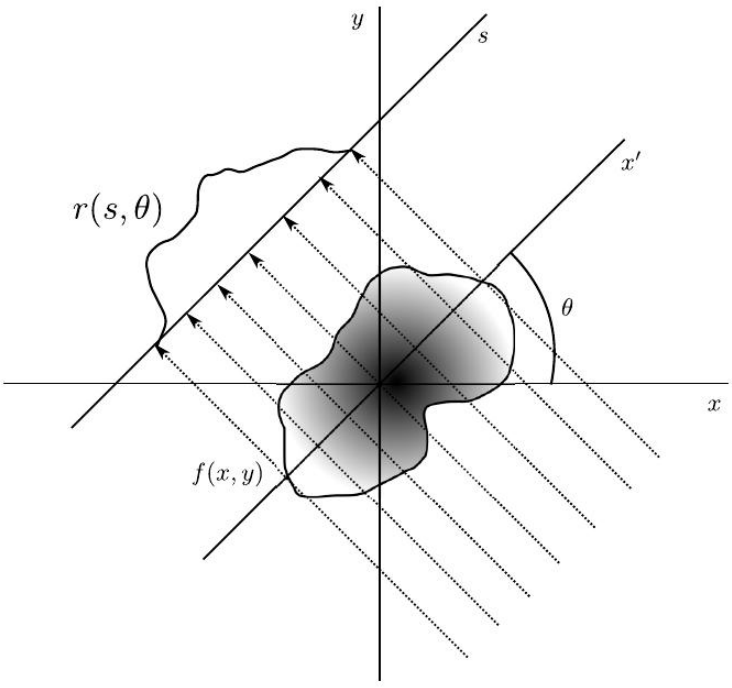
3 A TRANSFORMADA DE RADON

A Transformada de Radon é uma técnica matemática de reconstituição de imagens apresentada em 1917 pelo matemático austríaco Johann Radon, tornando-se uma técnica amplamente utilizada em tomografia e processamento de dados sísmicos e imagens. Em seus estudos, Radon (1917) definiu que se um conjunto completo de projeções de alguns parâmetros do objeto são medidos, então esses parâmetros podem ser calculados a partir dessas projeções. Portanto, assumindo uma função $f(x, y)$ iluminada por raios paralelos, a sua imagem $R(s, \theta)$ será obtida a partir da seguinte relação:

$$R(s,\theta) = \iint_{-\infty}^{+\infty} f(x,y)\,\delta(s - x\cos\theta - y\sin\theta)\,dx\,dy \tag{3.1}$$

onde s representa a distância da origem e θ o ângulo de propagação dos raios. A equação anterior indica que a transformada de Radon de uma função $f(x, y)$ é definida como uma série de integrais de linha ao longo de $f(x, y)$ em diferentes pontos a partir da origem.

Figura 10 – Geometria da Transformada de Radon.



Fonte: (SARAJAERVI, 2010).

A definição apresentada na equação (3.1) e na figura (10) tomam como exemplo projeções lineares. No entanto, as integrais de linha podem seguir diferentes tipos de curva. No processamento de dados sísmicos, as implementações da Transformada de Radon mais utilizadas são as lineares, as parabólicas e as hiperbólicas. Portanto, dado $d(x, t)$

representando uma família de CMP com tempo t e afastamento x, podemos generalizar a Transformada de Radon através da integral de linha definida por:

$$m(q,\tau) = \int_{-\infty}^{+\infty} d(x, t = \tau + q\phi(x))\, dx \tag{3.2}$$

onde q é o parâmetro que representa a forma da curva, também chamado de parâmetro do raio, ϕ é a função base que determina o tipo de Transformada de Radon, τ é o tempo de intersepção de dupla trajetória em $q = 0$ e $m(q,\tau)$ representa o modelo mapeado no domínio Radon, ou domínio $\tau - q$. A função base é muito importante pois evidencia qual o tipo de dependência existe entre x e q, determinando qual o caminho que a integral de linha irá percorrer para realizar o mapeamento.

A idéia chave por trás da Transformada de Radon é que algumas características do dado são identificadas com mais facilidade no domínio Radon, tornando-se mais viável atenuar ou realçar tais características nesse domínio e voltar ao domínio $t - x$. O retorno ao dado mapeado no domínio $t - x$ é realizado através da Transformada de Radon inversa, definida por:

$$\tilde{d}(x,t) = \int_{-\infty}^{+\infty} m(q, \tau = t - q\phi(x))\, dq, \tag{3.3}$$

onde $\tilde{d}(x,t)$ representa uma família de CMP reconstruída.

Quando a integração é realizada ao longo de curvas invariantes no tempo, podemos calcular a Transformada de Radon de forma mais eficaz no domínio de Fourier, ao longo de cada valor de frequência, reduzindo o tempo computacional. Aplicando a Transformada de Fourier nas equações (3.2) e (3.3), temos as seguintes relações:

$$M(q,\omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} D(x,\omega)\, e^{i\omega q\phi(x)}\, dx, \tag{3.4}$$

$$\tilde{D}(x,\omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} M(q,\omega)\, e^{-i\omega q\phi(x)}\, dq, \tag{3.5}$$

onde $M(q,\omega)$ e $\tilde{D}(x,\omega)$ representam, respectivamente, o espectro de amplitude do modelo $m(q,\tau)$ e o espectro de amplitude do dado reconstruído no domínio tempo-afastamento $\tilde{d}(x,t)$.

As transformações apresentadas nas equações (3.2) e (3.3), bem como nas equações (3.4) e (3.5) são chamadas de par adjunto de transformadas. Dado uma transformação ou mapeamento L entre dois espaços, como o dado original d e o modelo m, uma transformação adjunta L^* é definida como aquela que satisfaz o seguinte produto interno (TRAD, 2001):

$$< d, Lm > = < L^*d, m > \tag{3.6}$$

É importante ressaltar que, no caso da Transformada de Radon, o par adjunto não é considerado exatamente um par inverso, pois o resultado da transformação representada na equação (3.3), $\tilde{d}(x,t)$, não é igual ao dado original $d(x,t)$. Essa característica foi demonstrada por (ZHOU; GREENHALGH, 1994) considerado a Transformada de Radon no domínio de Fourier, substituindo $M(q,\omega)$ na equação (3.5), onde obtemos o seguinte resultado:

$$\tilde{D}(x,\omega) = \int_{-\infty}^{+\infty}\int_{-\infty}^{+\infty} D(x',\omega)\, e^{i\omega q(\phi(x')-\phi(x))}\, dx'\, dq \tag{3.7}$$

$$\tilde{D}(x,\omega) = D(x,\omega) * \rho(x,\omega), \tag{3.8}$$

onde o símbolo $*$ representa a convolução entre a família de CMP no domínio da frequência, $D(x,\omega)$, e o operador $\rho(x,\omega)$, também chamado de filtro rho. No caso contínuo, considerando uma faixa infinita de valores para x e q, a equação anterior mostra que para produzir o resultado inicial $d(x,\omega)$ é necessário realizar, para cada componente de frequência ω, uma deconvolução entre o filtro rho e $\tilde{d}(x,\omega)$, evidenciando que a Transformada de Radon não preserva todas as características do dado, sendo considerada, portanto, uma operação não-ortogonal.

3.1 A TRANSFORMADA DE RADON NA FORMA DISCRETIZADA

Na prática, o cálculo da Transformada de Radon é realizado de forma discreta, pois não lidamos com funções contínuas em termos computacionais. Por isso, é necessário definirmos uma amostragem temporal e espacial satisfatória para que o dado seja registrado com a mínima perda de informação. Assim, os arranjos temporais e espaciais são definidos da seguinte forma:

$$t_i = (i-1)\Delta t \qquad i = 1,\ \ldots,\ Nt \tag{3.9}$$

$$x_j = x_0 + (j-1)\Delta x \qquad j = 1,\ \ldots,\ Nx \tag{3.10}$$

onde t_i é o valor da *i-ésima* amostra em tempo, Δt é a taxa de amostragem temporal e Nt é o número de amostras em tempo. No espaço, x_j representa o afastamento do *j-ésimo* receptor em relação à fonte, x_0 é afastamento mínimo entre fonte e receptor, Δx é o espaçamento entre os receptores e Nx é o número de receptores ou canais.

Como consequência da amostragem, as integrais presentes nas equações (3.2) e (3.3) tornam-se agora os seguintes somatórios discretos:

$$m(q_n, \tau) = \sum_{j=1}^{N_x} d(x_j, t = \tau + q_n \phi(x_j)) \qquad n = 1, \ldots, Nq \tag{3.11}$$

$$\tilde{d}(x_j, t) = \sum_{n=1}^{N_q} m(q_n, \tau = t - q_n \phi(x_j)) \qquad j = 1, \ldots, Nx. \tag{3.12}$$

A função base $\phi(x_j)$ representa a relação existente entre o *offset* e o parâmetro do moveout que se deseja mapear. Nos métodos sísmicos, os tipos de Transformadas de Radon mais utilizadas são as lineares e as parabólicas.

3.1.1 Transformada de Radon linear

Muito semelhante à Transformada $f-k$, a Transformada de Radon Linear também decompõe o sinal de entrada em eventos de ondas planas, porém a organização no domínio Radon Linear é diferente, pois possui o eixo do tempo ao invés do eixo da frequência. O mapeamento desse domínio é realizado através da seguinte equação:

$$m(p_n, \tau) = \sum_{j=1}^{N_x} d(x_j, t = \tau + p_n x_j) \qquad n = 1, \ldots, Np \tag{3.13}$$

O procedimento da Transformada de Radon Linear baseia-se no somatório ao longo de linhas retas, com tempo de intercepção τ e inclinação p, também chamado de parâmetro do raio horizontal. Por esse motivo, o domínio Radon Linear é também chamado de domínio $\tau - p$ ou *slant-stack* [1].

Note que a Transformada de Radon Linear mapeia uma linha reta no domínio tempo-afastamento em um ponto no domínio Radon Linear. Além disso, um evento hiperbólico no domínio tempo-afastamento é mapeado como uma elipse no domínio Radon Linear (DIEBOLD; STOFFA,), como podemos observar na figura (11).

O parâmetro do raio p é definido como a inclinação da reta tangente ao longo de um evento no domínio do tempo-afastamento, sendo em função do tempo de trânsito $t(x)$, de acordo com a seguinte equação:

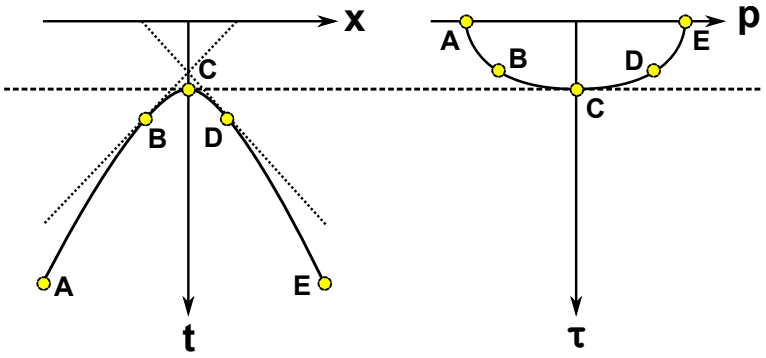
$$p = \frac{\partial t(x)}{\partial x} \tag{3.14}$$

Portanto, o valor máximo do parâmetro do raio horizontal no domínio Radon dependerá da máxima inclinação no domínio tempo-afastamento, destacado pelos pontos

[1] Do inglês, empilhamento oblíquo.

A e E na figura (11). O parâmetro do raio horizontal é inversamente proporcional à velocidade de propagação.

Figura 11 – Esquema representando o mapeamento de hipérboles como elipses no domínio $\tau - p$.



Fonte: (VERSCHUUR, 2006).

3.1.2 Transformada de Radon parabólica

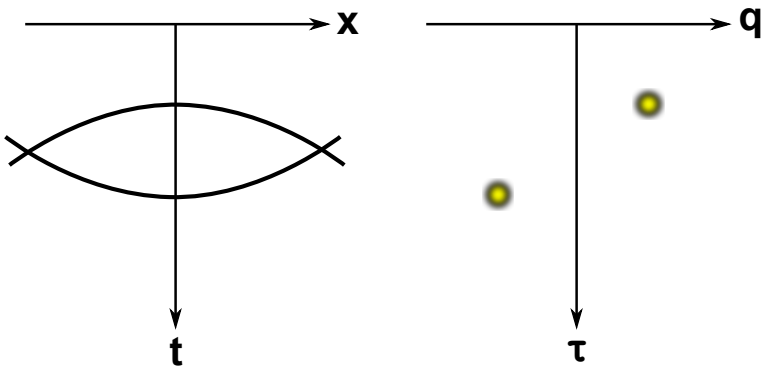
A Transformada de Radon Parabólica é aplicada em uma família CMP após a correção NMO, somando as amplitudes ao longo de uma parábola, através da seguinte equação:

$$m(q_n, \tau) = \sum_{j=1}^{N_x} d(x_j, t = \tau + q_n x_j^2) \qquad n = 1, \ldots, Nq \tag{3.15}$$

O mapeamento no domínio $\tau - q$ é realizado de acordo com as curvaturas das parábolas, sendo controladas pelo parâmetro de curvatura q, que pode assumir valores negativos ou positivos, dependendo da concavidade da parábola. Curvaturas posivitas e negativas são obtidas de acordo com a velocidade NMO utilizada na correção de sobretempo normal. Caso o valor da velocidade seja intermediária entre dois eventos, eles serão mapeados como pontos em localizações distintas no domínio $\tau - q$, como podemos observar na figura (12).

As desvantagens da Transformada de Radon Parabólica estão no fato de que eventos lineares no domínio $t - x$ não são mapeados dentro do *range* estimado no domínio $\tau - p$, resultando em dispersão de energia. Além disso, os eventos de reflexão não apresentam moveout parabólico, e sim hiperbólico, fazendo com que essa transformação dependa da aplicação prévia da correção NMO para ser executada com sucesso. Mais detalhes sobre esse tipo de Transformada encontram-se no capítulo (4).

Figura 12 – Esquema representando o mapeamento de parábolas no domínio $\tau - q$ após correção NMO utilizando um valor intermediário entre dois eventos.



Fonte: (VERSCHUUR, 2006).

4 METODOLOGIA

O presente capítulo aborda os principais aspectos práticos da implementação da Transformada de Radon Parabólica convencional, como amostragem e aliasing no domínio Radon Parabólico, Correção de moveout normal, Cálculo do Domínio de Fourier, Solução por mínimos quadrados e Filtragem de múltiplas. Além disso, etapas preliminares de processamento de dados também são explicadas.

4.1 PROCESSAMENTO CONVENCIONAL DE DADOS SÍSMICOS

Nesta seção são apresentados os fundamentos teóricos de processamento sísmico aplicados na linha 2D 0214-0266 da Bacia do Jequitinhonha. Como o objetivo do trabalho é a atenuação de múltiplas, o processamento foi aplicado até a fase de empilhamento, onde os efeitos da Transformada de Radon Parabólica podem ser avaliados. As etapas são exibidas na figura (13) e podem ser divididas em três fases: Pré-processamento, Pré-empilhamento e Empilhamento.

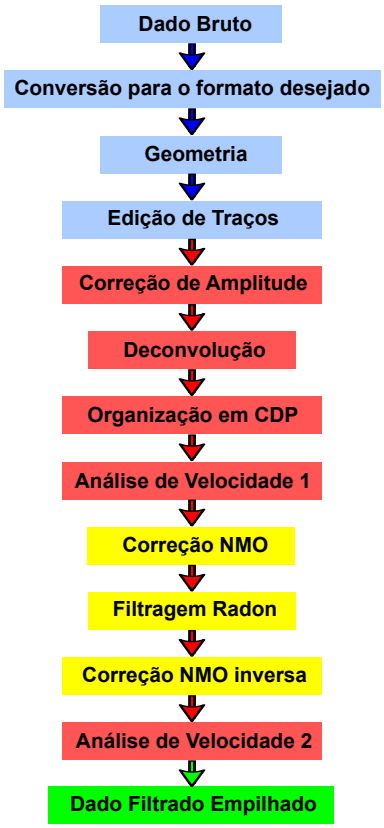
1. Pré-processamento: Fase onde o dado bruto é convertido para o formato desejado, de acordo com o *software* a ser utilizado. Os parâmetros da geometria do levantamento, baseado nas informações do relatório de campo são carregados do cabeçalho do traço. Em seguida, são realizados os procedimentos de edição de traços e aplicação de filtros.

2. Pré-empilhamento: Fase onde é feita a correção de amplitude para compensar o decaimento do sinal sísmico causado pela sua interação com a subsuperfície. Posteriormente é aplicada a deconvolução impulsiva, comprimindo o pulso e aumentando a sua resolução temporal. Em seguida, organizamos os traços em grupos que contém a mesma distância média entre fonte e receptor, chamados de famílias de Ponto Médio Comum ou CMP. A partir dessa organização, é realizada uma primeira análise de velocidade, estimando o perfil de velocidades médio entre as primárias e as múltiplas. Esse perfil de velocidades é utilizado na Correção NMO, gerando primárias e múltiplas com curvaturas distintas. Em seguida é aplicada a Filtragem Radon e a correção NMO inversa. Por fim, é realizada uma segunda análise de velocidades, mas dessa vez marcando os eventos de interesse.

3. Empilhamento: Fase em que os traços são corrigidos do efeito NMO e somados ao longo do eixo *offset*, com objetivo de melhorar a relação sinal/ruído. O empilhamento também é utilizado como atenuador de múltiplas, pois eventos horizontalizados

tendem a melhorar a sua resolução ao serem somados. Portanto, caso não haja marcação de múltiplas, elas tendem a ser naturalmente atenuadas nessa etapa, porém com uma eficácia menor que as técnicas utilizadas especificamente para essa finalidade.

Figura 13 – Fluxograma com as etapas do Processamento Sísmico Convencional aplicadas na atenuação de múltiplas da Bacia do Jequitinhonha. As setas em azul destacam a fase pré-processamento, em vermelho a fase pré-empilhamento e em verde o empilhamento. Os blocos amarelos destacam as etapas principais da atenuação de múltiplas.



Fonte: Do Autor.

4.2 AMOSTRAGEM E ALIASING NO DOMÍNIO $t - x$

No método sísmico digital, o traço sísmico é registrado de forma discretizada no tempo t, segundo intervalos constantes Δt, como já comentado no Seção (3.1). A partir disso, é natural nos questionarmos a respeito da perda de informação causada pela amostragem. Porém, isso dependerá da frequência do sinal que desejamos obter. Tomando a amostragem temporal como exemplo, quando Δt não for pequeno o suficiente para amostrar um sinal de frequência f, tal sinal será registrado como um evento falso, de mais baixa frequência, caracterizando o fenômeno de *aliasing*, como mostrado na figura (14).

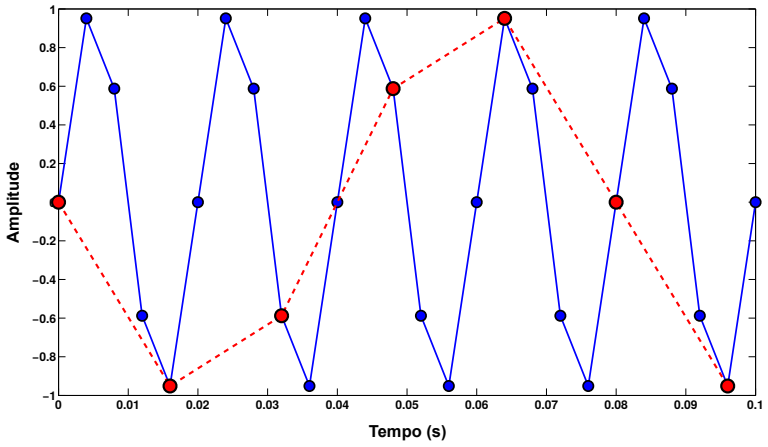
Partindo da idéia anterior, existe um limite entre as frequências amostradas corretamente e as frequências registradas em *aliasing* a partir de um determinado Δt. Esse limite é conhecido como frequência de Nyquist, definido por:

$$f_{Nyq} = \frac{1}{2\Delta t}. \tag{4.1}$$

Substituindo por frequência angular ω, medida em radianos por segundo, temos a seguinte expressão:

$$\omega_{Nyq} = \frac{\pi}{\Delta t} \tag{4.2}$$

Figura 14 – Senóide com frequência de 50 Hz, amostrada em 4ms (pontos azuis) e em 16ms (pontos vermelhos). Note que o evento registrado em vermelho possui mais baixa frequência, caracterizando o *aliasing* temporal. Fonte: Do Autor.



Fonte: Do Autor.

Nas situações práticas, a amostragem de dados sísmicos envolve também a distância ao longo do eixo x, caracterizada por Δx. Porém, nesse caso temos a influência da declividade dos eventos registrados, ou seja, como eles variam no espaço e no tempo. Por exemplo, se o evento apresenta uma alta declividade, menor deverá ser a amostragem Δx para registrá-lo. Portanto, devemos levar em conta a velocidade aparente dos eventos ou o seu inverso, conhecido como parâmetro horizontal do raio ou vagarosidade horizontal, a qual é definida por:

$$p = \frac{1}{v_A} = \frac{dt}{dx} \tag{4.3}$$

onde v_A é a velocidade aparente do sinal e p é a vagarosidade horizontal, uma medida do quão devagar um evento varia na direção horizontal.

A frequência angular espacial de Nyquist obedece os mesmos princípios da temporal, apenas trocando o eixo t por x, ou seja:

$$K_{x_{Nyq}} = \frac{\pi}{\Delta x} \tag{4.4}$$

O *aliasing* espacial acontece quando uma amostragem Δx não é suficiente para registrarmos eventos de uma determinada declividade p, gerando falsos eventos de baixa frequência espacial. Portanto, ao combinarmos as equações (4.2) e (4.3) e relacionarmos a vagarosidade dos eventos com a amostragem espacial, podemos determinar qual a frequência limiar temporal para que se possa registrar um componente de frequência sem o efeito de *aliasing* espacial:

$$\Omega_{Nyq} = \frac{\pi}{p\Delta x} \tag{4.5}$$

Em geral, para garantirmos que o dado sísmico não apresente *aliasing* espacial, devemos garantir que a banda de frequência dos pulsos sísmicos estejam dentro do intervalo $[0, \Omega_{Nyq}]$. Para isso, duas alternativas podem ser utilizadas:

- Filtrar o traço sísmico. Geralmente são utilizados filtros de banda passante que limitam as frequências dentro da banda desejada.
- Interpolar traços sísmicos para reduzir Δx.

4.3 AMOSTRAGEM E ALIASING NO DOMÍNIO $\tau - q$

No domínio $\tau - q$, os esforços relacionados à amostragem e *aliasing* concentram-se no eixo das curvaturas, pois, diferente das coordenadas temporais t e τ, ele não possui uma relação linear com o eixo *offset*. Portanto, a determinação correta da amostragem Δq e da faixa total de valores de curvatura q são fundamentais para uma boa performance da Transformada de Radon Parabólica.

A frequência de *aliasing*, por sua vez, pode ser determinada considerando agora as trajetórias aproximadamente parabólicas descritas por $t = \tau + qx^2$. Derivando esse moveout segundo a equação (4.3), temos:

$$\Omega_{Nyq} = \frac{\pi}{2x\Delta x\, q_{max}} \tag{4.6}$$

onde Ω_{Nyq} representa agora o limite de frequências amostradas corretamente considerando a curvatura máxima q_{max} contida na família CMP.

O pricipal critério para uma amostragem correta no eixo das curvaturas é a ausência de periodicidade no domínio $\omega - q$. Para evitar que isso ocorra, devemos garantir que o argumento da exponencial contida no operador $\mathbf{L}$ seja menor que 2π:

$$\omega q_n x_j^2 < 2\pi \tag{4.7}$$

Considerando toda a extensão do eixo x, teremos a inequação para o menor valor em q quando $\omega = \omega_{max}$, ou seja:

$$\Delta q < \frac{2\pi}{\omega_{max}(x_{max}^2 - x_{min}^2)} \tag{4.8}$$

Podemos escrever a inequação anterior como uma igualdade introduzindo o parâmetro α, o qual mede qualidade da amostragem do dado. O valor de α pode variar para baixas amostragem ($\alpha > 1$) e altas amostragens ($\alpha < 1$). Uma fórmula prática para dados regularmente amostrados é $\alpha = 1 - \frac{2}{N_x}$. Assim, uma boa aproximação para dados regularmente amostrados é (SCHONEWILLE; DUIJNDAM, 2001):

$$\Delta q = \frac{2\pi}{\omega_{max}(x_{max}^2 - x_{min}^2)}(1 - \frac{2}{N_x}) \tag{4.9}$$

A faixa de valores de curvatura foi estimada considerando $N_q = (2N_x - 1)$, afim de obtermos um eixo simétrico, com um número ímpar de valores de curvatura e $q = 0$ no centro. Assim, a faixa total de curvaturas é determinada pela expressão:

$$(q_{max} - q_{min}) = (2N_x - 1)\Delta q \tag{4.10}$$

4.4 METODOLOGIA DA TRANSFORMADA DE RADON PARABÓLICA

A Metodologia utilizada para implementação do algoritmo da Transformada de Radon Parabólica obedece os passos propostos por (HAMPSON, 1986):

1. Iniciar a partir de uma família CMP, $d(x, t)$, aplicar a correção NMO $d(x, t_{NMO})$.
2. Aplicar a Transformada de Fourier na direção t_{NMO}, resultando em $d(x, \omega_{NMO})$.
3. Para cada ω_{NMO}, calcular o operador $\mathbf{L}$ baseado na geometria de uma família CMP e a solução $\mathbf{m}$ utilizando a decomposição por mínimos quadrados dada pela equação (4.27).
4. Aplicar a Transformada de Fourier inversa para obter $m(q, \tau)$, a Transformada de Radon Parabólica.

5. Realizar a operação desejada, como silenciar as zonas de múltiplas, no domínio da Transformada de Radon Parabólica.

6. Realizar o mapeamento inverso de volta ao domínio $t - x$ para obter a família CMP com correção NMO reconstruída. $\tilde{d}(x,t)$. Durante esse mapeamento inverso, múltiplas, primárias, ou todos os eventos hiperbólicos podem ser modelados.

7. Retirar a correção NMO para obter a família CMP modelada $\tilde{d}(x,t)$.

4.4.1 Correção NMO

O primeiro passo na realização da Transformada de Radon Parabólica é a correção NMO dos tempos de trânsito nas famílias CMP. Em geral, A finalidade da correção NMO é retirar o atraso no tempo de trânsito das reflexões causado pelo afastamento entre fonte e receptor, ou seja, corrigir a diferença existente entre o tempo de dupla trajetória em um dado afastamento e o tempo de dupla trajetória em afastamento nulo. Essa correção é obtida aplicando a equação do moveout hiperbólico nas famílias CMP, definida por:

$$t_{NMO} = \sqrt{t_0^2 - \frac{x^2}{v_{NMO}^2}} \tag{4.11}$$

onde t_{NMO} é o tempo após a correção NMO e v_{NMO} é a velocidade estimada para correção do moveout hiperbólico. Quando v_{NMO} for igual à velocidade do evento que se deseja corrigir, resultará em um moveout horizontalizado. Caso v_{NMO} seja maior que a velocidade correta, teremos um moveout subcorrigido. Por outro lado, quando v_{NMO} for menor que a velocidade do evento, teremos seu moveout sobrecorrigido. A figura (15) exemplifica esses três casos.

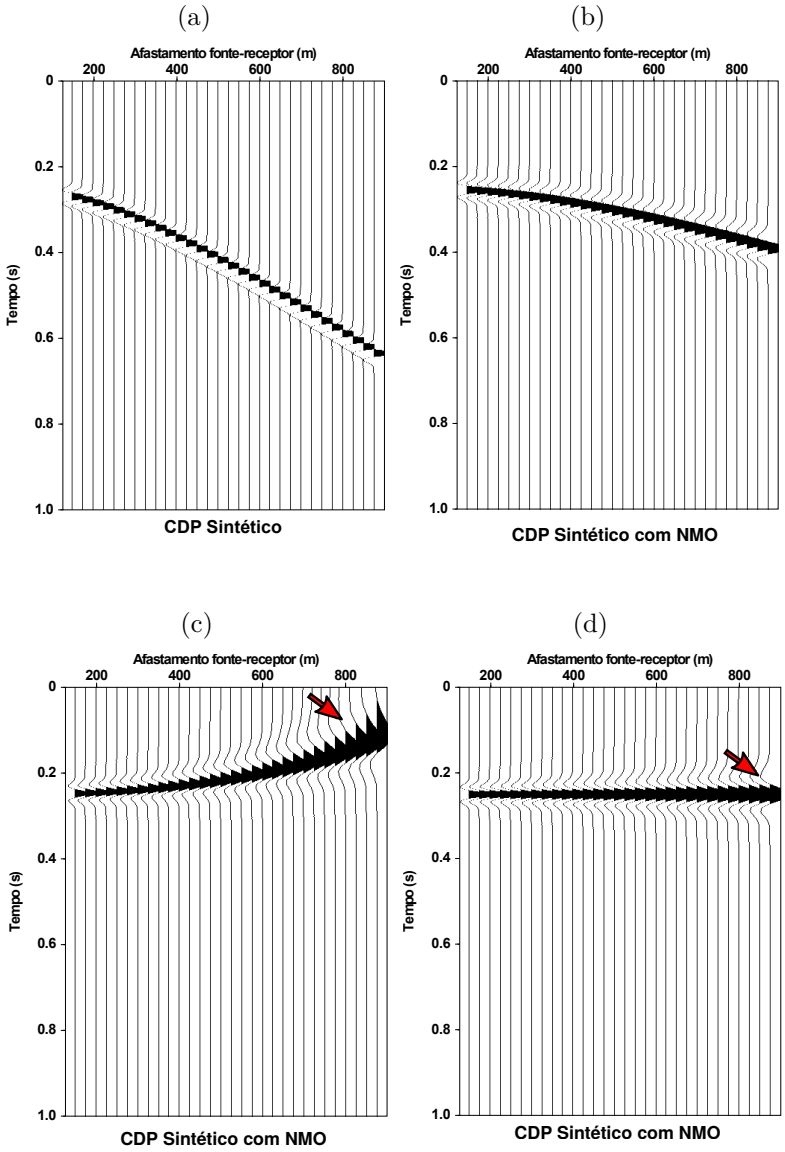
Uma das consequências da correção NMO é a distorção de frequência que ocorre geralmente em eventos rasos, de baixa velocidade, mais especificamente em altos afastamentos. Esse efeito é chamado de estiramento ou *stretching* e está ilustrado na figura (15). O *stretching* acontece quando um pulso sísmico em um período dominante T é estirado para um período dominante T_0 maior que T. Essa distorção acarreta no deslocamento de eventos para baixas frequências, contaminando o espectro. Por esta razão, alguns traços corrigidos precisam ser zerados a partir de um certo tempo e afastamento, retirando distorções que ultrapassam um limite pré-estabelecido, pois elas podem afetar etapas posteriores, como o empilhamento.

A relação entre estiramento do pulso e distorção na frequência é representada por:

$$\frac{\Delta f}{f} = \frac{\Delta t_{NMO}}{t_0} \tag{4.12}$$

onde f é a frequência dominante, Δf é a variação na frequência, Δt é o valor da correção NMO e t_0 é o tempo de dupla-trajetória em afastamento nulo. A figura (15) mostra alguns exemplos de estiramento.

Figura 15 – Ilustração dos possíveis *moveouts* resultantes da correção NMO. (a) Hipérbole com velocidade de 1500 m/s; (b) Subcorreção do evento utilizando $v_{NMO} = 1750$ m/s; (c) Sobrecorreção do evento utilizando $v_{NMO} = 1400$ m/s; (d) Correção utilizando a velocidade correta do evento. As setas vermelhas em (c) e (d) indicam o estiramento. provocado pela correção NMO. Fonte: Do Autor.



Fonte: Do Autor.

A discriminação dos *moveouts* gerada pela correção NMO é uma propriedade muito utilizada na separação entre primárias e múltiplas, sendo, portanto, uma etapa fundamental na aplicação da Transformada de Radon Parabólica. Além disso, após a

equação (4.11), *moveouts* que antes eram hiperbólicos tornam-se agora aproximadamente parabólicos através da expressão:

$$t_{NMO} = \tau + qx^2 \tag{4.13}$$

onde τ é o tempo de registro do evento, também chamado de tempo de dupla trajetória em afastamento nulo e q é o parâmetro que define a curvatura da parábola.

A distinção entre os eventos primários e suas múltiplas se dá quando utilizamos um perfil de velocidades intermediário a eles, ou seja, quando $v_m < v_{NMO} < v_p$. Dessa forma, as reflexões primárias tornam-se parábolas com curvatura positiva (concavidade para cima) e as múltiplas tornam-se parábolas com curvatura negativa (concavidade para baixo).

A correção NMO pode ser desfeita através da correção NMO inversa, a qual retorna para o moveout original caso a mesma velocidade seja utilizada. Trata-se de uma operação que não possui inversa exata, ou seja, não preserva todas as características do dado original, particularmente nos primeiros tempos de chegada e nos altos afastamentos, onde temos o maior efeito do estiramento. A correção NMO inversa é representada por:

$$t_{INMO} = \sqrt{t_0^2 + \frac{x^2}{v_{INMO}^2}} \tag{4.14}$$

4.4.2 **Cálculo do domínio** $\omega - x$

Após a correção NMO, o próximo passo é a passagem para o domínio da frequência ou $\omega - x$ aplicando-se a Transformada de Fourier Direta na direção t_{NMO}. Nesse domínio, o par de Transformadas de Radon Parabólica é escrito como:

$$M(q_n, \omega) = \sum_{j=1}^{N_x} D(x_j, \omega)\, exp(i\omega q_n x_j^2) \qquad n = 1, \ldots, Nq \tag{4.15}$$

$$\tilde{D}(x_j, \omega) = \sum_{n=1}^{N_q} M(q_n, \omega)\, exp(-i\omega q_n x_j^2) \qquad j = 1, \ldots, Nx. \tag{4.16}$$

O objetivo dessa transformação é decompor o CMP em vários componentes de frequência, fazendo com que a Transformada de Radon possa ser calculada a cada valor de ω, tornando o algoritmo mais eficaz em termos computacionais, já que além de eliminarmos a variável t_{NMO}, os cálculos também podem ser feitos de maneira circular, apenas variando os elementos do vetor ω.

Na prática, o algoritmo padrão utilizado no cálculo do domínio de Fourier em sinais digitais é o *FFT* ou *Fast Fourier Transform*. A utilização desse algoritmo requer alguns cuidados com o dado antes e após a sua aplicação, como os seguintes:

1. A partir de Δt, definir o arranjo total de frequências para qual o dado é amostrado corretamente.
2. Extensão das colunas da matriz de N_t para a potência de 2 mais próxima ($N = 2^n$).
3. Diminuir efeitos de truncamento através da aplicação das janelas de suavização em cada coluna.
4. Aplicar a *FFT* e, em seguida, deslocar o espectro para a faixa de frequências $[0, 2\pi]$.
5. Devido a característica periódica do espectro, devemos calcular o traço analítico multiplicando por 2 a primeira metade (de 0 a f_{Nyq}) e desconsiderar a segunda metade do espectro, de $N/2 + 1$ a N, pois ela é a imagem espelhada da primeira.

O retorno ao domínio do tempo é realizado através da Transformada de Fourier Inversa, a qual colapsa os componentes de frequência em um sinal no domínio do tempo de forma reversível, reconstruindo todas as características do dado original, caso nenhuma operação seja aplicada.

4.4.3 Solução por mínimos quadrados

Diferente da Transformada de Fourier, a Transformada de Radon não é reversível, ou seja, a sua aplicação não preserva todas as características do dado. Isso ocorre em decorrência de diversos fatores, como a abertura limitada do lanço sísmico, amostragem discreta ao longo do afastamento entre fonte e receptor e a proximidade, em baixos offsets, entre as trajetórias em que ocorrem os somatórios. Essa insuficiência de informações causam borramentos ou *smearing* ao longo do eixo de curvaturas, prejudicando a qualidade da filtragem.

Uma das propostas mais utilizadas para evitar o *smearing* é minimizar o erro entre o dado original $d(x, t)$ e o dado reconstruído $\tilde{d}(x, t)$ através do método dos mínimos quadrados. Essa técnica de otimização matemática procura encontrar o melhor ajuste para um conjunto de dados buscando minimizar a soma dos quadrados das diferenças entre o valor estimado e os dados observados. Para isso, consideremos a equação (4.16) na seguinte forma matricial:

$$\tilde{\mathbf{d}} = \mathbf{Lm} \tag{4.17}$$

O objetivo é estimar a matriz $\mathbf{m}$ de forma que o erro $\mathbf{e}$ entre $\mathbf{d}$ e $\tilde{\mathbf{d}}$ seja mínimo no sentido de mínimos quadrados. Utilizando a notação matricial, o resíduo $\mathbf{e}$ é definido como:

$$\mathbf{e} = \mathbf{d} - \mathbf{Lm} \tag{4.18}$$

De acordo com (LINES; TREITEL, 1984), a solução por mínimos quadrados da equação (4.17) é determinada, primeiramente, expressando o erro quadrado cumulativo $\mathbf{S}$ como:

$$\mathbf{S} = \mathbf{e^H e} \tag{4.19}$$

onde $\mathbf{H}$ indica o transposto complexo conjugado ou hermitiana. Substituindo $\mathbf{e}$ na equação anterior, obtemos:

$$\mathbf{S} = (\mathbf{d} - \mathbf{Lm})^{\mathbf{H}}(\mathbf{d} - \mathbf{Lm}) \tag{4.20}$$

$$\mathbf{S} = \mathbf{d^H d} - \mathbf{d^H Lm} - \mathbf{L^H m^H d} + \mathbf{L^H m^H Lm} \tag{4.21}$$

Ao aplicarmos a definição dos mínimos quadrados no erro quadrático, a seguinte condição deve ser satisfeita:

$$\frac{\partial \mathbf{S}}{\partial \mathbf{m}} = 0 \tag{4.22}$$

Portanto, teremos a seguinte solução para a equação (4.17):

$$\frac{\partial \mathbf{S}}{\partial \mathbf{m}} = -2\,\mathbf{L^H d} + 2\,\mathbf{L^H Lm} \tag{4.23}$$

$$\mathbf{m} = (\mathbf{L^H L})^{-1}\,\mathbf{L^H d} \tag{4.24}$$

A implementação da solução por mínimos quadrados necessita do cálculo da inversa de $(\mathbf{L^H L})$, o que pode apresentar problemas de singularidade. Para contornar esse problema, adicionamos o fator de amortecimento ou multiplicador de Lagrange β nessa solução, o que nos dá o seguinte resultado:

$$\mathbf{m} = (\mathbf{L^H L} + \beta \mathbf{I})^{-1}\,\mathbf{L^H d} \tag{4.25}$$

Devido a característica quase singular da matriz complexa $\mathbf{L}$, especialmente para pequenos valores de ω, a solução dada pela equação (4.25) é melhor formulada em termos de

decomposição por valores singulares da matriz $\mathbf{L}$ (PRESS et al., 1986). Esse procedimento fatora a matriz $\mathbf{L}$ em um produto de três matrizes:

$$\mathbf{L} = \mathbf{U}\,\mathbf{\Sigma}\,\mathbf{V^H} \tag{4.26}$$

onde $\mathbf{U}$ e $\mathbf{V}$ são matrizes unitárias complexas e $\mathbf{\Sigma}$ é uma matriz diagonal contendo os autovalores positivos de $\mathbf{U}$ e $\mathbf{V}$ (ambos apresentam os mesmos autovalores), organizados em forma descrescente.

Utilizando a forma fatorada da matriz $\mathbf{L}$, temos a solução final por mínimos quadrados otimizada pela decomposição por valores singulares:

$$\mathbf{m} = \mathbf{V}[(\mathbf{\Sigma^2} + \beta\mathbf{I})^{-\mathbf{1}}\mathbf{\Sigma}]\mathbf{U^H}\,\mathbf{d} \tag{4.27}$$

A solução por mínimos quadrados $\mathbf{m}$ projetada para o domínio da frequência, proposta na equação (4.27), deve ser recalculada a cada componente de frequência angular ω através dos seguintes passos:

1. Cálculo do operador $\mathbf{L}$:

$$\mathbf{L} = \begin{pmatrix} e^{-i\omega q_1 x_1^2} & e^{-i\omega q_2 x_1^2} & \dots & e^{-i\omega q_n x_1^2} \\ e^{-i\omega q_1 x_2^2} & e^{-i\omega q_2 x_2^2} & \dots & e^{-i\omega q_n x_2^2} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ e^{-i\omega q_1 x_j^2} & e^{-i\omega q_2 x_j^2} & \dots & e^{-i\omega q_n x_j^2} \end{pmatrix} \tag{4.28}$$

2. Aplicação da decomposição por valores singulares de $\mathbf{L}$.

3. Introdução do termo de amortecimento β na matriz $\mathbf{\Sigma}$:

$$(\mathbf{\Sigma^2} + \beta\mathbf{I})^{-\mathbf{1}}\mathbf{\Sigma} = \begin{pmatrix} \sigma_1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \sigma_2 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & \sigma_n \end{pmatrix} \tag{4.29}$$

onde $\sigma_i = \lambda_i/(\lambda_i^2 + \beta)$ e λ_i é a raiz quadrada positiva dos autovalores λ_i^2 de $\mathbf{L^H L}$.

4. Por fim, é realizado o cálculo da solução proposta pelo método dos mínimos quadrados na equação (4.27).

O resultado da solução $\mathbf{m}$ é o mapeamento $m(q, \omega)$, pois foi realizada a mudança de coordenadas de x para q. Portanto, é necessária a aplicação da Transformada de Fourier inversa para mudarmos para o tempo de intersepção τ dos eventos, resultando no domínio $\tau - q$, onde moveouts aproximadamente parabólicos são mapeados como pontos.

4.4.4 Filtragem no domínio $\tau - q$

Com o domínio $\tau - q$, a separação entre eventos primários e múltiplas torna-se muito mais clara, pois eles serão visualizados como pontos, facilitando o realce de eventos de interesse e atenuação de eventos indesejados. Caso a correção NMO seja feita corretamente, utilizando um perfil de velocidades intermediário a primárias e múltiplas, teremos a zona com curvaturas positivas apresentando as reflexões primárias e a zona com curvaturas negativas contendo as múltiplas.

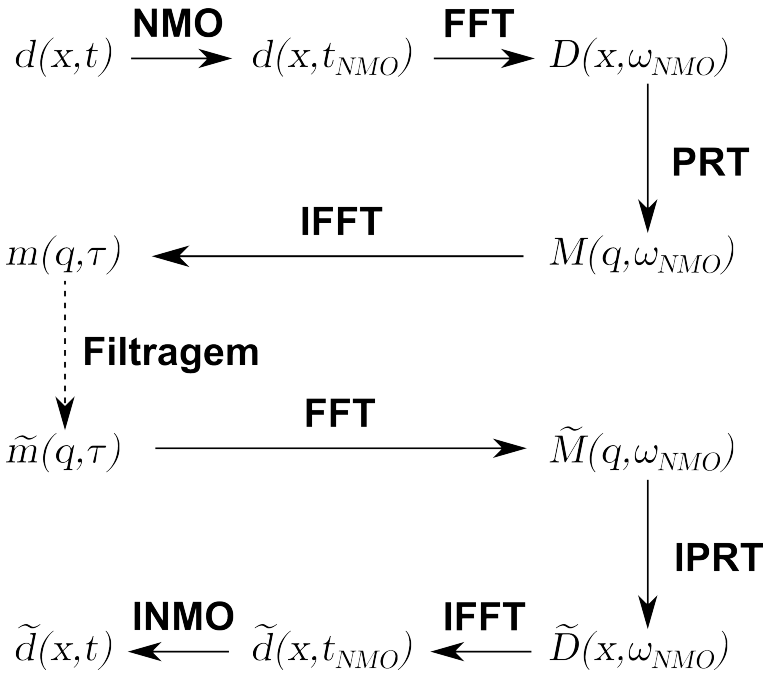
A etapa de filtragem das múltiplas consiste basicamente em zerar as zonas com curvaturas negativas sob os quais encontram-se os pontos que representam as múltiplas. É importante que as janelas utilizadas para silenciar os pontos sejam de suavização, evitando, assim, possíveis fenômenos de Gibbs.

Após a etapa de silenciamento das múltiplas, o objetivo agora é reconstruir a família CMP $\tilde{d}(x,t)$. Para isso, é necessário aplicarmos as operações exigidas pela Transformada de Radon inversa. Portanto, necessitamos retornar ao domínio $m(q,\omega)$, pois o operador inverso também é calculado no domínio da frequência, novamente sobre cada componente de ω. Nesse domínio, aplicamos agora a seguinte relação:

$$\tilde{\mathbf{d}}(\omega) = \mathbf{L}(\omega)\mathbf{m}(\omega) \tag{4.30}$$

O retorno ao domínio $t - x$ é alcançado através da Transformada de Fourier inversa, onde apenas as N_t amostras do espectro de $d(x,\omega)$ são consideradas. O último passo, após o cálculo de $\tilde{d}(x, t_{NMO})$, é retirar o efeito da correção de sobretempo normal, retornando à família CMP com as reflexões primárias e as múltiplas silenciadas.

Figura 16 – Diagrama de fluxo com todas as etapas necessárias para execução da Filtragem Radon Parabólica.



Fonte: Do Autor.

5 EXPERIMENTOS NUMÉRICOS

No capítulo anterior foram mostrados todos os passos para implementação do algoritmo da Transformada de Radon Parabólica, utilizando a solução por mínimos quadrados otimizada pela decomposição por valores singulares. Este capítulo aborda as aplicações do algoritmo em dados sintéticos, ilustrando todos as etapas da atenuação de múltiplas com esse método. Além disso, são destacados aspectos práticos importantes como aliasing, influência de ruídos aleatórios e regularização de dados.

O dado sintético é uma família CMP que simula dois moveouts hiperbólicos. O primeiro é uma reflexão primária com velocidade de 2000 m/s e tempo de registro 500 ms. O segundo é a múltipla, com velocidade de 1500 m/s e tempo de registro 1500 ms. Os demais detalhes da configuração do dado estão na tabela abaixo.

Tabela 1 – Parâmetros utilizados na geração da família de ponto médio comum sintética.

Especificações	Dados
Número de canais	45
Intervalo entre os receptores	25m
Mínimo offset	150m
Máximo offset	1250m
Tempo de registro	2s
Discretização	4ms
Número de amostras no tempo	501
Tipo de pulso fonte	Ricker
Frequência dominante do pulso	30Hz

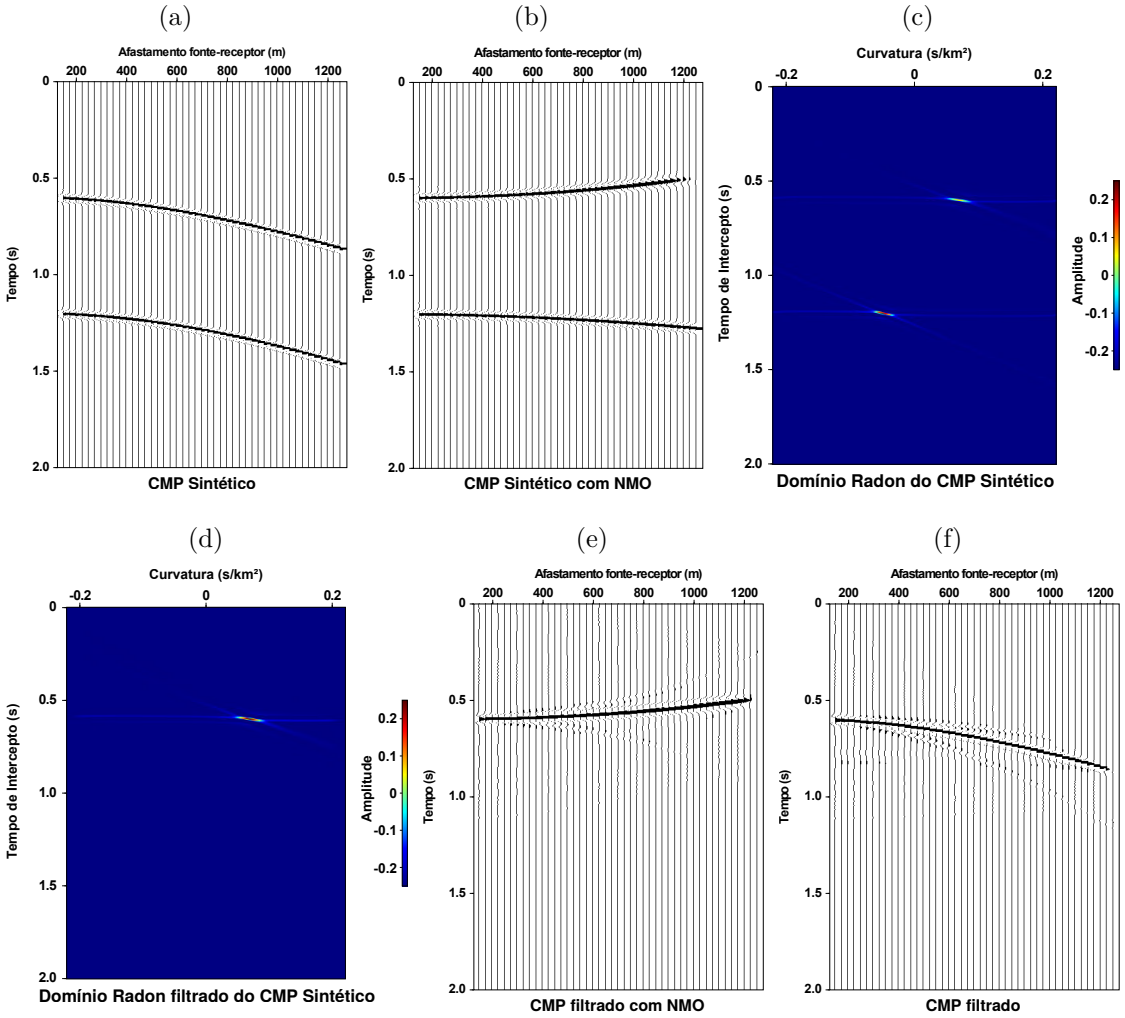
5.1 ETAPAS DA FILTRAGEM RADON

As etapas da Transformada de Radon Parabólica apresentadas no capítulo anterior foram aplicadas ao CMP sintético com o objetivo de analisarmos a eficácia do método antes de aplicarmos em dados reais. Nos primeiros testes foram realizados duas supressões de múltipla diferentes, uma total e outra parcial. A primeira filtragem consiste em silenciar todo o ponto correspondente à múltipla no domínio $\tau - q$, ilustrada na figura (17).

Em dados reais, onde temos a presença de múltiplos eventos, a supressão total das múltiplas não é viável, pois isso comprometerá a qualidade dos eventos de interesse.

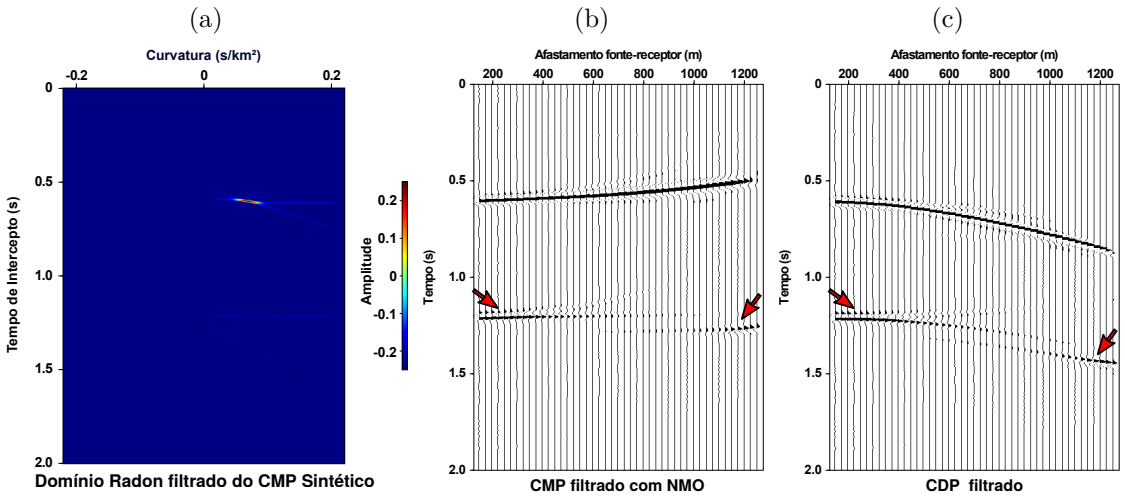
Isso acontece em virtude do espalhamento do ponto no domínio Radon, gerando uma espécie "cauda" que abrange toda a faixa de curvaturas ao longo do tempo de intercepto τ. Essa característica é ilustrada na segunda filtragem, presente na figura (18), onde apenas as curvaturas negativas são silenciadas. Como consequência, observamos resquícios de múltiplas presentes em baixos e altos *offsets*. Em contrapartida, nos médios afastamentos, onde a aproximação parabólica é mais precisa, temos uma melhor supressão da múltipla.

Figura 17 – (a) CMP Sintético; (b) CMP Sintético após a aplicação da correção NMO com velocidade intermediária de 1750 m/s; (c) Painel Radon do CMP após a correção NMO; (d) Painel Radon com filtragem total das múltiplas; (e) CMP com correção NMO após a filtragem; (f) CMP filtrado após a correção NMO inversa.



Fonte: Do Autor.

Figura 18 – (a) Painel Radon com supressão das curvaturas negativas; (b) CMP com correção NMO após a filtragem; (c) CMP filtrado após a correção NMO inversa. As setas vermelhas indicam a presença de resquícios de múltiplas em baixos e altos afastamentos.



Fonte: Do Autor.

5.2 ALIASING NO DOMÍNIO $\tau - q$

O fenômeno de *aliasing*, abordado no capítulo anterior, é entendido como o efeito da pobre amostragem de um sinal em relação à frequência de Nyquist, seja em coordenadas temporais ou espaciais. No domínio Radon, o *aliasing* aparece devido a uma pobre amostragem no *offset*, o que é um problema comum. *Aliasing* no domínio tempo-espaço devido a uma pobre amostragem no domínio $\tau - q$ também é possível, mas é um problema fácil de se corrigir porque ele simplesmente requer uma diminuição no intervalo de amostragem para o domínio do modelo $m(\tau, q)$ (TRAD, 2001).

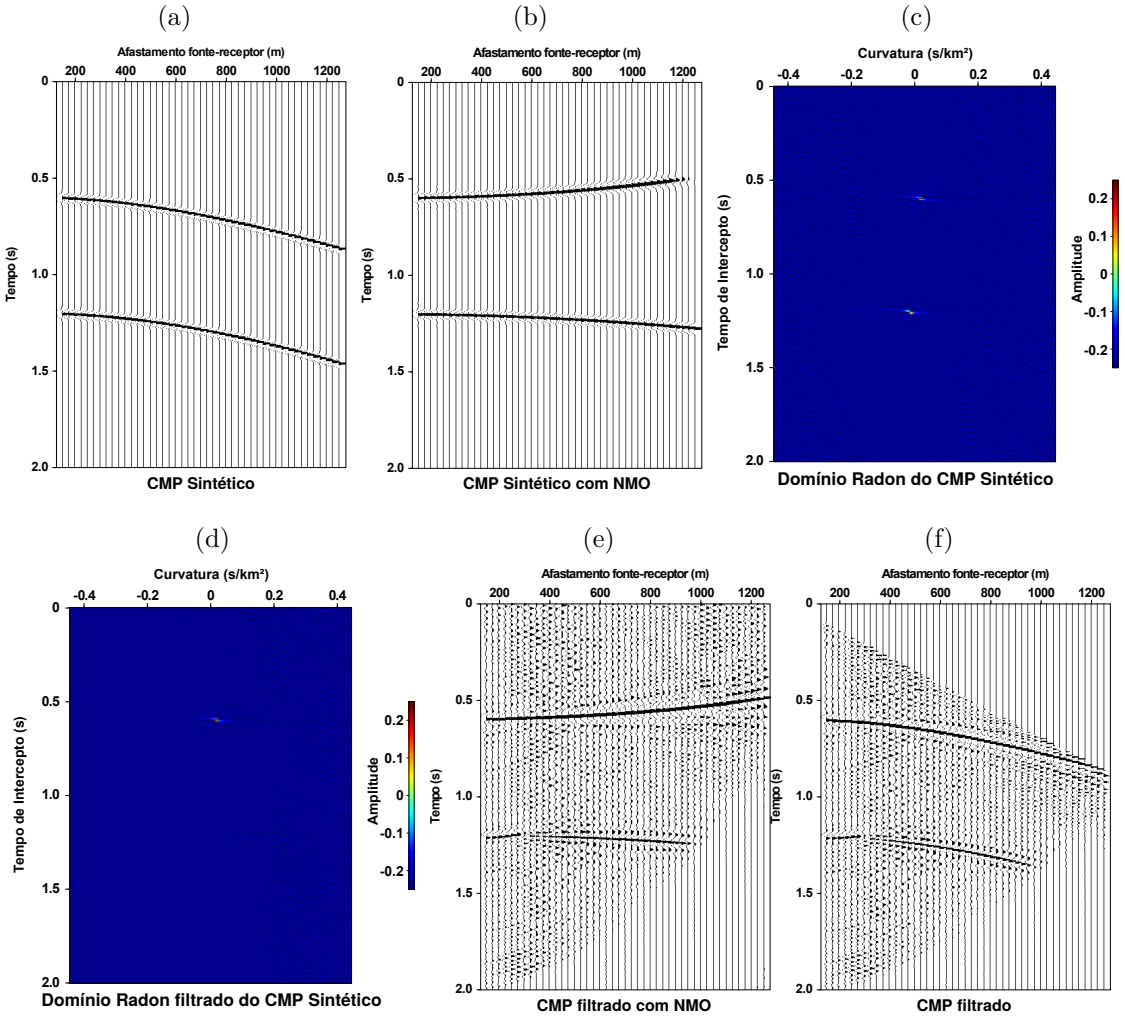
Uma forma de conseguir o efeito de *aliasing* no domínio Radon parabólico é extrapolarmos o valor de Δq recomendado na equação (4.9). Substituindo os valores pelos parâmetros utilizados, temos:

$$\Delta q = \frac{1}{125 Hz\,((1,25\,km)^2 - (0,15\,km)^2)}(1 - \frac{2}{45}) \approx 0,0048\,s/km^2 \tag{5.1}$$

O valor de Δq utilizado nas etapas anteriores foi aproximadamente $0,0014\,s/km^2$, ou seja, abaixo do limite estabelecido. Realizando as mesmas etapas anteriores, extrapolarmos Δq para $0,01\,s/km^2$, onde obtemos o efeito de *aliasing* mostrado na figura (19). Notamos uma considerável diminuição do ponto no domínio $\tau - q$, o que aparenta uma melhora na

propriedade de focalização, porém notamos uma série de artefatos próximos às bordas do painel Radon. Ao aplicarmos a Transformada inversa, esses artefatos são reconstruídos no domínio tempo-espaço, contaminando a família CMP. Além disso, a qualidade da supressão da múltipla não é satisfatória, contendo fortes resquícios até mesmo em médios afastamentos.

Figura 19 – (a) CMP Sintético original; (b) CMP após a correção NMO com velocidade 1750 m/s; (c) Painel Radon com efeitos de baixa amostragem; (d) Painel Radon em *aliasing* após a supressão da múltipla; (e) CMP reconstruindo com NMO e artefatos de *aliasing*; (f) CMP com correção NMO inversa e artefatos de *aliasing*.



Fonte: Do Autor.

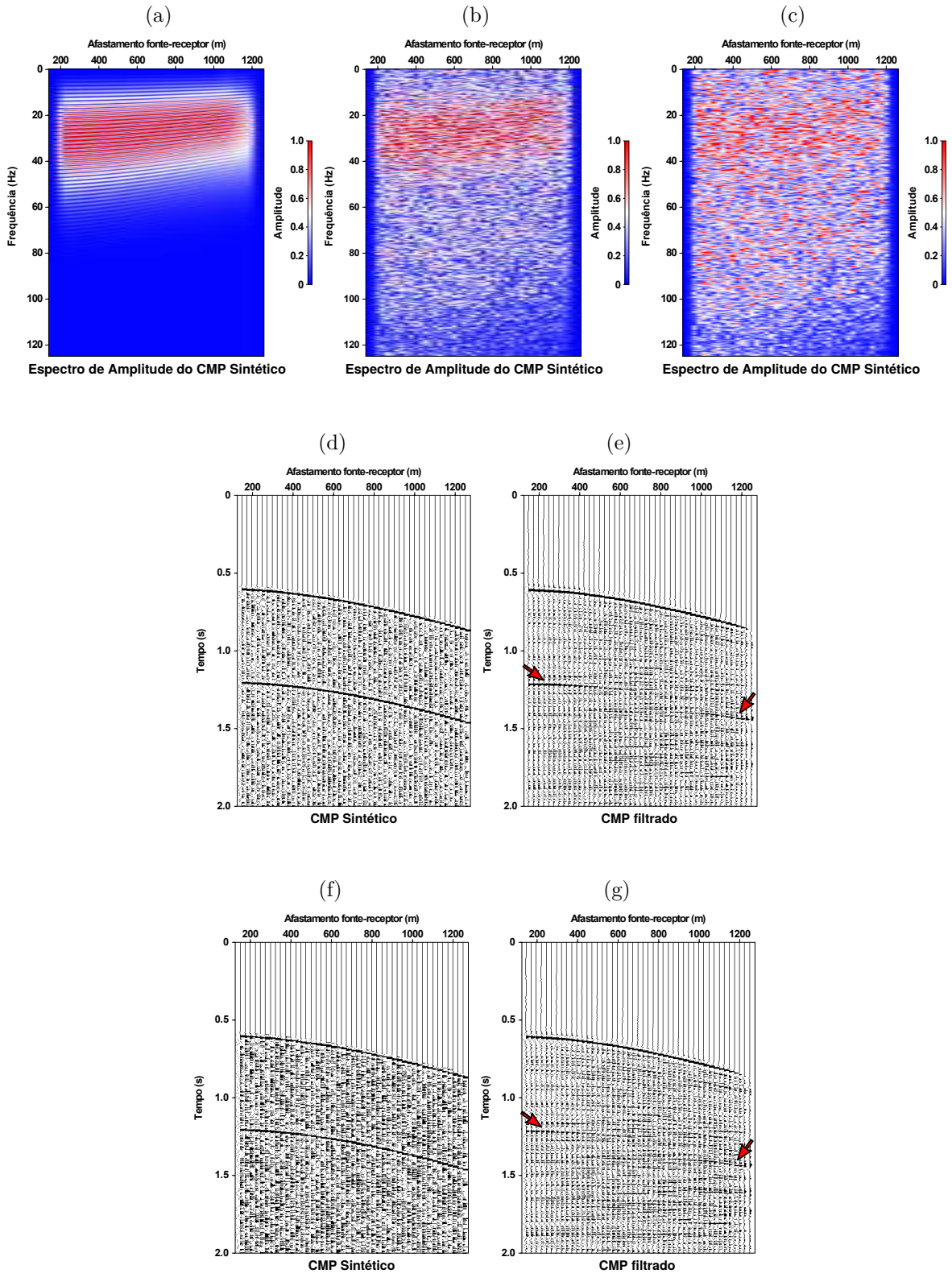
5.3 TESTES COM RUÍDO ALEATÓRIO

A presença de ruído aleatório nas famílias CMP também afeta a qualidade da filtragem Radon, visto que tende contaminar o conteúdo espectral, mascarando as reflexões

e, consequentemente, o somatório ao longo dos eventos. A figura (20) compara os espectros de amplitude da família CMP apresentada anteriormente antes e após a contaminação com ruído aleatório.

A filtragem Radon foi testada na presença da família CMP com razão sinal-ruído igual a 2 e 1 (figura (20)). Em ambos os casos os resquícios de múltiplas permanecem, porém no segundo caso ele é menos evidente, se confundindo com o ruído aleatório. Além disso, nota-se uma considerável de ruído, já que parte de sua energia também será atenuada junto com a múltipla.

Figura 20 – (a) Espectro de amplitude do CMP sintético sem ruído; (b) Espectro de amplitude em (a) com razão sinal-ruído igual a 2; (c) Espectro de amplitude em (a) com razão sinal-ruído igual a 1; (d) Família CMP com razão sinal-ruído igual a 2; (e) Filtragem de (d); (f) Família CMP com razão sinal-ruído igual a 1; (g) Filtragem de (f).



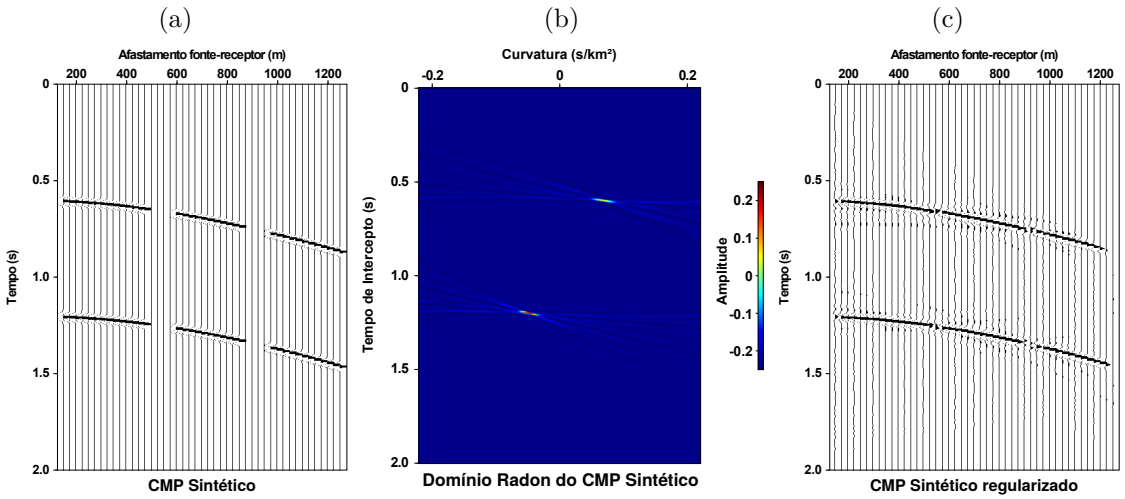
Fonte: Do Autor.

5.4 REGULARIZAÇÃO DE DADOS

A Transformada de Radon Parabólica também pode ser aplicada em famílias de ponto médio comum irregularmente amostradas na distância. Nesses casos, a inversão para o domínio $t - x$ atuará como interpolador, preenchendo as lacunas entre os traços. Isso acontece graças ao termo $\mathbf{L^H L}$, chamado de matriz função de espalhamento, o qual impõe suavidade ao modelo $m(\tau, q)$. Consequentemente, ao reconstruirmos o dado $\tilde{d}(t, x)$, teremos amplitudes suavizadas entre os traços.

Para o teste da regularização, silenciamos os traços existentes nos afastamentos de 500 a 575 e de 875 a 950 metros. Os resultados na figura (21) mostram um aumento no espalhamento das "caudas" no domínio $\tau - q$. O dado regularizado mostra um decaimento da amplitude do pulso ao longo das lacunas, característica comum ao tipo de suavização aplicada na Transformada de Radon padrão.

Figura 21 – (a) CMP sintético com amostragem espacial irregular; (b) Painel Radon do CMP em (a); (c) CMP reconstruído após regularização por suavização.



Fonte: Do Autor.

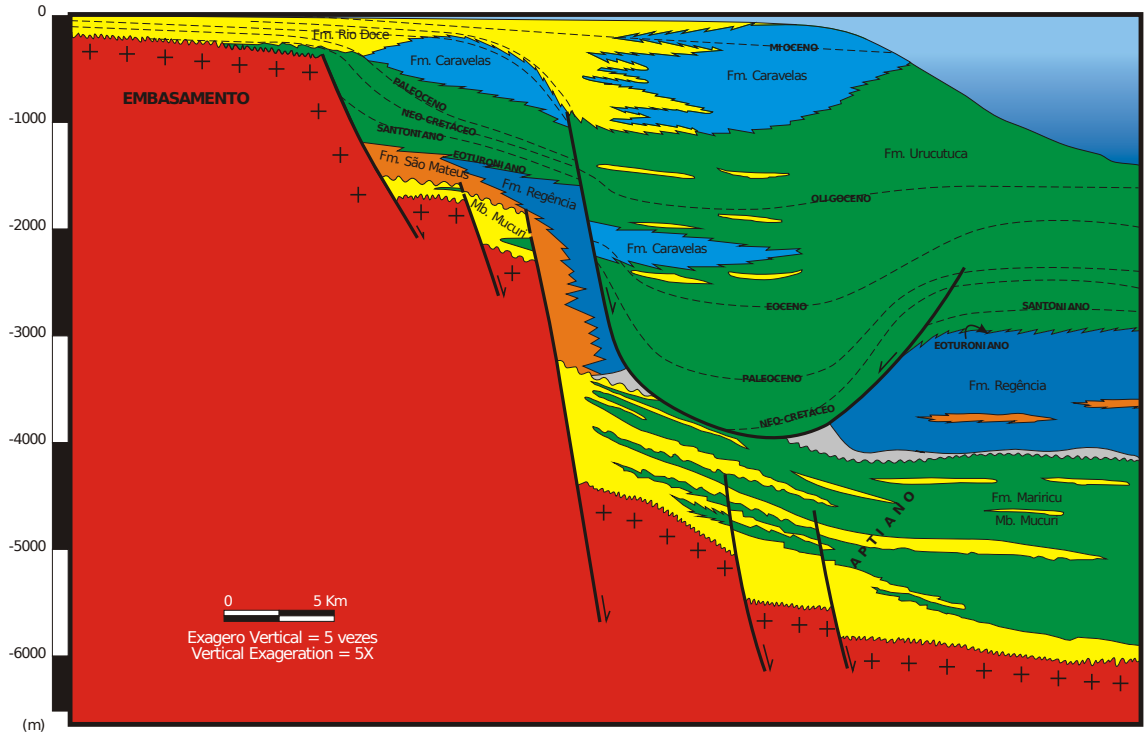
6 APLICAÇÃO EM DADOS REAIS

6.1 APRESENTAÇÃO DA BACIA

A Bacia de Jequitinhonha está situada na costa sul do Estado da Bahia, entre os paralelos 14°37' Sul e 16°24' Sul, na costa leste do Brasil, em frente à foz do Rio Jequitinhonha. Sua área total corresponde a 10.000 km^2, dos quais apenas 500 km^2 ocorrem na parte emersa. Além disso, possui uma área de 25.685 km^2 até a cota batimétrica de 3.500 m (CAIXETA et al., 2008). Seu limite norte com a Bacia de Almada ocorre no Alto de Olivença (SANTOS et al., 1994) e o limite Sul com o Complexo Vulcânico de Royal Charlote, onde inicia a Bacia de Cumuxaratiba.

A Bacia de Jequitinhonha apresenta uma geologia bastante complexa, onde aconteceram diversas modificações topográficas e estruturais causadas na fase rifte associada à separação entre as placas Sul-Americana e Africana, iniciada no Mesozóico. A seção geológica da figura (22) mostra a complexidade da tectônica local.

Figura 22 – Seção Geológica esquemática da Bacia do Jequitinhonha.



Fonte: ANP (2009).

6.2 GEOMETRIA DE AQUISIÇÃO

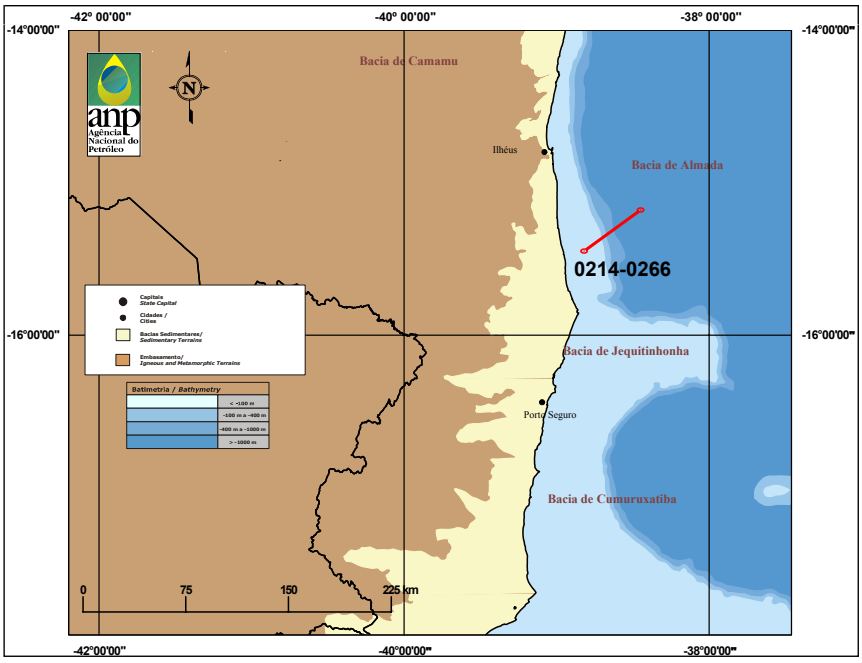
A aquisição sísmica realizada é do tipo *Marine Tower Streamer* ou arraste de cabo marinho, onde um navio arrasta tanto o arranjo de fontes (*airguns*) quanto o cabo (*streamer*) que contém o arranjo de receptores (hidrofones). Em um levantamento marinho, as fontes são canhões de ar comprimido que propagam ondas acústicas em direção à subsuperfície. Após interagirem com as camadas geológicas, as ondas refletidas são registradas pelos hidrofones como campos de pressão.

A linha sísmica 2D utilizada nesse trabalho é do tipo dip, ou seja, perpendicular à região entre as Plataformas continentais e marítima. A linha sísmica 0214-0266, também conhecida como 66, tem os detalhes de sua geometria de aquisição apresentada na tabela abaixo. A localização do levantamento está ilustrada na figura (23).

Tabela 2 – Detalhes da configuração da linha 0214-0266 da Bacia de Jequitinhonha.

Especificações	Dados
Número de canais	120
Intervalo entre os receptores	25m
Profundidade do cabo	10.5 m
Número de tiros	1577
Intervalo entre tiros	25 m
Profundidade da fonte	9 m
Tempo de registro	7s
Mínimo *offset*	150m
Máximo *offset*	3125m
Extensão do levantamento	39.425 m
Discretização	4ms

Figura 23 – Mapa do litoral baiano exibindo a localização da linha sísmica 0214-0266. O levantamento foi realizado ao longo da linha vermelha.



Fonte: Modificado de ANP (2002).

6.3 APRESENTAÇÃO DAS MÚLTIPLAS

Em levantamentos sísmicos marinhos é comum termos a presença de diversos tipos de múltiplas, das quais podemos destacar as reverberações de primeira camada ou *peg-legs*, múltiplas de fundo oceânico *(water-bottom multiples)* e múltiplas de superfície livre *(free-surface multiples)*, as quais surgem após encontrarem um forte contraste de impedância existente em superfícies como o fundo oceânico e a interface livre.

No caso da linha 0214-0266 da bacia de Jequitinhonha, temos a forte presença de múltiplas de superfície livre de até segunda ordem, facilmente identicadas em regiões mais profundas, onde a lâmina alcança profundidades de até 1830 m. Em regiões mais rasas, onde a lâmina de água varia entre 34 a 74 m, também temos a presença de múltiplas de superfície, porém elas aparecem combinadas com outros tipos de múltiplas, configurando assim um padrão de difícil discriminação dos eventos de interesse. A figura (24) dá uma visão geral dos padrões de múltiplas encontradas no levantamento.

Devido a variação do padrão de múltiplas ao longo do levantamento, dedicidimos dividi-lo em duas partes, com o intuito de testar a eficácia da implementação da Transformada de Radon Parabólica em múltiplas com diferentes comportamentos, tanto em zonas rasas quanto profundas. Portanto, a linha sísmica ficou dividida da seguinte forma:

- **Trecho 1**: Localizado na porção inicial da quebra de Talude continental, esta região apresenta múltiplas de superfície livre de grandes extensões, repetindo o assoalho oceânico e mascarando diversos eventos de interesse. O tempo de trânsito das múltiplas de primeira ordem está em torno de 1000 ms na parte inicial e 3500 ms na parte final desse trecho, com periodicidade em torno de 1100 ms. Também temos a presença de múltiplas de segunda ordem, identificadas pelas setas vermelhas na figura (24).

- **Trecho 2**: Localizado na porção final da quebra de Talude, esse trecho apresenta múltiplas de superfície livre de alta amplitude, as quais iniciam a partir de 4200 ms. Suas múltiplas apresentam longos períodos, em torno de 2300 ms, o que dificultou o registro de múltiplas de segunda ordem até as zonas mais profundas desse trecho.

O algoritmo implementado também foi aplicado na primeira porção da linha 66, entre os CMPs 120 e 1301. Esse trecho apresenta várias combinações de múltiplas, a qual destaca-se a de múltiplas superfície livre com as *peg-legs*. Isso ocorre devido a presença de camadas muito rasas nessa região, proporcionando um breve tempo de trânsito a essas reverberações e interferindo até nas próprias reflexões primárias, causando uma considerável perda de resolução vertical. Tais fatores contribuíram negativamente na aplicação do algoritmo, não gerando resultados satisfatórios nesse trecho.

Figura 24 Linha 0214-0266 editada, organizada em afastamento mínimo. O trecho 1, composto pela região de talude, apresenta múltiplas de superfície livre de até segunda ordem (setas em vermelho). No trecho 2, temos a predominância de múltiplas de superfície livre de primeira ordem (setas em azul) com forte amplitude.

Fonte: Do Autor.

CONCLUSÃO

Nesse trabalho foi apresentada uma análise da metodologia da Transformada de Radon Parabólica (TRP), uma das técnicas de atenuação de múltiplas baseada na discriminação de moveout entre primárias e múltiplas. Adicionalmente, aborda a implementação computacional do algoritmo da Filtragem Radon Parabólica através de quadrados mínimos utilizando a decomposição em valores singulares. Este algoritmo foi validado em dados gerados sinteticamente e aplicado em um dado real 2D da Bacia do Jequitinhonha.

A aplicação em dados sintéticos ilustra vantagens da TRP, especificamente: a melhoria da relação sinal-ruído e a regularização de dados em uma família CMP. Como desvantagens, a TRP apresenta menor eficácia na atenuação de múltiplas para pequenos afastamentos. Uma outra limitação da implementação avaliada neste trabalho é a perda de focalização de eventos no domínio de tempo de intercepto e curvatura. Também avaliamos as limitações da TRP em relação a amostragem e as condições para supressão de aliasing espacial, onde aspectos teóricos foram validados em dados sintéticos.

A implementação da TRP mostrou-se eficaz mesmo em regiões onde geralmente são aplicadas técnicas mais elaboradas como o SRME. A aplicação do algoritmo em dados reais na região de Talude da Bacia do Jequitinhonha, em médios afastamentos, produziu resultados satisfatórios com a supressão de múltiplas de forte intensidade associadas a superfície livre. Na aplicação a dados reais foi fundamental estimarmos perfis intermediários entre as primárias e as múltiplas, para assegurar uma boa separação entre os eventos nos dados pré-empilhados. A Transformada de Radon Parabólica também mostrou-se mais eficaz quando comparada à atenuação de múltiplas via empilhamento. Em relação aos modelos de velocidades, não houve variação considerável antes e após a filtragem.

O algoritmo mostrou-se satisfatório mesmo não sendo a tecnologia de Filtragem Radon mais avançada hoje em dia. Versões atuais, como a Transformada de Radon Parabólica de Alta-Resolução, apresentam melhorias na focalização dos eventos e na regularização de dados, além de uma menor perda de resolução. Tais características justificam a importância de uma continuação dessa pesquisa.

REFERÊNCIAS

ANSTEY, N. A.; NEWMAN, P. The sectional retro-correlogram. *Geophysical Prospecting*, Amsterdam, v. 14, n. 2, p. 389–426, 1966.

CAIXETA, J. M. et al. *Sal geologia e tectônica*. São Paulo: Beca, 2008.

DIEBOLD, J. B.; STOFFA, P. L. The traveltime equation tau-p mapping and inversion of common midpoint data. *Geophysics*, v. 46, n. 3.

HAMPSON, D. Inverse velocity stacking for multiple attenuation. *Journal of the Canadian Society of Exploration Geophysicists*, v. 22, p. 44–55, 1986.

LINES, L.; TREITEL, S. A review of least-squares inversion and its application to geophysical problems*. *Geophysical Prospecting*, Blackwell Publishing Ltd, v. 32, n. 2, p. 159–186, 1984.

PRESS, W. H. et al. *Numerical Recipes:The Art of Scientific Computing*. Cambridge University: Cambridge University Press, 1986.

RILEY, D. C.; CLAERBOUT, J. F. 2-d multiple reflections. *Society of Exploration Geophysicists*, Stanford, California, v. 43, n. 4, p. 592–620, 1976.

ROMANELLI, A. *Análise do Sinal Sísmico*. Rio de Janeiro: SBGf, 2010.

SACCHI, M. D.; ULRYCH, T. J. High-resolution velocity gathers and offset space reconstruction. *Geophysics*, v. 60, n. 4, p. 1169–1177, 1995.

SANTOS, C. F. et al. Bacias de cumuxaratiba e jequitinhonha. *Boletim de Geociências da Petrobras*, Rio de Janeiro, v. 8, n. 1, p. 185–190, 1994.

SARAJAERVI, M. *Inversion of the Linear and Parabolic Radon Transform*. Dissertação (Mestrado) — University of Bergen, 2010.

SCHONEWILLE, M.; DUIJNDAM, A. Parabolic radon transform, sampling and efficiency. *GEOPHYSICS*, v. 66, n. 2, p. 667–678, 2001.

SCHULTZ, P. S.; CLAERBOUT, J. F. Velocity estimation by wavefront synthesis. *Geophysics*, v. 43, p. 691–712, 1978.

TATHAM, R. H.; KEENEY, J. W.; NOPONEN, I. Application of the tau-p transform (slant-stack) in processing seismic reflection data. *Australian Society of Exploration Geophysicists*, v. 14, n. 4, p. 162–172, 1983.

TRAD, D. *Implementations and Applications of the sparse radon transform*. Tese (Doutorado) — University of British Columbia, 2001.

VERSCHUUR, D. J. *Seismic Multiple Removal Techniques: Past, Present and Future*. Delft: EAGE Publications, 2006. (Education tour series). ISBN 9789073781511.

VERSCHUUR, D. J.; BERKHOUT, A. J.; WAPENAAR, C. P. A. Wavelet estimation by prestack multiple elimination. *Society of Exploration Geophysicists - Expanded Abstracts*, n. 8, p. 1129 – 1132, 2003.

WATSON, R. J. Decomposition and suppression of multiple reflections. *Geophysics*, v. 30, p. 54–71, 1965.

YILMAZ, O. *Seismic Data Analysis*. 2 ed. ed. Tulsa, USA: Society Of Exploration Geophysicists, 2001. Hardcover. (Investigations in Geophysics, v. 10). ISBN 1560800941.

ZHOU, B.; GREENHALGH, S. Linear and parabolic tau-p transforms revisited. *GEOPHYSICS*, v. 59, n. 7, p. 1133–1149, 1994.