

UNIVERSIDADE FEDERAL FLUMINENSE – UFF

PEDRO MENDONÇA VERGARA LOPES

**ANÁLISE DO FLUXO DE PROCESSAMENTO SÍSMICO NA BACIA DE
POTIGUAR**

**NITERÓI
2010**

UNIVERSIDADE FEDERAL FLUMINENSE – UFF
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE GEOLOGIA
LABORATÓRIO DE GEOLOGIA MARINHA – LAGEMAR

PEDRO MENDONÇA VERGARA LOPES

Matrícula: 106500226

“Análise do fluxo de Processamento Sísmico na Bacia de Potiguar”

Projeto Final II apresentado ao Curso de
Graduação em Geofísica da Universidade
Federal Fluminense, como requisito para
conclusão do Curso de Graduação
em Geofísica.

Niterói – RJ

Julho de 2010

L864 Lopes, Pedro Mendonça Vergara
 Análise do fluxo de processamento sísmico na Bacia Potiguar /
 Pedro Mendonça Vergara Lopes. – Niterói : [s.n.], 2010.
 102 f.

 Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Geofísica) –
 Universidade Federal Fluminense, 2010.

 1.Sismologia. 2.Processamento de sinais. 3.Método de reflexão
 sísmica. 4.Bacia Potiguar. I.Título.

CDD 551.22

ANÁLISE DO FLUXO DE PROCESSAMENTO SÍSMICO NA BACIA DE POTIGUAR

PEDRO MENDONÇA VERGARA LOPES

Projeto final apresentado ao Curso de
Graduação em Geofísica da Universidade
Federal Fluminense, como requisito para
conclusão do Curso de Graduação
em Geofísica.

Comissão Examinadora:

Dr. Adalberto da Silva/ Orientador

Dr. Alexandre Motta Borges

Dr. Marco Antônio Cetale Santos

Niterói, 8 de Julho de 2010

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais, meu irmão e toda a minha família que fez questão de sempre me incentivar com os estudos e me deu totais condições para usufruir do que pôde ser mais interessante para a minha formação.

Aos meus amigos, em especial, Guilherme, Eduardo e Leonardo, pelo incentivo e apoio constante.

Aos meus amigos, em especial, Felipe, Paula, Lucas, Giselle e João Victor, pela amizade que se construiu para além dos espaços da universidade.

Aos amigos Alexandre Motta Borges e Manoela Vergara, pelo estímulo ao Curso de Geofísica durante o meu ensino médio.

Ao professor e orientador Adalberto da Silva por seu apoio e inspiração no amadurecimento dos meus conhecimentos e conceitos que me levaram a execução e conclusão desta monografia.

À professora e coordenadora do Curso de Geofísica, Elaine da Costa Alves, pelo convívio, pelo apoio, pela compreensão.

À empresa, em especial a Elaine Mattos, pela paciência e ajuda com os dados sísmicos utilizados nesta monografia.

Aos professores Sidney Mello, Christian Gorini, Marcia Maia e Marie-Odile Beslier, pela oportunidade de participar de dois projetos inesquecíveis durante meu período acadêmico. Pela valorização cultural que eles atribuíram a minha vida.

Aos professores da Universidade Federal Fluminense, em especial Marco Cetale, Rogério Santos e Cleverson Guizan, pela importância no desenvolvimento desta monografia.

RESUMO

O trabalho tem como objetivo apresentar um fluxograma de processamento de dados sísmico 2D da Bacia Potiguar, visando melhorar a qualidade do sinal, utilizando técnicas do método sísmico, e obter seções sísmicas, que forneçam informações sobre as estruturas geológicas em subsuperfície.

O fluxo é todo detalhado, e possui passos essenciais para um dado sísmico real, como por exemplo, remoção dos ruídos aleatórios e das múltiplas, preparação para a migração Kirchhoff, migração Kirchhoff e o aprimoramento do dado para a interpretação.

Neste trabalho foi utilizado *software* Omega, que possui uma série de algoritmos muito eficientes para dados 2D e 3D. O fluxograma foi o mais comum possível e procurou satisfazer as normas básicas da empresa proprietária do dado, WesternGeco Serviços Sísmicos Ltda.

ABSTRACT

This work aims to present the 2D seismic data processing work flow used while analyzing the Potiguar Basin trying to improve the quality of the signal using seismic method techniques and obtaining seismic sections that provide information on the geologic structures beneath the surface.

The work flow is detailed and has the essential steps for real seismic data, such as random and multiple noise removal, preparation for the Kirchhoff migration and the migration itself, and the enhancement of data for interpretation.

The Omega software was used because it has several efficient algorithms for 2D and 3D data. The work flow was as common as possible and aimed to meet the data owner's regulation, WesternGeco Seismic Services Ltd.

SUMÁRIO

Agradecimentos.....	v
Resumo.....	vi
Abstract.....	vi
Sumário.....	vii
Lista de figuras.....	ix
Lista de tabelas.....	xi
Lista de fluxos.....	xi
1 INTRODUÇÃO E OBJETIVO.....	1
1.1 Introdução.....	1
1.2 Objetivo.....	2
2 CONTEXTO GEOLÓGICO DA BACIA POTIGUAR.....	3
2.1 Bacia Potiguar.....	3
2.1.1 Geologia da Bacia Potiguar.....	4
2.2 Evolução Tectono-sedimentar.....	5
2.2.1 Evolução tectono-sedimentar mesozóica.....	5
2.2.2 Evolução tectono-sedimentar cenozóica.....	10
3 DADOS UTILIZADOS.....	12
3.1 Configuração dos Instrumentos.....	12
3.1.1 Filtragem de Frequência.....	13
3.2 Configuração do Cabo da Aquisição.....	14
3.3 Energia da Fonte Sísmica.....	15
3.4 Conteúdo do Cabeçalho dos Traços.....	17
3.5 Cobertura.....	19
4 PRÉ PROCESSAMENTO.....	20
4.1 Fluxo de processamento.....	20
4.2 Controle de qualidade do dado.....	20
4.3 Compensação das Perdas de Amplitude.....	25
4.4 Silenciamento dos traços.....	26
4.5 Correção NMO.....	27
4.6 Empilhamento.....	27
4.7 Transformada Radon.....	28
4.7.1 Transformada Radon Linear (Slant-Stack ou τ -p).....	28
4.7.2 Transformada Radon Parabólica.....	29
4.8 Análise dos ruídos.....	30
4.8.1 Ruídos Aleatórios.....	30
4.8.2 Ruídos Coerentes.....	34
4.9 Migração.....	56
4.9.1 Migração Kirchhoff Pré empilhamento.....	56
5 PÓS PROCESSAMENTO.....	59
5.1 Análise e compensação das amplitudes residuais (RAAC).....	59
5.2 Filtro passa-baixa variante no tempo (TVF).....	59
6 RESULTADOS.....	60
6.1 Compensação das perdas de amplitude.....	60

6.2	Silenciamento dos traços.....	61
6.3	Correção NMO.....	61
6.4	Remoção dos Ruídos.....	63
6.4.1	Atenuação <i>Swell noise</i>	63
6.4.2	Onda direta.....	65
6.4.3	<i>Ground roll</i>	66
6.4.4	Múltiplas	69
6.5	Migração Kirchhoff.....	75
6.6	RAAC	80
6.7	TVF	81
6.8	Resultado Final	82
7	CONCLUSÕES.....	87
8	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	88

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1- Mapa geológico simplificado da Província Borborema (Jardim de Sá, 1994).....	3
Figura 2.2 - Mapa de localização e arcabouço tectônico da Bacia Potiguar (Soares <i>et al</i> , 2005).....	4
Figura 2.3 - Evolução Tectono-sedimentar da Bacia Potiguar segundo Françolin e Szatmari (1987).....	6
Figura 2.4 - Coluna estratigráfica da Bacia Potiguar (Araripe e Feijó, 1994).....	8
Figura 2.5 - Evolução tectônica das Bacias do Nordeste Oriental segundo Matos (1994).	10
Figura 2.6 - Blocos diagramas esquemáticos mostrando (A) passagem do centro de espalhamento em frente a Bacia Potiguar causando o aquecimento, soerguimento e erosão dos sedimentos; (B) estágio de resfriamento e subsidência da crosta continental após a passagem do centro de espalhamento (Cremonini e Karner, 1995 e Cremonini, 1995).	11
Figura 3.1 - Filtros de frequência: (a) passa-baixa, (b) passa-alta, (c) passa-banda.....	14
Figura 3.2 - Filtro passa-banda esquemático, de acordo com as frequências utilizadas no processamento em campo.	14
Figura 3.3 - Configuração do cabo.....	15
Figura 3.4 - Arranjo da fonte sísmica.....	16
Figura 3.5 - Esquema do efeito bolha em diferentes canhões de ar.	17
Figura 3.6 - Obtenção da cobertura máxima através do levantamento contínuo.	18
Figura 3.7 - Esquema representativo da aquisição.....	19
Figura 4.1 - Opções de representação do traço sísmico: wiggle em (a), área variável em (b), área variável + wiggle em (c) e densidade variável em (d) (Silva, 2004).	22
Figura 4.2 - Representação do algoritmo de deslocamento do traço.	22
Figura 4.3 - Acima se pode notar o efeito do deslocamento do traço. (a) imagem antes da correção, (b) imagem após feita a correção, com a posição correta.	23
Figura 4.4 - Visualização inicial do dado bruto. Seleção somente do primeiro traço de cada família de tiro. Seção não-empilhada.....	24
Figura 4.5 - (a) Mostra os pares de tempo x distancia feitos para o primeiro silenciamento e (b) representa a janela na qual os valores irão ser anulados.	27
Figura 4.6 - Correção NMO (EAGE, Learning Geoscience online – http://www.learninggeoscience.net)	27
Figura 4.7 - Eventos lineares no domínio t-x e suas respectivas transformadas no domínio τ -p. (Fonte: www.petroleumseismology.com).	29
Figura 4.8 - Eventos no domínio espaço-tempo e suas respectivas transformadas no domínio parabólico τ -p.....	30
Figura 4.9 - Demonstração dos efeitos de ruído de ondas superficiais.....	31
Figura 4.10 - Efeito das cracas no dado.	31
Figura 4.11 - Efeito do <i>ground roll</i>	36
Figura 4.12 - Demonstração do ruído.	37
Figura 4.13 - Em (a) filtro para conversão em fase zero, em (b) a análise espectral de amplitude e em (c) a análise espectral em fase.	53
Figura 4.14 - Grid gerado para introduzir todas as linhas sísmicas do projeto principal.....	54
Figura 4.15 - Representação das linhas sísmicas envolvidas no projeto principal, a linha desse projeto se encontra na extremidade.	54
Figura 4.16 - Visualização do <i>software</i> InvA para realização da leitura das velocidades.....	58
Figura 6.1 - Demonstra a variação de ganho entre as janelas (a) dado sem ganho, (b) x = 1,4, (c) x = 1,8 e (d) x = 2.....	60
Figura 6.2 - Demonstração do efeito do silenciamento em três famílias de CMP.....	61
Figura 6.3 - (a) Apresentação de 4 famílias de CMP com a velocidade utilizada na primeira vez que essa	

linha foi processada, em (b) as mesmas 4 famílias de CMP com a velocidade refeita para esse projeto.	62
Figura 6.4 - (a) Dado bruto com a presença de ruídos aleatórios, (b) dado com os ruídos eliminados e (c) os ruídos que foram eliminados do dado.	63
Figura 6.5 - Seção empilhada, em (a) o dado bruto foi feita uma correção NMO, aplicado os silenciamentos e o empilhamento; (b) a seção sofreu correções referentes aos ruídos randômicos mais as aplicações do dado bruto.	64
Figura 6.6 - Detalhe de uma das regiões da imagem anterior (a) dado bruto e (b) o dado com os ruídos randômicos eliminados pelo algoritmo “atenuação de ruídos de ondas superficiais”.	65
Figura 6.7 - No domínio do tiro na região plana onde a profundidade é aproximadamente 300ms, em (a) dado de entrada com a presença dos efeitos da onda direta; em (b) o dado de saída com a remoção feita e em (c) a diferença entre os dados de entrada e saída.	65
Figura 6.8 - No domínio do tiro na região plana onde a profundidade é aproximadamente 500ms, em (a) dado de entrada com a presença dos efeitos da onda direta; em (b) o dado de saída com a remoção feita e em (c) a diferença entre os dados de entrada e saída.	66
Figura 6.9 - Tiro 1875, em (a) a presença do <i>ground roll</i> a partir de 1000ms; em (b) o tiro de saída com os ruídos lineares e alguns ruídos randômicos eliminados; e em (c) a diferença entre o tiro de entrada e o tiro de saída.	67
Figura 6.10 - Em detalhe a remoção tanto da onda direta, como do <i>ground roll</i>	67
Figura 6.11 - Seção empilhada (a) antes da aplicação dos algoritmos para remoção da onda direta e <i>ground roll</i> , em (b) após a aplicação dos dois algoritmos e em (c) a diferença entre eles, o retângulo azul localiza onde o algoritmo atuou melhor.	68
Figura 6.12 - Em (a) o dado no domínio CMP antes do 2D SRME; em (b) o CMP após a aplicação do algoritmo; e em (c) a diferença entre ambos.	69
Figura 6.13 - Seção empilhada (a) antes da aplicação do 2D SRME, em (b) após a aplicação do algoritmo e em (c) a diferença entre eles.	70
Figura 6.14 - Foi aplicado no CMP 3336 a correção NMO, e em (a) o dado de entrada com 4 múltiplas visíveis do fundo oceânico; em (b) pelo menos duas múltiplas não aparecem com tanta intensidade no dado; e em (c) a diferença entre o dado de entrada e o dado de saída.	71
Figura 6.15 - Seção empilhada (a) antes da aplicação do WLS Radon, (b) após a aplicação do algoritmo e (c) a diferença.	72
Figura 6.16 - No domínio CMP, em (a) o dado antes de ser aplicado a PRIMAL, em (b) o CMP após a aplicação e em (c) a diferença entre os dois dados.	73
Figura 6.17 - Seção empilhada, em (a) o dado de entrada, em (b) o dado de saída logo após a aplicação do algoritmo PRIMAL, e em (c) a diferença entre o dado de entrada e saída. Pode-se notar uma forte diferença entre ambos.	74
Figura 6.18 - Seção empilhada do dado após a migração Kirchhoff em tempo.	76
Figura 6.19 - Em (a) pode-se observar a seção antes de ser aplicada a migração, e em (b) a seção após aplicada a migração.	77
Figura 6.20 - (a) Seção empilhada com uma velocidade 5% menor que a inicial, (b) com a velocidade inicial e (c) com uma velocidade 5% maior que a inicial.	78
Figura 6.21 - (a) Seção empilhada com a velocidade inicial e (b) com a velocidade lida após a migração.	79
Figura 6.22 - (a) Seção empilhada após a migração com a nova velocidade, e (b) após o algoritmo RAAC aplicado.	80
Figura 6.23 - (a) Seção empilhada antes da aplicação do TVF, e (b) após aplicação do TVF.	81
Figura 6.24 - (a) O dado inicial antes de qualquer tratamento e (b) o dado após todo o processamento, o	

retângulo azul limita a região onde se encontra a bacia.	83
Figura 6.25 – (a) No detalhe, a bacia no dado bruto e em (b) a bacia após todo o processamento.	84
Figura 6.26 - Imagem final da linha sísmica, o retângulo azul localiza a região onde se encontra a bacia.	85
Figura 6.27 - Imagem, no detalhe, da bacia após todos os passos do fluxo de processamento.	86

LISTA DE TABELAS

Tabela 4.1 - Parâmetros utilizados no algoritmo ARA.	32
Tabela 4.2 - Parâmetros utilizados para eliminação da onda direta.	34
Tabela 4.3 - Parâmetros utilizados para eliminação do <i>ground roll</i>	36
Tabela 4.4 - Parâmetros utilizados para interpolação de tiros.	38
Tabela 4.5 - Parâmetros utilizados para interpolação dos traços.	39
Tabela 4.6 - Parâmetros utilizados para reconstrução do afastamento.	40
Tabela 4.7 - Parâmetros utilizados para o PMI.	41
Tabela 4.8 - Parâmetros utilizados pelo filtro adaptativo.	41
Tabela 4.9 - Parâmetros utilizados pelo WLS Radon.	44
Tabela 4.10 - Parâmetros utilizados pela PRIMAL.	46
Tabela 4.11 - Parâmetros utilizados para sorteio dos dados no domínio de afastamento.	48
Tabela 4.12 - Parâmetros utilizados pelo 2D RNA.	50
Tabela 4.13 - Parâmetros utilizados pelo Filtro inverso Q.	50
Tabela 4.14 - Parâmetros utilizados para conversão do dado em fase zero.	52
Tabela 4.15 - Parâmetros utilizados pelo ganho programado.	55
Tabela 4.16 - Parâmetros utilizados pelo migração Kirchhoff.	59
Tabela 5.1 - Parâmetros utilizados pelo TVF.	59

LISTA DE FLUXOS

Fluxo 4.1 - Representa os passos seguidos durante trabalho.	20
Fluxo 4.2 - Referente aos testes de ganho.	26
Fluxo 4.3 - Diagrama do algoritmo de remoção dos ruídos aleatórios.	33
Fluxo 4.4 - Referente a eliminação da onda direta.	35
Fluxo 4.5 - Responsável pela eliminação do <i>ground roll</i>	36
Fluxo 4.6 - Primeiro algoritmo para atenuação das múltiplas - 2D SRME.	42
Fluxo 4.7 - Segundo algoritmo para atenuação das múltiplas - WLS Radon.	45
Fluxo 4.8 - Terceiro algoritmo para atenuação das múltiplas - PRIMAL.	47
Fluxo 4.9 - Responsável por algumas manipulações pré migração.	51
Fluxo 4.10 - Outras manipulações anteriores a migração.	55

1 INTRODUÇÃO E OBJETIVO

1.1 Introdução

O desenvolvimento computacional de métodos geofísicos atrelado às necessidades do mercado petrolífero atual impulsiona empresas, faculdades e alunos a produzirem respostas para atender essa crescente demanda.

O método sísmico de reflexão possui um papel importantíssimo nesse mercado, pois consegue, através de diferentes metodologias, inferir, ou pelo menos, imagear feições geológicas inacessíveis a métodos convencionais. Tal método se constitui no mais utilizado dentre os métodos geofísicos de exploração, principalmente devido a sua grande capacidade de investigação de subsuperfície e de proporcionar resultados com um alto nível de precisão e resolução. Através dos dados sísmicos de reflexão podemos, por exemplo, mapear feições associadas a acumulação de hidrocarbonetos, identificar litologias e visualizar estruturas geológicas em subsuperfície.

O processamento de dados sísmicos de reflexão é uma atividade rotineira na indústria do petróleo e tem por objetivo fundamental a obtenção de uma imagem representativa da subsuperfície. Para que este objetivo seja alcançado, os dados são submetidos a uma série de operações e manipulações, que aqui foram organizadas e separadas em etapas do processamento.

O processamento sísmico é subdividido em duas fases: o pré-processamento e o processamento avançado. A diferença entre elas pode ser entendida em termos de suas técnicas específicas de tratamento de sinal sísmico. Enquanto na primeira encontramos técnicas simples e etapas básicas de preparação dos dados, na segunda encontramos técnicas mais sofisticadas, que influenciam significativamente o aumento da resolução sísmica dos dados. Todas as etapas realizadas durante o processamento compõem o fluxograma do processamento.

Não há um número específico de etapas a serem realizadas num processamento sísmico, pois isso é dependente da qualidade dos dados e dos recursos disponíveis no *software* adotado. O processamento sísmico pode ser avaliado pela qualidade da seção empilhada obtida.

Neste trabalho, descreve-se o processamento de dados sísmicos adquiridos na Bacia Potiguar pela WesternGeco Serviços de Sísmica Ltda no ano de 2001. Os principais objetivos foram: a obtenção da seção sísmica empilhada, a ser utilizada no trabalho de interpretação; a atenuação do ruído coerente de alta amplitude e de baixa frequência existente nos dados; aplicação de métodos de deconvolução e comparação dos resultados, para definição do tipo de deconvolução que será escolhida para compor o

fluxograma do processamento; realização da análise de velocidade das famílias CMP's e geração do modelo ou campo de velocidade da subsuperfície.

Para alcançar tais objetivos, foi adotado o software Omega v2.7 desenvolvido pela WesternGeco Serviços de Sísmica Ltda, que trabalha com dados sísmicos 2D e 3D (pré ou pós- empilhamento).

Essa pesquisa, foi totalmente desenvolvida utilizando os recursos tecnológicos disponibilizados pela empresa, na qual participamos do programa de estágio curricular, juntamente, com a ajuda dos professores do Laboratório de Geologia Marinha – LAGEMAR/UFF.

O texto foi estruturado da seguinte forma: o Capítulo 2 traz basicamente informações sobre a geologia da Bacia Potiguar e sobre os dados geofísicos utilizados; o Capítulo 3 abrange as etapas básicas da aquisição sísmica e os métodos utilizados. No Capítulo 4, expomos o processamento sísmico, incluindo a descrição das técnicas de tratamento de sinal empregadas; no Capítulo 5 são apresentadas as informações sobre a migração Kirchhoff aplicada aos dados oriundos da fase de pré processamento; no Capítulo 6, são detalhadas as fases pós processamento, onde alguns algoritmos são aplicados para uma melhor visualização e finalização dos dados; o Capítulo 7 apresenta os resultados obtidos desde as manipulações iniciais da sísmica em tempo até os últimos detalhes da fase de pós processamento; o Capítulo 8 contém as conclusões do trabalho de processamento com dados sísmicos da Bacia Potiguar e o Capítulo 9 apresentam-se as referências bibliográficas.

1.2 Objetivo

Unindo a necessidade do projeto às cadeiras cursadas nos períodos correspondentes, Estágio Curricular I e Estágio Curricular II, atingiu-se um resultado muito satisfatório no estudo e pesquisa de Processamento de Dados Sísmicos. Na empresa WesternGeco Serviços de Sísmica Ltda., com os objetivos de aperfeiçoar o Projeto Final e aprender a operar o *software*, surgiu a oportunidade de obter um conjunto de dados sísmicos que será mostrado nesse trabalho. Com a utilização deste conjunto é possível uma melhor visualização dos efeitos gerados por cada componente do fluxo e a real função de cada ferramenta.

Este trabalho tem como finalidade reportar detalhadamente os passos de um fluxo de processamento sísmico, mostrando as ferramentas aplicadas e exemplificando-as.

Para tanto, algumas etapas foram cumpridas:

- Apresentação do contexto histórico de onde a Bacia está inserida;
- Apresentação das características geológicas da região;

2.1.1 Geologia da Bacia Potiguar

A Bacia Potiguar representa um rifte intracontinental em sua porção emersa e uma bacia do tipo *pull-apart* em sua porção submersa. A Bacia Potiguar faz parte do Sistema de Riftes do Nordeste Brasileiro, conjuntamente com as bacias do Recôncavo, Tucano, Jatobá, Araripe, Rio do Peixe e Sergipe-Alagoas (Matos 1994).

Sua origem está inserida no contexto da evolução da margem equatorial atlântica, iniciada ao final do Jurássico. A rotação diferencial dextral entre a América do Sul e a África gerou, na Província Borborema, um regime de esforços com distensão norte-sul e compressão leste-oeste, propiciando o desenvolvimento de diversas bacias rifte sob regimes transtensional (caso do rifte Potiguar) e transpressional.

Rochas ígneas básicas são importantes componentes no preenchimento da bacia. O vulcanismo basáltico é predominantemente alcalino e possui duas idades principais: Cretáceo Inferior (130 Ma) e Eoceno-Mioceno denominada de Formação Macau.

As rochas sedimentares presentes nesta Bacia estão associadas a três seqüências deposicionais principais: uma rifte, uma transicional e outra marinha. A seqüência rifte é resultante da fase rifte de idade Neocomiano a Barremiano (Cretáceo inferior), que compreende as formações Pendência e Pescada; a fase transicional de idade Aptiano/Eoptiano (Cretáceo médio), com a Formação Alagamar, e a seqüência drifte de idade Albiano a Maastrichtiano/Campaniano, constituída pelas seqüências flúviomarinhas transgressivas (formações Açú, Ponta do Mel, Quebradas e Jandaíra) e um sistema regressivo marinho, de idade Maastrichtiano/Campaniano a Plioceno/Paleoceno/Terciário, com as formações Ubarana, Guamaré, Tibau e Barreiras (Souza, 1982; Bertani *et al.*, 1990).

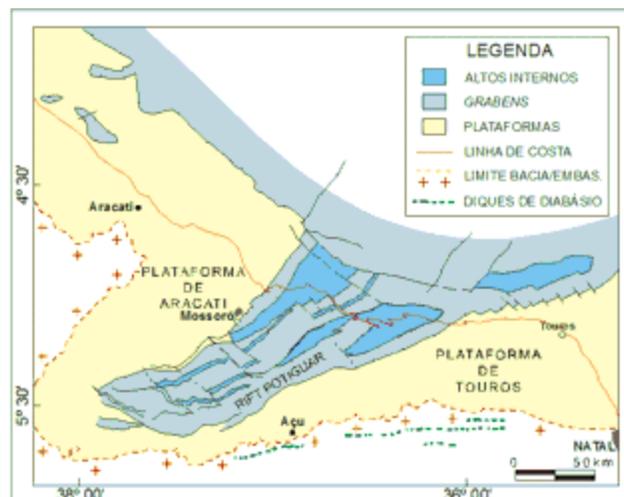


Figura 2.2 - Mapa de localização e arcabouço tectônico da Bacia Potiguar (Soares *et al.*, 2005)

2.2 Evolução Tectono-sedimentar

2.2.1 Evolução tectono-sedimentar mesozóica

A evolução das bacias da margem equatorial brasileira foi por muitos anos considerada análoga à da margem leste, sendo reconhecidos os três estágios tectônicos clássicos: rifte, transicional e de margem passiva (Beltrami *et al.*, 1994; Araripe & Feijó, 1994). No entanto, estruturas e padrões de sedimentação associados à tectônica direcional envolvida na separação Brasil – África já haviam sido constatadas em muitos trabalhos (Zalán & Warne, 1985; Françolin & Szatmari, 1987; Szatmari *et al.*, 1987; Azevedo, 1991; Matos, 2000).

A origem do rifte Potiguar é tema de estudo de vários autores que propõem modelos evolutivos que se diferenciam pela orientação dos esforços e pelos mecanismos que atuaram na época de sua geração. Existem basicamente dois modelos que se distinguem concordando ou discordando de uma fase compressiva que teria atuado no Cretáceo Superior (Santoniano-Maastrichiano). O modelo de Françolin e Szatmari (1987) utiliza rotação horária da placa sul-americana em relação à africana, em torno de um polo situado ao sul de Fortaleza, para explicar a separação da América do Sul-África, envolvendo esforços compressivos e distensivos. Por outro lado, o modelo de Matos (1992) propõe dois estágios principais de geração do rifte Potiguar, ambos distensivos. Mais adiante, dois modelos evolutivos para origem e evolução da Bacia Potiguar acima citados serão apresentados com mais detalhe. A estratigrafia está descrita em consonância com o modelo de Françolin e Szatmari (1987), em que propuseram que as primeiras manifestações da separação Brasil-África ocorreram no Jurássico Superior com movimentação divergente leste-oeste. Esta movimentação possibilitou a formação de uma mega fratura de milhares de quilômetros que se iniciou no sul do continente e progressivamente propagou-se para o norte (Figura 2.3 (a)).

No Cretáceo Inferior, a movimentação divergente dos dois continentes era maior a sul, imprimindo, desta forma, uma rotação horária na placa sul-americana em relação à africana. O pólo desta rotação, segundo Françolin e Szatmari (1987), estava localizado aproximadamente a 39° W e 7° S. Como resultado, instalou-se na Província Borborema um processo de compressão a sul e distensão a norte (Figura 2.3 (b)). No Neocomiano, toda a província sofreu uma compressão de direção leste-oeste e uma distensão norte-sul, promovendo reativações de inúmeras falhas e possibilitando a implantação da atual porção emersa da bacia (Figura 2.3 (b)). Concomitante a estas, as falhas de direção NE-NW, brasileiras, foram reativadas com movimentação transicional em seu extremo NE e transpressional na

sua porção SW. O limite entre estes dois regimes seria marcado pelo magmatismo Ceará-Mirim (Gomes *et al.* 1981) de orientação E-W.

As falhas de direção NW-SE são pouco representativas no Neocomiano, enquanto que as de direção NE-SW são as mais importantes, pois condicionaram a abertura do *Rifte* Potiguar e tem como representante principal a Falha de Portalegre-Carnaubais. Neste estágio da evolução da bacia, são depositados a Sequência Rifte (Figura 2.3 (c)) definida por Asmus e Guazelli (1981) e, alternativamente, denominada por Souza (1982) de Sequência Continental. Esta sequência é composta pela Formação Pendência, não aflorante, que é formada por folhelhos, siltitos, e arenitos finos, passando no topo para arenitos grossos e conglomerados, típicos de borda de Bacia (Matos *et al.* 1987).

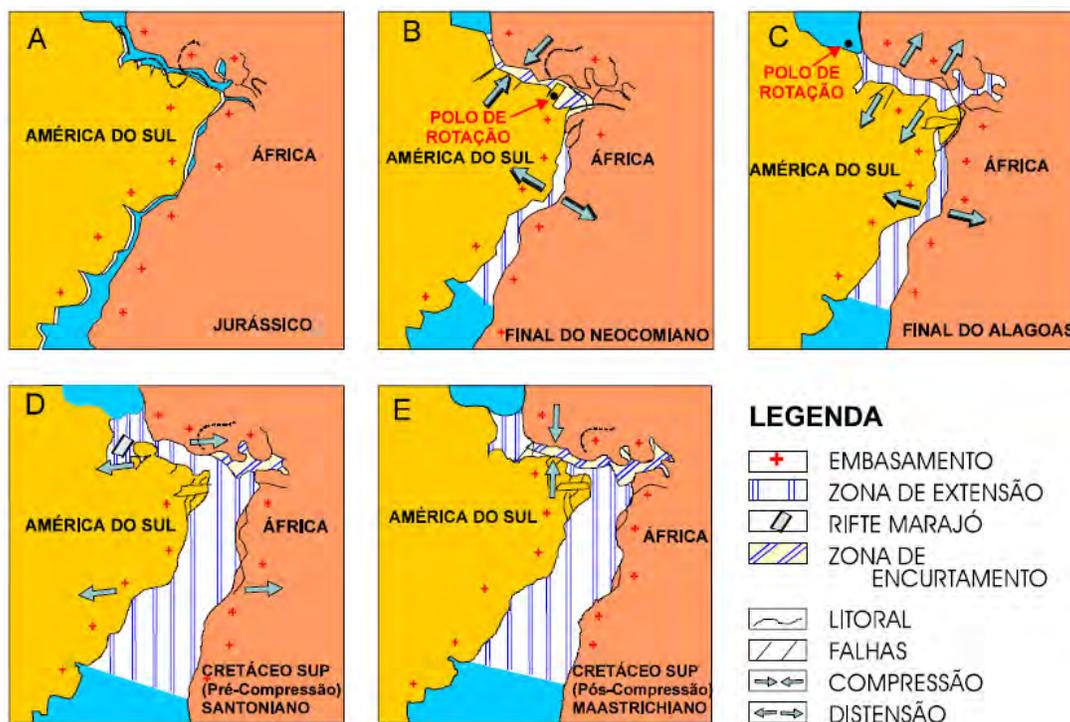


Figura 2.3 - Evolução Tectono-sedimentar da Bacia Potiguar segundo Françolin e Szatmari (1987).

Segundo Caldas, no Aptiano, a Província Borborema foi submetida a uma distensão de direção N-S, interrompendo-se, portanto, a movimentação transcional e transpressional nas falhas NE-SW e a deposição na porção emersa da Bacia (Figura 2.3 (c)). Segundo Bertani *et al.* (1990), é nesta fase que ocorreram reativações de altos internos, culminando com uma extensa discordância regional e deposição com subsidência contínua, na porção submersa, condicionada pelas falhas de direção E-W. É nesta fase que a Sequência Proto-Oceânica de Asmus e Guazelli (1981), alternativamente denominada de Transicional por Souza (1982), se instala. Ocorre a deposição de arenitos deltaicos, intercalados com folhelhos lacustrinos (Membro Upanemo), lamitos, que marcam o início da influência marinha na bacia

(Camadas Ponta do Tubarão), e argilitos (Membro Galinhos), todos da Formação Alagamar, também não aflorante (Figura 2.4).

No Albiano, a movimentação entre os continentes sul-americano e africano era divergente (E-W), o que permitiu a ingressão marinha, causando transgressão e posteriormente regressão marinha na Bacia Potiguar. Asmus e Guazelli (1981) denominaram de Sequência Marinha Transgressiva e Sequência Marinha Regressiva os sedimentos depositados durante estas duas fases. Já Souza (1982) agrupou as fases transgressivas e regressivas, denominando-as Sequência Drifte. Segundo Bertani et al. (1990), esta sequência teria sido depositada em um ambiente de deriva continental e sob influência de mar aberto, com subsidência controlada, principalmente, por mecanismos térmicos e isostáticos.

Segundo Araripe e Feijó (1994), a Sequência Transgressiva, de idades Albiana a Turoniana, é representada por arenitos grossos a médios (Formação Açú) interdigitados, na parte submersa da bacia, com rochas carbonáticas da Formação Ponta do Mel e com siltitos e arenitos do Membro Quebradas da Formação Ubarana (Figura 2.4). No topo desta sequência, ocorrem os calcários do Turoniano a Campaniano da Formação Jandaíra, composto por eventuais intercalações de arenitos, folhelhos, evaporitos e margas de um ambiente de planície de maré, laguna rasa, plataforma rasa e mar aberto, como também siltitos e arenitos do Membro Quebradas. A sequência regressiva é tratada no próximo item deste capítulo.

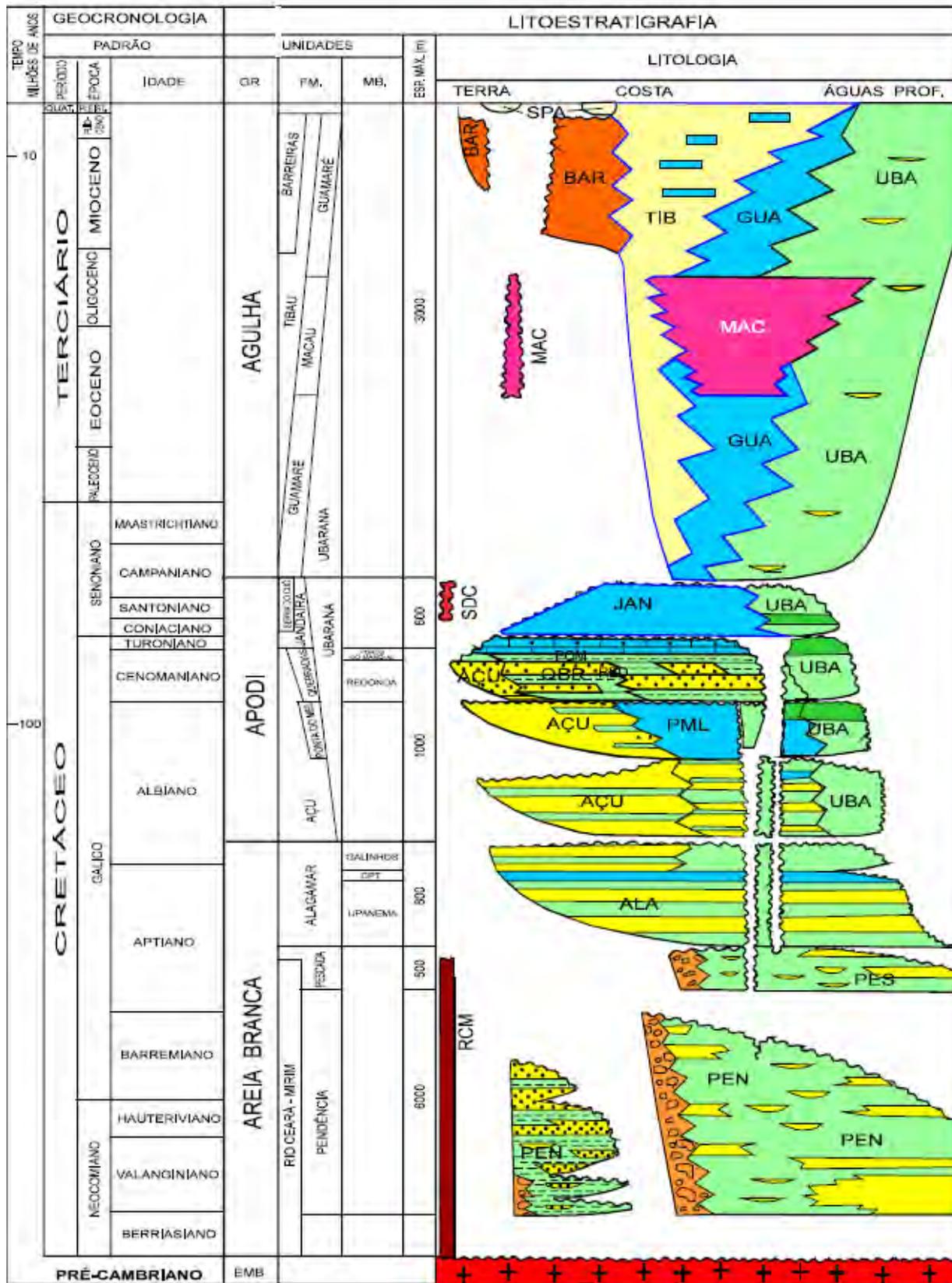


Figura 2.4 - Coluna estratigráfica da Bacia Potiguar (Araripe e Feijó, 1994).

Após o Campaniano, uma compressão N-S afetou as bacias do Ceará e Barreirinhas (Figura 2.3 (e)), localizadas a oeste da Bacia Potiguar. Segundo Françolin e Szatmari (1987), a Bacia Potiguar sofreu reflexo desta compressão, o que seria evidenciada pelo soerguimento da plataforma carbonática da Formação Jandaíra e pela reativação de inúmeras falhas na bacia.

Matos (1992) apresentou críticas ao modelo de Szatmari *et al.* (1987) e Françolin & Szatmari (1987), destacando o fato de não haver registro de transcorrência dextral segundo as falhas NE na Bacia Potiguar. O autor também considerou inconsistente admitir rotação rígida da Província Borborema sem que houvesse registro de deformação ao longo das várias zonas de fraqueza e heterogeneidades do substrato proterozóico.

Segundo o modelo de Matos (1992), a porção leste da margem equatorial brasileira foi submetida a esforços distensivos de direção SE-NW a E-W no intervalo Neocomiano-Barremiano (Figura 2.5) e não no Jurássico Superior como defendem Françolin e Szatmari (1987). De acordo com esse autor, duas fases caracterizam a evolução tectônica do *Rifte Potiguar*: *Sin-Rifte II* (Neocomiano-Eobarremiano) e *Sin-Rifte III* (Neobarremiano).

O preenchimento na porção *onshore* do rifte ocorreu principalmente durante a fase *Sin-Rifte II* (Figura 2.5 (b)), com sedimentação condicionada por hemi-grábens de direção média nordeste (Umbuzeiro e Boa Vista) limitados por altos internos (Quixaba, Mossoró, Serra do Carmo etc.), propiciando, assim, a deposição de sedimentos fluviais, deltaicos e lacustrinos da Formação Pendência (Matos, 1994). O eixo de esforços distensivos apresentava orientação SE-NW, aproximadamente ortogonal às principais falhas limítrofes dos grábens. Nesse contexto, desenvolveu-se na porção submersa da Bacia Potiguar a zona de transferência de Ubarana (Cremonini, 1996), representada por falhas transcorrentes dextrais de direção N80-85W. A trama estrutural do embasamento, de direção predominantemente nordeste, exerceu papel importante como herança estrutural na configuração geométrica dos riftes (Azevedo, 1991; Matos, 1992).

A fase *Sin-Rifte III* (Figura 2.5 (c)), evidencia uma mudança na cinemática de ruptura, abortando a sedimentação na parte emersa do rifte Potiguar e iniciando importante deformação ao longo da margem continental equatorial (Matos, 1992). Uma mudança aparente no campo de tensões gerou rotação do eixo de distensão de SE-NW para a direção E-W, causando transtensão ao longo da Bacia Potiguar e no seu equivalente africano (calha de Benue). A região antes ocupada pelo rifte sofreu soerguimento e erosão, com o eixo de rifteamento e principal sítio de sedimentação sendo deslocado para nordeste. O processo de deformação transtensiva foi acompanhado de sedimentação rifte contínua na porção submersa da Bacia Potiguar até o final do Barremiano.

No Aptiano, a bacia passou a ter uma sedimentação que variava de continental a marinha, constituindo a Megassequência Transicional. No Albiano, a Megassequência Marinha registra a separação completa dos continentes sul-americano e africano (Araripe e Feijó, 1994).

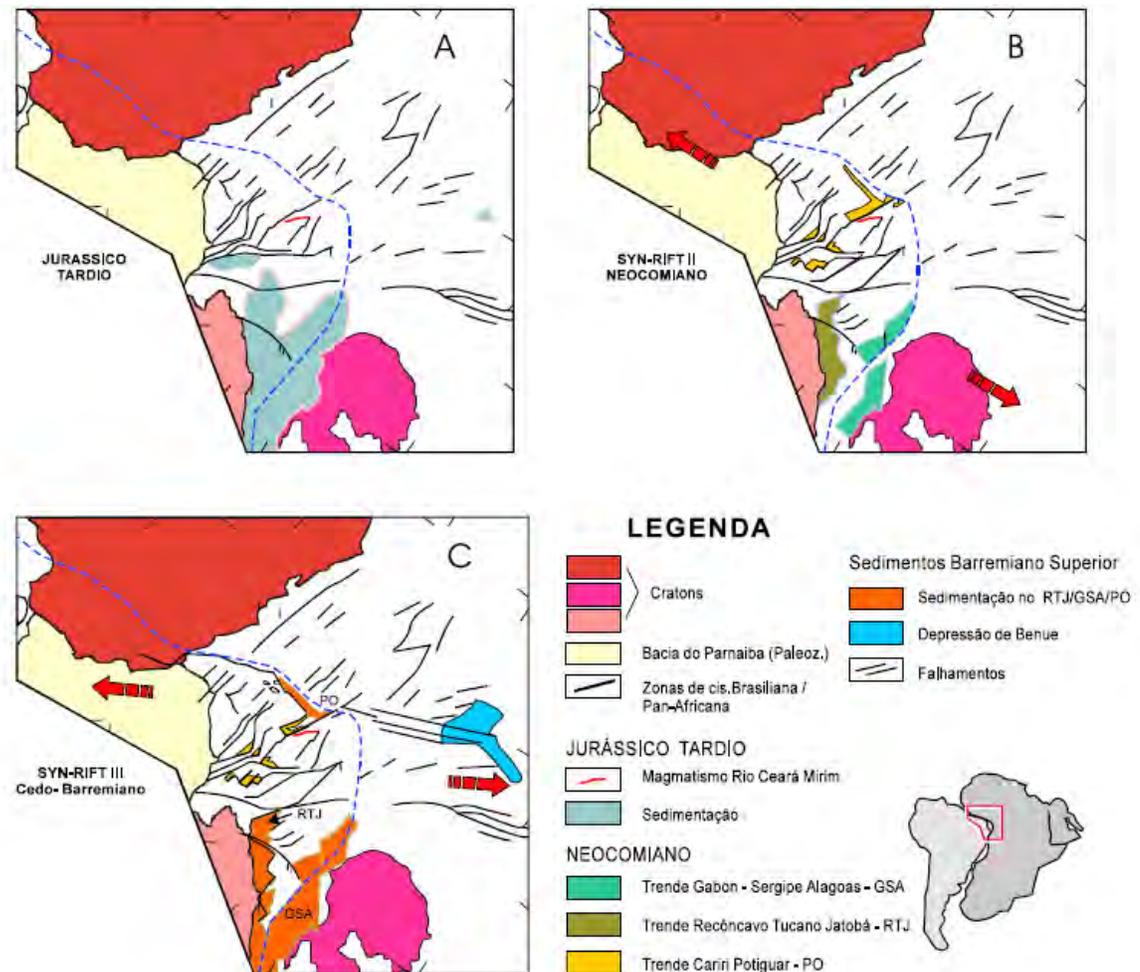


Figura 2.5 - Evolução tectônica das Bacias do Nordeste Oriental segundo Matos (1994).

2.2.2 Evolução tectono-sedimentar cenozóica

A evolução tectônica cenozóica nordestina ainda é um tema aberto a muitas discussões, portanto é necessária uma base maior para o entendimento da geologia desta Era no nordeste brasileiro. Esta seção aborda, numa sucessão cronológica, a evolução tectônica e sedimentar do Cenozóico do Rio Grande do Norte, com base em trabalhos que diretamente ou indiretamente associam-se a esta fase de evolução.

O limite entre Mesozóico e o Cenozóico na Bacia Potiguar deu-se com uma erosão generalizada atestada pela discordância sobre as formações Jandaira e Ubarana (Figura 2.4) e posterior deposição da Sequência Marinha Regressiva. Segundo Françaolin e Szatmari (1987), nesta transição, a Bacia Potiguar

foi submetida a uma forte compressão de direção N-S, evidenciada por falhas reversas e dobras encontradas nas formações Açú e Jandaíra, além da reativação de estruturas pré-existentes. Datações efetuadas nos diques de diabásio da Formação Serra do Cuo colocam estas rochas na transição Mesozóico-Cenozóico, especificamente entre o Santoniano e o Campaniano (Lima Neto, 1985).

Cremonini e Karner (1995) e Cremonini (1995) propõem que a erosão generalizada que produziu a discordância nas formações Jandaíra e Ubarana deve-se a um soerguimento regional que, por sua vez, foi induzido pelo fluxo de calor proveniente da crosta oceânica que se formava ao longo da margem equatorial brasileira (Figura 2.6). Este soerguimento regional também teria promovido reativações de falhamentos importantes, como a Falha de Afonso Bezerra (Cremonini e Karner, 1995).

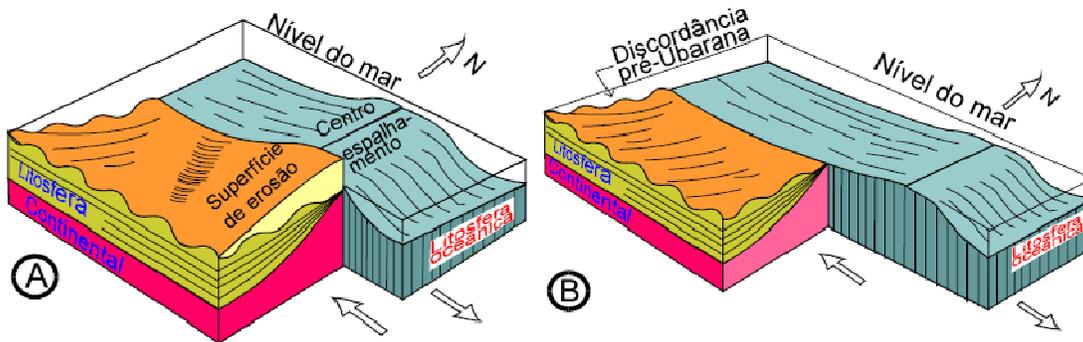


Figura 2.6 - Blocos diagramas esquemáticos mostrando (A) passagem do centro de espalhamento em frente a Bacia Potiguar causando o aquecimento, soerguimento e erosão dos sedimentos; (B) estágio de resfriamento e subsidência da crosta continental após a passagem do centro de espalhamento (Cremonini e Karner, 1995 e Cremonini, 1995).

A partir do Neocampaniano até o Holoceno, as Formações Tibau, composta por arenitos grossos típicos de leques costeiros, e Guamaré, composta por calcarenitos bioclásticos creme e calcilitos típicos de plataforma e talude carbonáticos são depositadas, fazendo parte da Sequência Regressiva da bacia (Araripe e Feijó, 1994).

No terciário, a Bacia Potiguar foi submetida a esforços compressivos de direção E-W responsáveis pela formação de dobramentos de grande comprimento de onda com eixos orientados na direção N-S (Cremonini, 1995). Foi constatado por Costa Neto (1997) em uma área a sul de Macau, que a intrusão de um magma básico, relacionado à Formação Macau (Meyer, 1974), ocorreu durante uma reativação tectônica no Terciário (Oligoceno). Já Sial (1976) argumentou que a colocação desta suíte Terciária foi induzida pelos ajustes internos da Placa Sul-Americana, após o alívio de pressão de zonas arqueadas no Mesozóico.

A partir do Mioceno, começa a deposição dos sedimentos da Formação Barreiras de Mabesoone (1994). O surgimento dos Andes promoveu mudanças climáticas e sedimentológicas de abrangência continental que explicariam a deposição dos sedimentos da Formação Barreiras por quase todo o Brasil.

Atualmente, a sedimentação e tectonismo do quaternário no Estado do Rio Grande do Norte têm sido muito interessantes para estudos locais. Desde 1989, quando passaram a ser registrados os abalos sísmicos na Cidade de João Câmara (RN), a comunidade científica vem pesquisando várias regiões do estado com o objetivo de entender as condicionantes do atual tectonismo. Vários acreditam que um processo progradacional, instalado no litoral norte a partir do quaternário, é consequência das reativações das falhas de direção SE/NW e NE/SW (Costa Neto, 1985; Silva, 1991).

3 DADOS UTILIZADOS

Os dados sísmicos processados nesse trabalho, foram adquiridos pelo navio Geco Tau, de propriedade da WesternGeco Serviços de Sísmica LTDA. Eles foram coletados no primeiro semestre de 2001 e sofreram sua última edição em Janeiro de 2002.

Durante a aquisição sísmica há certos parâmetros e observações que são fundamentais para a boa compreensão do processamento, como por exemplo a geometria em que os dados foram dispostos. Por isso, os profissionais responsáveis pela aquisição no navio devem desenvolver o Relatório do Observador, onde estão contidas informações que variam desde a instrumentação, passando pela configuração do *streamer* e navegação, até a energia da fonte sísmica. Abaixo segue uma breve descrição de alguns parâmetros importantes.

3.1 Configuração dos Instrumentos

O instrumento Triacq é responsável por gravar dados em fita. Geralmente, os dados sísmicos registrados nas fitas estão em um dos formatos padronizados pela *Society of Exploration Geophysicists* – SEG., dos quais podemos citar o SEG-B, SEG-D, SEG-2 e SEG-Y. Neste caso, os dados foram gravados no formato SEG-D. É importante citar que os dados, ao início do processamento, são convertidos para um formato proprietário compatível com o *software* Omega.

Como existia o interesse do cliente em imagear áreas mais profundas, essa linha sísmica foi gravada com 12 s de comprimento, com uma taxa de amostragem de 0,002 s (2 ms).

Devido à distância entre o hidrofones e o gravador, é comum ocorrer um atraso (*record delay*) na gravação, no caso de 48,07 ms, calculado pelos especialistas. O deslocamento deverá ser retirado

posteriormente.

Além de reportar o que ocorre na aquisição, os observadores podem realizar um processamento no próprio campo. Por exemplo, nesses dados, eles utilizaram a filtragem de frequência.

3.1.1 Filtragem de Frequência:

De acordo com Vasconcellos (2009), o objetivo básico dessa filtragem inicial dos dados sísmicos é remover as faixas de frequência indesejadas, de forma que sejam removidos dos traços os componentes de frequências muito baixas (que normalmente estão associadas aos eventos superficiais de alta energia e a onda aérea) e os componentes de alta frequência originadas por fontes de interferência. Portanto, esta etapa pode significar um razoável aumento de razão sinal-ruído dos dados.

Os filtros de frequência mais comuns no processamento são:

Passa-banda (Figura 3.1 (c)): No domínio da frequência, este filtro tem um formato trapezoidal e tem como objetivo definir a banda de frequência a ser preservada do sinal, juntamente com as bandas dos ruídos de baixa e alta frequência a serem rejeitados. Há duas zonas de transição relacionadas à inclinação da reta a partir de frequência de corte, chamadas de ombreiras; essas zonas de seletividade indicam a declividade do filtro. Nos filtro de frequência, inclinação do espectro de amplitude do filtro adjacente à faixa de passagem, ou seja, são de grande importância para que não ocorra um corte “brusco” nas frequências (ocasionando o efeito de ombreiras), e mantenham uma região intermediária bem preservada.

Passa-alta ou corta-baixa (Figura 3.1 (b)): A atenuação efetiva dos ruídos de baixa frequência pode ser obtida, entretanto, o que deve ser levado em consideração é a possível atenuação dos eventos de reflexão, principalmente os mais profundos que são caracterizados pela baixa frequência e amplitude.

Passa-baixa ou corta-alta (Figura 3.1 (a)): Esse filtro é responsável por remover as altas frequências, como por exemplo algumas fontes de interferência.

Na figura 3.1, pode-se observar um gráfico de amplitude x frequência, onde as frequências f_2 e f_3 representam as frequências de corte e as frequências f_1 e f_4 , são determinadas para diminuir o efeito de ombreiras.

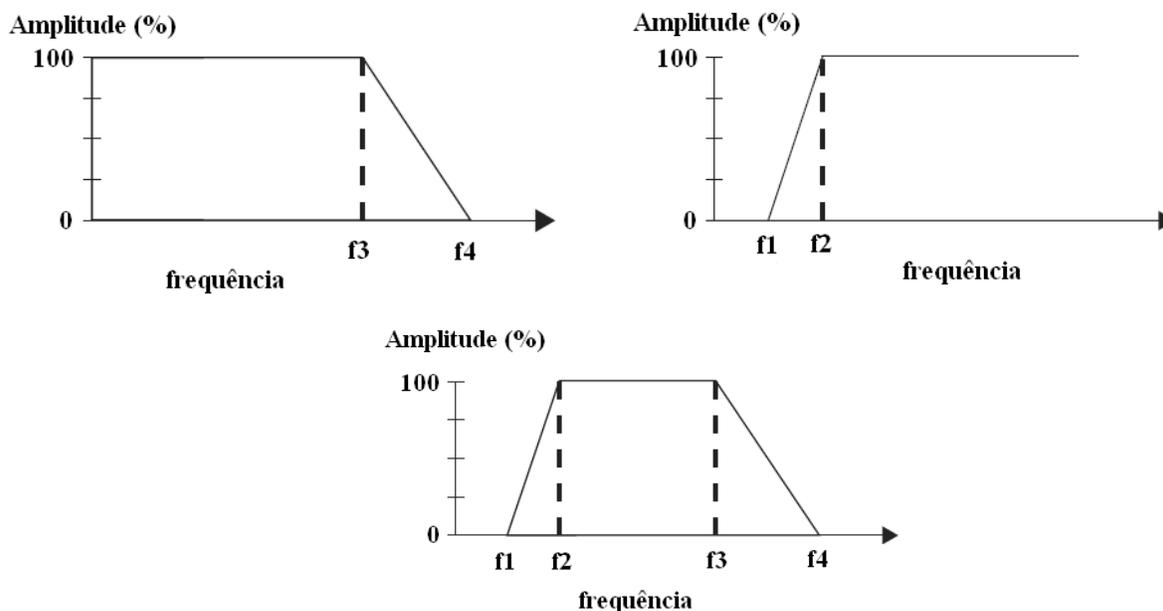


Figura 3.1 - Filtros de frequência: (a) passa-baixa, (b) passa-alta, (c) passa-banda.

Neste trabalho optou-se por um filtro passa-baixa de 200 Hz e um passa-alta de 3 Hz. Em outras palavras, foi feito um passa-banda com os limites 3 Hz/200 Hz (Figura 3.2).

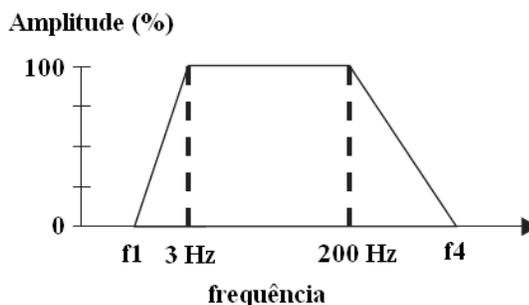


Figura 3.2 - Filtro passa-banda esquemático, de acordo com as frequências utilizadas no processamento em campo.

3.2 Configuração do Cabo da Aquisição

Como já foi dito anteriormente, a geometria da aquisição é fundamental para o processamento. Portanto o geofísico deve fornecer ao *software* os parâmetros corretamente, pois qualquer erro durante a definição das coordenadas da fonte de energia ou dos receptores irá ocasionar na perda parcial ou total das atividades executadas nas demais etapas do fluxograma. Essa técnica requer muitos cuidados, pois tanto o navio como o cabo sofrem diversas influências, dentre elas: força do vento (aproximadamente 20 nós), ondulação (~ 1,5m), velocidade do navio em relação ao fundo (~ 5,14 nós). Essas variações geram o chamado de deriva do cabo, ou seja, ele nunca se mantém completamente alinhado. No final desta etapa, todas as informações definidas e calculadas são gravadas nos cabeçalhos de cada traço

sísmico, mais especificamente nas coordenadas de ponto de tiro, receptor e no seu afastamento correspondente. Depois, temos a possibilidade de organizar os dados em ponto médio comum (CMP).

Nessa aquisição foi utilizado somente um cabo do tipo Nessie-4, em que em cada receptor de um total de 320, estão agrupados em 16 hidrofones – que logo serão somados na posição média- com uma distância de 25m entre os hidrofones intermediários de cada grupo. Cada grupo possui um comprimento de 27,34m – aproximadamente 1,71m entre dois hidrofones consecutivos - portanto, o último hidrofone de um grupo acaba sendo levado em consideração também pelo grupo seguinte. O cabo se encontrava a aproximadamente 7m de profundidade. Abaixo segue o esquema:

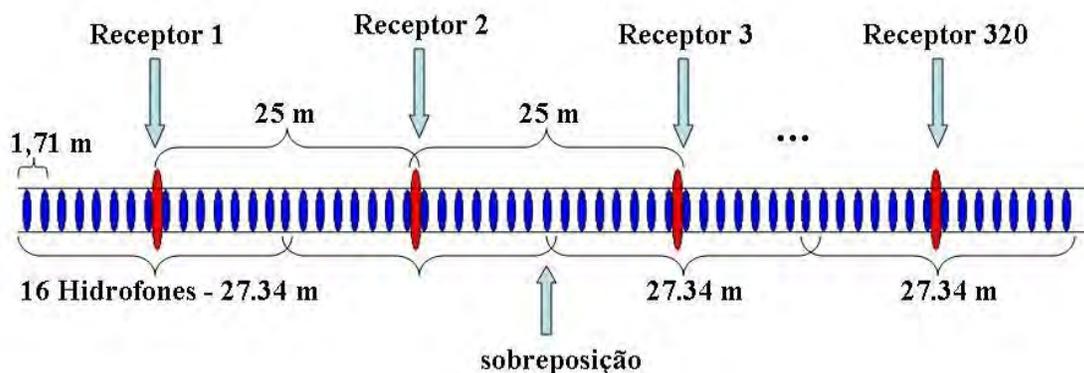


Figura 3.3 - Configuração do cabo.

Vale a pena citar que, esta configuração tende a aumentar ainda mais a razão sinal-ruído, uma vez que muitos ruídos aleatórios oriundos somente de alguns hidrofones serão totalmente eliminados, pois não ocorre sobreposição entre os ruídos.

3.3 Energia da Fonte Sísmica

O *airgun* (canhão de ar) é a fonte de energia sísmica mais utilizada atualmente na prospecção marítima. Ao liberar o ar comprimido armazenado em alta pressão (nesse caso 2000 PSI), esta fonte gera um pulso acústico de baixa potência (Guimarães, 1989).

Esse trabalho foi feito com uma única fonte sísmica, que emitia um impulso acústico a cada 37,5m, e se encontrava a aproximadamente 6m de profundidade. Neste trabalho, a geometria ideal para a aquisição sísmica foi disposta de 36 *airguns* com diferentes volumes, gerando um volume total de 7918 cu.in (Figura 3.4).

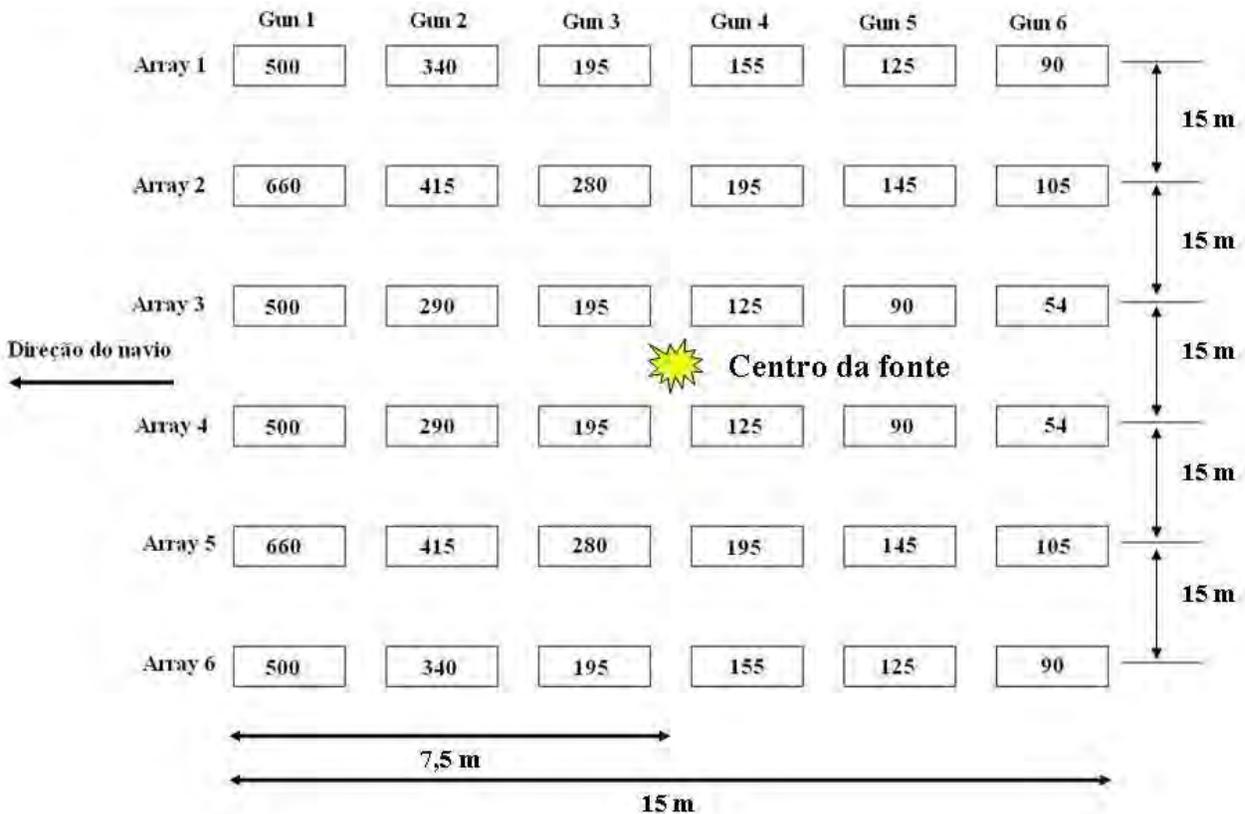


Figura 3.4 - Arranjo da fonte sísmica.

A assinatura do arranjo da fonte sísmica é inconvenientemente longa e oscilatória. Visualizando o espectro pode-se observar muitos picos nas frequências de interesse, e uma assinatura em fase mínima. Mesmo com tantas desvantagens, o *airgun* se tornou a melhor fonte empregada na sísmica marinha, pois é de extrema confiança e pela repetibilidade da assinatura (A. Ziolkowski, G. Parkes, L. Hatton e T. Hauglands, 1981).

Para superar os aspectos indesejados da assinatura de uma única fonte sísmica, arranjos de diferentes tamanhos (Figura 3.5) são normalmente agrupados para criar uma composição de fontes onde a característica da assinatura se torne mais desejável possível. O desenho usual tem como objetivo gerar uma onda sísmica onde a assinatura na vertical seja pequena e estreita. Já no espectro, é desejável que a assinatura seja suavizada, ampla sobre a frequência de interesse e preferencialmente em fase mínima (Giles and Jonhston, 1973; Noteboom, 1978).

Na época em que essa aquisição foi feita, utilizava-se somente um hidrofone no arranjo para captar a assinatura da fonte. Desta forma, o “efeito bolha” (*bubble effect*) deve ser removido com “designatura” (deconvolução). Atualmente, esse efeito é tratado como um ruído aleatório, ou seja, é distribuído um hidrofone para cada *airgun*, e como cada canhão possui um volume, o “efeito bolha” é

diferente para cada canhão de ar (Figura 3.5). Assim, quando as assinaturas forem somadas, o efeito será eliminado e sobrar a assinatura original. Após o somatório, ainda é feita uma deconvolução final para eliminar os últimos efeitos.

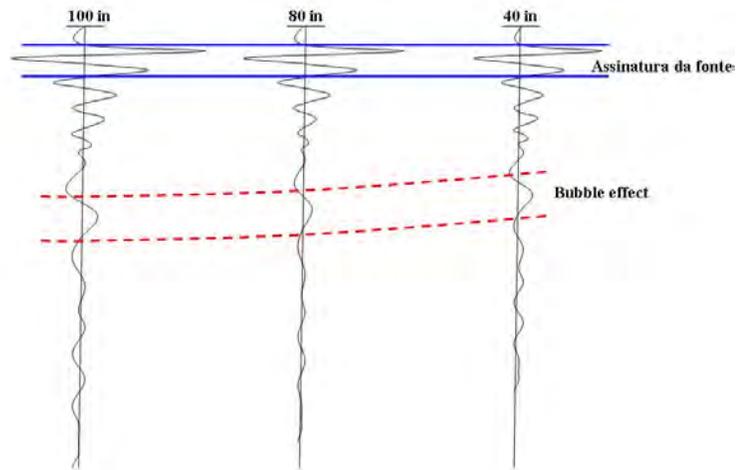


Figura 3.5 - Esquema do efeito bolha em diferentes canhões de ar.

Em outras palavras, o R.O. descreve toda a história da aquisição em campo.

3.4 Conteúdo do Cabeçalho dos Traços

Muitas informações são de grande importância para o início do processamento e, portanto, é criado um cabeçalho para salvar estas informações de cada traço sísmico. A partir desses dados, podemos determinar a posição de cada *Common Midpoint* (CMP) e calcular a cobertura (Figura 3.7).

- Número de tiro – Indica a qual tiro está relacionado o traço;
- Número de canal de campo – Indica em qual receptor o traço foi armazenado;
- Coordenadas X e Y – Representa a posição do receptor no momento em que o traço foi gravado.

As coordenadas estão salvas em UTM.

- Distância fonte-receptor – Indica o afastamento, ou seja, a distância entre a fonte e o receptor.

A figura 3.6 esquematiza como é feita a aquisição sísmica.

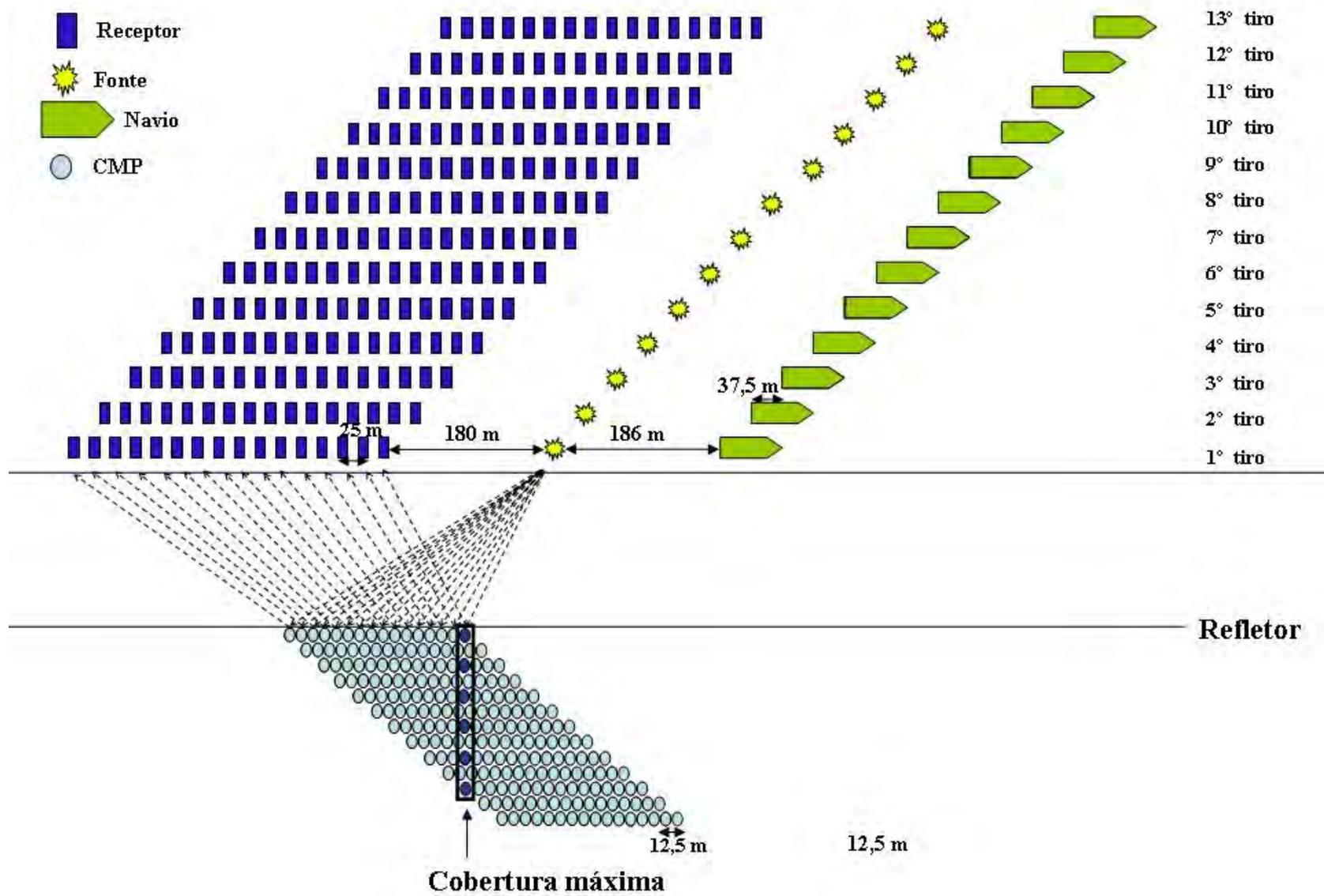


Figura 3.6 - Obtenção da cobertura máxima através do levantamento contínuo.

3.5 Cobertura

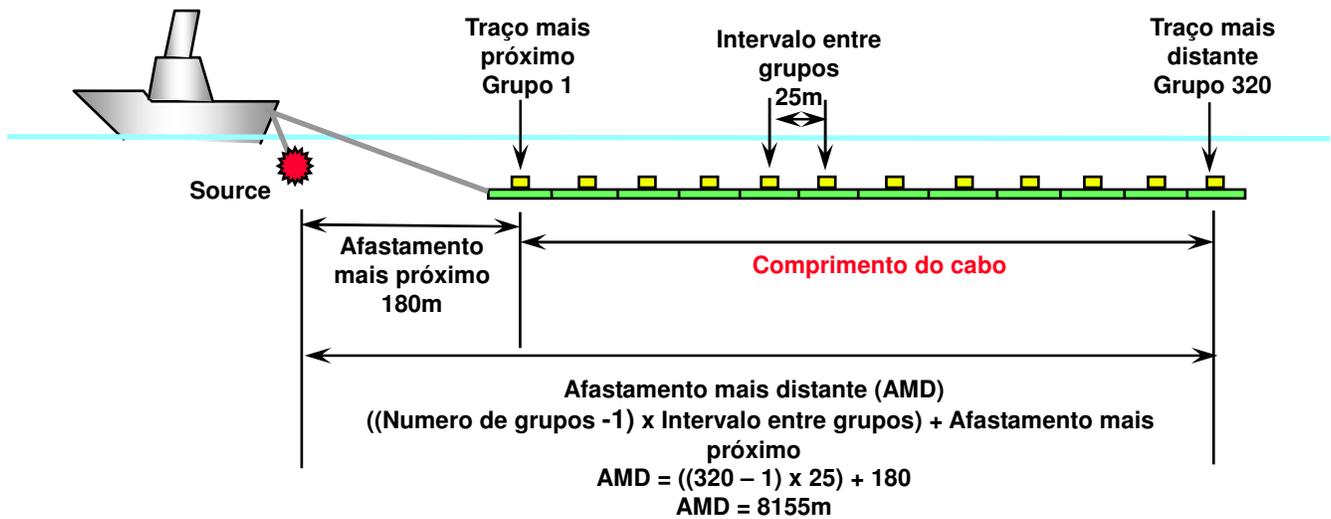


Figura 3.7 - Esquema representativo da aquisição.

Seguem alguns cálculos relevantes para o processamento:

$$\text{Intervalo CMP} = (\text{Intervalo entre grupos}/2)$$

$$\text{Intervalo CMP} = (25/2) = 12,5$$

$$\text{Número de novos CMPs / Tiro} = (\text{Intervalo entre tiros} / \text{Intervalo entre CMPs})$$

$$\text{Número de novos CMPs / Tiro} = (37,5/12,5) = 3$$

$$\text{Cobertura} = (\text{Intervalo entre grupos}/\text{Intervalo entre tiros}) * (\text{Numero de canais}/2)$$

$$\text{Cobertura} = (25/37,5) * (320/2) = 106,67$$

$$\text{Primeiro CMP} = [(\text{AMD}/2) / \text{CMP int}] + 1$$

$$\text{Primeiro CMP} = [(8155/2) / 12,5] + 1 = 327,2$$

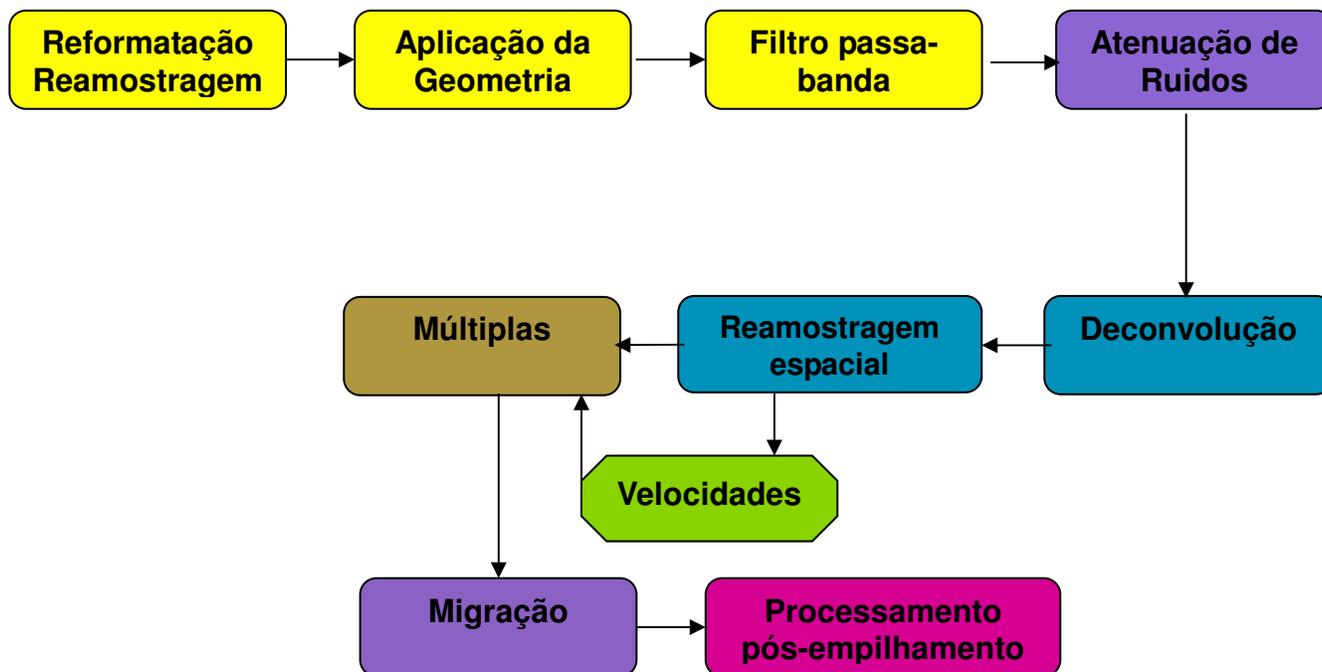
$$\text{Primeira cobertura máxima CMP} = \text{Primeiro CMP vivo} + [(\text{cobertura} - 1) * (\text{n}^\circ \text{ de novos CMP por tiro})]$$

$$\text{Primeira cobertura máxima CMP} = 327,2 + [(106,67 - 1) * (3)] = 644,21$$

4 PRÉ PROCESSAMENTO

4.1 Fluxo de processamento

Quando se inicia um novo projeto, é necessário manter as idéias claras sobre qual será o formato do fluxo em geral. Normalmente, o contrato feito com o cliente traz os detalhes sobre o que é esperado e aplicado no dado. Como o objetivo é demonstrar os mais importantes passos de um fluxo de processamento, será utilizado o fluxo mais comum (como vemos abaixo no fluxo 4.1):



Fluxo 4.1 - Representa os passos seguidos durante trabalho.

4.2 Controle de qualidade do dado

O controle de qualidade é essencial ao trabalho e uma série de etapas devem ser seguidas antes de começar a manipulação dos dados, como por exemplo: edição dos traços, deslocamento dos traços e a linearidade da onda direta.

A etapa de edição envolve uma visualização prévia dos sismogramas de tiro (normalmente os registros de campo correspondem a famílias de tiro) e a eliminação total ou parcial dos traços que possam vir a comprometer diretamente a qualidade dos resultados. Em geral, a edição de dados sísmicos marinhos é menos dispendiosa que no caso de dados sísmicos terrestres, pois normalmente apresentam uma melhor qualidade dos traços (traços uniformes e menos variações no sinal). Isso possibilita uma análise dos registros de tiros em incrementos regulares. Os principais traços editados num sismograma são: traços com baixíssima razão sinal-ruído; sem sinais “mortos” (amplitudes zero,

devido ao desligamento ou problemas no hidrofone); com sinal em monofrequência (interferência de linhas de transmissão ou dos equipamentos de registro); contaminado por ruídos transientes (causados pela deriva do cabo de aquisição); traços com ruído aleatório (relacionados ao mau acoplamento dos hidrofones e a ondas na superfície da água que provocam vibrações do cabo).

Esta etapa é fundamental para os passos posteriores, pois se realiza um controle de qualidade para evitar a propagação de erros. Assim, os traços ruidosos devem ser eliminados do dado de forma que não comprometa a qualidade final.

Como esta etapa trata basicamente da visualização dos traços, o geofísico deve ter o máximo de cuidado para que não haja perda de informação quando o sinal for excluído em virtude de uma eliminação equivocada.

Durante a visualização dos sismogramas no domínio t-x, pode-se identificar os eventos desejáveis e indesejáveis presentes nos sismogramas e verificar algumas de suas características. Para visualizar melhor os dados, temos as seguintes opções de representação do traço sísmico:

- Wiggle (WGL) – representação dos dados sísmicos que emprega uma curva sinuosa e contínua para indicar a variação da amplitude em função do tempo;
- Área Variável (VA) – somente são representadas as amplitudes positivas “preenchidas em preto” que ficam a direita do centro do traço. Essa opção é mais usada quando se deseja gerar uma versão reduzida de uma seção sísmica;
- Área variável mais wiggle (VA + WGL) – nessa opção, além das amplitudes negativas e positivas serem representadas por uma simples curva, elas são preenchidas pelas cores branco e preto respectivamente (padronizado pelo SEG). Trata-se da opção mais utilizada para representar o traço sísmico;
- Densidade variável (VD) – as amplitudes são diferenciadas empregando-se escalas de cores ou de cinza (greyscale). Os sismogramas obtidos com radar normalmente utilizam essa opção de representação do traço.

A figura 4.1, ilustra dois traços com as opções de representação, mencionadas anteriormente.

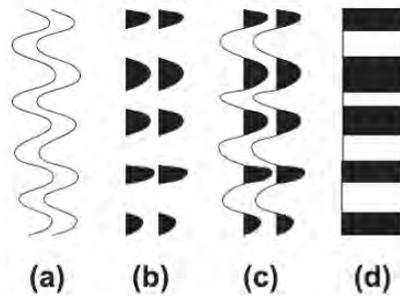


Figura 4.1 - Opções de representação do traço sísmico: wiggle em (a), área variável em (b), área variável + wiggle em (c) e densidade variável em (d) (Silva, 2004).

Para ser feito o “QC” (controle de qualidade) não é necessário todo o dado, porque além de demorar a executar o fluxo inteiro para cada traço, os pontos de tiro vizinhos possuem características muito semelhantes. Logo, o dado pode ser visualizado a cada 100 tiros. Vale lembrar que os ruídos não são eliminados nesse momento. São apenas analisados, e, somente após definidas as ferramentas adequadas, eliminados.

A partir dos estudos feitos no navio e dos valores calculados pode ser feito imediatamente o uso do deslocamento dos traços, ou seja, correção do atraso ocorrido na gravação do dado. Esse parâmetro não altera em nada o dado. Apenas transporta o traço para a posição correta (Figura 4.2), de modo que possa ser feito antes do controle de qualidade. A figura 4.3 representa esse efeito no dado.

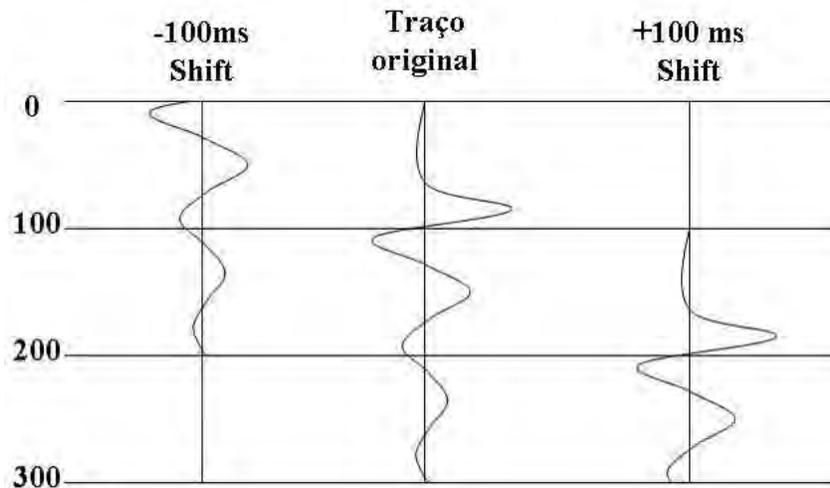


Figura 4.2 - Representação do algoritmo de deslocamento do traço.

Outra etapa que pode ser feita nesse momento é checar a linearidade da onda direta, o que pode ser feito selecionando somente o primeiro traço de cada tiro, com o objetivo de determinar se ocorre defasagem do tempo de chegada das famílias de tiro, caso ocorra, o tiro deve ser deslocado para a posição real.

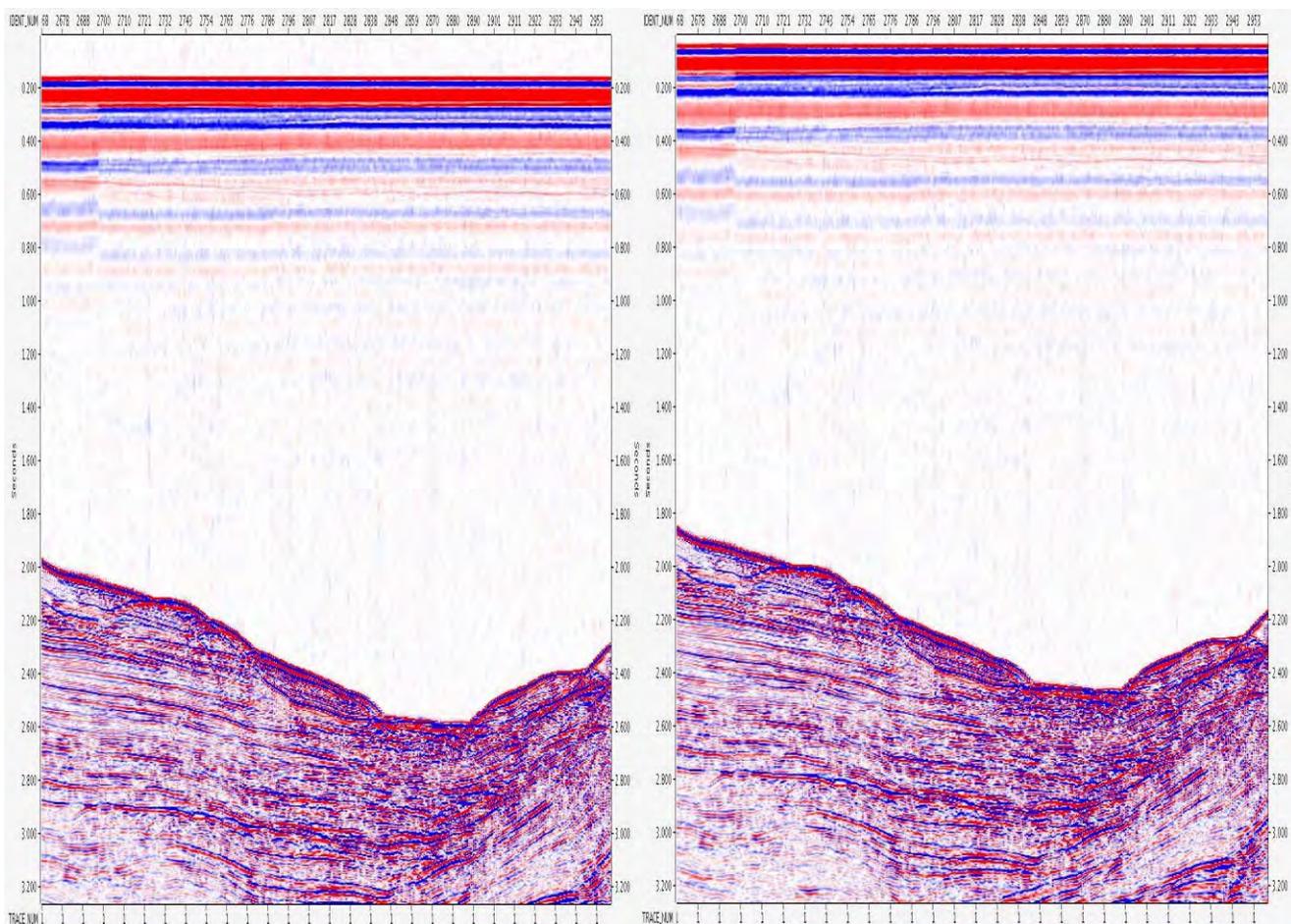


Figura 4.3 - Acima se pode notar o efeito do deslocamento do traço. (a) imagem antes da correção, (b) imagem após feita a correção, com a posição correta.

Já é possível, a partir desse início de processamento, ter uma visualização do dado bruto sem a adição de alguma manipulação efetiva (Figura 4.4).

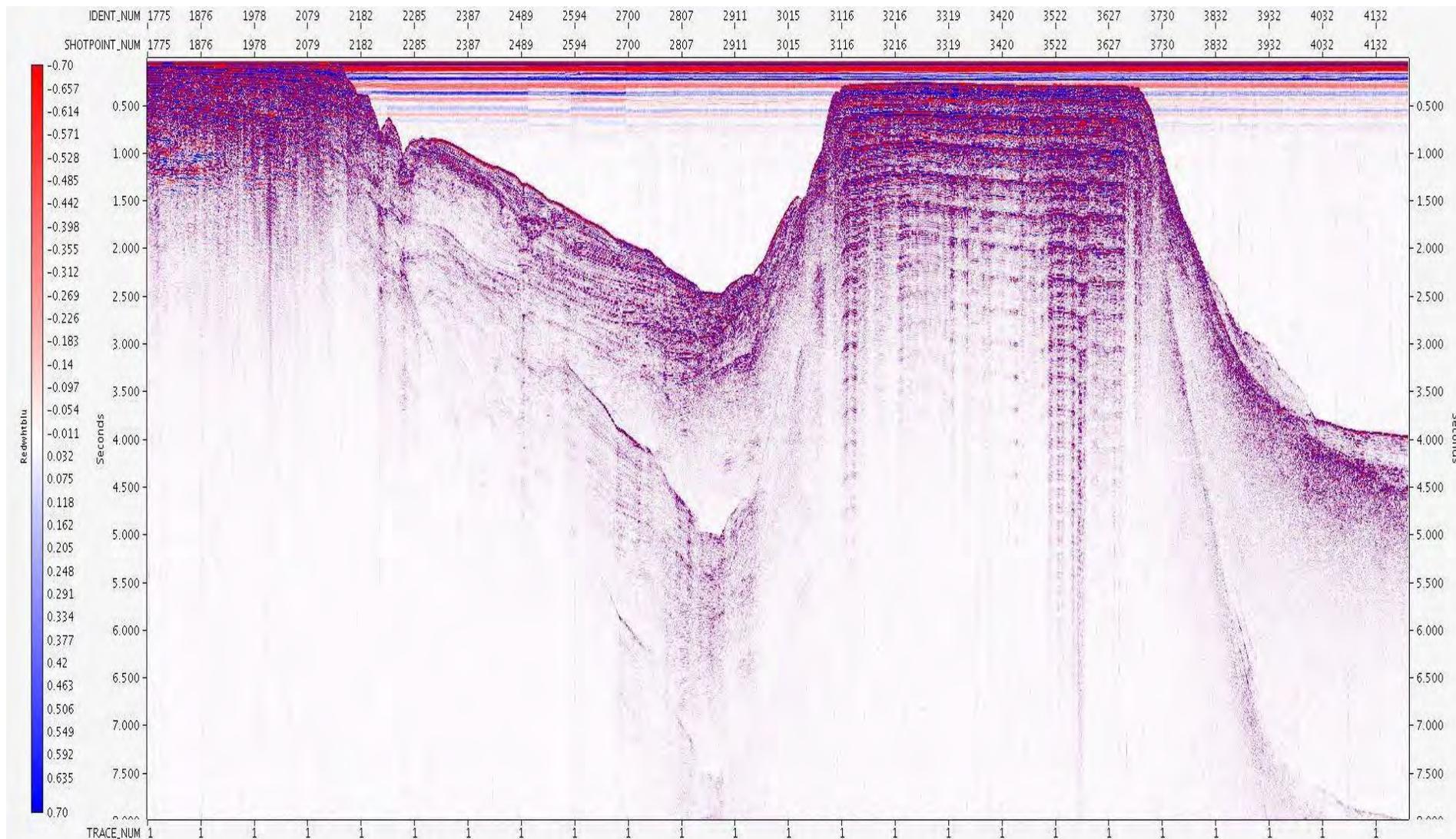


Figura 4.4 - Visualização inicial do dado bruto. Seleção somente do primeiro traço de cada família de tiro. Seção não-empilhada.

4.3 *Compensação das Perdas de Amplitude*

Em virtude da perda de energia durante a propagação da onda sísmica, a visualização dos traços normalmente fica comprometida; por isso, costuma-se aplicar uma técnica de correção de amplitude antes da etapa de edição.

Durante a propagação da onda sísmica há uma grande perda de energia com o tempo e a visualização dos traços normalmente fica comprometida. Por isso, costuma-se aplicar uma técnica de correção de amplitude antes da etapa de edição. Os mecanismos de perda de amplitude são variados, mas os três principais fatores que afetam as amplitudes são:

- Divergência Esférica
- Absorção
- Perdas por transmissão

Estas perdas combinadas causam um rápido decaimento das amplitudes dos traços com o tempo de propagação. A perda por espalhamento é a principal causa para o decréscimo da amplitude.

Algumas operações numéricas que são aplicadas nos dados sísmicos assumem que as amplitudes dos traços são normalizadas de alguma forma. No processamento realizado, usa-se na edição dos dados, um recurso de visualização bastante útil, disponibilizado pelo Omega, em que os traços são observados como se tivesse sido aplicado um controle de ganho automático. Normalmente a visualização mais utilizada é a área variável + wiggle. O fluxo 4.2 representa os testes feitos com relação a este algoritmo.

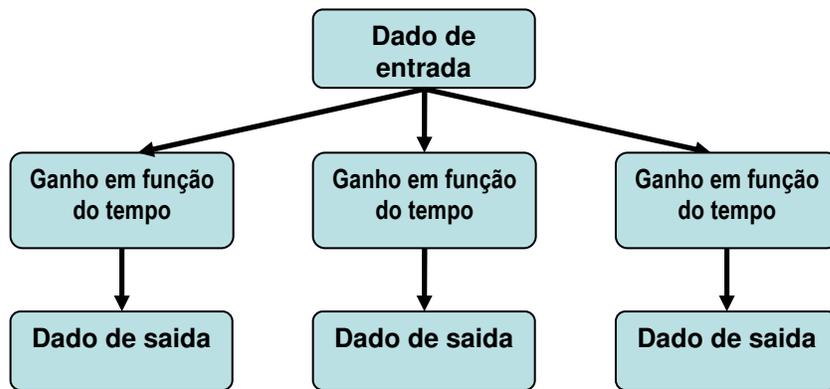
Esse processo balanceia amostras de traços, com o tempo aumentando (em segundos), com informações fornecidas pelo usuário através de valores exponenciais e se multiplica o resultado da amplitude da amostra no tempo certo. Isto é:

$$\mathbf{A_o(t) = A_i(t) t^x} \quad (4.1)$$

Onde:

- $A_o(t)$ é a amostra do traço de saída no tempo t ;
- $A_i(t)$ é a amostra do traço de entrada no tempo t ;
- t é o tempo em segundos;
- x é o valor do ganho exponencial.

Neste projeto, foi feito um teste inicial apenas para decidir qual é o melhor ganho para ser aplicado no dado, onde o valor de x variou entre 1,4, 1,8 e 2,0. O fluxo 4.2 demonstra exatamente como foi feito esse teste. Vale lembrar que esse processo é totalmente reversível.



Fluxo 4.2 - Referente aos testes de ganho.

4.4 Silenciamento dos traços

O silenciamento ou mute tem como finalidade anular o valor das amplitudes (que não interessam) de parte dos traços sísmicos, eliminando áreas ruidosas do sismograma. A área ruidosa dos traços das famílias de tiro comum compreendida entre o tempo zero e os tempos das primeiras chegadas pode ser eliminada sem maiores problemas definindo-se uma função silenciamento para zerar as amplitudes acima do fundo oceânico, assim, a onda direta (que não se encontra junta com os eventos primários) e as refrações sísmicas também serão removidos. A função silenciamento é obtida a partir da leitura de uma reflexão (pontos selecionados) que determina uma fronteira no sismograma. O silenciamento tem sido uma ferramenta bastante explorada nos fluxos de processamento sísmico e sua utilização não é restrita apenas a fase do pré-processamento, sendo sua aplicação recomendada antes da deconvolução e da análise de velocidade (Parasnis, 1997).

Os pontos selecionados são pares de tempo x distancia que determinam o limite entre a região do traço onde serão preservados os valores das amplitudes e a região de silenciamento onde as amplitudes serão anuladas (Figura 4.5 (a)). No Omega, a função é obtida manualmente e a partir da leitura efetuada diretamente nos sismogramas. Existe um outro silenciamento externo que remove, através de uma janela, para as amplitudes que sofrem estiramento quando são corrigidas as velocidades NMO do dado (Figura 4.5 (b)).

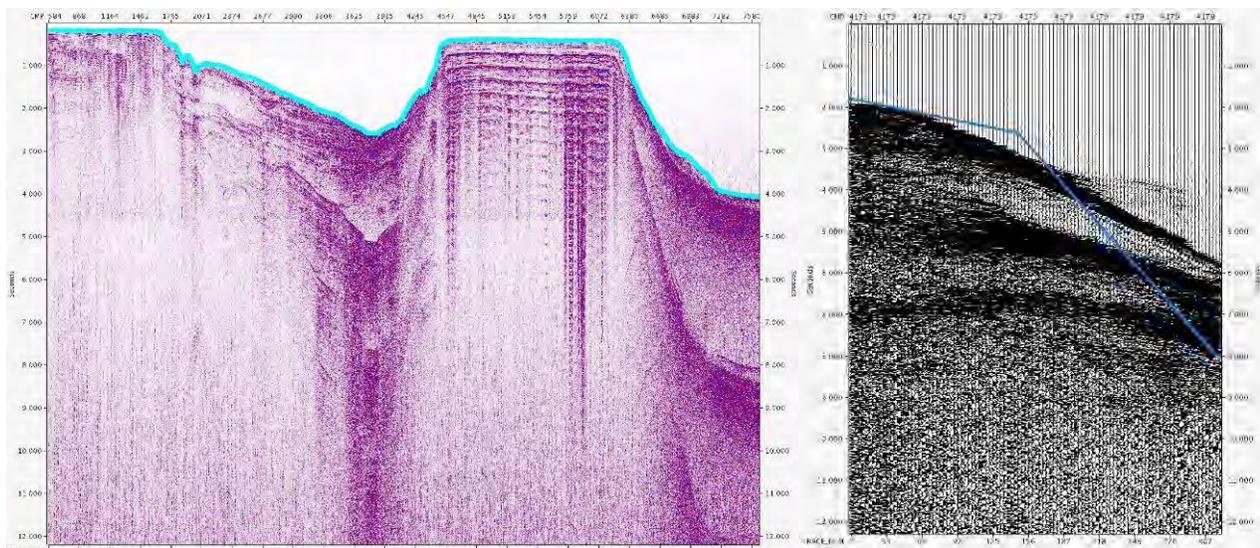


Figura 4.5 - (a) Mostra os pares de tempo x distancia feitos para o primeiro silenciamento e (b) representa a janela na qual os valores irão ser anulados.

4.5 Correção NMO

A correção *Normal Moveout* (NMO) consiste em mover todos os traços de um sismograma com afastamento igual para o mesmo tempo (x), isto é, o afastamento nulo entre a fonte e os hidrofones. Desta maneira, os picos refletidos perdem a feição hiperbólica e se alinham.

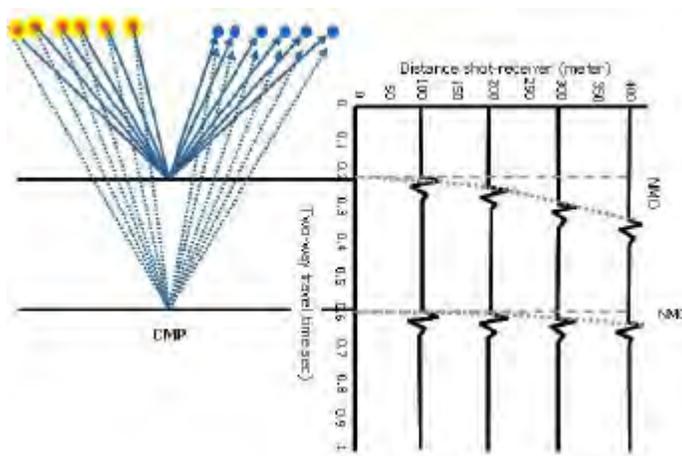


Figura 4.6 - Correção NMO (EAGE, Learning Geoscience online – <http://www.learninggeoscience.net>)

4.6 Empilhamento

O empilhamento sísmico é um método utilizado para aumentar a relação sinal/ruído e construir o CDP final. Este método é realizado a partir de traços no domínio CDP, em que a correção NMO já tenha sido aplicada, pois os eventos primários estão horizontalizados e são somados em fase (construtivamente), já os ruídos são somados destrutivamente. O empilhamento consiste na soma dos traços de uma mesma família, gerando um único traço resultante.

4.7 Transformada Radon

A transformada Radon é uma técnica amplamente utilizada no processamento do dado sísmico e na análise de imagens. O nome desta transformada é uma homenagem a Johann Radon que, em 1917, estabeleceu fundamentos matemáticos para reconstruir imagens tomográficas de um objeto através das projeções do mesmo (Duarte, 2006).

Neste trabalho de processamento sísmico foram aplicados dois tipos de transformada Radon:

- Transformada Radon Linear (ou *Slant-Stack* ou τ - p (*Tau-P*));
- Transformada Radon Parabólica.

Essas variações da Transformada Radon mapeiam eventos com padrões característicos, por exemplo, a Transformada Linear foi utilizada para remoção da onda direta e *ground roll*, e a Transformada Parabólica foi utilizada para remoção das múltiplas.

O procedimento da Transformada Radon é bastante simples, o dado é transformado do domínio T-X para o domínio τ - p (domínio do tempo de intercepção (τ) versus vagarosidade (p)), no qual os eventos indesejáveis são removidos. Contudo, a organização das informações no domínio Radon é diferente e a transformação inversa (para o domínio original) não é uma tarefa simples. O processo realizado para se obter uma “inversa aceitável” aplica técnicas que resolvam problemas lineares inversos como técnicas de Mínimos Quadrados (Ferreira, 2009).

Além da transformada inversa, para se obter sucesso na aplicação da transformada, deve-se separar os eventos com extremo cuidado no domínio Radon. Utilizando a técnica de Mínimos Quadrados para a inversão, o dado é otimizado de tal forma que se torna possível reconstruir o dado original. O processo de inversão é realizado para cada componente de frequência, objetivando a eficiência da transformada (Verschuur, 2006).

A partir do conceito inicial, será apresentado nas subseções apenas as transformadas Radon Linear e Parabólicas (os algoritmos que foram utilizados neste trabalho), para eliminação da onda direta e das múltiplas respectivamente.

4.7.1 Transformada Radon Linear (Slant-Stack ou τ - p)

A definição matemática da Transformada Radon Linear é dada por:

$$m(p_x, \tau) = \int_{-\infty}^{\infty} p(x, t = \tau + p_x x) dx \quad (4.2)$$

Como se vê pela equação, o dado no domínio do espaço-tempo é somado ao longo de linhas retas com tempo de interceptação τ e tempo de mergulho p_x . A escolha deste parâmetro ocasiona, freqüentemente, a denominação da transformada linear como τ - p (τ = tempo de interceptação e p = vagarosidade) ou *slant-stack* (Duarte, 2006).

Na figura 4.7, pode-se observar que a transformada Radon Linear no domínio t - x é ilustrada como uma linha reta e no domínio τ - p se converte em um ponto. Além disso, um evento hiperbólico no domínio do afastamento-tempo é mapeado como uma elipse no domínio Radon Linear (Diebold & Stoffa, 1981).

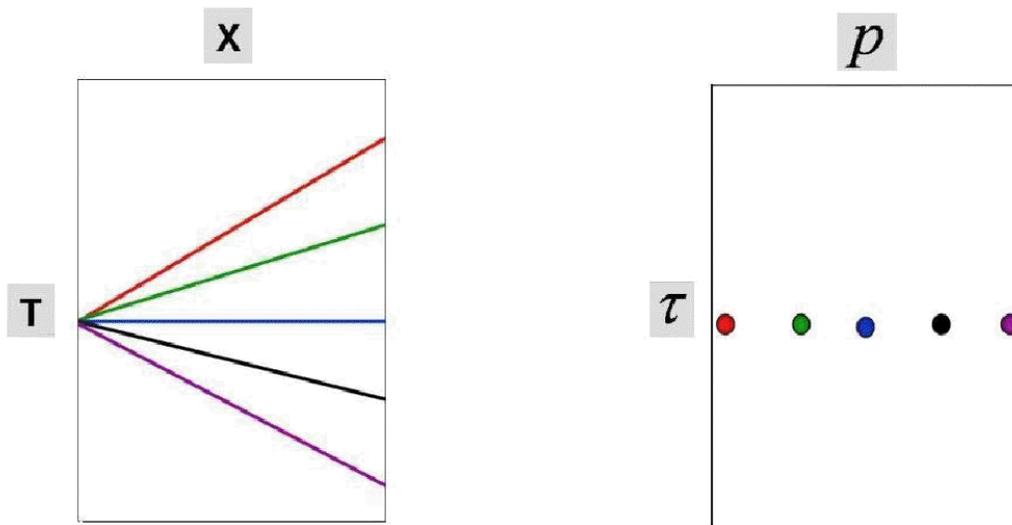


Figura 4.7 - Eventos lineares no domínio t - x e suas respectivas transformadas no domínio τ - p . (Fonte: www.petroleumseismology.com).

4.7.2 Transformada Radon Parabólica

Em 1986, Hampson, com o objetivo de separar com maior eficiência os eventos primários das múltiplas em dados CMP, sugeriu a criação da *Transformada Parabólica* τ - p . Ela é bastante utilizada por distinguir efetivamente os eventos sísmicos hiperbólicos (Figura 4.8). Caso a transformada do dado possa ser calculada eficientemente no domínio *Radon Parabólico*, os eventos são decompostos em parábolas e podem ser definidos como (Vershuur, 2006):

$$m(q, \tau) = \int_{-\infty}^{\infty} p(x, t = \tau + qx^2) dx \tag{4.3}$$

Todavia, os eventos que possuem características lineares no domínio afastamento- tempo não

serão mapeados concentradamente em uma determinada área no domínio parabólico, resultando na dispersão da energia. Partindo dessa premissa, cabe a eliminação dos eventos não mapeados.

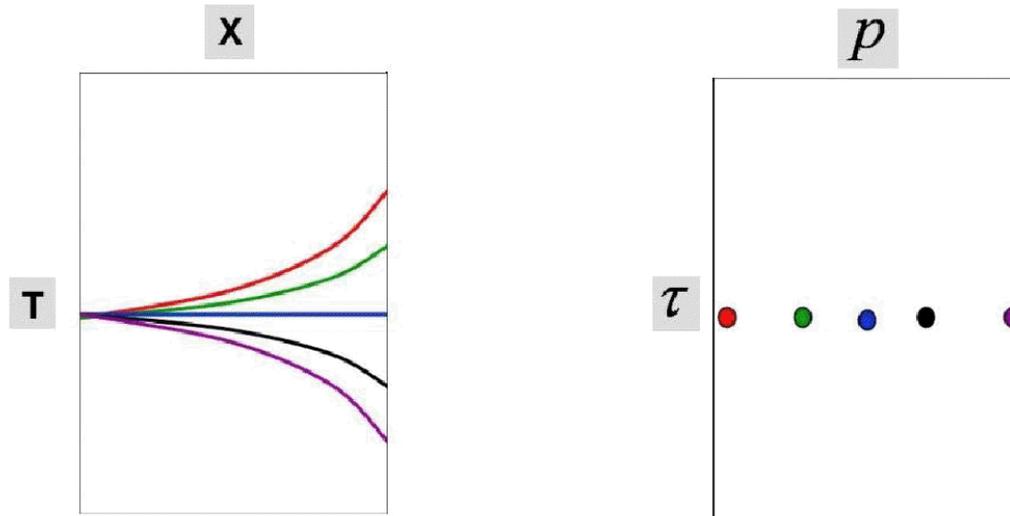


Figura 4.8 - Eventos no domínio espaço-tempo e suas respectivas transformadas no domínio parabólico τ - p .

4.8 Análise dos ruídos

Após os detalhes da primeira parte do controle de qualidade dos dados, realiza-se uma visualização preliminar das famílias dos tiros (uma espécie de continuação do controle de qualidade), a fim de um melhor entendimento dos ruídos, descritos a seguir, que aparecem no dado.

4.8.1 Ruídos Aleatórios

Os ruídos aleatórios geralmente não são originados pela fonte sísmica, ou seja, eles estão relacionados às interferências externas ao arranjo da aquisição. Estão representados por uma energia onde a causa não tenha sido a fonte sísmica, que não apresenta correlação entre traços. Neste estudo foram observados os seguintes ruídos:

4.8.1.1 Ruído de ondas superficiais

No dado marinho sísmico, a maior fonte de contaminação do dado pela fonte é o chamado ruído de ondas superficiais, causado pela pressão no cabo (a medida que o navio faz a curva, a tendência é que o cabo sofra uma pressão ao longo da sua extensão). Na figura 4.9 está bem nítida a presença desse ruído.

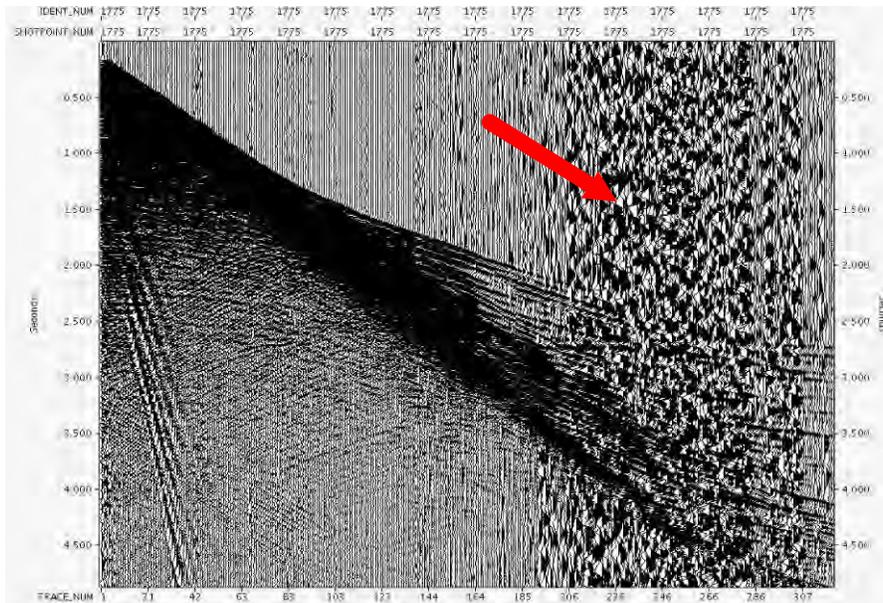


Figura 4.9 - Demonstração dos efeitos de ruído de ondas superficiais.

4.8.1.2 Cracas ou Barnacles

Em determinadas regiões, pode-se notar que apenas alguns traços sofrem com um ruído muito parecido com o ruído de ondas superficiais. Isso se deve a um artrópode chamado “*barnacle*”. Essas cracas tendem a viver em ambientes marinhos, principalmente em águas rasas e de maré. Normalmente elas se anexam permanentemente a qualquer substrato rígido. Esses artrópodes muitas vezes se fixam nos cabos de aquisição, causando uma interferência muito grande na recepção da onda.

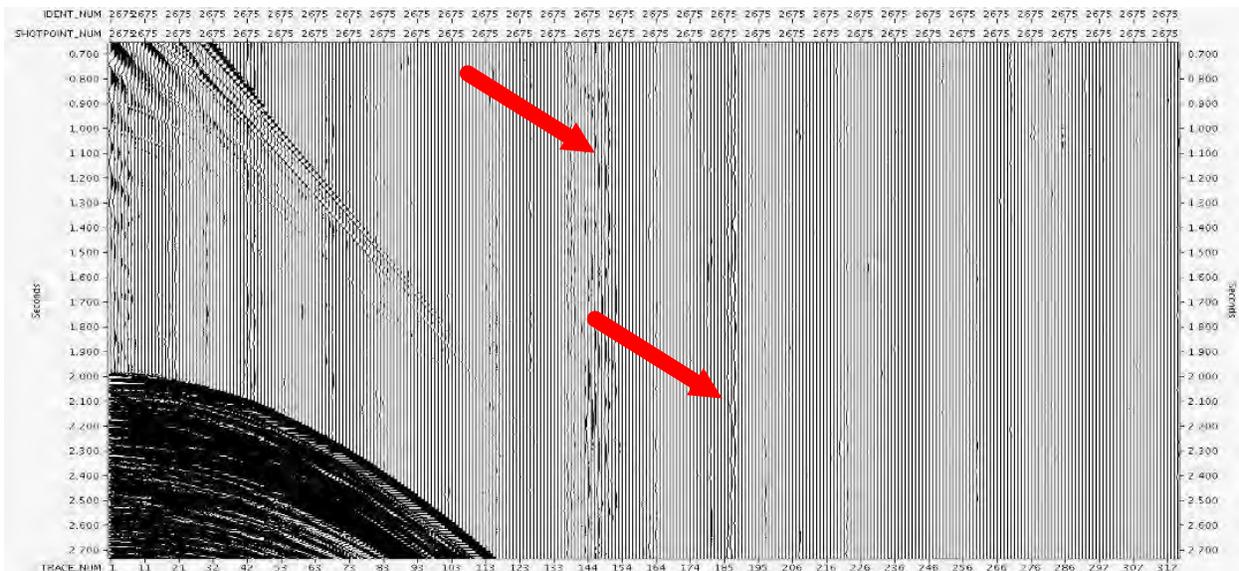


Figura 4.10 - Efeito das cracas no dado.

O algoritmo ARA (atenuação de ruídos anômalos) visa atenuar os ruídos transformando as famílias processadas para o domínio da frequência e aplicando um filtro especial médio. Dessa forma, as faixas de frequência que se afastam das amplitudes médias de um determinado limiar serão zeradas.

O nível de atenuação de ruído foi controlado especificando o número de mediana dos desvios absolutos a partir do valor médio. A mediana dos desvios absolutos é uma medida de dispersão dos dados e, portanto, leva em conta a variabilidade da amplitude. Estes tipos de fatores, muitas vezes não precisam ser especificados no espaço ou no tempo variante, os parâmetros para esse controle estão na tabela 4.1.

A estratégia pra atenuar o ruído de ondas superficiais foi realizar três passos no domínio do tiro, sem que haja necessidade de algum passo no domínio CMP. O primeiro passo ARA, visa eliminar os ruídos de baixa frequência (0-10 Hz), o segundo as médias frequências (10-30 Hz) e o terceiro de altas frequências (30 -80 Hz).

Tabela 4.1 - Parâmetros utilizados no algoritmo ARA.

Valores dos parâmetros:

Domínio no qual ocorre o processamento: Tiro (Passo 1)

Arranjo de frequência a ser processada: 0 até 10 Hz

Threshold:	0	20
	4000	15
	7000	10
	10000	5
	12290	3

Janela de processamento:

Comprimento da janela: 500 ms

Sobreposição no zero offset: 50 %

Atraso da primeira janela: 2000 ms

Domínio no qual ocorre o processamento: Tiro (Passo 2)

Arranjo de frequência a ser processada: 10 até 30 Hz

Threshold:	0	60
	8000	50
	10000	15
	12290	5

Janela de processamento:

Comprimento da janela: 500 ms

Sobreposição no zero offset: 50 %

Atraso da primeira janela: 2500 ms

Domínio no qual ocorre o processamento: Tiro (Passo 3)

Arranjo de frequência a ser processada: 30 até 80 Hz

Threshold: 0 25

12290 25

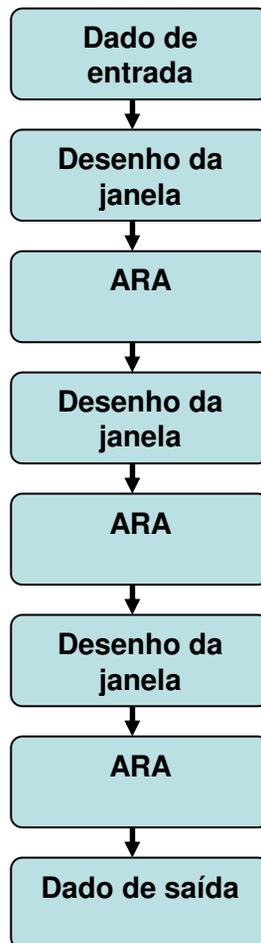
Janela de processamento:

Comprimento da janela: 500 ms

Sobreposição no zero offset: 50 %

Atraso da primeira janela: 2000 ms

O fluxo a ser seguido para eliminação dos ruídos aleatórios está esquematizado na figura 4.3:



Fluxo 4.3 - Diagrama do algoritmo de remoção dos ruídos aleatórios.

4.8.2 Ruídos Coerentes

Os ruídos coerentes são representados por energias sísmicas indesejadas que têm a fase consistente de um traço para o outro, e podem ser assim descritos:

4.8.2.1 Onda direta

A onda direta relaciona-se à energia oriunda da fonte que atinge diretamente os receptores. Esta energia é geralmente de baixa velocidade (1500 m/s) e alta amplitude. Esses efeitos se tornam mais inconvenientes nas menores lâminas d'água, pois tais ruídos começam a se unir a chegada das ondas primárias. Logo, a remoção somente irá ocorrer na região onde os dados estão menos profundos, ou seja, nos dados em que o fundo oceânico se encontra abaixo de 600 ms. Especialmente nesta linha sísmica, existem dois planos em diferentes profundidades (aproximadamente em 300 ms e 600 ms) e os parâmetros aplicados nos planos foram diferentes. O domínio τ - p foi utilizado para atenuar o efeito da onda direta.

Como citado no tópico 4.7.1, os dados são transformados do domínio do tempo (T-X) para o domínio τ - p , com o objetivo de encontrar os valores de frequências para uma determinada onda de chegada P. A onda direta é separada dos eventos primários no domínio τ - p (os parâmetros para separação dos eventos estão na tabela 4.2) e é feita a transformada inversa antes de subtrair dos dados de entrada. Uma vantagem desse algoritmo é que a remoção efetiva da onda direta permite uma melhor preservação da onda primária, que de outra forma estaria contaminada.

Tabela 4.2 - Parâmetros utilizados para eliminação da onda direta.

Valores dos parâmetros:

Domínio no qual ocorre o processamento: Tiro (Fundo oceânico entre 0 – 350 ms)

Transformada Radon Linear

Mínimo Moveout no t-x: -100ms

Máximo Moveout no t-x: 100ms

Distância do afastamento referencial: 8200m

Domínio no qual ocorre o processamento: Tiro (Fundo oceânico entre 350 – 600 ms)

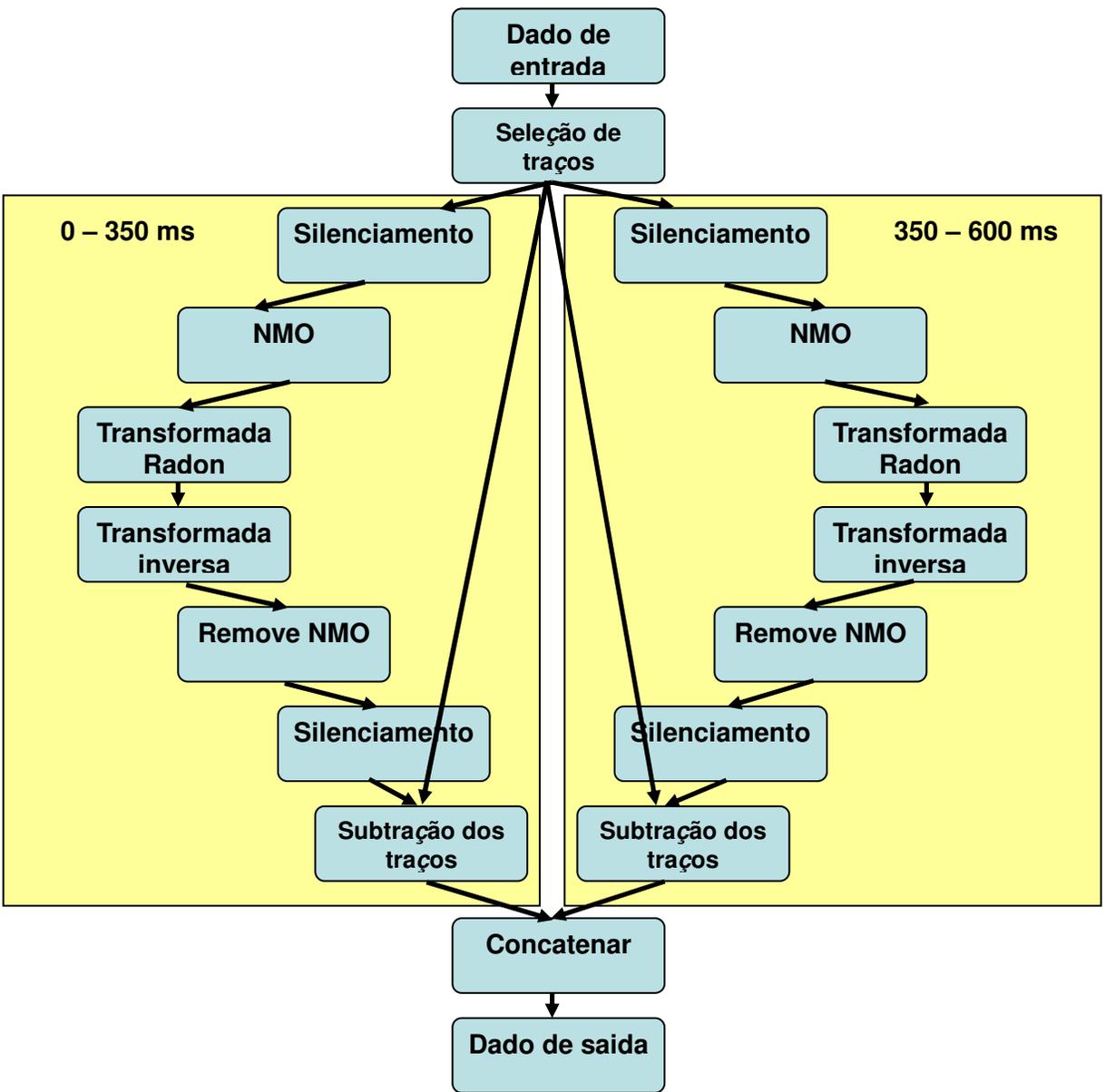
Transformada Radon Linear

Mínimo Moveout no t-x: -500ms

Máximo Moveout no t-x: 500ms

Distância do afastamento referencial: 8200m

O fluxo utilizado está esquematizado na figura 4.4.



Fluxo 4.4 - Referente a eliminação da onda direta.

4.8.2.2 Ground Roll

Segundo Duarte (2006), o *ground roll* é uma onda sísmica superficial dispersiva que viaja paralelamente às camadas superiores do solo, caracterizado por baixa velocidade, baixa frequência e grande amplitude. Sua propagação se dá pelo movimento elíptico e retrógrado das partículas do meio, na direção de propagação (Figura 4.11). Esse ruído pode diminuir a relação sinal-ruído e degradar a qualidade dos dados, mas pode ser atenuado através de uma seleção cuidadosa entre a geometria (disposição de fontes e geofones), filtros e parâmetros de empilhamento.

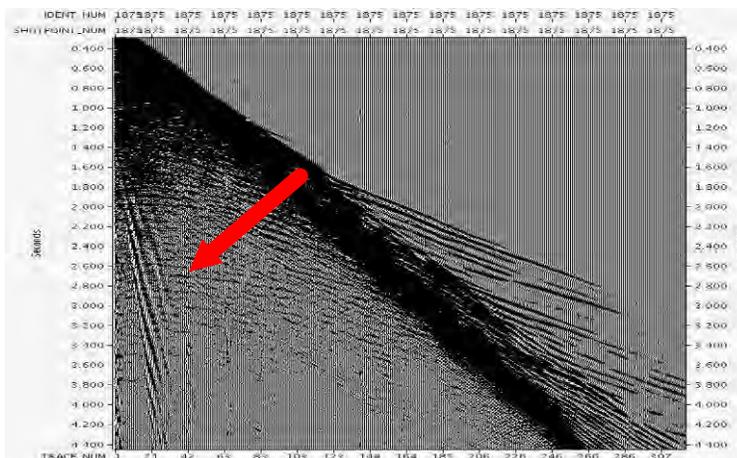


Figura 4.11 - Efeito do *ground roll*.

Tabela 4.3 - Parâmetros utilizados para eliminação do *ground roll*.

Valores dos parâmetros:

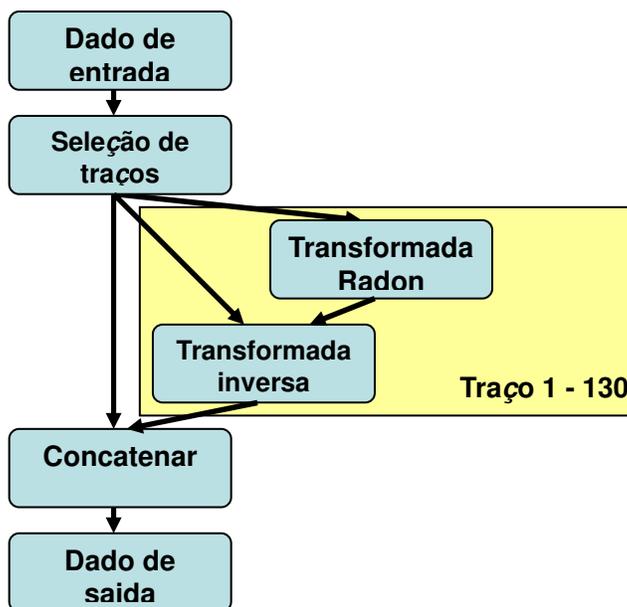
Domínio no qual ocorre o processamento: Tiro (Traço 0 – 130 ms)

Mínimo Moveout no t-x: -9500ms

Maximo Moveout no t-x: 9500ms

Distância do afastamento referencial: 8200m

Abaixo segue o fluxo utilizado:



Fluxo 4.5 - Responsável pela eliminação do *ground roll*.

4.8.2.3 Múltiplas

A múltipla representa um evento que sofreu mais de uma reflexão em um registro sísmico. Dependendo do tempo de separação, a reflexão múltipla possui curto período ou longo períodos. Nas de curto período não é possível se discriminar os pulsos correspondentes à primária e à múltipla; já nas de longo período, as reflexões primárias e a múltipla aparecem como pulso distintos (Duarte, 2003) .

Segundo Yilmaz (2001), as reflexões múltiplas e reverberações são atenuadas usando técnicas baseadas na periodicidade ou na diferença na velocidade de *moveout* entre as múltiplas e as primárias. Tais técnicas podem ser aplicadas em vários domínios, entre eles o domínio CDP, ideal para explorar a periodicidade e o critério de discriminação da velocidade.

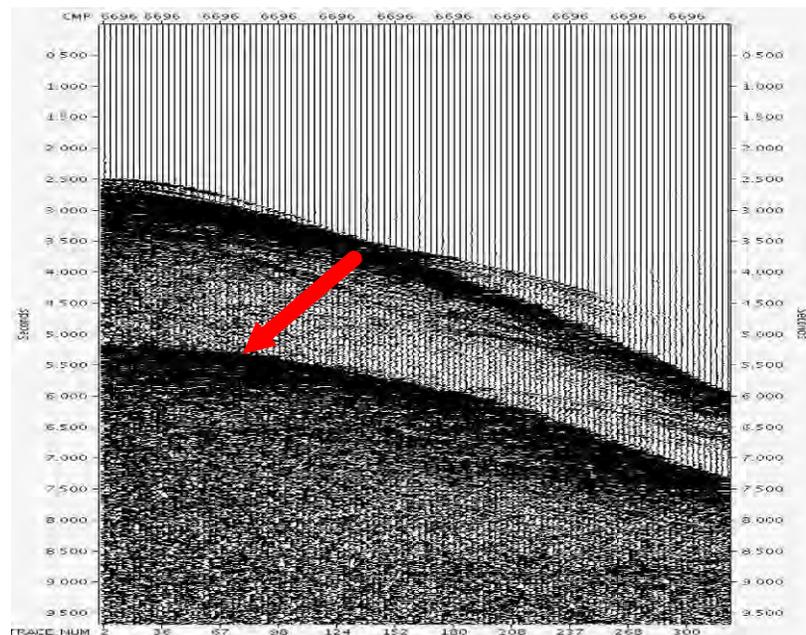


Figura 4.12 - Demonstração do ruído.

Nas múltiplas são aplicados três processos distintos com o intuito de diminuir a intensidade do ruído.

4.8.2.3.1 Método de eliminação de reflexões múltiplas relacionadas à superfície - 2D SRME

O método de SRME (*surface related multiple elimination*) foi criado por Anstey e Newman em 1967, os quais observaram que a autoconvolução dos traços de um dado com reflexões primárias gerava as reflexões múltiplas relacionadas à superfície, como reverberações por exemplo. A partir dos dados que continham apenas as múltiplas era realizado uma subtração adaptativa, isto é, era aplicado um filtro para escalonar as amplitudes e a fase dos traços para que as múltiplas pudessem ser subtraídas do dado (Ferreira, 2009).

A aplicação desse método permite que as múltiplas sejam previstas através de um procedimento de inversão do dado sísmico, sem a necessidade de informações sobre a estrutura em subsuperfície (Verschuur e Kabir, 1992). A medição da assinatura da fonte pode complementar e aumentar a eficiência do método visto que o mesmo pode ser bastante efetivo na remoção de múltiplas geradas a partir de geologias complexas (Ferreira, 2009).

A partir desse conceito, o primeiro algoritmo utilizado é o SRME, que possui uma característica muito particular para ser executado: a distância entre os tiros (37,5m) e entre os receptores (25m) devem ser iguais. A fim de satisfazer as condições do primeiro algoritmo que será aplicado nas múltiplas, são feitas duas interpolações: a primeira para os tiros e a segunda para os traços.

Interpolação de tiros

Os tiros de entrada são lidos e armazenados no formato de cubo, onde a direção x representa o número de estações receptoras, a direção y, o número de estações de tiros e a direção z, o tempo. A família de tiros interpolados é então gerada com a interpolação ‘2.5 D’.

O cubo de dados é “janelado” em todas as três direções com a intenção de criar sub volumes onde a interpolação atua. Esses sub-volumes são sobrepostos para permitir a combinação dos resultados de interpolação. Isto é feito para se adequar à premissa do algoritmo de que eventos sísmicos são lineares ou planares dentro de cada sub-volume. Vale lembrar que o NMO é aplicado antes da interpolação para continuar em conformidade com este pressuposto.

No método ‘2.5 D’, a interpolação é realizada somente no tiro, depois é aplicada a transformada de Fourier para o domínio fx-Ky. O operador utilizado é então uma média de todos os receptores na janela de tempo-espaco, que deverá produzir operadores mais confiáveis do que um simples interpolador 2D no domínio de receptor. Os parâmetros utilizados para essa interpolação seguem na tabela 4.4.

Tabela 4.4 - Parâmetros utilizados para interpolação de tiros.

Valores dos parâmetros:

Espaçamento entre os tiros da fonte do dado de entrada: 37,5 m

Espaçamento entre os tiros da fonte do dado de saída: 12,5 m

Comprimento da janela de tempo: 512 ms

Sobreposição de tempo: 256 ms

Mergulho máximo: 40 ms/traço

Largura da janela na direção do detector: 20 traços

Largura da janela na direção da fonte: 20 traços

Sobreposição da janela n direção do detector: 6 traços

Sobreposição da janela n direção da fonte: 6 traços

Interpolação dos traços

Os traços também foram armazenados no formato de cubo, para uma melhor manipulação dos dados. A partir daí, eles são interpolados no fator 2 para 1 no domínio F-K, ou seja, entre dois traços será interpolado apenas um traço.

Depois da interpolação, a correção NMO é removida. Os valores utilizados nesse algoritmo seguem na tabela 4.5.

Tabela 4.5 - Parâmetros utilizados para interpolação dos traços.

Valores dos parâmetros:

Espaçamento entre os traços de entrada: 25m

Espaçamento entre os traços de saída: 12,5m

Fator de interpolação: 2 para 1

Tipo de interpolação: Interpolação F-K

Tiros e traços interpolados com nova geometria

Após a interpolação, o espaçamento dos tiros passou de 37,5m para 12,5m e o espaçamento entre receptores passou de 25m para 12,5m. É necessário adequar os dados à nova geometria dos traços, de modo a apresentar as novas condições dos dados.

Reconstrução do afastamento zero

A reconstrução do afastamento zero é usada para gerar um dado sísmico com uma nova distância de afastamento entre a fonte e o receptor, ou seja, o afastamento mais próximo nesta linha do projeto é 180m, após esse procedimento, o afastamento mais próximo será 0m. Isso normalmente é utilizado para eliminação de múltiplas, supressão de *ground-roll* e de alguns ruídos lineares.

Tabela 4.6 - Parâmetros utilizados para reconstrução do afastamento.

Valores dos parâmetros:

Afastamento de referência para definição do moveout: 2300m

Moveout mínimo no afastamento de referência: -295ms

Moveout máximo no afastamento de referência: 295ms

Mínima frequência para reconstrução: 3Hz

Máxima frequência para reconstrução: Nyquist

Tipo de curvatura: Parabólica

2D SRME (Eliminação de múltiplas relacionadas à superfície) – Preditor de múltiplas intracamadas (PMI)

Como foi dito anteriormente, o preditor de múltipla intracamada prevê múltiplas presentes nos dados pré-empilhamento. O PMI atua tanto nas múltiplas cuja trajetória dos raios múltiplos incluem uma reflexão na superfície, quanto nas múltiplas cuja trajetória dos raios múltiplos incluem uma reflexão na subsuperfície de seus eventos primários constituintes usando inversão campo de onda baseado na integral de Kirchhoff.

O PMI não depende da discriminação do NMO. A única informação de subsuperfície necessária é a leitura dos tempos onde foram gerados os eventos primários, assim o PMI consegue prever as múltiplas e gerar um modelo.

Para satisfazer à condição de modelagem – fonte e receptor devem possuir o espaçamento igual ou pelo menos um deve ser múltiplo do outro – o dado de entrada no PMI foi interpolado tanto nos tiros quanto nos traços, a fim de alcançar o mesmo espaçamento, ambos com 12,5m. Em seguida, os afastamentos dessas novas famílias são interpolados até o afastamento zero com a geometria regular. Finalmente, para modelar foi aplicado um deslocamento no traço de 9ms, devido à correção do cabo e se torna possível a previsão das múltiplas no seu tempo correto. Após realizar a modelagem, foi possível observar o modelo com um conjunto de planos de afastamento.

O resultado do 2D SRME é uma combinação, do dado real e o modelo, e uma subtração utilizando uma série de filtros quadrados adaptativos no domínio de afastamento.

Tabela 4.7 - Parâmetros utilizados para o PML.

Valores dos parâmetros:

Modelo: 2D

Arranjo de frequência do modelo: 3 até 90 Hz

Tempo de suavização: 100%

Afastamento de suavização: 20%

Filtro adaptativo de mínimos quadrados e subtração

O algoritmo de filtro adaptativo de mínimos quadrados subtrai dos traços sísmicos reais os dados sísmicos existentes no modelo. A cada janela de sobreposição especificada, o filtro é calculado e é aplicado o que melhor se adapta ao modelo de dados sísmicos no sentido dos mínimos quadrados. Os traços do modelo filtrado são então subtraídos do dado sísmico. Os valores utilizados pelo filtro se encontram na tabela 4.8.

Tabela 4.8 - Parâmetros utilizados pelo filtro adaptativo.

Valores dos parâmetros:

Domínio no qual ocorre o processamento: Afastamento (Passo 1)

Comprimento do filtro: 41

Comprimento do filtro de antecipação 20.5

Comprimento da janela temporal: 12000ms

Largura da janela espacial: 150 traços

Domínio no qual ocorre o processamento: Afastamento (Passo 2)

Comprimento do filtro: 35

Comprimento do filtro de antecipação 17.5

Comprimento da janela temporal: 6000ms

Largura da janela espacial: 21 traços

Domínio no qual ocorre o processamento: Afastamento (Passo 3)

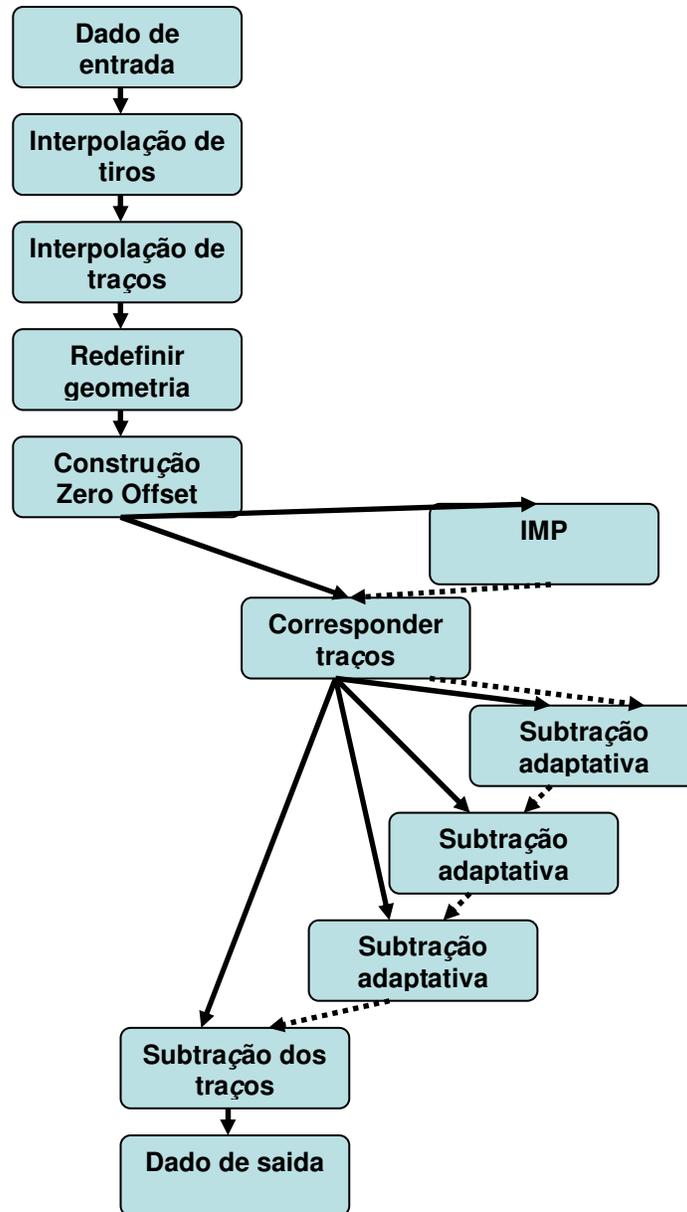
Comprimento do filtro: 25

Comprimento do filtro de antecipação: 12.5

Comprimento da janela temporal: 500ms

Largura da janela espacial: 17 traços

O fluxo 4.6 esquematiza o processo de remoção das múltiplas através do SRME.



Fluxo 4.6 - Primeiro algoritmo para atenuação das múltiplas - 2D SRME.

4.8.2.3.2 Remoção das múltiplas com a Transformada Radon (WLS Radon)

A transformada parabólica tem sido amplamente utilizada no processamento sísmico como ferramenta na atenuação de reflexões múltiplas. Sua aplicação gera resultados bastante satisfatórios na manipulação de eventos hiperbólicos (Ferreira, 2009).

Durante alguns anos, o algoritmo de atenuação de múltiplas, através da Transformada Radon, tem sido a segunda opção para eliminação desse ruído coerente na empresa. Há um grande interesse na qualidade da resolução, visto que a melhoria da mesma proporciona melhor identificação e

discriminação entre reflexões múltiplas e primárias. Como foi dito no tópico 4.7.2, apesar da grande importância em eliminar a energia responsável pelas múltiplas contidas no dado, a transformada inversa é extremamente complexa. Uma precisa inversão de domínio garantirá a eficiência do método – visando satisfazer essa eficiência, uma série de testes foram feitos buscando os melhores valores amostrais para o *moveout*. A técnica de inversão de domínio mais utilizada nas Transformadas Radon é a técnica dos Mínimos Quadrados, exatamente a mesma que foi explicada anteriormente neste trabalho.

De fato, após a correção NMO, o *moveout* residual das primárias e múltiplas possui uma curvatura que pode ser aproximada em uma parábola e, assim, os eventos podem ser mais bem separados no domínio da frequência. Ao aplicar a Transformada de Radon Parabólica foi possível estimar e remover a energia das reflexões múltiplas (Ferreira, 2009).

Contudo, foi constatado que a inversão pelo método dos Mínimos Quadrados traz melhores resultados que outros métodos de inversão, mas o dado pode continuar com artefatos visíveis. Isto ocorre devido à pequena diferença no *moveout* dos eventos sísmicos, logo quando é feito o controle de qualidade nas seções pré empilhamento, pode-se notar os artefatos. Caso fosse possível visualizar artefatos, aumentou-se a diferença entre o *moveout*.

O algoritmo atua da seguinte forma: os ruídos coerentes indesejáveis são isolados no domínio τ - p , sofrem a transformada inversa (voltando para o domínio t - x), e então são subtraídos do dado original. A energia das múltiplas pode ser isolada no domínio τ - p porque eventos com diferentes velocidades possuem características diferentes nesse domínio.

Na atenuação das múltiplas através do Radon, três campos de velocidade são necessários:

- O campo de velocidade estimado para o empilhamento, V_s .
- A velocidade dominante das múltiplas de interesse, V_d .
- A velocidade máxima para atenuação das múltiplas, V_m . Ela pode ser igual a V_d porém é mais comum ser um percentual de V_s e situa-se entre V_d e V_s .

O dado ordenado em CMP é corrigido primeiramente para NMO com a velocidade V_d , o que significa que as primeiras reflexões são supercorrigidas enquanto as múltiplas estão geralmente alinhadas ou subcorrigidas após o NMO. Por conveniência, refere-se como supercorrigidas, o dado que possui um mergulho negativo (*dip* – o tempo diminui a medida que aumenta o afastamento), o dado subcorrigido que possui um mergulho positivo (o tempo aumenta com o aumento do afastamento) e alinhado significa que não houve mudanças à medida que aumenta o afastamento.

Vale lembrar que neste caso, os dados foram transformados para o domínio τ - p usando a transformada Radon Parabólica, e, para satisfazer tais condições, o NMO aplicado anteriormente tem

que ser hiperbólico.

O arranjo dos “traços P” foi escolhido para cobrir pelo menos o arranjo que indica a energia das múltiplas que devem ser removidas. Não é necessário incluir os dados referentes às primárias nessa transformada, embora sua inclusão não traga problemas maiores. Como os traços dentro de um conjunto não possuem offsets de zero a infinito, um filtro de compensação de geometria precisa ser aplicado. Este filtro é determinístico, ou seja, é baseado unicamente na geometria dos dados de entrada, e é utilizado para concentrar a energia no domínio τ - p . Outro requisito imposto seria o limite de “traços P”, o que significa que a compensação geométrica foi feita usando a “deconvolução P”, que aplica um filtro através dos “traços P” (ao invés de utilizar os “mínimos quadrados”). Um filtro separado foi computado e aplicado a cada frequência temporal.

Para refinar ainda mais a construção do modelo das múltiplas, partes do espaço tau-p representam as primárias que foram zeradas baseadas no conhecimento da velocidade, V_d , usada no NMO e na velocidade das múltiplas, V_m . Com esse propósito, a energia primária é assumida para quaisquer dados com velocidade maior que V_m . Isso possibilita a variação do tempo no campo de velocidade das múltiplas o qual não é atingido limitando o arranjo de “traços P”. V_m não precisa ser exatamente a velocidade real das múltiplas, mas deve ser mais rápida do que a das múltiplas de interesse, e, ainda, ser mais lenta que a velocidade das primárias.

A transformada inversa de τ - p e o NMO inverso (remoção da velocidade NMO) produzem um modelo de múltiplas que é subtraído do dado original para gerar um dado final com as múltiplas atenuadas.

Particularmente neste projeto, com um fundo oceânico muito irregular e complexas múltiplas estruturais, foi decidido aplicar o Radon somente nas partes mais profundas (a partir de 1000 ms). O algoritmo foi aplicado usando a velocidade da água. A tabela 4.9 apresentada os parâmetros utilizados neste dado.

Tabela 4.9 - Parâmetros utilizados pelo WLS Radon.

Valores dos parâmetros:

Campo de velocidade: Velocidades primárias

Número de “traços p” gerados: 256

Afastamento de referência: 8115 m

Moveout no afastamento de referência do dado de entrada:

Mínimo *moveout* (ex: para o primeiro “traço p”): -600ms

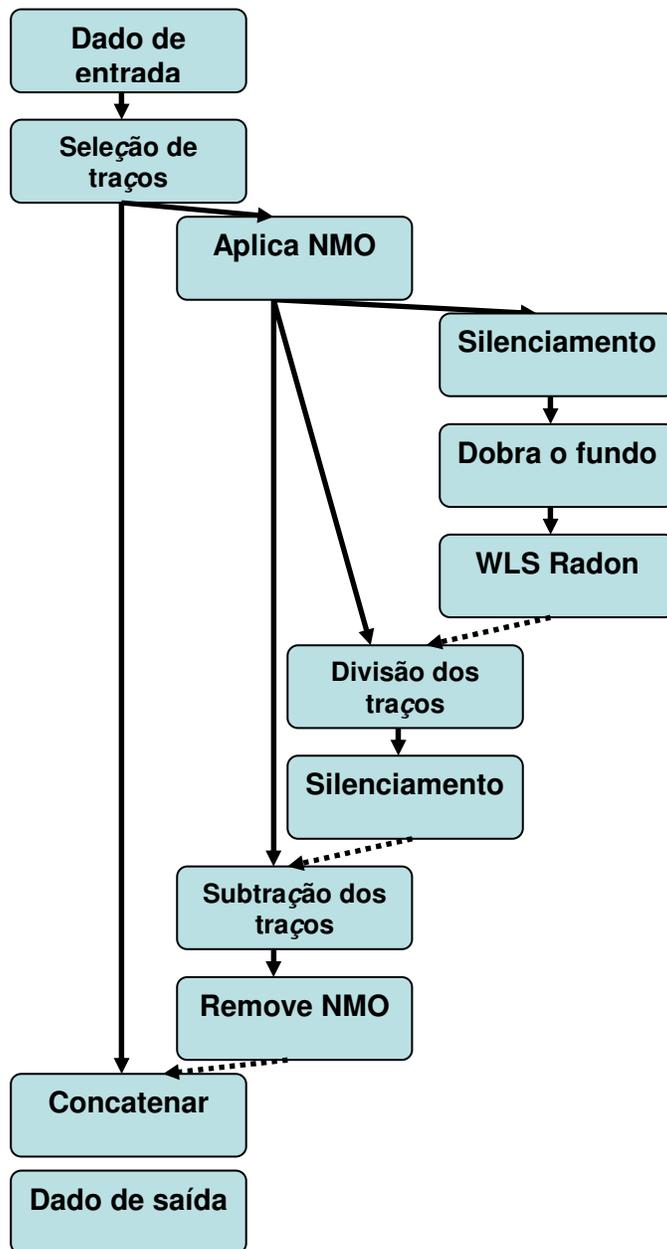
Máximo *moveout* (ex: para o último “traço p”): 3500ms

Definição dos *moveouts* para o sinal:

Mínimo *moveout*: -600ms

Máximo *moveout*: 500ms

O esquema para remoção das múltiplas através do Radon está representado no fluxo 4.7.



Fluxo 4.7 - Segundo algoritmo para atenuação das múltiplas - WLS Radon.

4.8.2.3.3 PRIMAL (Post-Radon Isolation Multiple Algorithm process)

O algoritmo PRIMAL é de propriedade da WesternGeco Processamento Sísmico. Foi utilizado para remover algumas múltiplas remanescentes dos CMP que já passaram por alguns métodos de remoção das múltiplas anteriormente. Essas famílias são caracterizadas muitas vezes por possuir múltiplas de diferentes formatos, tais como:

- Energia concentrada nos traços mais próximos, onde a velocidade de discriminação entre as primárias e as múltiplas é muito pequena para ser distinguida na transformada Radon.
- Pequenas quantidades de energia enviesada que podem ter tido um mergulho muito acentuado ou frequências altas que podem ter sido amostradas incorretamente na transformada Radon.
- Energia difratada das múltiplas que não segue o padrão assumido pelo método de atenuação de múltiplas do Radon, onde elas não descrevem uma parábola com o topo no (ou próximo do) afastamento zero. Essas múltiplas serão atenuadas com o Radon convencional, mas perderão alguma energia nos afastamentos mais distantes do zero.

A PRIMAL utiliza um processo de decomposição espectral para identificar e então atenuar as formas das múltiplas remanescentes. Se as múltiplas remanescentes forem transientes, esse processo será eficaz.

Tabela 4.10 - Parâmetros utilizados pela PRIMAL.

Valores dos parâmetros:

Domínio no qual ocorre o processamento: CMP (Passo 1)

Arranjo de frequência a ser processada: 20 Hz até Nyquist

Filtro médio: 31

Threshold: 0 6

6000 3

Janela de processamento:

Janela flat com comprimento de 750 ms

Sobreposição no zero offset: 25 %

Domínio no qual ocorreu o processamento: CMP (Passo 2)

Arranjo de frequência a ser processada: 15 Hz até Nyquist

Filtro médio: 31

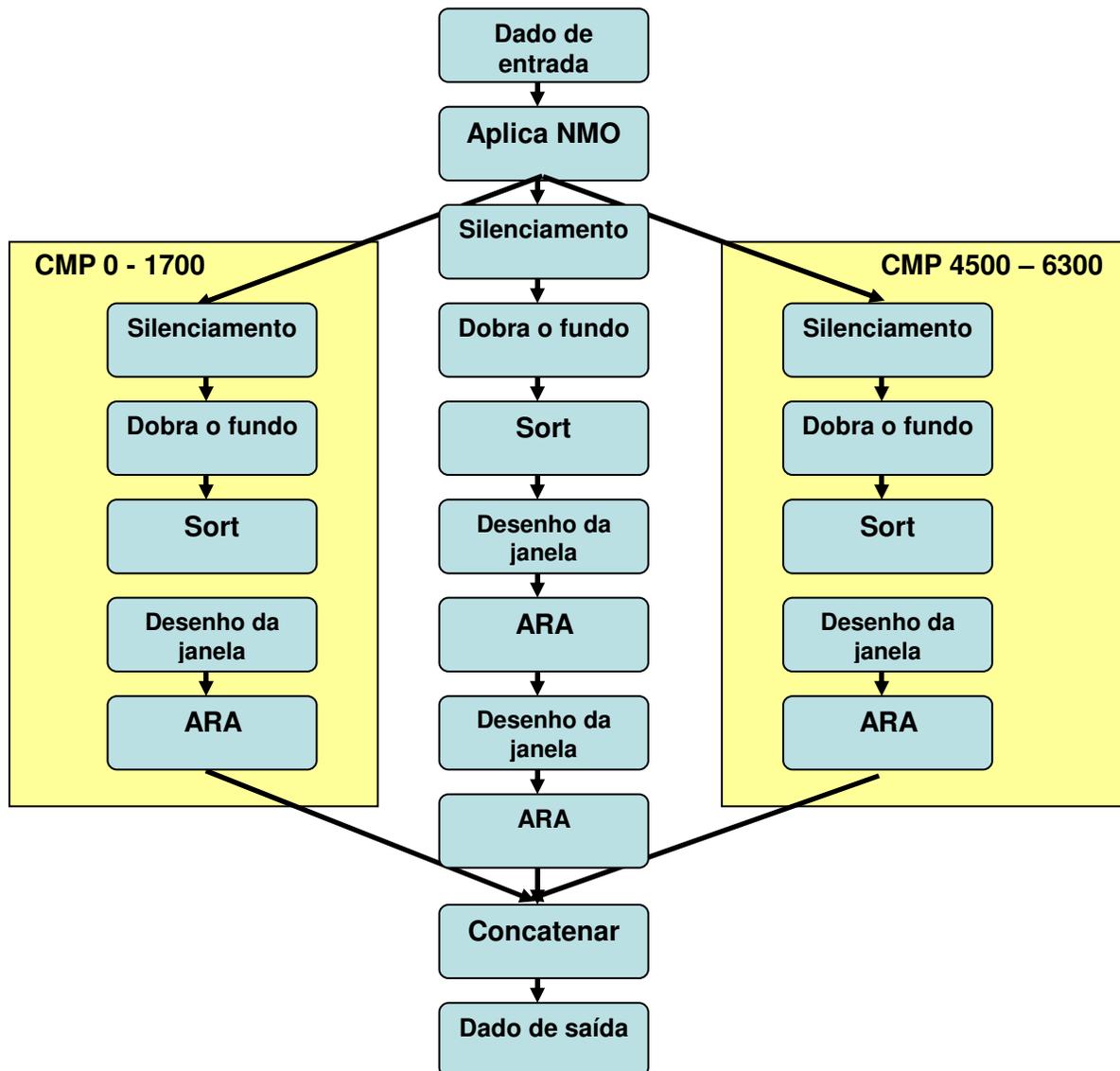
Threshold: 0 6

6000 3

Janela de processamento:

Janela flat com comprimento de 500 ms

Sobreposição no zero offset: 25 %



Fluxo 4.8 - Terceiro algoritmo para atenuação das múltiplas - PRIMAL.

4.8.2.4 Sorteio para o domínio de afastamento-tempo e separação

A partir deste momento, começam algumas manipulações para o migração do dado. O primeiro passo foi organizar o dado em 105 planos de afastamento.

Tabela 4.11 - Parâmetros utilizados para sorteio dos dados no domínio de afastamento.

Valores dos parâmetros:

Grupo de afastamento	Afastamento mínimo	Afastamento máximo	Afastamento central
1	143	237.999	190
2	238	312.999	265
3	313	387.999	340
4	388	462.999	415
5	463	537.999	490
6	538	612.999	565
7	613	687.999	640
8	688	762.999	715
9	763	837.999	790
10	838	912.999	865
11	913	987.999	940
12	988	1062.999	1015
13	1063	1137.999	1090
14	1138	1212.999	1165
15	1213	1287.999	1240
16	1288	1362.999	1315
17	1363	1437.999	1390
18	1438	1512.999	1465
19	1513	1587.999	1540
20	1588	1662.999	1615
21	1663	1737.999	1690
22	1738	1812.999	1765
23	1813	1887.999	1840
24	1888	1962.999	1915
25	1963	2037.999	1990
26	2038	2112.999	2065
27	2113	2187.999	2140
28	2188	2262.999	2215
29	2263	2337.999	2290
30	2338	2412.999	2365
31	2413	2487.999	2440
32	2488	2562.999	2515
33	2563	2637.999	2590
34	2638	2712.999	2665
35	2713	2787.999	2740
36	2788	2862.999	2815
37	2863	2937.999	2890
38	2938	3012.999	2965
39	3013	3087.999	3040
40	3088	3162.999	3115
41	3163	3237.999	3190
42	3238	3312.999	3265
43	3313	3387.999	3340
44	3388	3462.999	3415
45	3463	3537.999	3490
46	3538	3612.999	3565
47	3613	3687.999	3640
48	3688	3762.999	3715
49	3763	3837.999	3790
50	3838	3912.999	3865
51	3913	3987.999	3940
52	3988	4062.999	4015
53	4063	4137.999	4090
54	4138	4212.999	4165
55	4213	4287.999	4240
56	4288	4362.999	4315
57	4363	4437.999	4390
58	4438	4512.999	4465
59	4513	4587.999	4540
60	4588	4662.999	4615
61	4663	4737.999	4690

62	4738	4812.999	4765
63	4813	4887.999	4840
64	4888	4962.999	4915
65	4963	5037.999	4990
66	5038	5112.999	5065
67	5113	5187.999	5140
68	5188	5262.999	5215
69	5263	5337.999	5290
70	5338	5412.999	5365
71	5413	5487.999	5440
72	5488	5562.999	5515
73	5563	5637.999	5590
74	5638	5712.999	5665
75	5713	5787.999	5740
76	5788	5862.999	5815
77	5863	5937.999	5890
78	5938	6012.999	5965
79	6013	6087.999	6040
80	6088	6162.999	6115
81	6163	6237.999	6190
82	6238	6312.999	6265
83	6313	6387.999	6340
84	6388	6462.999	6415
85	6463	6537.999	6490
86	6538	6612.999	6565
87	6613	6687.999	6640
88	6688	6762.999	6715
89	6763	6837.999	6790
90	6838	6912.999	6865
91	6913	6987.999	6940
92	6988	7062.999	7015
93	7063	7137.999	7090
94	7138	7212.999	7165
95	7213	7287.999	7240
96	7288	7362.999	7315
97	7363	7437.999	7390
98	7438	7512.999	7465
99	7513	7587.999	7540
100	7588	7662.999	7615
101	7663	7737.999	7690
102	7738	7812.999	7765
103	7813	7887.999	7840
104	7888	7962.999	7915
105	7963	8037.999	7990

4.8.2.5 2-D RNA

O 2D RNA (*Random Noise Attenuation*) diferencia eventos coerentes (lineares) de ruídos aleatórios utilizando a técnica de filtragem F-X, que consiste em selecionar automaticamente um intervalo de mergulhos (*dip*) com base nos mergulhos do dado. O processo opera em janelas que possuem os eixos em tempo (t) e largura (x), que são 1D. A transformada de Fourier passa os dados do domínio do tempo para o domínio da frequência, gerando a janela de dados F-X. Operando separadamente em cada frequência, o filtro de Wiener (erro de predição) é calculado e aplicado no dado na direção x. O processo assume que a energia prevista (*predicted energy*) na direção x é sinal e a energia restante é ruído aleatório (que será rejeitada no dado de saída).

Janelas adjacentes de dados são misturadas espacialmente antes da transformada inversa e temporalmente após a transformada inversa para chegar ao resultado final.

Tabela 4.12 - Parâmetros utilizados pelo 2D RNA.

Valores dos parâmetros:

Largura da janela: 51 traços
Largura do operador 7 traços
Sobreposição dos traços: 7 traços

Comprimento da janela de tempo: 500 ms
Sobreposição de tempo: 100 ms

4.8.2.6 Filtro Q inverso

O filtro Q serve para compensar a perda das altas frequências causadas pela absorção de energia intrínseca nas rochas, à medida que a onda se propaga no tempo. Isso acaba dando um comportamento não-estacionário no formato da onda (*waveform*), associando os eventos refletidos a diferentes tempos.

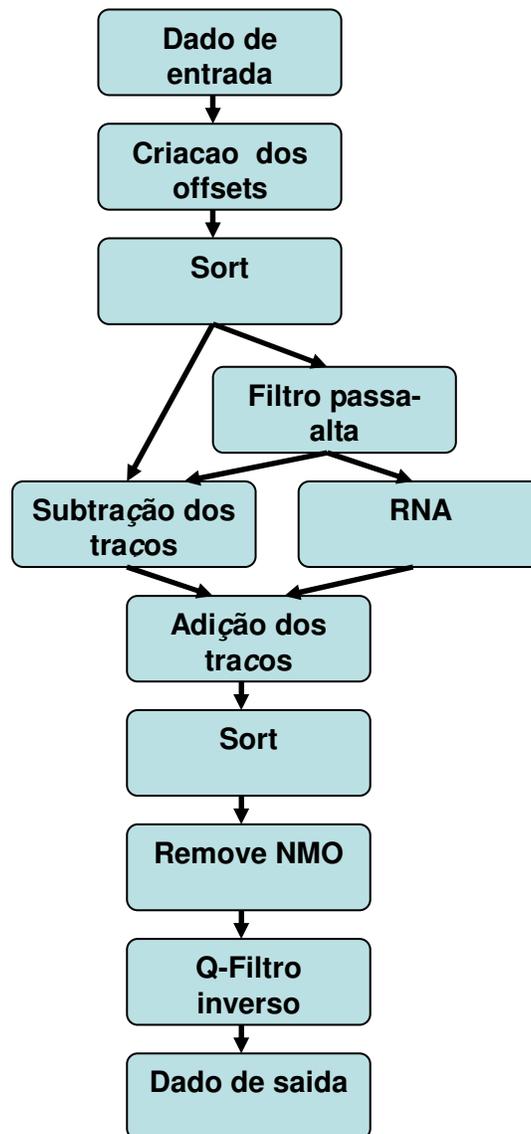
Para recuperar essa perda, uma compensação que varia em relação ao tempo foi aplicada usando um algoritmo baseado no modelo Q de frequência constante de atenuação da Terra de Futterman. Segundo Yilmaz (2001), a aplicação do filtro Q inverso requer conhecimentos sobre o fator Q, que normalmente é um número constante. Para esse trabalho, o valor escolhido foi 150, determinado a partir do método de razão espectral, mas em outros casos pode-se escolher o valor de Q através da previsão da rocha existente no local. Walters, em 1981, criou uma tabela referenciando o valor de Q a sua respectiva rocha. Através dessa tabela nota-se que o valor de 150 encontra-se entre os arenitos e argilitos.

Tabela 4.13 - Parâmetros utilizados pelo Filtro inverso Q.

Valores dos parâmetros:

Tipo de compensação : Somente em fase
Valor de Q : 150
Fonte do valor Q : Spectral Ratio Method

Tipo de Rocha	Constante de atenuação - Q
Basalto	555
Granito	300
Argilito	200
Arenito	125
Folhelho	75



Fluxo 4.9 - Responsável por algumas manipulações pré migração.

4.8.2.7 Conversão para fase zero

De acordo com Yilmaz (2001), a deconvolução pré empilhamento visa melhorar a resolução temporal a partir da remoção da assinatura da fonte (*wavelet*) contida no traço sísmico.

Neste trabalho, foi feita uma etapa de deconvolução “dessignatura” anterior ao início do tratamento dos dados, e um filtro de fase mínima foi aplicado ao conjunto de dados, mas na fase final do tratamento dos dados (antes da migração), ela deve ser zero. Nesta etapa, um operador de conversão de fase zero foi aplicado ao conjunto de dados.

Tabela 4.14 - Parâmetros utilizados para conversão do dado em fase zero.

Valores dos parâmetros:

Assinatura de campo: Computada a partir dos parâmetros do arranjo da fonte
Wavelet de saída desejada : Fase zero

Operador da assinatura de deconvolução:

Número de coeficientes: 251

Amostra do operador de tempo-zero: 126

Intervalo de amostragem: 4 ms

Coeficientes: (Começa na coluna 1 e termina na coluna 8)

1	2	3	4	5	6	7	8
2.13E-05	-1.06E-04	7.81E-04	-0.008512438	-0.007339113	-1.66E-04	-2.64E-04	5.04E-05
1.70E-05	-1.10E-04	9.32E-04	-0.009716693	-0.001557852	-5.79E-06	1.57E-04	1.25E-04
3.85E-05	-2.21E-04	7.10E-04	-0.010059853	0.00123636	2.63E-04	2.69E-04	2.09E-05
5.82E-05	-9.44E-05	0.001144084	-0.017168555	-0.001077202	-0.001081815	5.44E-04	4.42E-05
6.49E-05	-2.47E-04	6.88E-04	-0.010050736	0.001879617	8.89E-05	4.14E-04	-2.65E-05
1.10E-04	-8.35E-05	7.87E-04	-0.007015222	-0.007902591	-7.09E-04	4.41E-04	-6.98E-05
1.20E-04	-1.85E-04	0.001075013	-0.011904838	-5.14E-04	-2.77E-04	5.11E-04	-5.62E-05
1.50E-04	-2.33E-04	-9.41E-05	-0.001899396	0.001292786	-2.24E-04	4.64E-04	-1.08E-04
1.78E-04	-2.56E-04	0.001685361	-0.012371547	-0.004500961	-6.47E-04	5.52E-04	-5.45E-05
1.70E-04	-6.11E-04	0.001244463	-0.00750594	0.002715249	-1.42E-04	4.67E-04	-6.73E-05
2.07E-04	-5.04E-04	-0.001009254	0.001739022	-0.002793769	-3.60E-04	4.92E-04	-4.40E-05
1.89E-04	-8.50E-04	4.36E-04	-0.009362455	0.003012765	8.88E-06	4.46E-04	-1.69E-05
2.00E-04	-8.00E-04	6.81E-04	0.019523358	0.002141601	-6.47E-04	3.88E-04	-2.86E-05
2.12E-04	-7.13E-04	0.003456127	-0.020245098	-0.001185199	-8.35E-04	4.23E-04	
1.82E-04	-8.41E-04	0.012259603	0.011712072	0.002757079	-8.19E-04	3.28E-04	
2.20E-04	-4.38E-04	0.010491565	0.014614004	0.001114595	-0.001145687	3.63E-04	
1.85E-04	-7.74E-04	0.007548009	-2.22E-04	0.005175523	-9.05E-04	3.36E-04	
1.90E-04	-3.81E-04	0.007501074	0.070693061	-5.46E-04	-0.001265052	2.45E-04	
2.09E-04	-5.33E-04	0.003212367	-0.041061297	0.001030522	-0.001135462	3.36E-04	
1.38E-04	-5.55E-04	7.10E-05	0.123889647	0.003316852	-0.001059796	2.17E-04	
1.93E-04	-2.23E-04	-0.00402798	0.337376654	-5.22E-04	-0.001108039	2.87E-04	
1.23E-04	-7.25E-04	-0.002538802	-0.02238391	1.32E-04	-0.001046518	2.95E-04	
8.73E-05	-1.82E-04	-0.001447635	-0.1834151	-0.005353642	-9.11E-04	1.91E-04	
5.17E-05	-5.00E-04	-0.002235109	-0.01036856	-0.002531164	-6.62E-04	2.99E-04	
-4.33E-05	-3.36E-04	-0.002986377	-0.077755168	5.07E-04	-6.20E-04	1.40E-04	
8.61E-06	-1.85E-04	-0.005319215	-0.031698957	-1.90E-05	-3.93E-04	2.10E-04	
-8.20E-05	-3.66E-04	-7.34E-05	-0.00195049	0.004469962	-4.46E-04	1.28E-04	
-1.80E-05	7.95E-05	-0.003441005	-0.039970476	0.009291895	-3.36E-04	9.00E-05	
-8.37E-05	-1.86E-04	-0.006149068	2.81E-04	0.01067388	-4.64E-04	1.25E-04	
-8.98E-05	1.73E-04	-0.004063467	-0.027608959	0.005168751	-7.99E-04	2.10E-06	
-4.98E-05	2.31E-04	-0.006704655	-0.003881312	0.003991757	-9.44E-04	1.05E-04	
-1.64E-04	5.03E-04	-0.003880427	-0.002622567	0.001192264	-0.001093793	1.86E-05	
-3.73E-05	6.79E-04	-0.007893373	-0.009503799	-7.25E-04	-8.57E-04	7.85E-05	
-1.68E-04	6.33E-04	-0.009422686	-6.35E-04	0.002316488	-7.11E-04	9.51E-05	

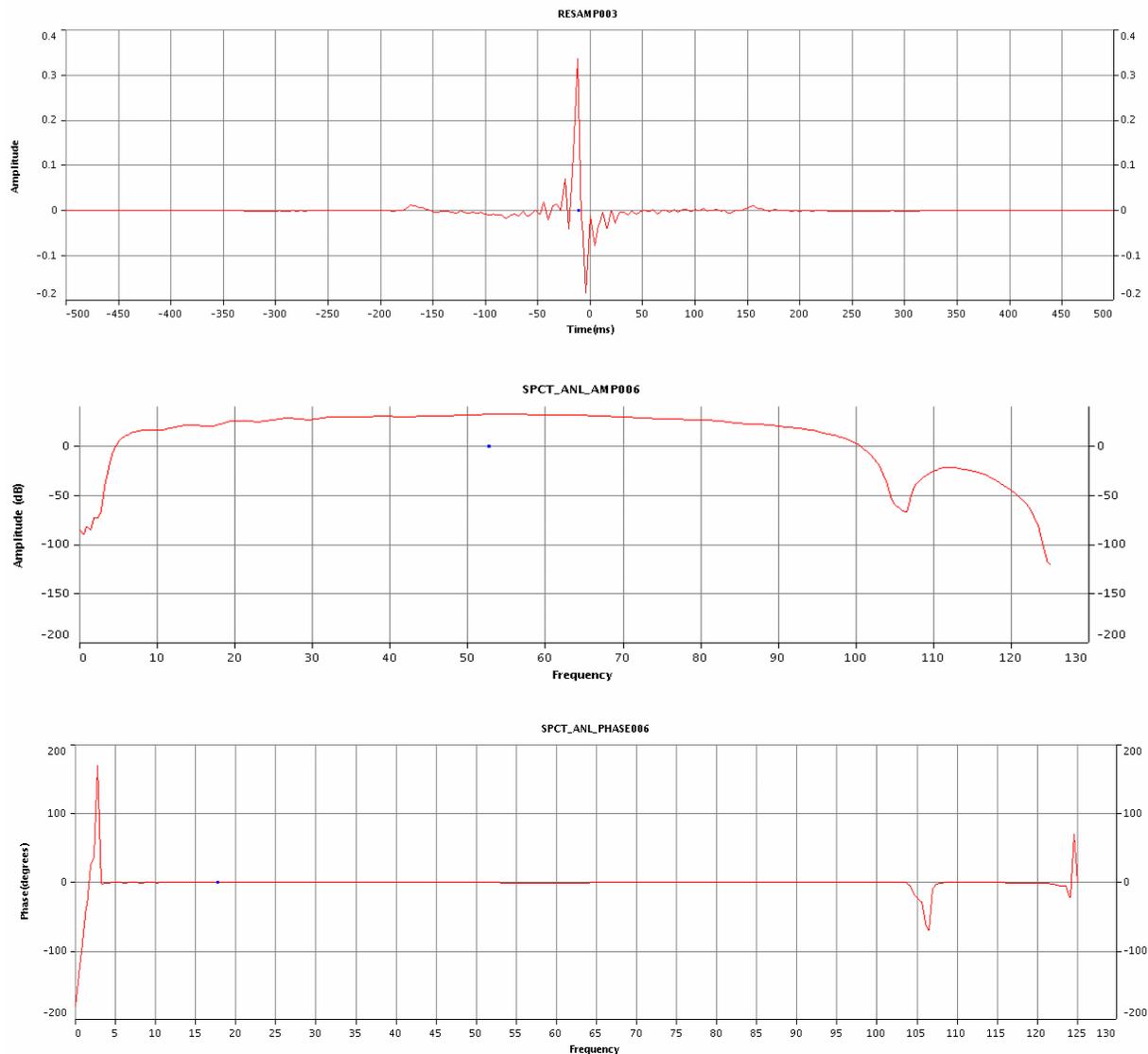


Figura 4.13 - Em (a) filtro para conversão em fase zero, em (b) a análise espectral de amplitude e em (c) a análise espectral em fase.

4.8.2.8 3D Grid

A Migração Kirchhoff em tempo é um algoritmo que deve ser aplicado em um dado 3D. Para atender a esta premissa, a rede de informações 3D deve ser inserida no cabeçalho para um futuro rastreamento.

Para construir o grid, coordenadas X e Y dos extremos das linhas que foram utilizadas no processamento anterior foram levadas em conta e um grande retângulo foi construído, que incluiu todas as linhas sísmicas 2D do projeto, inclusive a linha processada nesse trabalho. O tamanho da célula foi definido como 12,5 x 12,5 metros, pois satisfaz o intervalo de CMP tanto no mergulho (*dip*) quanto no azimute (*strike*).

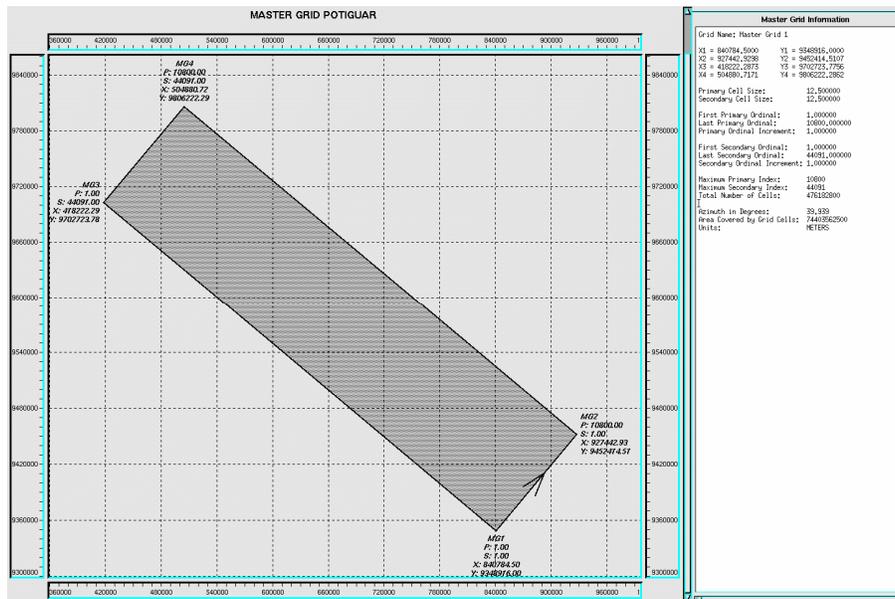


Figura 4.14 - Grid gerado para introduzir todas as linhas sísmicas do projeto principal.

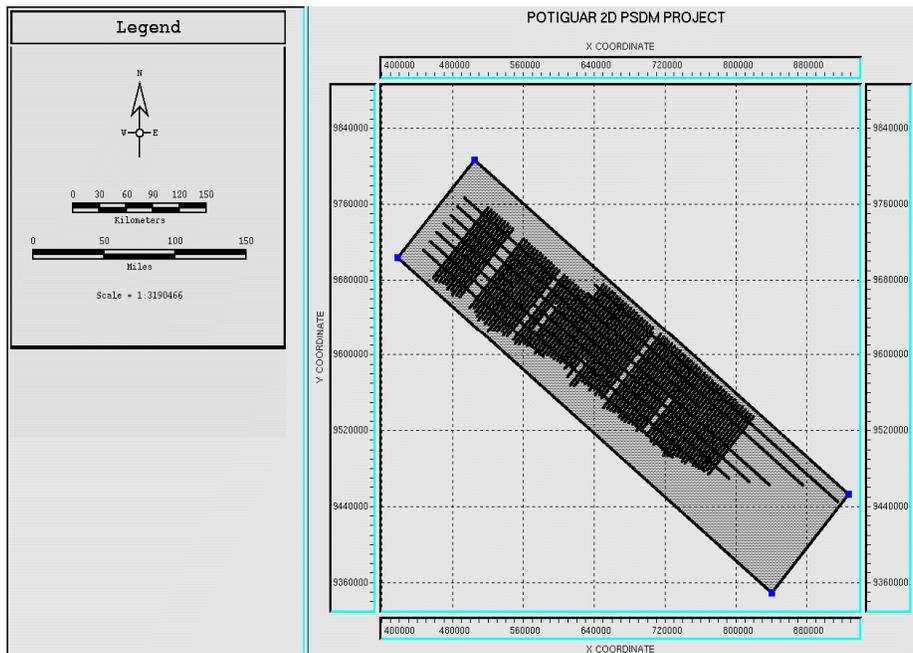


Figura 4.15 - Representação das linhas sísmicas envolvidas no projeto principal, a linha desse projeto se encontra na extremidade.

4.8.2.9 Ganho Programado

De acordo com Yilmaz (2001), vários tipos de ganho são usados na prática. Baseado no critério desejado, uma função de ganho é derivada do dado e multiplicada com as amplitudes em cada amostra de tempo, a fim de diminuir a diferença de amplitudes ao longo do tempo.

O algoritmo funciona da seguinte forma: é criada uma janela com o limite superior nos pontos selecionados do fundo oceânico, e que a relação do ganho irá variar a partir dos pares de tempo e fator

de ganho.

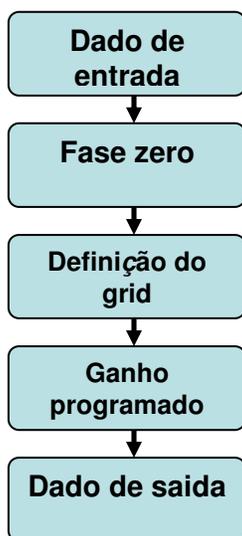
A curva do ganho em tempo foi construída a partir de uma interpolação linear entre um fator específico de ganho-em-tempo, e um fator de ganho que está sendo mantido constante antes do primeiro tempo que foi especificado. De acordo com a tabela 4.15, de 0ms a 11600ms o ganho está sendo linear; a partir de 11600ms a 11900ms o ganho diminui substancialmente e se mantém constante de 11900ms até 12290ms, que seria o tempo final do dado. Nesse caso o fator de ganho está valorizando ainda mais as regiões mais rasas. Isto se deve ao fato que a região de interesse, a bacia Potiguar, se localiza a aproximadamente 3000ms.

A função do ganho programado pode ser aplicada tanto no domínio CMP, quanto em uma seção empilhada com o objetivo de preservar as variações relativas das amplitudes na direção lateral.

Tabela 4.15 - Parâmetros utilizados pelo ganho programado.

Valores dos parâmetros:

Tempo (msec)	Fator de ganho
0	1
11600	1
11700	0.75
11800	0.5
11900	0
12290	0



Fluxo 4.10 - Outras manipulações anteriores a migração.

4.9 Migração

Segundo Yilmaz, a migração move as reflexões para a posição correta das superfícies e colapsa as difrações, assim aumenta a resolução espacial e produz uma imagem sísmica de subsuperfície. O objetivo da migração é recriar, através da seção empilhada, toda a seção geológica.

4.9.1 Migração Kirchhoff Pré empilhamento

O algoritmo de migração Kirchhoff funciona tanto em pré como em pós-empilhamento, utilizando o método de soma Kirchhoff. A imagem migrada é construída pela soma ponderada de amplitudes ao longo das curvas de difração. Essas difrações são determinadas pela viagem do tempo duplo desde a superfície até a subsuperfície que são calculadas a partir do campo de velocidade fornecido pelo usuário. A trajetória para a curva pode ser calculada usando a equação de raiz quadrada dupla tradicional (DSR) ou em um modo que compreende “raio de curvatura”. O “raio de curvatura” torna-se significativo com campos de velocidade que geralmente aumentam com a profundidade, e com grandes ângulos de reflexão e grandes mergulhos (normalmente superiores a 40-50 graus).

No pré empilhamento, a migração é realizada em planos de afastamento, pois o dado é 2D (caso o dado fosse 3D, seria feito em volume). Devido à grande demanda computacional, este processo é geralmente executado em plataformas de computação paralela.

4.9.1.1 Base teórica

A migração Kirchhoff é baseada no teorema de Green, uma equação matemática que indica uma relação entre as observações de um campo de onda sobre uma superfície fechada e o campo de onda em qualquer ponto dentro dessa superfície (Schneider, W.A. 1978). O nome de Gustav Kirchhoff foi associado com o método por causa de seu trabalho em 1882 sobre difração ótica. A fórmula de difração, que é derivado do teorema de Green, tem a forma de uma integral (ou uma soma, no caso dos dados amostrados discretamente) sobre observações feitas na superfície da terra. A imagem migrada, calculada através da soma, representa a refletância acústica ao longo de uma seção da terra sob as observações de superfície.

Os parâmetros chave para a migração são o ângulo de mergulho máximo, o limite máximo de abertura e os fatores espaciais *anti-aliasing*. A migração Kirchhoff normalmente fornece uma solução melhor quando as velocidades variam lateralmente e temporalmente. Uma característica dessa migração é a capacidade de definir um local de saída, linha ou volume, independente dos dados de entrada. Esta fornece os meios para introduzir um volume total 3D e a saída em linhas selecionadas ou em locais que são totalmente migrados. Essa opção de saída é particularmente útil em pré empilhamentos 3D, e para a

eficiente execução da migração, o algoritmo passa a produzir uma seleção de dados adequados para visualizar e analisar as velocidades, antes de executar a migração completa com todos os dados desejados. Sob tais circunstâncias, o processo não desperdiça recursos de computação, ou seja, migra somente os traços que contribuem para o perfil de saída.

A migração pré empilhamento é realizada através da migração de painéis de afastamento divididos em painéis individuais de afastamento zero, e durante a migração Kirchhoff os traços são corrigidos (*moveout*) efetivamente; porém, a NMO inversa, com a velocidade de migração, é normalmente aplicada sobre a saída dos dados. Isto permite uma análise de velocidade final e *moveout* para ser realizada sobre os dados antes de empilhá-los.

A migração Kirchhoff é um processo de soma, que é realizado apenas por traços de entrada que estão dentro de um raio de abertura (*aperture*) do ponto de saída. Para cada traço de entrada e saída de amostras, tempos de viagem são calculados para determinar a amostra adequada para somar. Valores das amostras de entrada são dimensionados e filtrados antes de somá-los. Os filtros *antialias*, como as funções de mergulho e da distância entre os pontos médio, são aplicados ao dado durante a migração.

4.9.1.2 Análise de velocidade para migração

O processo de migração Kirchhoff pré-empilhamento aplica efetivamente três correções de imagem tradicional (NMO, DMO e migração) em uma única etapa, que anteriormente seriam aplicadas individualmente. A migração necessita de um campo de velocidade para este processo.

A metodologia utilizada para este estudo foi a seguinte:

- Primeira passagem na migração deve ser feita com o campo de velocidade preliminar (mas com a suavização feita – smooth);
- Analisar as velocidades de saída no grid, apenas das famílias que possuem cobertura máxima, ou seja, deve-se analisar os afastamentos que estão completos para visualizar a cobertura da migração;
- Gerar um campo de velocidade nos moldes do grid, com as velocidades analisadas;
- Testar a suavização do campo de velocidade. Executar a migração Kirchhoff pré empilhamento no domínio do tempo (PrSTM) com o objetivo de avaliar os parâmetros de suavização.
- Última passagem pela migração Kirchhoff PrSTM utilizando a melhor velocidade escolhida (tanto na leitura, quanto na suavização). Saída de todos os dados.

A análise de velocidade é a etapa na qual os valores de velocidade que corrigem o *Normal Moveout* são escolhidos. Para tal foi utilizado o Velocity Interactive Analysis (InvA) de propriedade da

WesternGeco. Para melhor visualização dos horizontes foram abertas três janelas: a primeira janela com o *semblance* (velocidade x tempo), onde serão marcadas as velocidades de cada horizonte; a segunda janela com o CMP (Figura 4.16 (b)) em que esta sendo feita a análise; e a terceira janela com o empilhamento dos dados (Figura 4.16 (c)), apenas para ajudar a visualizar os horizontes.

Os curvas de velocidade foram marcadas em intervalos regulares de acordo com o dado no domínio CMP. A partir das curvas, são computados valores de velocidades semelhantes para os intervalos entres as curvas. Os pontos onde foram feitas as marcações são consistentes com os horizontes existentes no dado. Cada um desses pontos marcados representa um valor de velocidade RMS, que o software acumula na forma de tabela.

Segundo Vasconcellos (2009), o *semblance* é um espectro que apresenta o sismograma no plano velocidade x tempo (Figura 4.16 (a)). Esse plano é visualizado como uma janela cromática, cuja coloração varia de acordo com a coerência das amplitudes. Eventos com forte coerência aparecem como fortes manchas na cor amarela. Essas manchas recebem o nome de “*bull eyes*”, olhos de touro, pois as vezes se encontram na forma arredondada.

Esses “*bull eyes*” servem de guia para a marcação dos pontos na velocidade *RMS*, já que nesses pontos os eventos estão mais coerentes.

Um problema que ocorre com as múltiplas, é que essas também aparecem como “*bull eyes*” em velocidades mais baixas do que as reflexões primárias, e por isso podem representar certa confusão na marcação das velocidades.

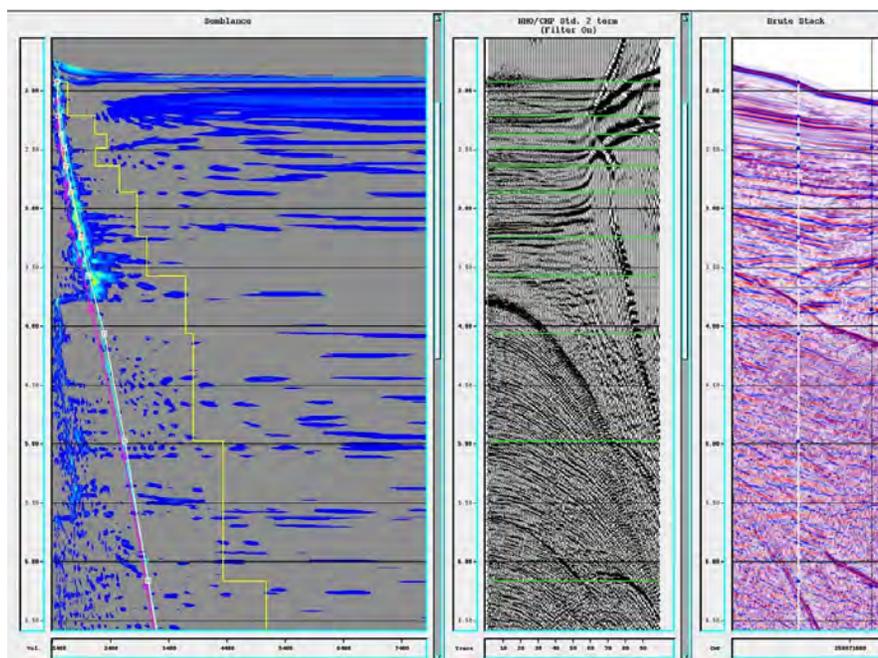


Figura 4.16 - Visualizacao do *software* InvA para realização da leitura das velocidades.

Tabela 4.16 - Parâmetros utilizados pelo migração Kirchhoff.

Valores dos parâmetros:

Tempo de viagem da computação : Isotropic Finite Difference

Abertura máxima : 4000 m

Amplitude compensation mode : 2D

Mergulho máximo : 60 graus

5 PÓS PROCESSAMENTO

5.1 *Análise e compensação das amplitudes residuais (RAAC)*

Quando é necessária a manutenção da informação real sobre as amplitudes do dado, não é necessário utilizar o RAAC, mas como o objetivo é gerar um dado com a melhor visualização possível, o processo foi aplicado logo após a migração. O RAAC utiliza métodos estatísticos para reter as amplitudes anômalas, como por exemplo os pontos brilhantes.

O passo da análise do RAAC calcula, para cada traço, a amplitude de múltiplas janelas utilizando o critério de amplitude RMS. O valor da compensação de amplitude residual (RAC) de cada janela é, então, a recíproca desta amplitude calculada. O centro de cada janela de tempo define a posição de seu valor RAC associado. Sabendo a posição X-Y e o tempo de cada valor RAC, é possível aplicar uma suavização espacial e temporal aos valores RAC.

O passo de aplicação do RAAC utiliza os valores suavizados do RAC para interpolar cada amostra e aplicar os escalares resultantes aos traços de entrada.

5.2 *Filtro passa-baixa variante no tempo (TVF)*

Após todo o processamento, ainda foi possível visualizar em algumas partes do dado (principalmente nas partes mais profundas), ruídos de alta frequência, e, para controlar esse efeito, foi aplicado um filtro passa-baixa que varia de acordo com o tempo.

Tabela 5.1 - Parâmetros utilizados pelo TVF.

Valores dos parâmetros:

Tempo central do filtro (ms)	Frequência do filtro passa-alto (Hz)	Frequência do filtro passa-baixa (Hz)
Fundo oceânico	3	90
FO + 5000	3	40
FO + 12000	3	30

6 RESULTADOS

A partir desse capítulo, são propostos os resultados de cada fluxo de processamento sísmico citado anteriormente.

6.1 Compensação das perdas de amplitude

A partir dos testes feitos (Figura 6.1) no início do trabalho sobre a compensação das perdas de amplitude, foi possível escolher um resultado para ser aplicado no dado durante todo o trabalho. Este recurso é utilizado para um controle de qualidade, poder imagear os horizontes mais profundos a medidas que o tempo aumenta.

Com os resultados que seguem, foi escolhido o parâmetro $x = 1,8$ (Figura 6.1 (c)), onde a imagem se encontra com uma melhor resolução, pois nos primeiros dois testes (Figura 6.1 (a) e (c)) a imagem ainda está um pouco comprometida, a visualização das porções mais profundas continua complicada e no último teste (Figura 6.1 (d)) as amplitudes já estão muito fortes e fica mais complicado de analisar cada evento primário.

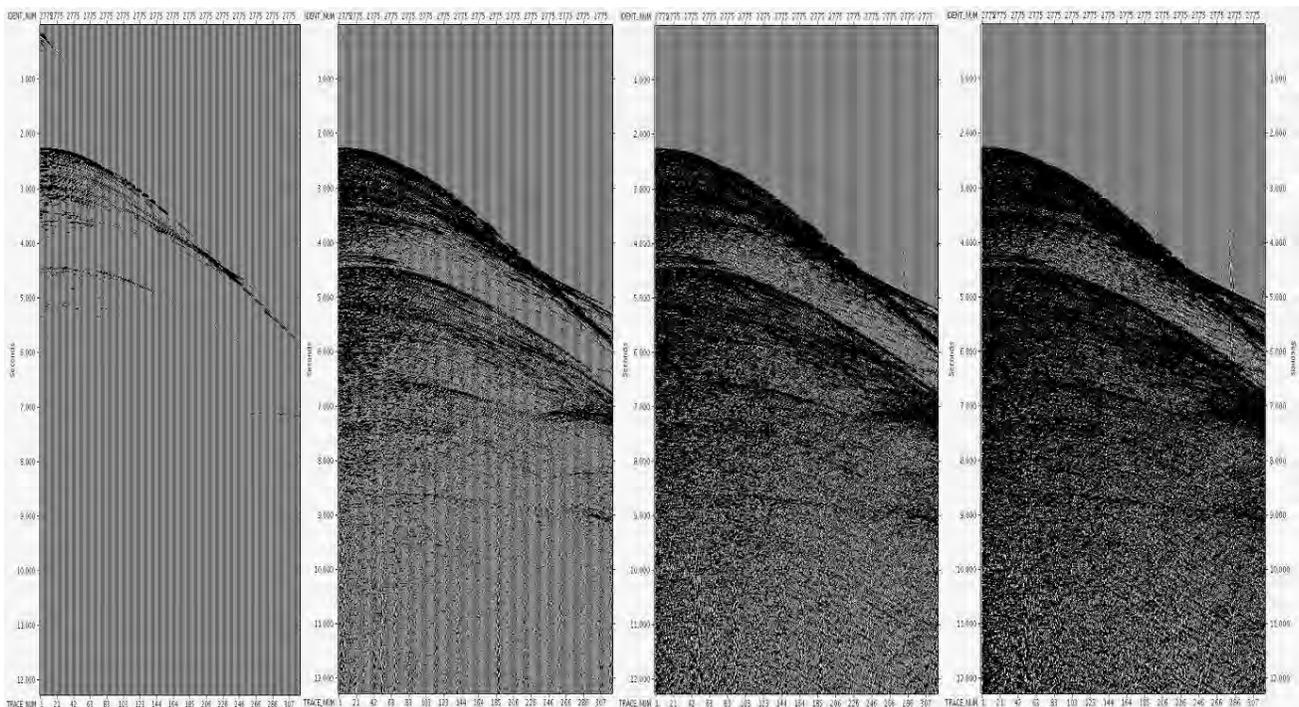


Figura 6.1 - Demonstra a variação de ganho entre as janelas (a) dado sem ganho, (b) $x = 1,4$, (c) $x = 1,8$ e (d) $x = 2$.

6.2 Silenciamento dos traços

O silenciamento aplicado no dado consiste de dois métodos distintos, o primeiro apenas “zera” as amplitudes acima do fundo oceânico, o segundo zera as amplitudes que se encontram na parte do dado, que após a correção NMO, se tornam estiradas, ou seja, não representam fielmente os eventos primários nos afastamentos mais distantes, por isso devem ser removidos.

Na figura 6.2, pode-se notar a diferença entre o dado aplicado anterior e posterior a aplicação do silenciamento. Este processo é muito importante para a fase de empilhamento dos dados, pois aumenta a relação sinal/ruído.

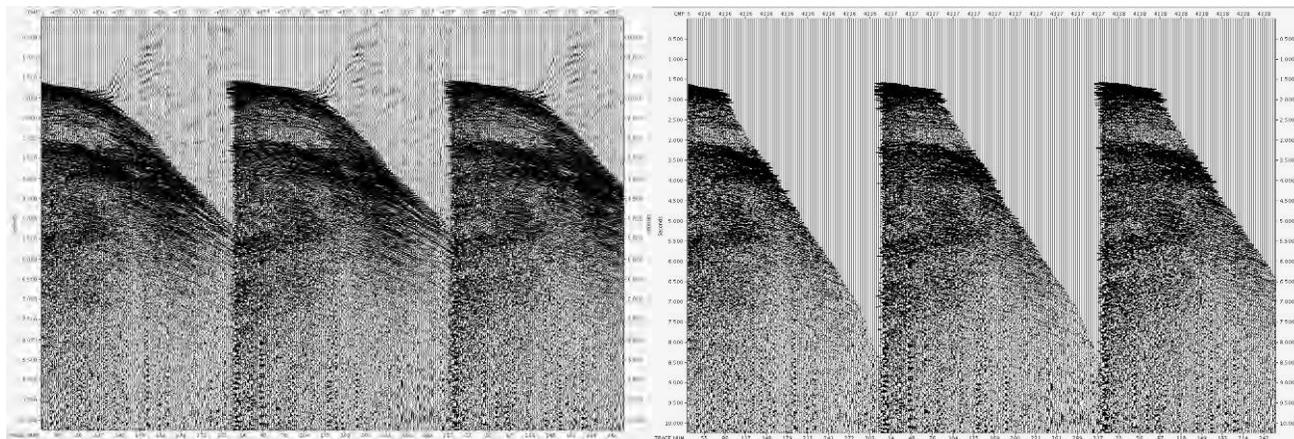


Figura 6.2 - Demonstração do efeito do silenciamento em três famílias de CMP.

O importante a ser informado é que a correção NMO aplicada nessa imagem foi a mesma que foi visualizada no Projeto Final I, onde nota-se que os refletores não estão totalmente horizontalizados. No próximo passo pode-se perceber a diferença entre as duas correções.

6.3 Correção NMO

A correção NMO tem a propriedade de trazer o evento coerente para o mesmo tempo, ou seja para o tempo do primeiro afastamento.

A figura 6.3 ilustra o efeito desse método. A figura 6.3 (a) representa a família CMP sem a correção, onde o mesmo evento está sofrendo um aumento no tempo a medida que o afastamento aumenta entre a fonte e o receptor. A figura 6.3 (b) representa a velocidade determinada quando o projeto foi feito pela primeira vez, nota-se que as velocidades ainda sofrem com uma pequena defasagem, pois quando todo o projeto da Bacia Potiguar foi feito eram muitas linhas sísmicas, e para não perder muito tempo com a leitura da velocidade, ela ocorre a uma distância pré determinada e entre

as famílias onde foi feita a leitura das velocidades são interpoladas. Na figura 6.4 (c) leitura da velocidade foi específica para esse projeto, portanto o picking de velocidade foi feito a cada 4 CMPs, logo a interpolação será bem menor.

A correção NMO é extremamente importante para o empilhamento, pois com os eventos primários horizontalizados se torna mais fácil perceber a continuidade das camadas.

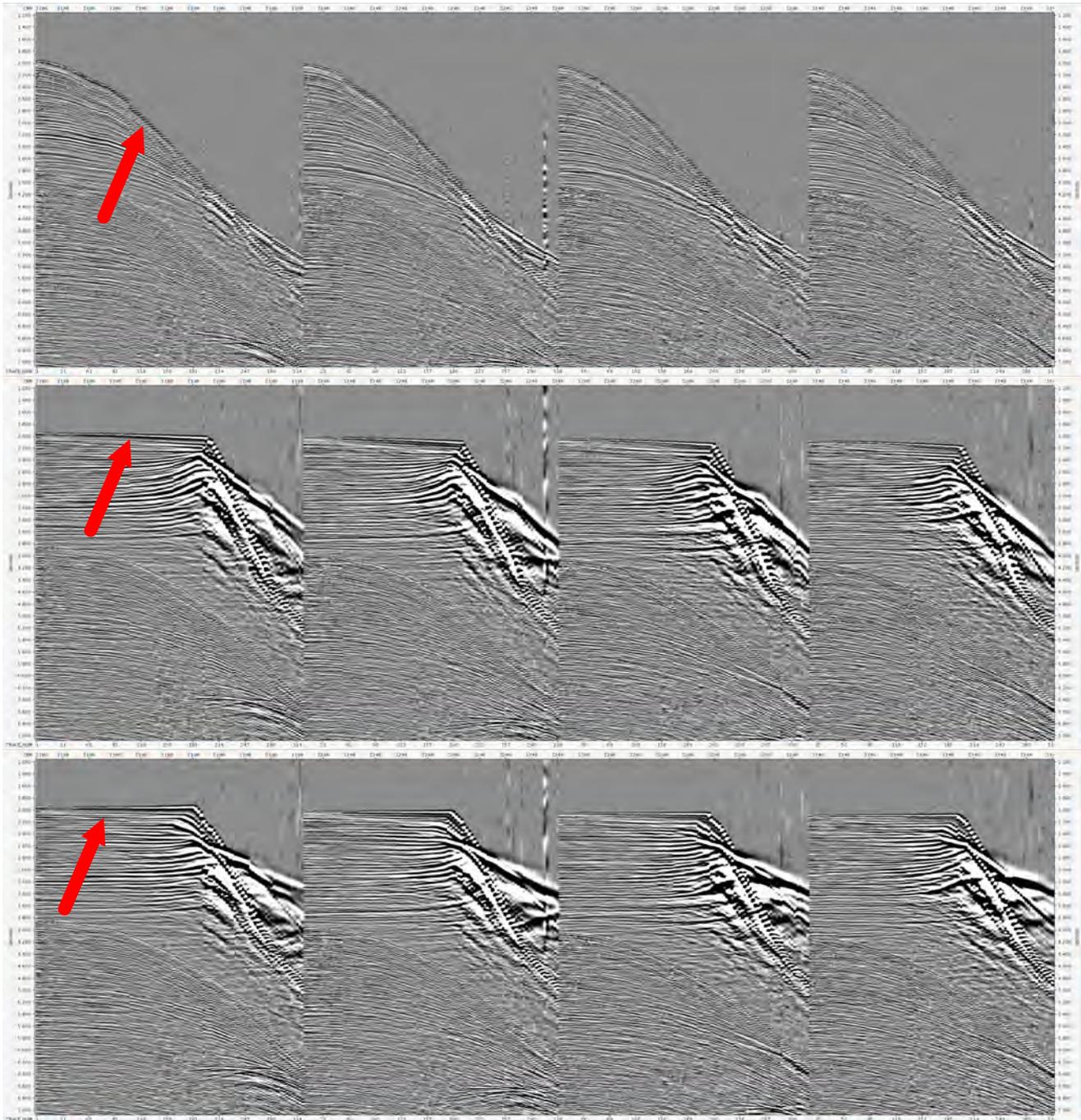


Figura 6.3 - (a) Apresentação de 4 famílias de CMP com a velocidade utilizada na primeira vez que essa linha foi processada, em (b) as mesmas 4 famílias de CMP com a velocidade refeita para esse projeto.

6.4 Remoção dos Ruídos

6.4.1 Atenuação de ruídos de ondas superficiais

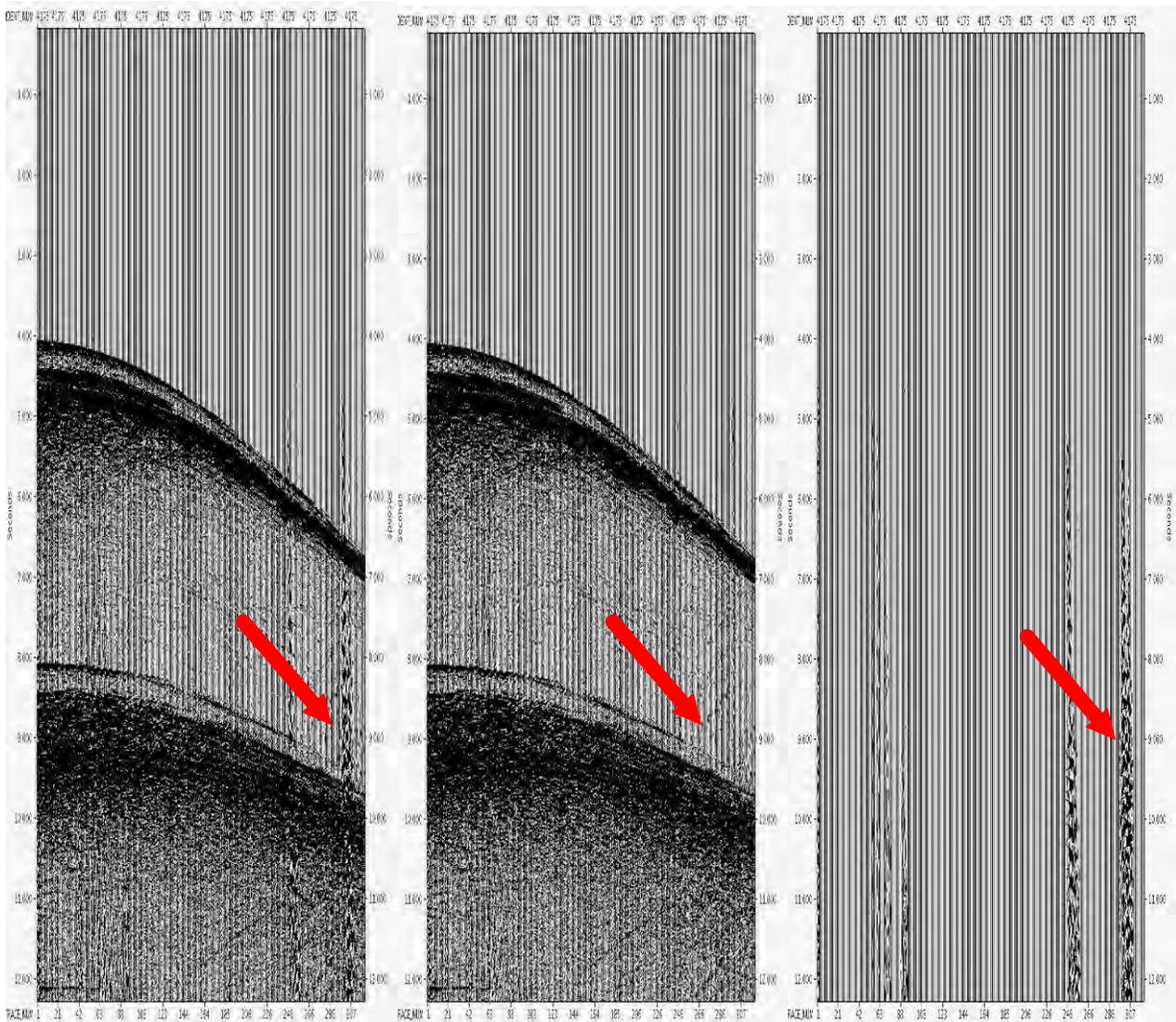


Figura 6.4 - (a) Dado bruto com a presença de ruídos aleatórios, (b) dado com os ruídos eliminados e (c) os ruídos que foram eliminados do dado.

O resultado do algoritmo de Atenuação de Ruídos Aleatórios foi bom, apesar de visualizar na figura 6.4, uma excelente diferença entre o dado de entrada e o dado de saída., quando é feito o controle de qualidade no dado empilhado (Figura 6.5), nota-se a existência de alguns ruídos aleatórios. O algoritmo não conseguiu remover todo o ruído randômico existente no dado, devido a prioridade que foi escolhida – Não remover qualquer evento primário das famílias de CMP. Depois de inúmeros testes, foram escolhidos parâmetros que não tornassem o algoritmo muito agressivo. Na figura 6.6, nota-se claramente a melhora da relação sinal/ruído com o efeito do ARA.

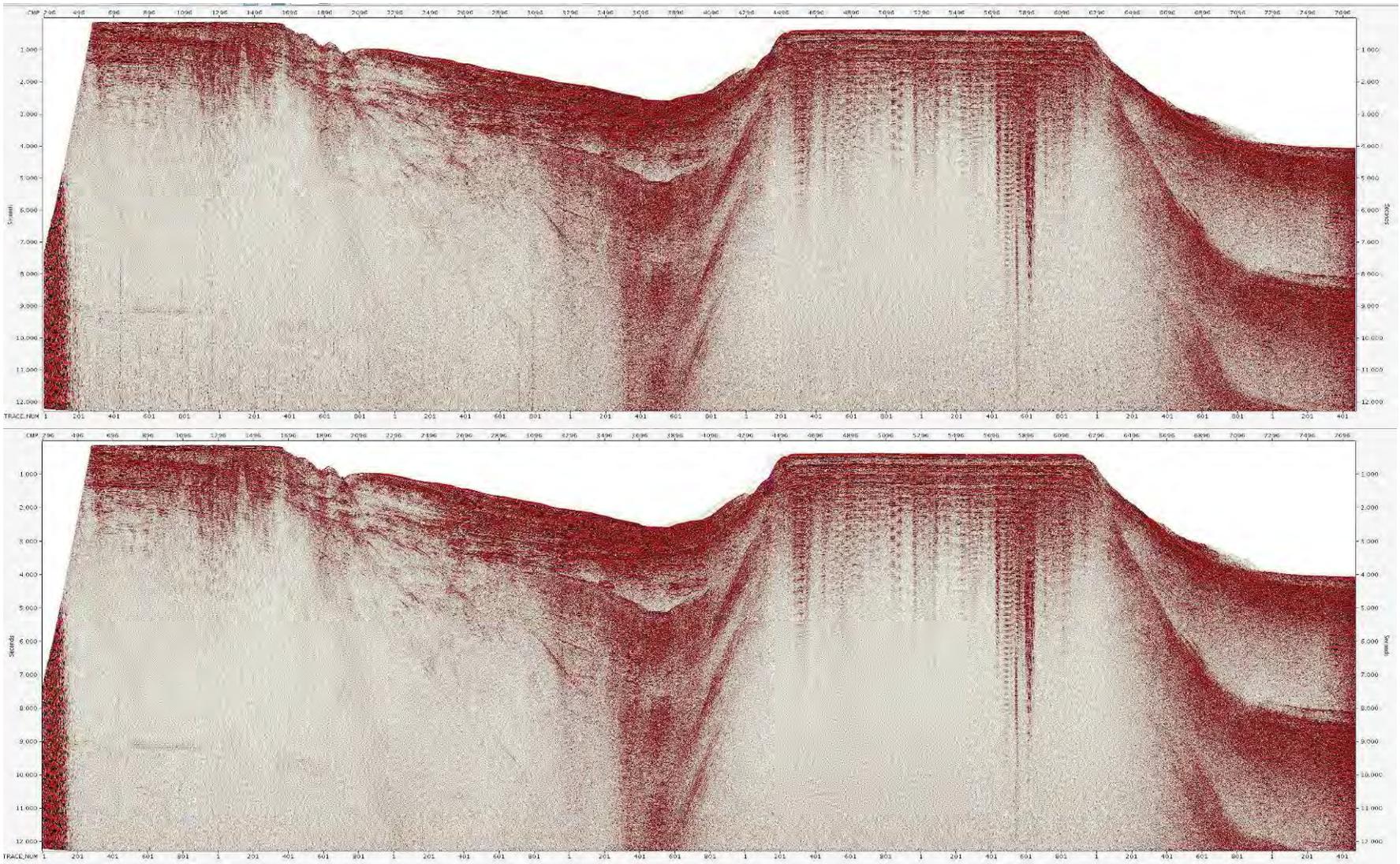


Figura 6.5 - Seção empilhada, em (a) o dado bruto foi feita uma correção NMO, aplicado os silenciamentos e o empilhamento; (b) a seção sofreu correções referentes aos ruídos randômicos mais as aplicações do dado bruto.

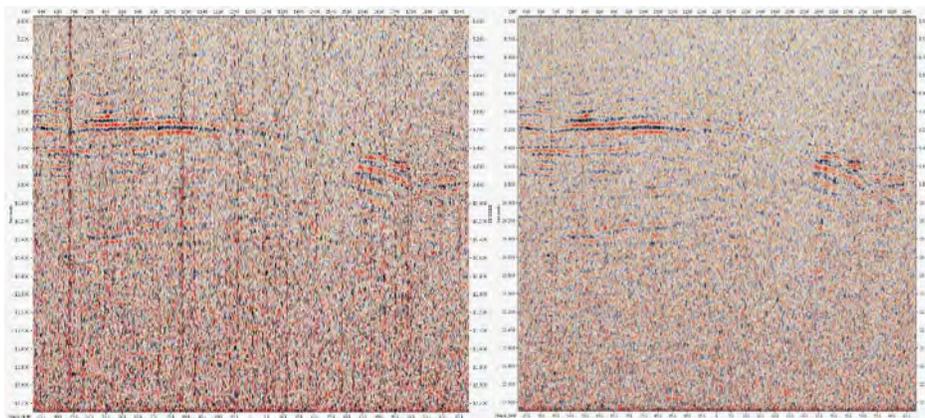


Figura 6.6 - Detalhe de uma das regiões da imagem anterior (a) dado bruto e (b) o dado com os ruídos randômicos eliminados pelo algoritmo “atenuação de ruídos de ondas superficiais”.

6.4.2 Onda direta

Em certas partes do dado, o fundo oceânico se encontra muito raso, isso faz com que a onda direta se misture aos eventos primários, por isso o algoritmo é aplicado somente na parte onde a profundidade se encontra entre 0 e 600ms. Analisando a linha pode-se notar duas regiões praticamente horizontais, uma esta em aproximadamente 300ms e a outra em 500ms, logo o efeito da onda direta nas ondas primárias será diferente. Por isso foram aplicados dois algoritmos distintos, para “atenuar” a remoção do ruído quando a região for mais profunda.

Na figura 6.7, onde se encontra a região plana em aproximadamente 300ms, pode-se notar uma remoção muito mais agressiva, isso se deve ao parâmetro utilizado, nessa situação foi possível determinar melhor a onda direta no domínio τ - p .

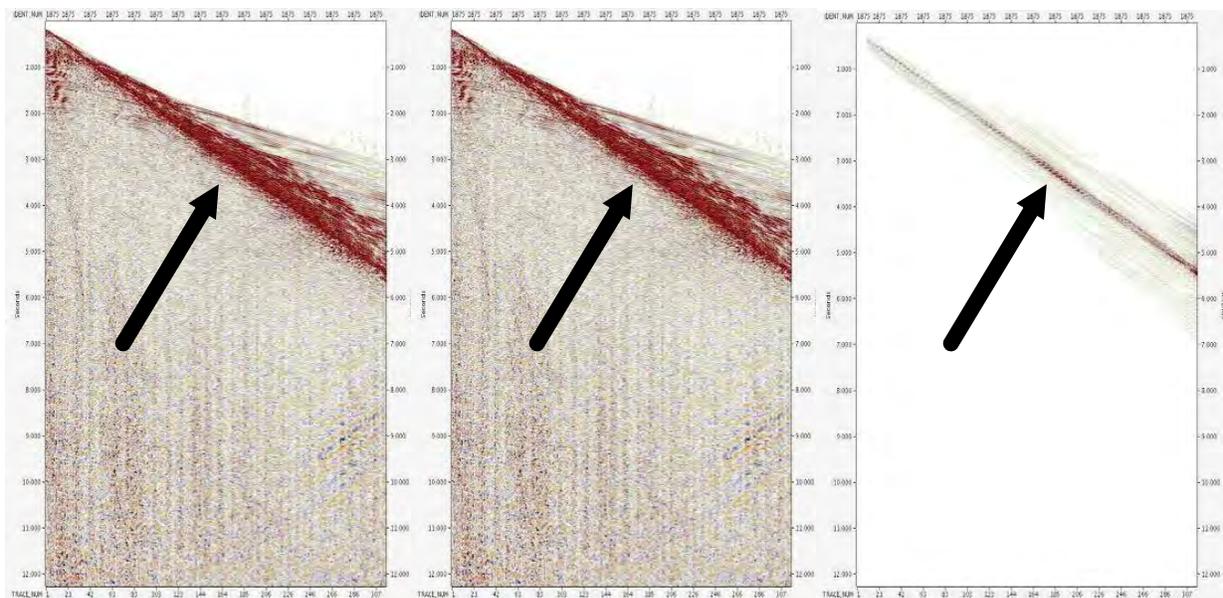


Figura 6.7 - No domínio do tiro na região plana onde a profundidade é aproximadamente 300ms, em (a) dado de entrada com a presença dos efeitos da onda direta; em (b) o dado de saída com a remoção feita e em (c) a diferença entre os dados de entrada e saída.

Na figura 6.8, esse detalhamento no no domínio τ - p , ficou um pouco comprometido, pois a onda direta não ficou totalmente concentrada.

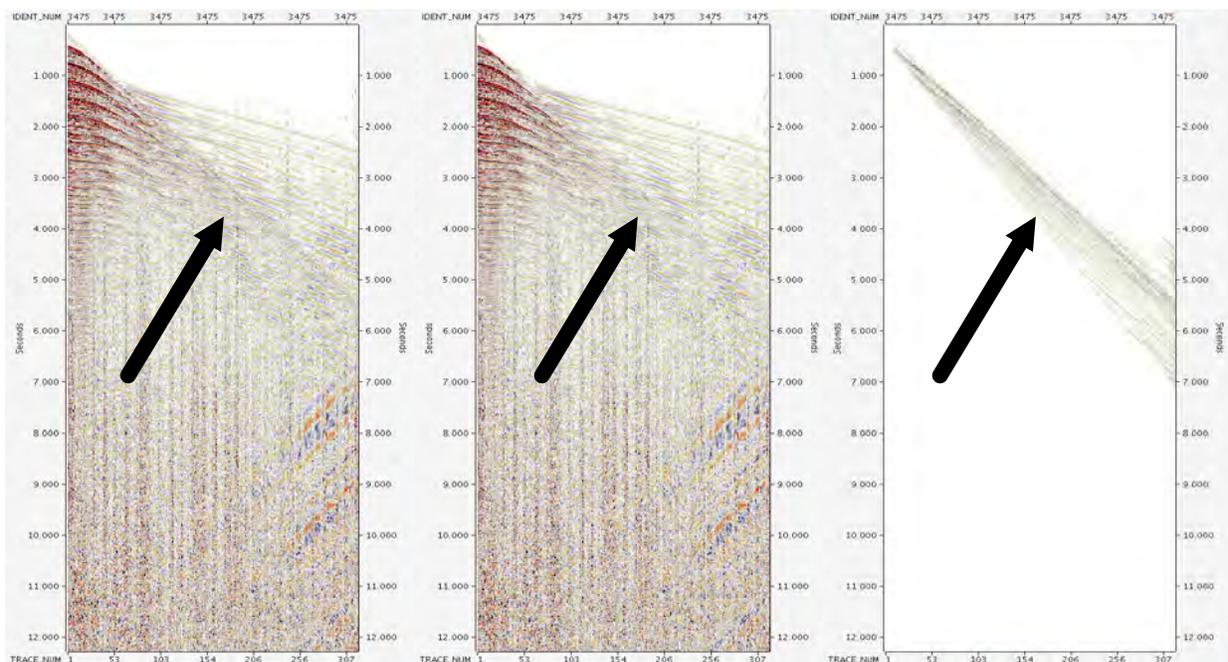


Figura 6.8 - No domínio do tiro na região plana onde a profundidade é aproximadamente 500ms, em (a) dado de entrada com a presença dos efeitos da onda direta; em (b) o dado de saída com a remoção feita e em (c) a diferença entre os dados de entrada e saída.

6.4.3 Ground roll

O *ground roll* ocorre somente na parte do dado em que a profundidade é aproximadamente 300ms, isso se deve ao movimento elíptico e retrógrado das partículas em subsuperfície. Nesse trabalho, esse ruído também foi removido com a transformada Radon.

Como o interesse era remover apenas o *ground roll* e a velocidade deste ruído é muito baixa, o algoritmo foi aplicado apenas nos 130 traços iniciais de cada família de tiro, suficiente para excluir todo o ruído do dado.

Pode-se notar também que além de remover o ruído coerente, o algoritmo foi muito eficiente na remoção de mais ruídos aleatórios (Figura 6.9 (a)).

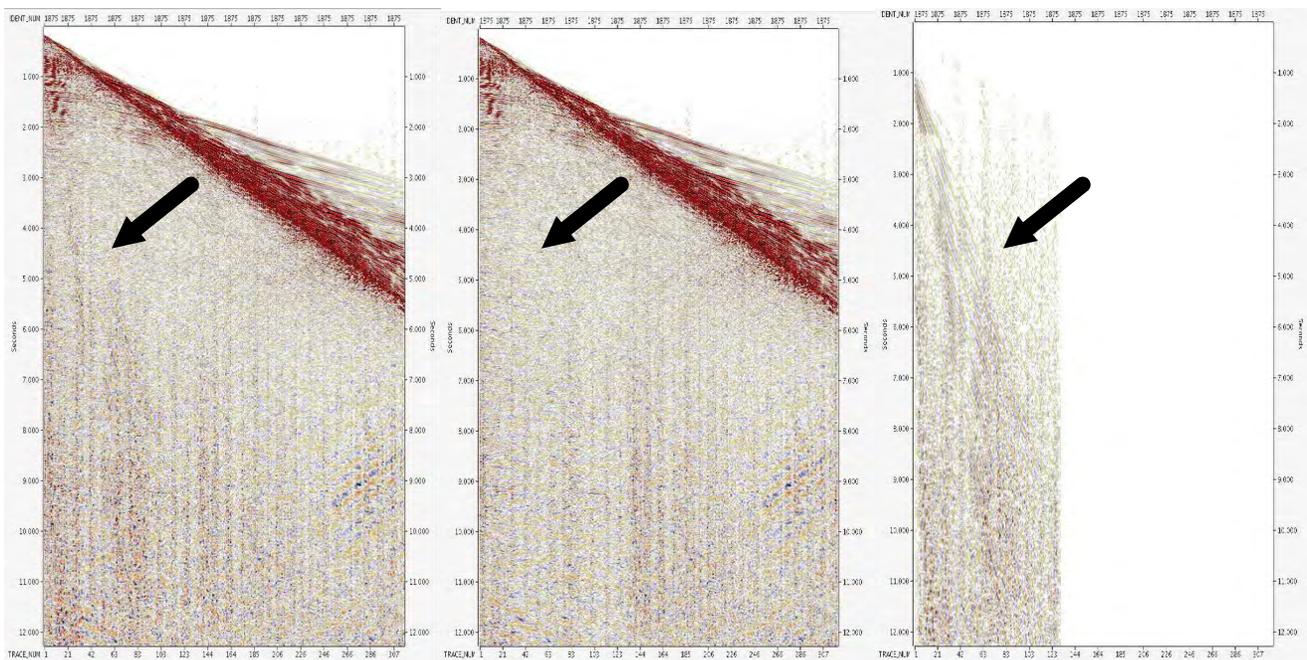


Figura 6.9 - Tiro 1875, em (a) a presença do *ground roll* a partir de 1000ms; em (b) o tiro de saída com os ruídos lineares e alguns ruídos randômicos eliminados; e em (c) a diferença entre o tiro de entrada e o tiro de saída.

Na figura 6.10 (c), a seção empilhada mostra claramente o efeito que a onda direta tinha sobre os eventos primários e a remoção do *ground roll*. Na figura 6.11, além da onda direta, pode-se notar a eficiência do algoritmo também com os ruídos aleatórios restantes na linha sísmica.

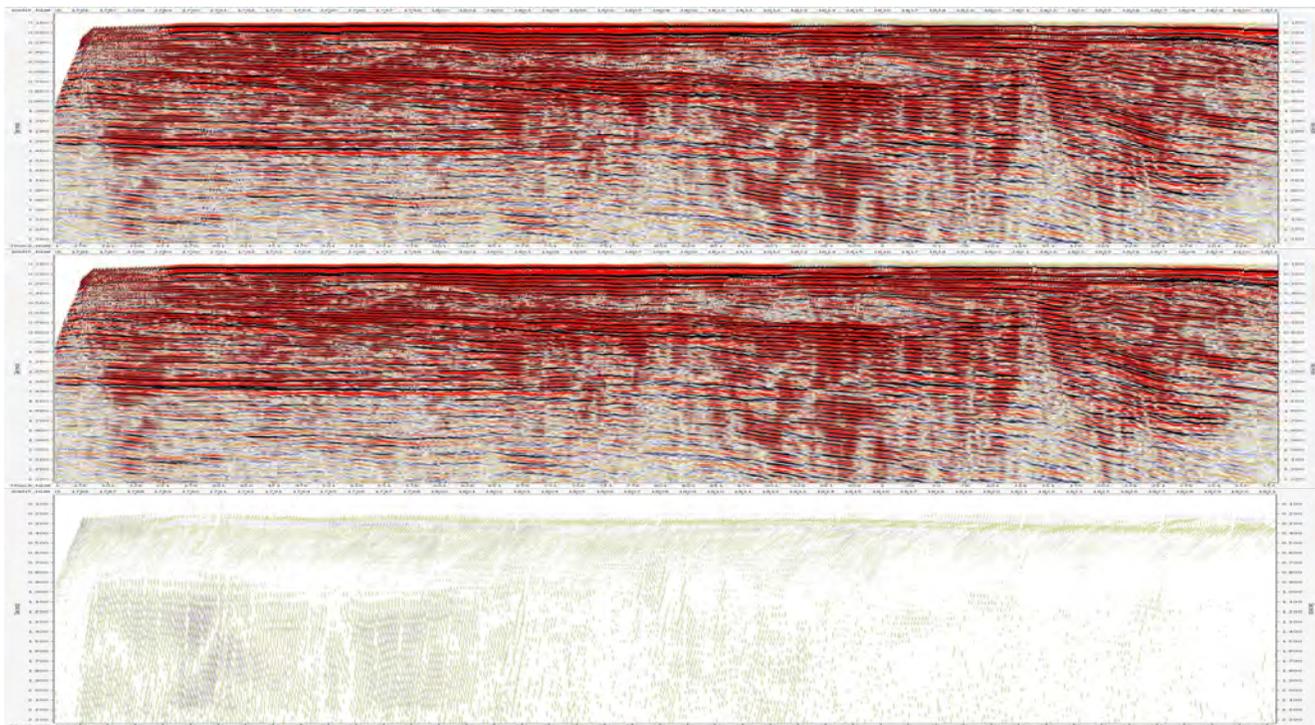


Figura 6.10 - Em detalhe a remoção tanto da onda direta, como do *ground roll*.

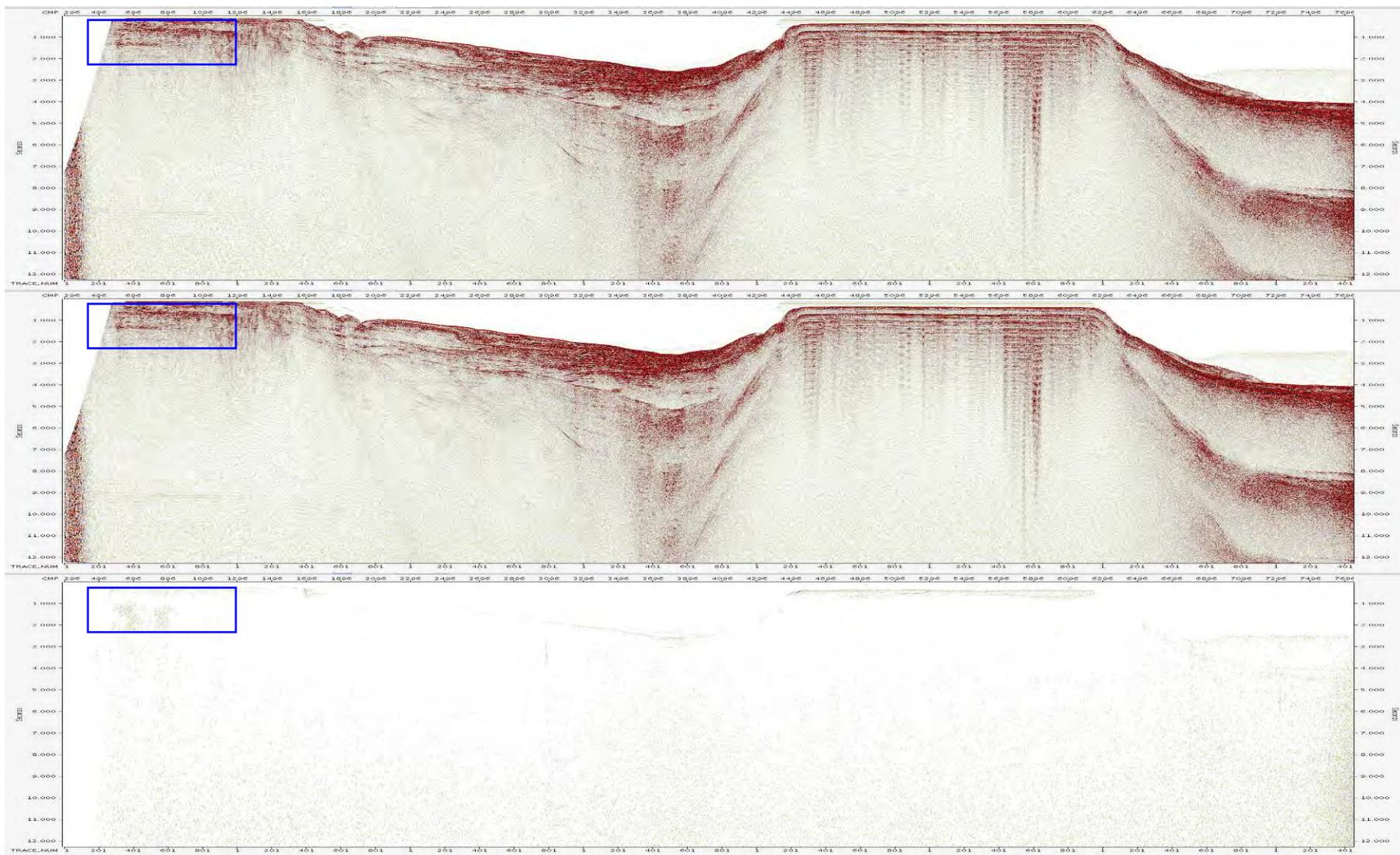


Figura 6.11 - Seção empilhada (a) antes da aplicação dos algoritmos para remoção da onda direta e *ground roll*, em (b) após a aplicação dos dois algoritmos e em (c) a diferença entre eles, o retângulo azul localiza onde o algoritmo atuou melhor.

6.4.4 Múltiplas

6.4.4.1 2D SRME

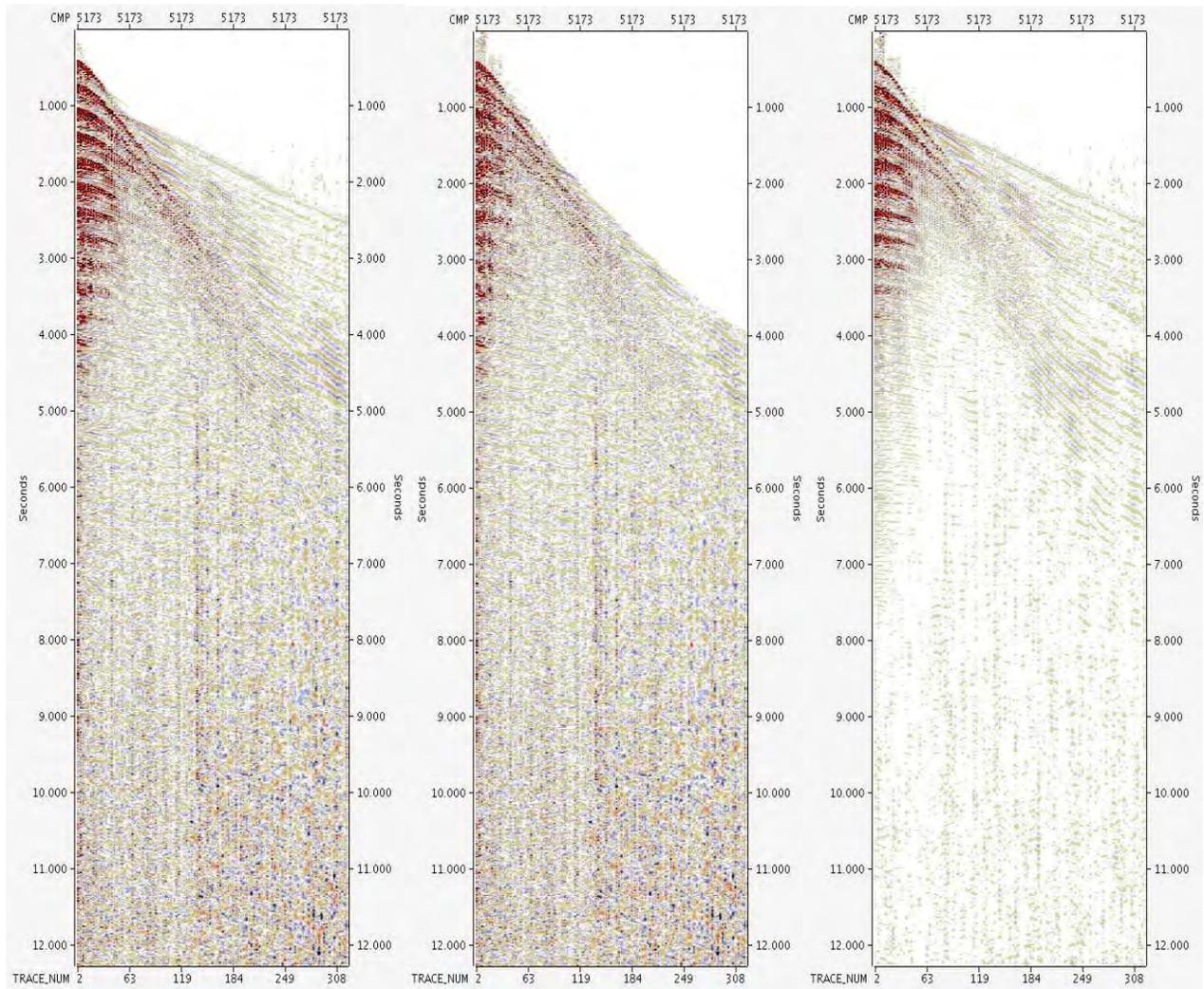


Figura 6.12 - Em (a) o dado no domínio CMP antes do 2D SRME; em (b) o CMP após a aplicação do algoritmo; e em (c) a diferença entre ambos.

O método 2D SRME foi o primeiro método aplicado nesta linha sísmica para remoção das múltiplas. Como o algoritmo não possui restrições entre as regiões de baixa e alta profundidade, ele foi aplicado utilizando os mesmos parâmetros em todo o dado. Muitos teste foram feitos, pois os filtros adaptativos estavam sendo muito agressivos com o dado. O resultado foi bom, apesar de acreditar que se tivesse mais tempo para o processamento (o tempo computacional deste algoritmo é muito alto), a remoção seria mais eficiente. A figura 6.12, demonstra que mesmo com os filtros escolhidos, ainda ocorre uma leve remoção dos eventos primários. Mesmo assim, com a figura 6.13, pode-se notar a necessidade de outros métodos de remoção.

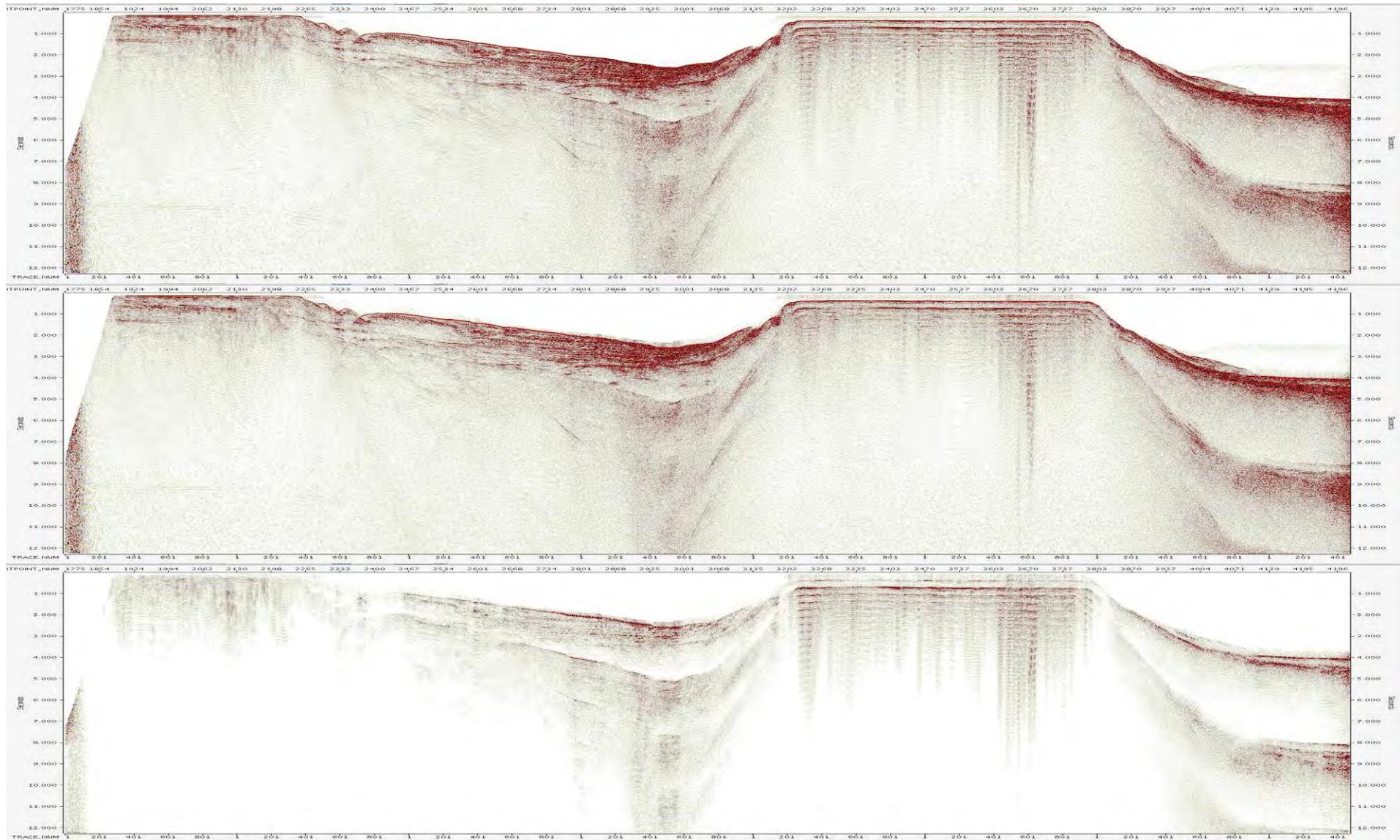


Figura 6.13 - Seção empilhada (a) antes da aplicação do 2D SRME, em (b) após a aplicação do algoritmo e em (c) a diferença entre eles.

6.4.4.2 Múltiplas Radon

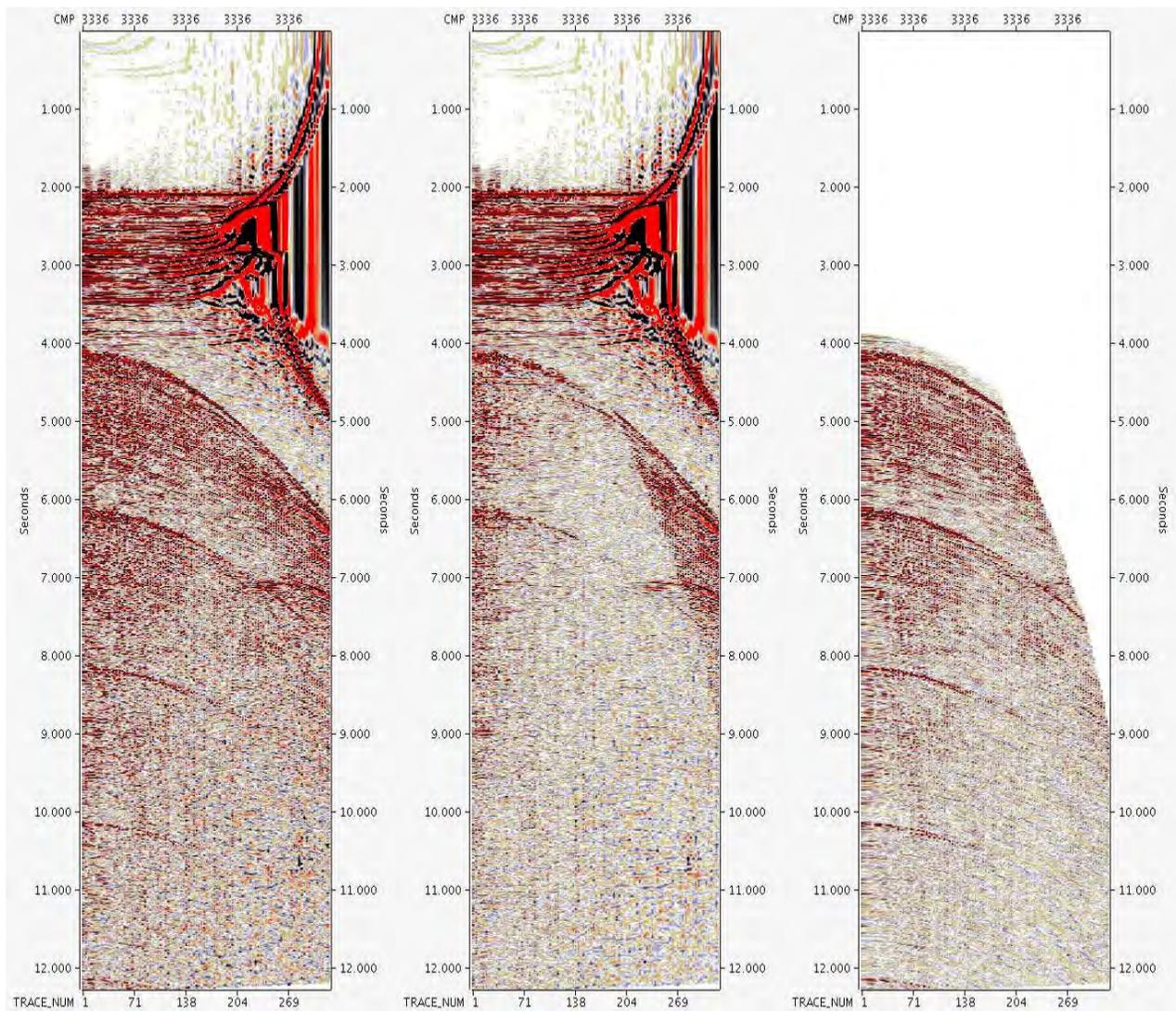


Figura 6.14 - Foi aplicado no CMP 3336 a correção NMO, e em (a) o dado de entrada com 4 múltiplas visíveis do fundo oceânico; em (b) pelo menos duas múltiplas não aparecem com tanta intensidade no dado; e em (c) a diferença entra o dado de entrada e o dado de saída.

O algoritmo Radon foi mais eficiente que o SRME, pode-se notar na figura 6.14, que algumas múltiplas existente no dado de entrada foram praticamente removidas, porém a janela escolhida para o “ataque” as múltiplas pode ser um pouco melhor. Mesmo assim como foi utilizado um silenciamento externo, esse efeito acaba desaparecendo. Na figura 6.15, nota-se que o método foi aplicado somente nas partes profundas do dado, pois estava sendo muito severo em alguns refletores primários.

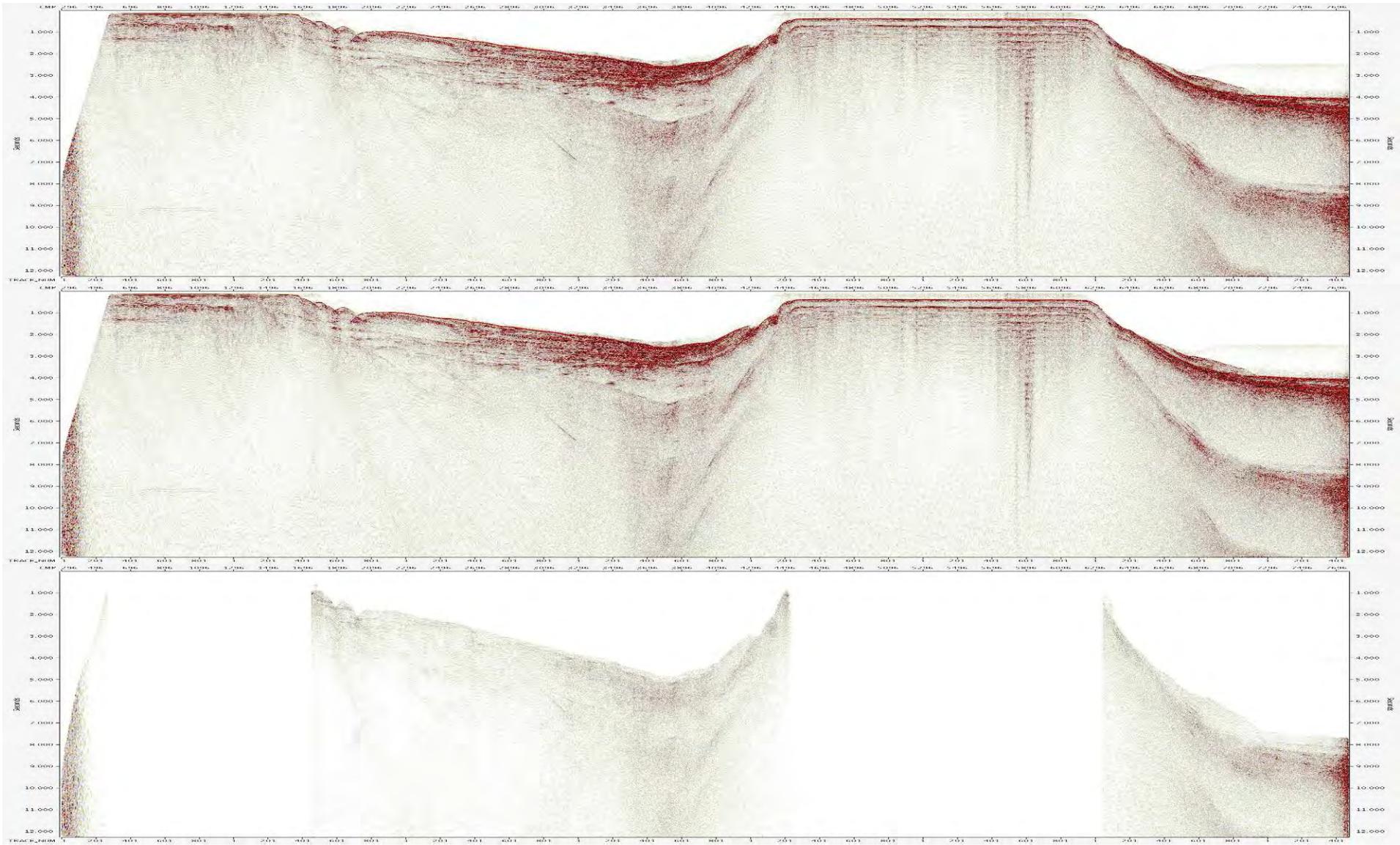


Figura 6.15 - Seção empilhada (a) antes da aplicação do WLS Radon, (b) após a aplicação do algoritmo e (c) a diferença.

6.4.4.3 Múltiplas PRIMAL

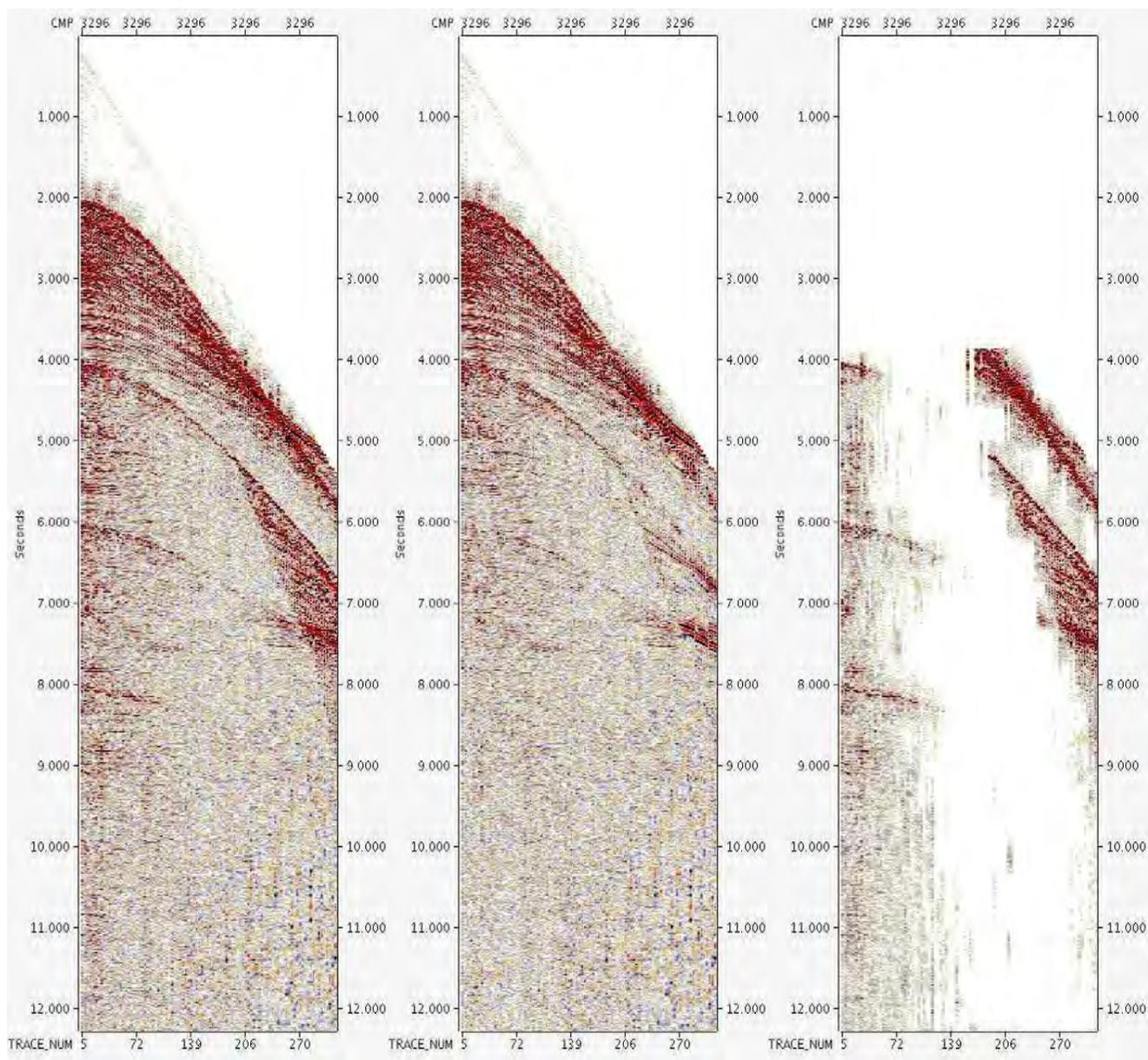


Figura 6.16 - No domínio CMP, em (a) o dado antes de ser aplicado a PRIMAL, em (b) o CMP após a aplicação e em (c) a diferença entre os dois dados.

O método da PRIMAL foi o mais eficiente, o que mais removeu as múltiplas. Na figura 6.17, quando se compara a diferença deste método com os anteriores, percebe-se que o algoritmo atuou somente nas múltiplas, e diminuiu muito o efeito no dado de saída. Com o resultado de saída, já pode iniciar as manipulações do dado para a migração.

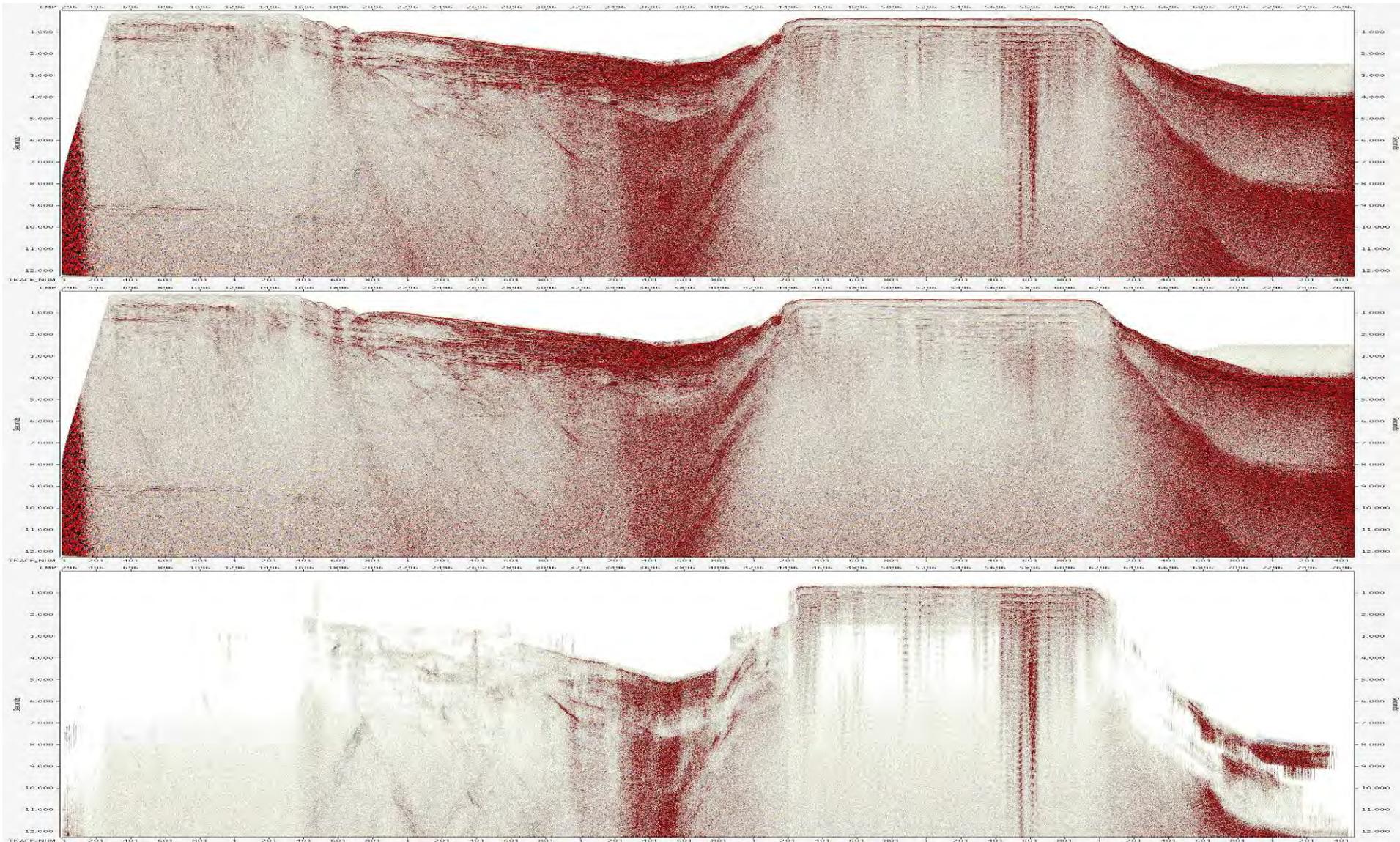


Figura 6.17 - Seção empilhada, em (a) o dado de entrada, em (b) o dado de saída logo após a aplicação do algoritmo PRIMAL, e em (c) a diferença entre o dado de entrada e saída. Pode-se notar uma forte diferença entre ambos.

6.5 Migração Kirchhoff

A migração Kirchhoff, foi responsável por uma mudança considerável no dado, nota-se que os horizontes estão mais contínuos, as hipérbolas foram colapsadas.

Na figura 6.18, está o resultado da migração em toda a linha sísmica com a velocidade utilizada para correção do NMO, ou seja, a velocidade foi lida com os eventos e as velocidades sem estarem na posição correta. Como o resultado das múltiplas não foi tão eficiente, na região da bacia percebe-se uma série de hipérboles super migradas, ou seja, as hipérboles estão super corrigidas.

Quando foca na bacia (Figura 6.19), já é possível imagear muitos horizontes contínuos, mesmo utilizando a velocidade da correção NMO. Fica ainda mais claro que, as múltipla após a migração são imageados por hipérboles super corrigidas, exatamente como foi dito na figura 6.18.

A figura 6.20 ilustra as variações da correção de velocidade da seguinte forma: 95% vel – velocidade da correção NMO foi diminuída em 5% (Figura 6.20 (a)); Vel – velocidade da correção NMO (Figura 6.20 (b)); 105% vel – velocidade da correção NMO foi aumentada em 5% (Figura 6.20 (c)). Com o aumento da velocidade a tendência é as hiperbolas abrirem.

Com os refletores na posição correta, foi possível criar, a partir do InVA, uma nova leitura de velocidade. A figura 6.21, ilustra que a migração com a nova velocidade foi melhor em alguns locais e em outros um pouco pior:

- Com a nova velocidade, o fundo oceânico no início da linha sísmica, tem uma maior continuidade (entre os CMPs 1 e 1400) ;
- Com a velocidade antiga, entre os CMPs 1800 e 2400 (entre o tempo 1000ms e 2500 ms), os refletores estão mais bem imageados;
- Com a nova velocidade, entre os CMPs 2400 a 4400 (exatamente o alvo), as estruturas estão mais compactadas e bem definidas;
- Com a nova velocidade, entre os CMPs 6000 a 7400, as estruturas também estão melhor imageadas.

Seguindo a idéia acima, foi mantida a nova velocidade.

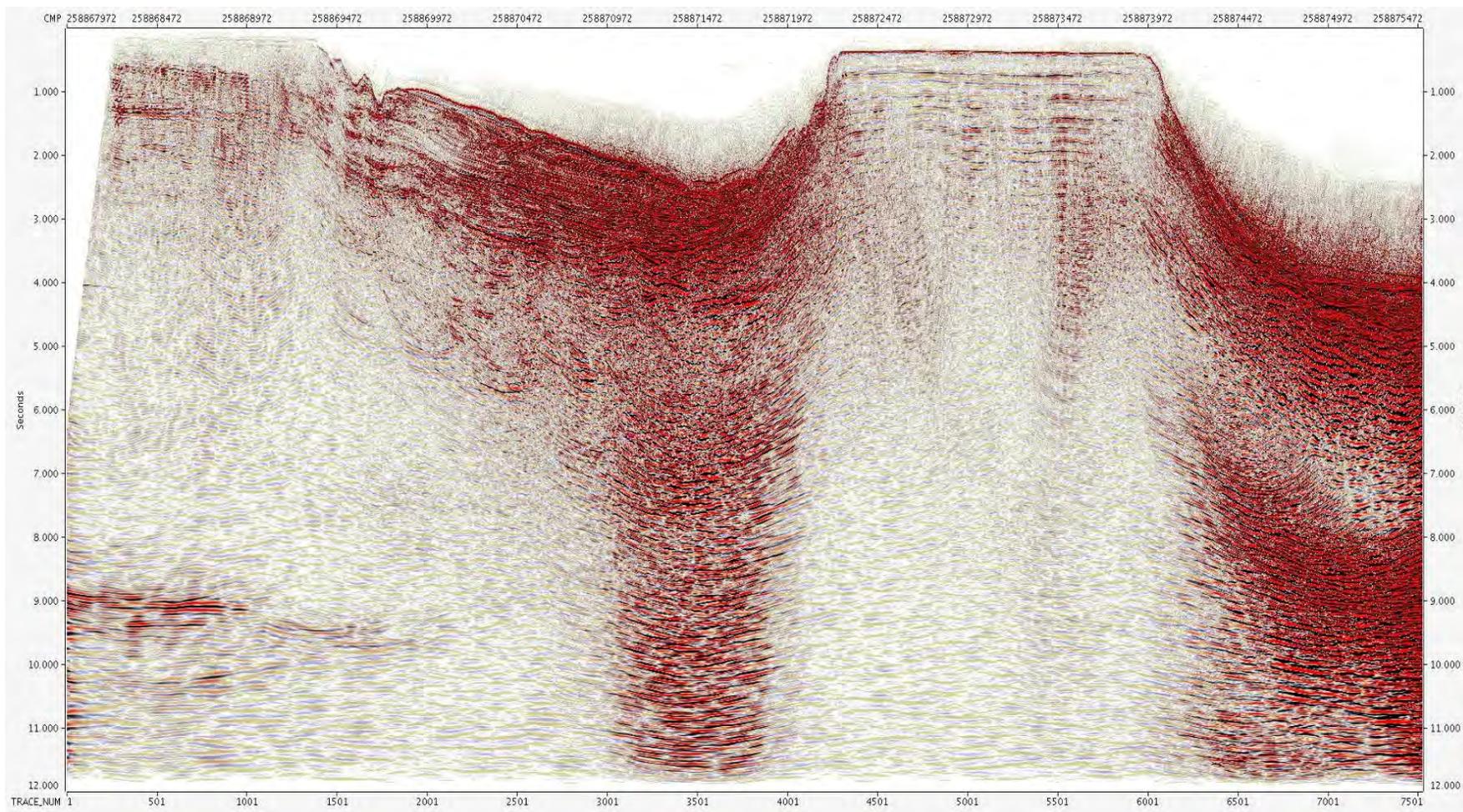


Figura 6.18 - Seção empilhada do dado apos a migração Kirchhoff em tempo.

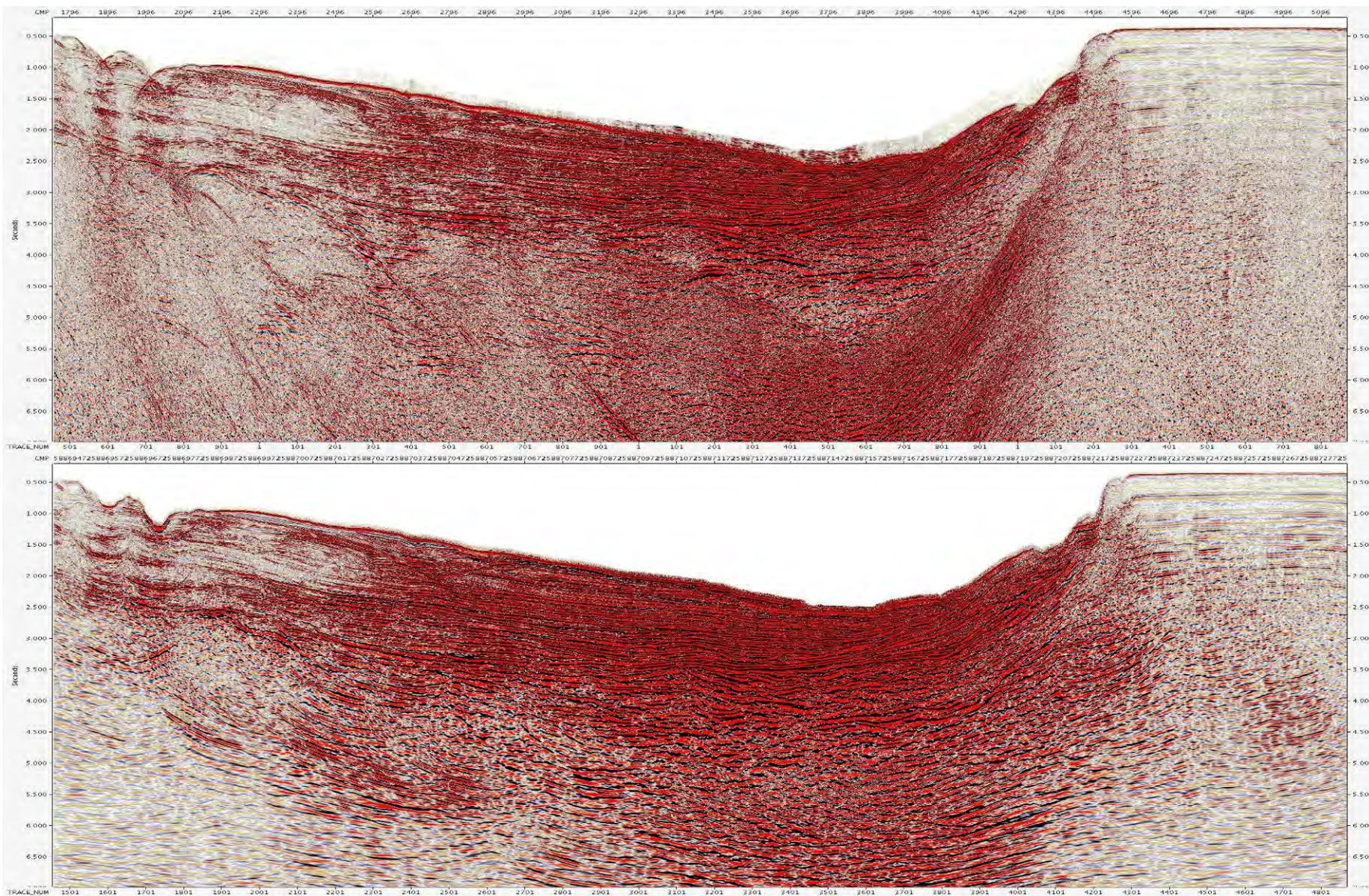


Figura 6.19 – Em (a) pode-se observar a seção antes de ser aplicada a migração, e em (b) a seção após aplicada a migração.

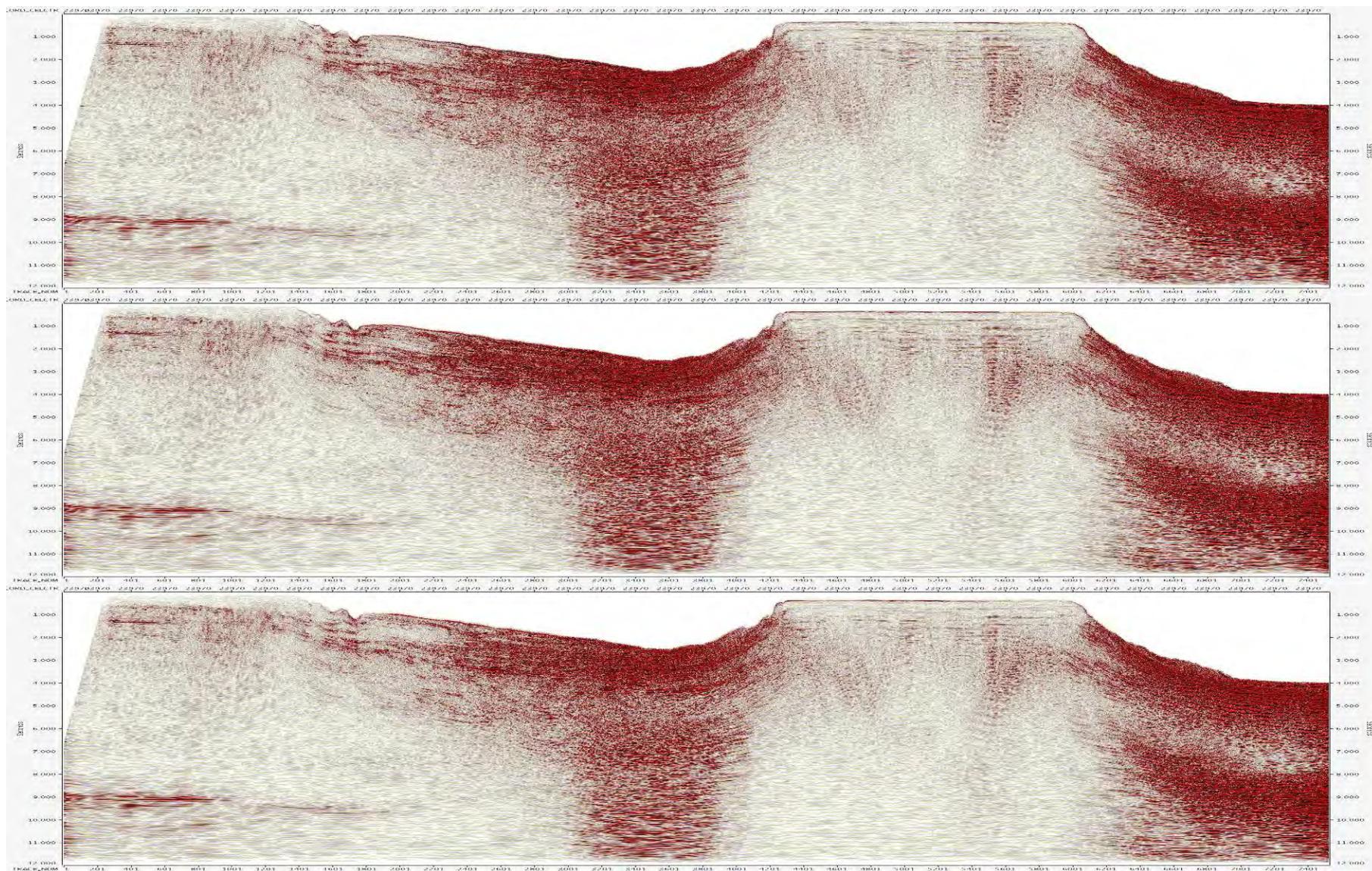


Figura 6.20 - (a) Seção empilhada com uma velocidade 5% menor que a inicial, (b) com a velocidade inicial e (c) com uma velocidade 5% maior que a inicial.

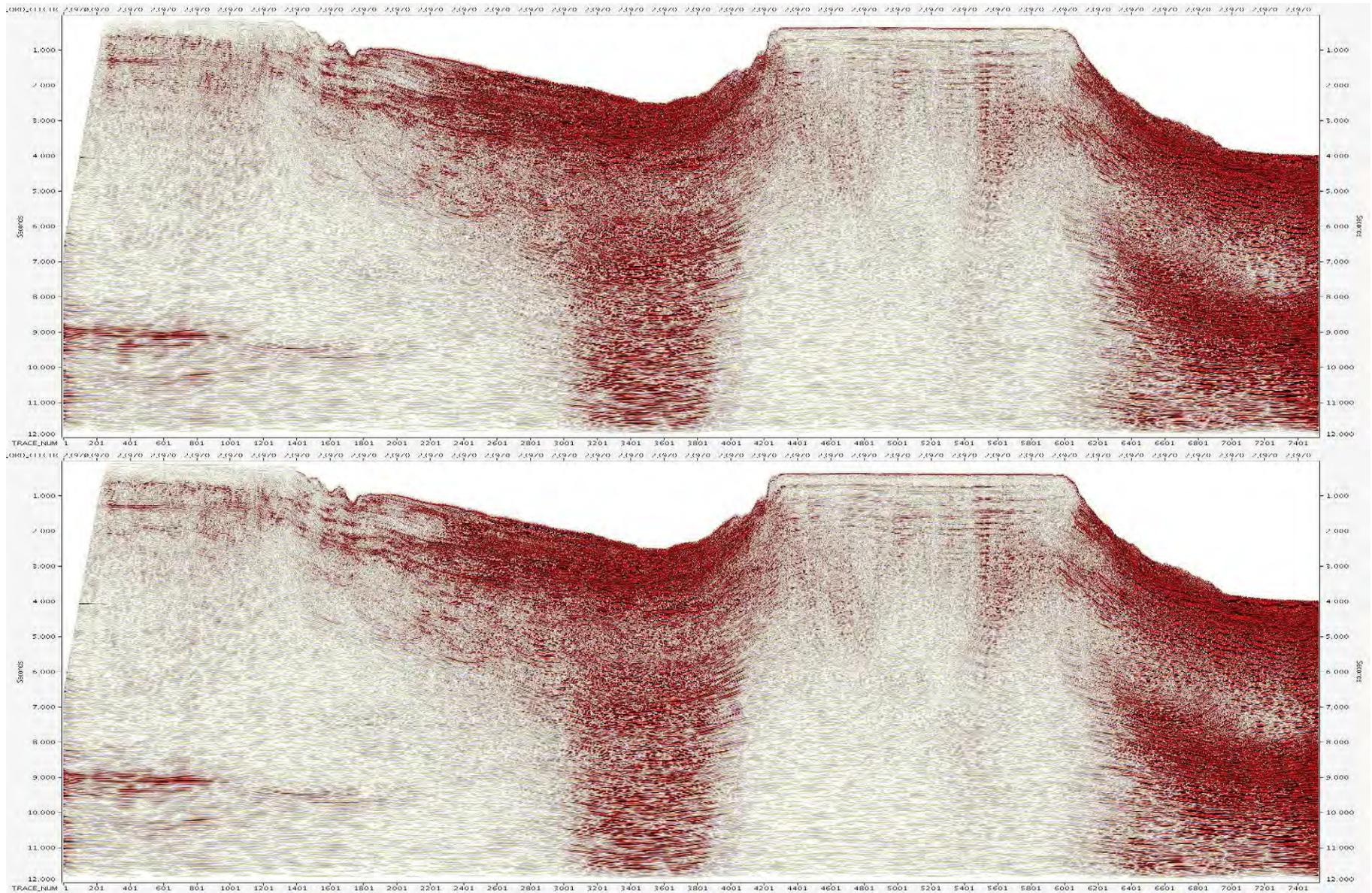


Figura 6.21 - (a) Seção empilhada com a velocidade inicial e (b) com a velocidade lida após a migração.

6.6 RAAC

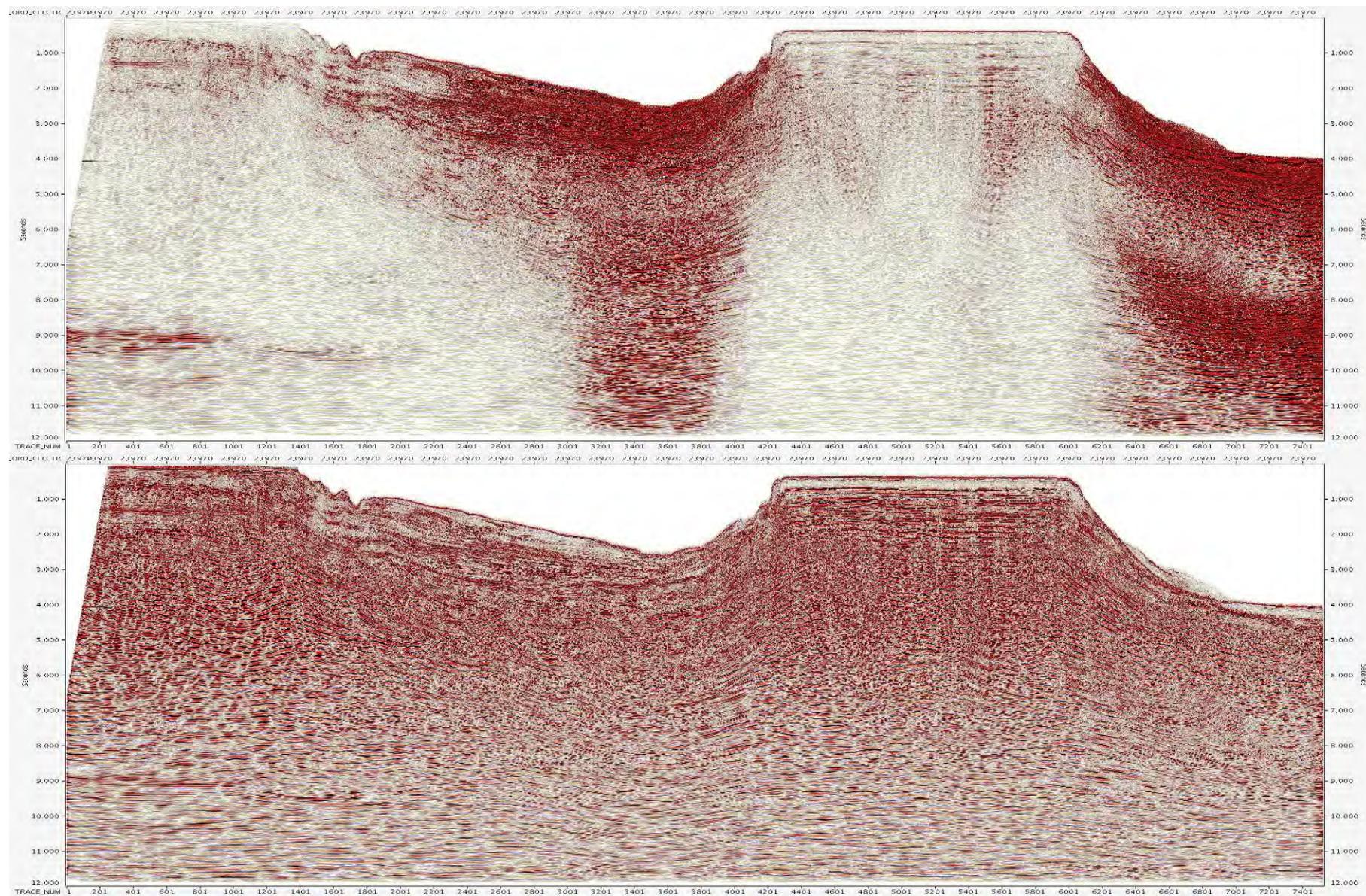


Figura 6.22 - (a) Seção empilhada após a migração com a nova velocidade, e (b) após o algoritmo RAAC aplicado.

6.7 TVF

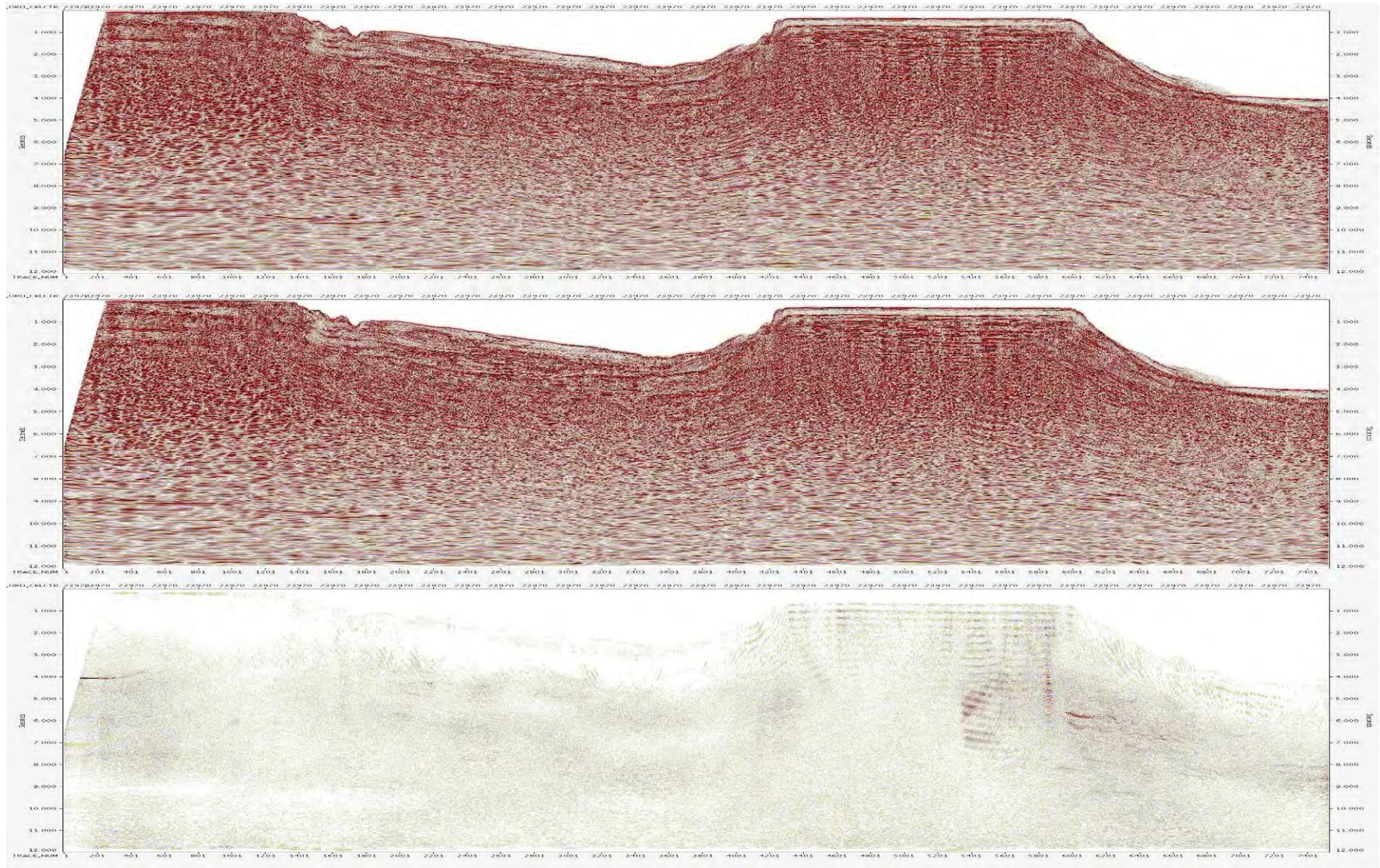


Figura 6.23 - (a) Seção empilhada antes da aplicação do TVF, e (b) após aplicação do TVF.

Tanto o RAAC, quanto o TVF, são algoritmos que servem para “embelezar” o dado para a interpretação.

O RAAC é responsável por balancear as amplitudes do dado, tanto lateralmente quanto verticalmente. Por isso na figura 6.22, as amplitudes estão mais bem definidas, não existe problemas referentes à profundidade. A partir desse resultado foi possível observar ainda a existência de ruídos de alta frequência, principalmente na parte mais profunda do dado.

O TVF funciona como um filtro para remover esses resíduos. A figura 6.23 demonstra que apenas resíduos foram removidos nesse passo. Dá para notar com a figura 6.23 (c), que a remoção dos ruídos está muito bem condicionada à escolha das janelas do filtro.

6.8 Resultado Final

Com todos os resultados citados anteriormente, pode-se observar a evolução qualitativa do dado ao longo de todo o processamento sísmico. A figura 6.24 simboliza o dado inicial trabalhado e o dado final que será entregue para a interpretação sísmica. Os retângulos demonstram a região que será imageada na figura 6.25.

As prioridades no processamento foram não inserir artefatos no dado e remover eventos primários. Partindo dessa premissa, em alguns passos do trabalho o resultado não foi totalmente satisfatório, mas mesmo assim o dado de saída foi mantido.

A figura 6.25 demonstra que os refletores da bacia estão melhor imageados após todo o processamento. As amplitudes estão muito bem balanceadas, e as camadas seguem uma continuidade muito boa.

A figura 6.26 apresenta a imagem final da linha sísmica, sem dar ênfase na área da bacia. Mas como a área de real interesse nesta linha sísmica é a parte da bacia, o retângulo azul limita a região que será visualizada na figura 6.27.

A figura 6.27 ilustra uma seção sísmica típica da bacia Potiguar, com os resultados finais do processamento e suas melhorias.

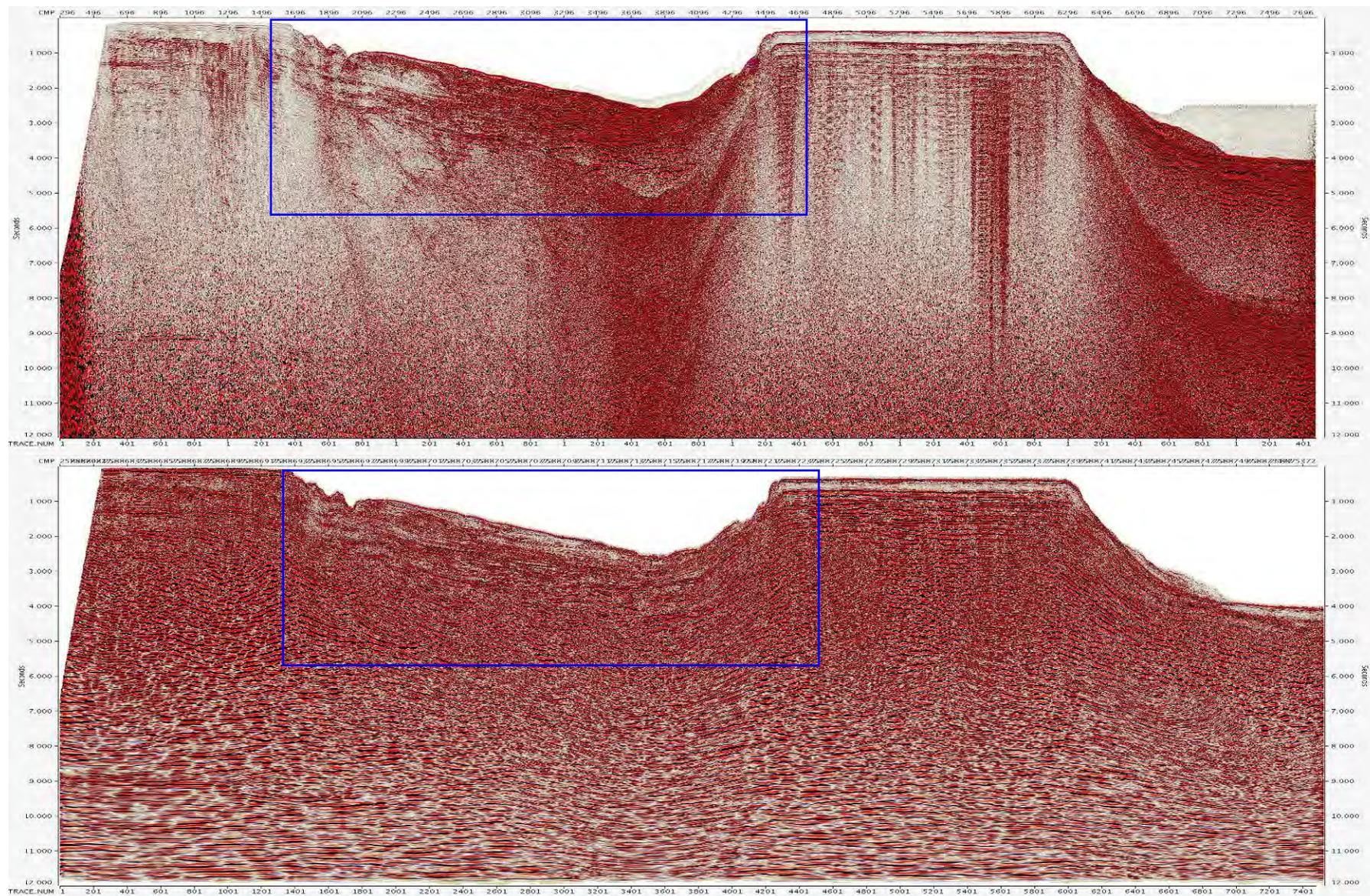


Figura 6.24 - (a) O dado inicial antes de qualquer tratamento e (b) o dado após todo o processamento, o retângulo azul limita a região onde se encontra a bacia.

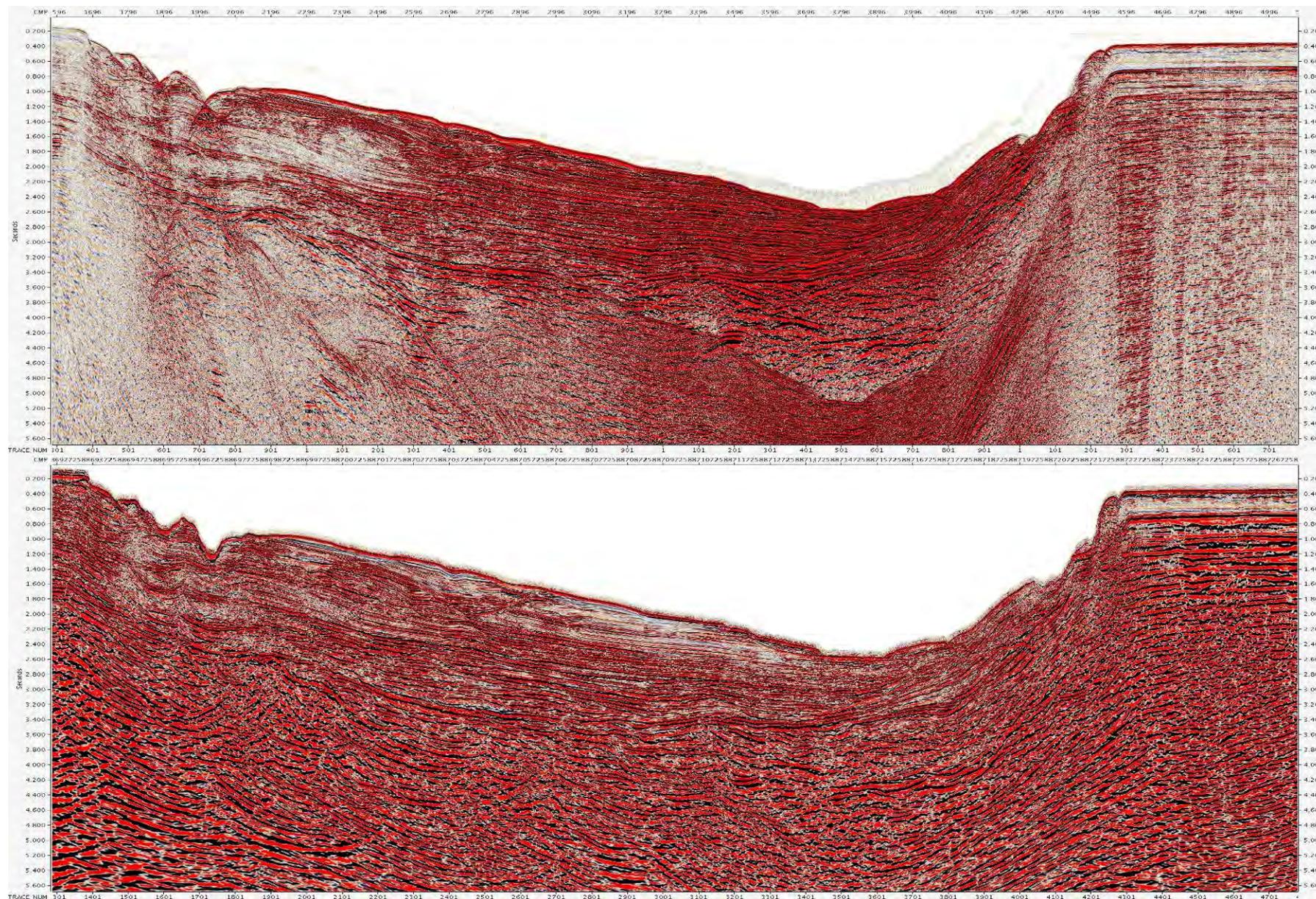


Figura 6.25 – (a) No detalhe, a bacia no dado bruto e em (b) a bacia após todo o processamento.

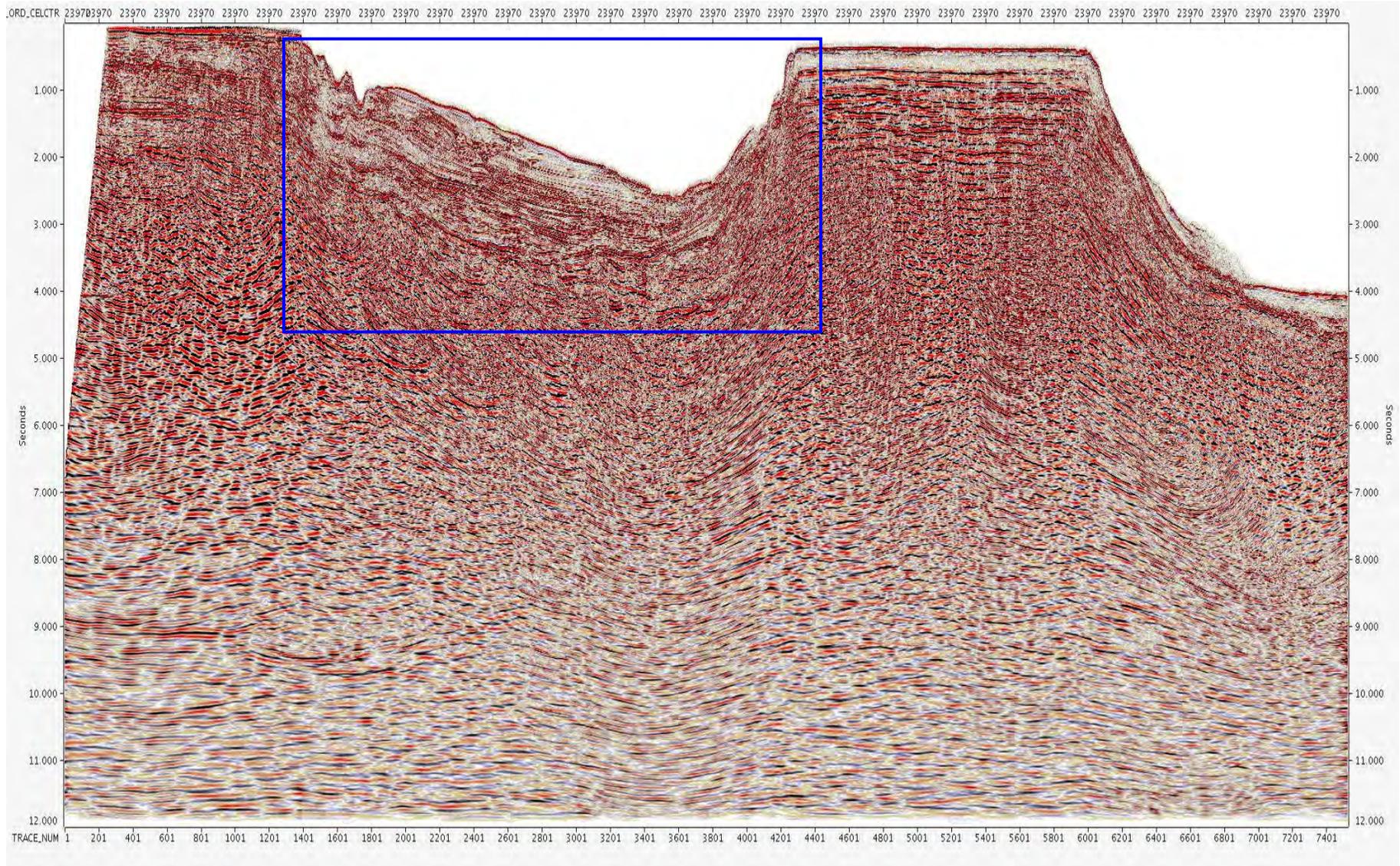


Figura 6.26 - Imagem final da linha sísmica, o retângulo azul localiza a região onde se encontra a bacia.

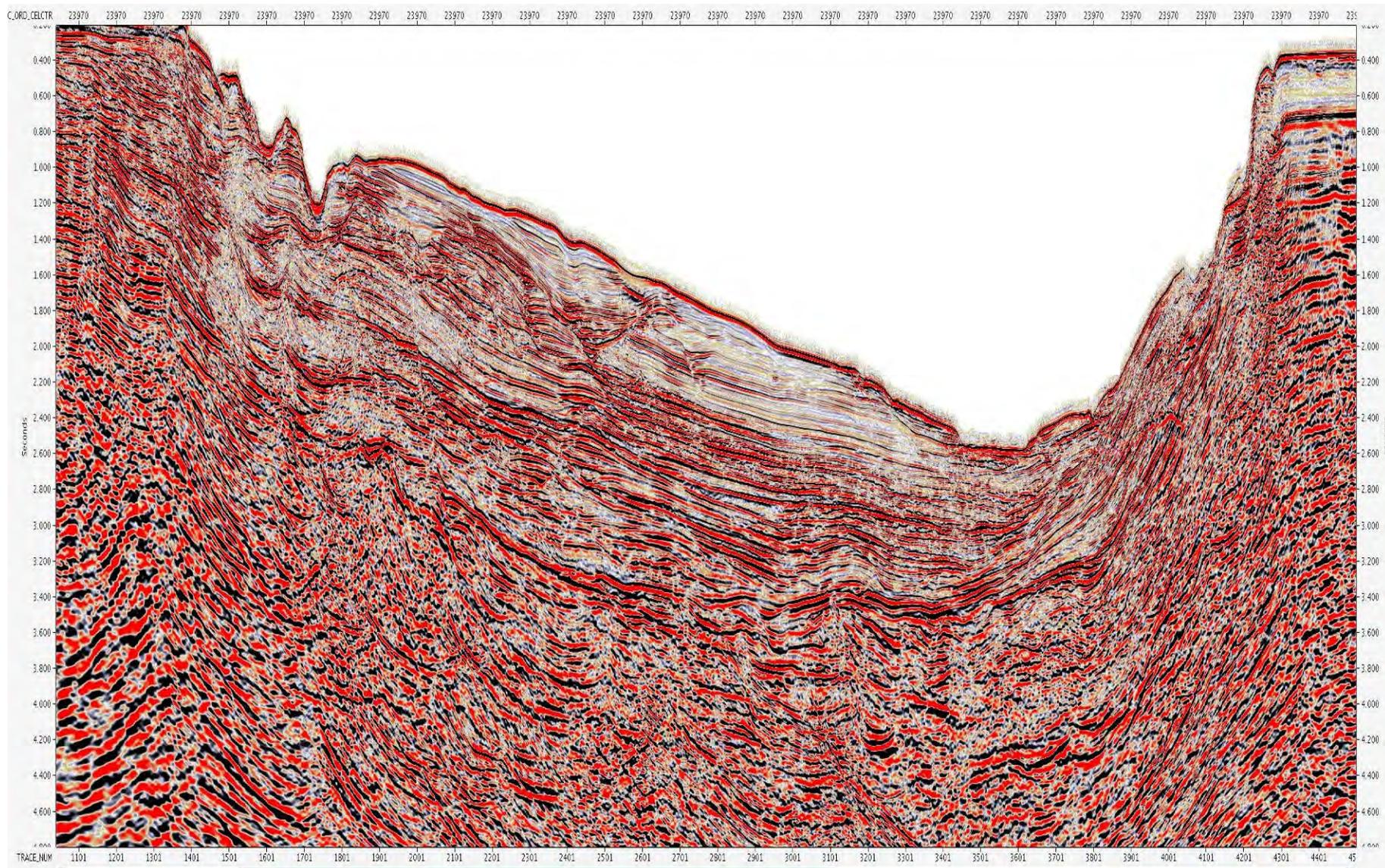


Figura 6.27 - Imagem, no detalhe, da bacia após todos os passos do fluxo de processamento.

7 CONCLUSÕES

Os conceitos de aquisição sísmica embasaram a análise dos ruídos existentes na linha sísmica. Os primeiros ruídos a serem removidos no trabalho foram os ruídos aleatórios, devido a uma certa facilidade e exatidão no processo. O algoritmo de Atenuação de Ruídos Aleatórios atuou com extrema qualidade aumentando a relação sinal/ruído. Vale citar que muitos testes foram realizados objetivando uma imagem sem nenhum ruído aleatório, porém o tempo de processamento e a possível eliminação de eventos primários fez com que os parâmetros aplicados fossem escolhidos de forma que não removessem muito sinal.

Nas partes rasas do dado ocorre um efeito muito comum, onde a onda direta se encontra com os eventos primários; além desse ruído, nas partes onde a profundidade é menor que 350 ms aparece um ruído característico da sísmica terrestre, o *ground roll*. Para a retirada desses ruídos foi aplicado a transformada Radon Linear. O entendimento do conceito da transformada e do arranjo a ser utilizado para eliminação do ruído tornou o resultado experimental muito próximo do que foi estudado na teoria.

Em uma imagem superficial do dado, é claramente possível visualizar uma série de múltiplas, principalmente na parte rasa do dado. Considerando que os ruídos aleatórios, a onda direta e o *ground roll* já haviam sido eliminados, realizou-se um processo constituído de três etapas distintas para a remoção das múltiplas. Depois de muitos testes, pode-se notar que o resultado dos processos foi muito eficiente. Um fator extremamente importante no processamento sísmico, nenhum artefato foi inserido no dado.

De acordo com o que já foi mencionado anteriormente, não é possível utilizar a velocidade preliminar para a migração, portanto para melhorar a resolução da linha sísmica, é necessário fazer um novo *picking*.

Os objetivos traçados no início do trabalho foram alcançados. O início do conhecimento sobre processamento sísmico e utilização do *software* Omega foi concluído com sucesso.

A partir dos conceitos citados no contexto geológico, foi possível notar que os movimentos de compressão e transpressão originados na fase de abertura do Oceano Atlântico, foram responsáveis pelo desenvolvimento da estrutura do fundo oceânico na região. Com a primeira imagem da linha sísmica, pode-se notar como característica, a existência de *horsts* e *grabens* na região.

Como o trabalho proposto possui diversos assuntos, e todos foram abordados nesta monografia, sugere-se aperfeiçoá-los em projetos de pesquisas futuras.

8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALMEIDA, F. F. M.; HASSUI, Y.; BRITO NEVES, B. B. e FUCK, R. A. 1977. Províncias Estruturais Brasileiras. In: Simpósio de Geologia do Nordeste, 2, Campina Grande/PB, Anais, p. 242-258.
- ANSTEY, N. A. e NEWMAN, P., 1967, Part I: The sectional auto-correlogram and Part II: The sectional retro-correlogram: *Geophysical Prospecting*, 14, 391-426.
- ARARIPE, P. T. e FEIJÓ, F. J. 1994. Bacia potiguar. Rio de Janeiro, Boletim de Geociências da PETROBRAS, 8(1): 127-141.
- ASMUS, H. E. e GUAZELLI, W. 1981. Descrição sumaria das estruturas da margem continental brasileira e das áreas oceânicas adjacentes. In: Petrobras. Rio de Janeiro, Cenpes/Dintep. P.187-269.
- AZEVEDO, R. P. 1991. Tectonic evolution of brazilian equatorial continental margin basins. University of London, Imperial College, London, Tese de Doutorado, 455p.
- BARBOSA, R. V. N. 1984. Geologia da Área a Oeste de Macau na Confluência dos Rios dos Cavalos e das Conchas, no Litoral Norte do Estado do Rio Grande do Norte. Relatório de Graduação, Departamento de Geologia, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, 142 p.
- BELTRAMI, C. V.; ALVES, L. E. M.; FEIJÓ, F. 1994. Bacia do Ceará. B. Geoci. Petrobrás, 8(1), 117-25.
- BERTANI, R. T.; COSTA, I. G. e MATOS, R. M. D. 1990. Evolução tectono-sedimentar, estilo estrutural e habitat do petróleo na Bacia Potiguar. In: PETROBRAS (ed.). Origem e Evolução de Bacias Sedimentares. Rio de Janeiro, p.291-310.
- CALDAS, L. H. De O. 1998. Estudo geológico e geofísico da falha de carnaubais, Bacia Potiguar – RN, e implicações neotectônicas.
- CASSAB, R. De C. T. 2003. Paleontologia da Formação Jandaíra, Cretáceo Superior da Bacia Potiguar, com ênfase na paleobiologia dos gastrópodos. Programa de Pós-Graduação em Geologia. Instituto de Geociências – UFRJ.
- COSTA NETO, L. X. 1985. Geologia da Área entre Macauzinho e Boa Vista (Sul de Macau). Relatório de Graduação, Departamento de Geologia, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, 193 p.
- COSTA NETO, L. X. 1997. Evolução geológica-geomorfológica recente da plataforma continental interna ao largo do delta do Rio Açu, Macau - RN. Programa de pós-graduação em geologia e geofísica marinha da Universidade Federal Fluminense, Rio de Janeiro, Dissertação de Mestrado,

214pp.

- CREMONINI, O. A. 1995. A reativação Tectônica da Bacia Potiguar no Cretáceo Superior. SBG, Boletim de resumos expandido, V Simpósio Nacional de Estudos Tectônicos, 1: 277-280, Gramado, RS.
- CREMONINI, O. A. e KARNER, G. D. 1995. Soerguimento termal e erosão na bacia Potiguar submersa e seu relacionamento com a evolução da margem equatorial brasileira. In: Simpósio de Geologia do Nordeste, 16, Recife, Pernambuco, 1995. Sociedade Brasileira de Geologia, Boletim, 14: 181-184.
- CREMONINI, O. A.; GOULART, J. P. M. e SOARES, U. M. 1996. O Rifte Potiguar: novos dados e implicações tectônicas. In: Simp. sobre o Cretáceo do Brasil, 4. *Bol...* Rio Claro: UNESP, p. 89-93.
- DELLA FÁVERA, J. C.; ROSSETTI, E. L.; GUZZO, J.; MATSUDA, N.; SOARES, U. M.; HASHIMOTO, A. T.; ALVES, D. B.; CASTRO, J. C.; AZAMBUJA, N. C. e RODRIGUES, R. 1992. *Estratigrafia de seqüências da formação pendência, bacia Potiguar*. Petrobras/Depex-Cenpes. Relatório Interno, 46 p.
- DIEBOLD, J. B. e STOFFA, P. L. 1981. The travelttime equation, tau-p mapping, and inversion of common midpoint data: *Geophysics*, 46, 3, 238-254.
- DUARTE, O. O. 2006. Dicionário Enciclopédico Inglês-Português de Geofísica e Geologia, Ed. Petrobras, 3ª. Edição.
- FERREIRA, P. P. 2009. Características da Atenuação das Reflexões Múltiplas da Superfície Livre Utilizando a Extrapolação do Campo de Onda.
- FRANÇOLIN, J. B. L. e SZATMARI, P. 1987. Mecanismo de rifteamento da porção oriental da margem norte brasileira. *Revista Brasileira de Geociências*, v. 17, p.196-207.
- GILES, B. F. e JOHNSTON, R. C. 1973. System approach to air gun array design: *Geophys. Prosp.*, v. 21, p. 77-101.
- GOMES, J. R. C.; GATTO, C. M. P. P.; SOUZA, G. M. C.; LUIZ, D. S.; PIRES, J. L.; TEIXEIRA, W. 1981. Geologia e mapeamento regional. In: Brasil. Ministério das Minas e Energia. Projeto RADAMBRASIL. Folhas SB. 24/25, Jaguaribe/Natal. Rio de Janeiro, 1981. (Levantamento de recursos naturais, 23) p.27-176.
- GUIMARÃES, M. A. G. 1989. Avaliação dos arranjos de airguns como fonte sísmica marítima. Boletim de Geociências da Petrobras, Petrobras, v. 3, p. 147-158.

- JARDIM DE SÁ, E. F. 1994. A Faixa Seridó (Província Borborema, NE do Brasil) e seu Significado Geodinâmico na Cadeia Brasileira/ Pan-Africana. Tese de Doutorado. Instituto de Geociências, Universidade de Brasília, 803 p.
- LIMA NETO, F. F. 1994. Geologia da Bacia Potiguar e de suas acumulações de petróleo. PETROBRAS/DEBAR, Natal. 164 p.
- MABESOONE, J. M. 1994. Sedimentary basis of Northeast Brazil. Publicação especial n. 2, UFPE/ Centro de Tecnologia, Departamento de Geologia, Recife, p. 135-141.
- MATOS, R. M. D.; LIMA NETO, F. F.; ALVES, A. C.; WAICK, R. N. 1987. O Rifte Potiguar-Gênese, Preenchimento e Acumulações de Hidrocarbonetos. In: Seminário de Riftes Intracontinentais, 1, Rio de Janeiro, Anais, Petrobrás/Depex. P160-197.
- MATOS, R. M. D. 1992. The northeast brazilian rift system. *Tectonics*, 11(4): 766-791.
- MATOS, R. M. D. 1994. The Northeastern Brazilian Rift System. In: *Tectonics*, 11(4): 767-790.
- NOOTEBOOM, J. J. 1978. Signature and amplitude of linear air gun arrays: *Geophys. Pros.*, v 26, p. 194-201.
- PARASNIS, D. S. 1997. Principles of applied geophysics. Chapman and Hall, London
- ROLIM, R. L. 1985. Quaternario Continental do Nordeste do Brasil. In: Series Textos Didaticos. UFPE/Recife.
- SANTOS NETO, E. V.; MELLO M. R. e RODRIGUES, R. 1990. Caracterização geoquímica dos óleos da Bacia Potiguar: In: Congresso Brasileiro de Geologia, 36, Natal: SBG, 2: 974-985.
- SIAL, A. N. 1976. The post-paleozoic volcanism of northeast Brazil and its tectonic significance. *Anais da Academia Brasileira de Ciências (Suplemento)*, 48: 299-311.
- SILVA C. G. 1991. Holocene Stratigraphy and Evolution of the Açu River Delta, Rio Grande do Norte State, Northeastern Brazil. Duke University, United States, Doctor Philosophy Theses, 359 p.
- SILVA, M. G. 2004. Processamento de dados sísmicos da Bacia do Tacutu. Salvador.
- SOUZA, S. M. 1982. Atualização da litoestratigrafia da Bacia Potiguar. In: SBG, Congresso Brasileiro de Geologia, 32, Salvador/BA, Anais, 5, p. 2392-2406.
- STOFFA, P. L. 1989, Tau-p: An alternative domain for filtering, velocity analysis and imaging: *SEG Expanded Abstracts*, 8, 551-554.
- SZATMARI, P.; FRANÇOLIN, J. B.; ZANOTTO, O. e WOLFF, S. 1987. Evolução tectônica da margem equatorial brasileira. *Revista Brasileira de Geociências*, 17: 180-188.
- TRAD, D. 2003. Interpolation and multiple attenuation with migration operators: *Geophysics*, 68,

6, 2043-2054.

- VASCONCELLOS, G. D. 2009. Processamento de dados sísmicos sintéticos de um modelo de sal utilizando o software SPW.
- VERCHUUR, D. J. e KABIR, M. M. N. 1992. Applications of the generalized Radon transform: expanded abstracts of the 54th Ann. EAEG Mtg., Paris.
- VERCHUUR, D. J. 2006. Seismic multiple removal techniques – past, present and future, EAGE Publications.
- YILMAZ, O. 1987. Seismic Data Processing, Society of Exploration Geophysicists- SEG, Tulsa.
- YILMAZ, O. 2001. Seismic Data Analysis, Society of Exploration Geophysicists- SEG, Tulsa.
- ZALAN, P. V. e WARME, J. E. 1985. Tectonics and sedimentation of the Piauí-Camocim sub-basin, offshore northeastern Brazil. *Ciência-Técnica-Petróleo*, 17, 71 pp.
- ZIOLKOWSKI, A.; PARKES, G.; HATTON, L. e HAUGLANDS, T. 1981. The signature of an air gun array: Computation from near-field measurements including interactions.