



UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO NORTE
CENTRO DE TECNOLOGIA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PETRÓLEO

**PROCESSAMENTO SÍSMICO DA LINHA 204-239 DA BACIA DO
TACUTU COM O SEISMIC UNIX E BOTOSEIS**

Alan Silva de Oliveira

**Dezembro, 2018
NATAL, RN**

Alan Silva de Oliveira

**PROCESSAMENTO SÍSMICO DA LINHA 204-239 DA BACIA DO TACUTU COM O
SEISMIC UNIX E BOTOSEIS**

Trabalho apresentado ao Curso de
Engenharia de Petróleo da Universidade
Federal do Rio Grande do Norte como
requisito parcial para a obtenção do título
de Engenheiro de Petróleo.

Orientador : Dr. German Garabito Callapino

Dezembro, 2018

NATAL, RN

Orientador: Dr. German Garabito Callapino.

**PROCESSAMENTO SÍSMICO DA LINHA 204-239 DA BACIA DO TACUTU COM O
SEISMIC UNIX E BOTOSEIS**

Natal, 06 de dezembro de 2018

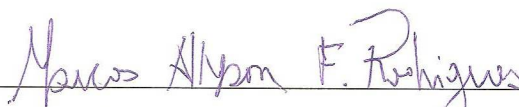
O aluno **Alan Silva de Oliveira** foi considerado aprovado no seu trabalho de conclusão para obtenção do título de **Formação em Engenharia de Petróleo**.

Banca examinadora formada por:



Prof. Dr. German Garabito Callapino

Orientador - UFRN



Prof. Dr. Marcos Allyson Felipe Rodrigues

Membro examinador - UFRN



Prof. Dr. Edney Rafael Viana Pinheiro Galvão

Membro examinador – UFRN

OLIVEIRA, Alan Silva de. Processamento sísmico da linha 204-239 da Bacia do Tacutu com o Seismic Unix e BotoSeis. 2018. 62 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia de Petróleo, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, Brasil, 2018.

Palavras-Chaves: Processamento de dados sísmicos, Seismic Unix, BotoSeis.

Orientador: Prof Dr. GERMAN GARABITO CALLAPINO

RESUMO

O processamento de dados sísmicos é um conjunto de etapas realizadas de forma detalhada, aplicados a dados obtidos na aquisição, com a finalidade de melhorar o sinal de reflexão, eliminando ou atenuando energia indesejáveis, produzindo ao final imagens mais reais possíveis da subsuperfície. Na indústria do petróleo, o processamento de dados sísmicos de reflexão é realizado com programas comerciais que podem ser acessados somente nas empresas de processamento ou nos laboratórios de instituições de ensino que possuem licenças acadêmicas. Este trabalho apresenta um estudo de aplicação de dois programas livres e de código aberto que podem ser usados para processamento de dados sísmicos reais, que são o pacote Seismic Unix e a plataforma interativa BotoSeis. Este estudo é realizado por meio do processamento sísmico padrão de dados reais de uma linha sísmica da Bacia do Tacutu, região norte do Brasil. Este trabalho apresenta os resultados das etapas do processamento sísmico que podem ser executadas de forma eficiente pela plataforma BotoSeis, bem como as etapas que foram realizadas com o pacote Seismic Unix. Combinando os dois programas, foram aplicadas as principais etapas do processamento sísmico padrão, obtendo-se uma imagem final com uma boa qualidade da geologia em subsuperfície.

OLIVEIRA, Alan Silva de. Processamento sísmico da linha 204-239 da Bacia do Tacutu com o Seismic Unix e BotoSeis. 2018. 62 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia de Petróleo, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, Brasil, 2018.

Keywords: Seismic data processing, Seismic Unix, BotoSeis.

Tutor: Prof Dr. GERMAN GARABITO CALLAPINO

ABSTRACT

Seismic data processing is a set of steps performed in detail, applied to acquisition data, in order to improve the reflection signal, eliminating or attenuating undesirable energy, producing at the end more real images of the subsurface. In the oil industry, seismic reflection data processing is performed with commercial software that can be accessed only in processing companies or in the laboratories of educational institutions that have academic licenses. This work presents a study of the application of two free and open-source software that can be used to process real seismic data, which are the Seismic Unix package and the interactive platform BotoSeis. This study is carried out by means of the standard seismic processing of real data of a seismic line of the Tacutu Basin, north of Brazil. This work presents the results of the seismic processing steps that can be performed efficiently by the BotoSeis platform, as well as the steps that were performed with the Seismic Unix package. Combining the two programs were applied the main steps of the standard seismic processing, obtaining a final image with a good quality of the subsurface geology.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus, acima de tudo, pois sem ele nada disso teria sido realizado.

Além disso, agradeço a toda minha família por sempre me apoiar em todos os momentos.

Agradeço ainda a todos os professores que tive o prazer de conhecer, principalmente aos do Departamento de Engenharia de Petróleo da Universidade Federal do Rio Grande do Norte (DPET/UFRN) pelos ensinamentos.

Aos meus amigos, em especial, aos que a engenharia de petróleo me deu, por compartilhar muitos momentos de estudo e felicidade.

Ao Prof. Dr. German Garabito Callapino, por todo ensinamento ministrado, como professor e orientador de estágio, sempre se dedicando e incentivando.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	13
2	ASPECTOS TEÓRICOS.....	15
2.1	TIPOS DE ONDAS SÍSMICAS.....	15
2.1.1	Ondas longitudinais.....	15
2.1.2	Ondas transversais.....	16
2.1.3	Ondas Rayleigh.....	17
2.1.4	Ondas Love.....	17
2.2	VELOCIDADES SÍSMICAS.....	18
2.3	AQUISIÇÃO TÉCNICA CDP.....	19
2.4	ETAPAS PRINCIPAIS DO PROCESSAMENTO SÍSMICO.....	21
2.4.1	Técnica para remoção do Ground Roll.....	22
2.4.2	Deconvolução.....	24
2.4.3	Correção NMO.....	26
2.4.4	Análise de velocidade.....	28
2.4.6	Empilhamento CMP.....	31
2.4.7	Migração pós-empilhamento.....	32
3	MATERIAS E MÉTODOS.....	35
3.1	LOCALIZAÇÃO DA LINHA SÍSMICA.....	35
3.2	PARÂMETROS CONSIDERADOS PARA A AQUISIÇÃO.....	36
3.3	PACOTE SEISMIC UNIX.....	37 3737
3.3.1	Formato de dado SU.....	37
3.4	INTERFACE BOTOSEIS.....	38
3.5	PROCESSAMENTO.....	40

4	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	42
4.1	EDIÇÃO DE TRAÇOS.....	42
4.2	CORREÇÃO DO ESPALHAMENTO GEOMÉTRICO.....	44
4.3	FILTRAGEM PASSA-BANDA.....	46
4.4	SUPRESSÃO DE GROUND ROLL.....	47
4.5	DECONVOLUÇÃO.....	48
4.6	ANÁLISE DE VELOCIDADES (COM BOTOSEIS).....	50
4.7	EMPILHAMENTO CMP.....	54
4.8	MIGRAÇÃO PÓS-EMPILHAMENTO.....	56
5	CONCLUSÕES.....	60
5.1	RECOMENDAÇÕES.....	60
6	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	61

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 - Onda longitudinal.	16
Figura 2.2 - Onda transversal.	16
Figura 2.3 - Onda Rayleigh.	17
Figura 2.4 - Onda Love.	18
Figura 2.5 - Velocidades em diferentes rochas e fluidos.	19
Figura 2.6 - Técnica CDP com o diagrama de avanço dos tiros.	20
Figura 2.7 – (a) Representação do CDP para camadas planas e horizontais e (b) Representação do CDP para camadas inclinadas.	21
Figura 2.8 - Representação do Ground Roll no sismograma.	22
Figura 2.9 – Transformada de Fourier bidimensional.	23
Figura 2.10 - Espectro F-K.	24
Figura 2.11 - Modelo convolucional.	25
Figura 2.12 - Deconvolução ao impulso.	26
Figura 2.13 - Representação em gráfico da correção NMO.	27
Figura 2.14 - Seção CMP seguido da sua correção NMO.	28
Figura 2.15 - (a) Seção CMP; (b) Sismograma corrigido com o valor <i>vnmo</i> correto; (c) Sobrecorreção devido <i>vnmo</i> mais baixa que a correta e (d) Subcorreção devido ao <i>vnmo</i> ser mais alta do que a correta.	29
Figura 2.16 - Painel de empilhamento com velocidade constante (CVS).	30
Figura 2.17 - Seção CMP e sua medida da qualidade do sinal (Semblance).	31
Figura 2.18 - (a) Seção CMP; (b) Seção CMP após correção MNO e (c) Seção empilhada CMP.	32
Figura 2.19 - Semicírculo de migração pós-empilhamento para um meio com velocidade constante.	33
Figura 2.20 - Refletor inclinado na seção afastamento zero e deslocamento da reflexão pela migração.	34
Figura 2.21 - Seções empilhada e migrada de um refletor em forma de dobra sinclinal e uma difração.	34

Figura 3.1 - Mapa de localização da Bacia Tacutu e da linha sísmica 204-239.	35
Figura 3.2 - Interface gráfica principal da plataforma BotoSeis.	39
Figura 3.3 - Fluxograma do processamento sísmico.	40
Figura 4.1 - Eliminação de traços anômalos.	43
Figura 4.2 - Edição de traços com polaridade invertida.	43
Figura 4.3 - Seção sísmica original e sua amplitude ao longo do tempo.	45
Figura 4.4 - Seção com correção de amplitude e sua amplitude ao longo do tempo.	46
Figura 4.5 - Seção original seguido do seu espectro F-K.	47
Figura 4.6 - (a) Seção filtrada, (b) Espectro de frequência e (c) Parte rejeitada.	48
Figura 4.7 - Processo de deconvolução.	49
Figura 4.8 - Seção CDP original e painel de coerência.	50
Figura 4.9 - Seção CDP super gather e painel de coerência.	51
Figura 4.10 - (a) Fluxograma na interface BotoSeis e (b) Parâmetros de entrada utilizados na análise realizada no BotoVelan.	52
Figura 4.11 – Análise de velocidades com BotoVelan: Seção CDP, painéis de coerência e CVS com os pontos selecionados no processo de <i>picking</i>	53
Figura 4.12 - Representação da Seção CDP corrigida de NMO, painéis de coerência e CVS com os pontos selecionados no processo de <i>picking</i>	54
Figura 4.13 - Fluxograma na interface principal do BotoSeis para realizar o empilhamento.	55
Figura 4.14 - Seção empilhada CMP usando o modelo de velocidade obtida pelo programa BotoVelan.	56
Figura 4.15 - Modelo de velocidades interpolado sem suavização.	57
Figura 4.16 – (a) Seção empilhada e (b) Seção migrada pós-empilhamento.	58

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 – Parâmetros de aquisição utilizados.....	36
Tabela 3.2 - Exemplos de algumas palavras chaves ou headers do formato SU.....	38

LISTA DE ABREVIATURAS E/OU SÍMBOLOS E/OU SIGLAS

ANP – Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis.

CDP – Common Depth point

CMP – Common Midpoint

CVS – Constant Velocity Stacking

CWP – Center for Wave Phenomena

$e(t)$ – Função refletividade

$f(t)$ – Filtro

GPL - General Public License

GRI – Gas Research Institute

k – Módulo de bulk

μ - Módulo de cisalhamento

$n(t)$ – Ruído aleatório

NMO – Normal Moveout

ρ – Densidade

$s(t)$ – Traço sísmico

SEG – Society of Exploration Geophysicist

SU – Seismic Unix

t_0 – Tempo de afastamento nulo

$t(x)$ – Tempo de trânsito das reflexões

v – Velocidade da onda no meio

v_{NMO} – Velocity Normal Moveout

v_p – Velocidade sísmica da onda P

v_s – Velocidade sísmica da onda S

x – Afastamento fonte-receptor

$w(t)$ – Sinal da fonte

$w(t)^{-1}$ – Inverso do sinal da fonte

1 INTRODUÇÃO

O método sísmico de reflexão consiste de experimentos que geram na superfície, usando fontes mecânicas, um campo de onda elástica ou onda sísmica que se propaga no interior da Terra. As ondas sísmicas que retornam à superfície são coletadas por sensores espalhados sobre a superfície e depois registrados. O método sísmico de reflexão tem uma ampla gama de aplicações desde estudos ambientais e de engenharia civil em terrenos próximos à superfície, até a exploração de petróleo e gás em áreas rasas e profundas.

O processamento de dados sísmicos de reflexão consiste de um conjunto de processos desenvolvidos com base em métodos físicos, matemáticos e computacionais, que são aplicados a dados sísmicos de reflexão com a finalidade de realçar os sinais correspondentes a reflexões, eliminando ou atenuando energias indesejáveis, para gerar ao final do processamento uma imagem mais real possível das estruturas geológicas e um modelo de velocidades representativo das formações rochosas em subsuperfície (Yilmaz, 2001).

Na indústria do petróleo, existem diversos softwares comerciais para o processamento de dados sísmicos de reflexão, a saber Promax/SeisSpace - Halliburton, Echos - Paradigm, Vista - Schlumberger, entre outros. Normalmente, as licenças de softwares comerciais desse tipo são muito caras e, portanto, inacessíveis para um usuário comum. Embora os laboratórios das universidades contem com licenças acadêmicas desses softwares, seu uso também está restrito aos horários de funcionamento dos laboratórios e até ao número de usuários. Alternativamente, existem softwares livres distribuídos sob licença GPL (*General Public License*) que podem ser utilizados para o processamento de dados sísmicos de reflexão, como por exemplo, Seismic Unix (COHEN; STOCKWELL, 2010) e Madagascar (FOMEL, 2012). Também existem alguns softwares livres interativos como o GeBR (BILOTTI, 2012) e BotoSeis (GARABITO et al., 2012), que facilitam o uso dos programas do pacote Seismic Unix através da construção de fluxogramas.

Este trabalho tem o objetivo de realizar o estudo das principais etapas de um processamento de dados sísmicos por meio dos programas do pacote Seismic Unix

(SU) sendo executados através do *shell scripts* e a utilização do software BotoSeis. Um primeiro estudo deste tipo comparando somente o processo de análise de velocidades de ambas ferramentas foi apresentado em (VARELA, 2017). Para o estudo neste trabalho, será utilizado o dado sísmico da linha 204-239 adquirida na Bacia do Tacutu, região norte do Brasil. Neste trabalho, será apresentada uma revisão teórica das principais técnicas do processamento sísmico e, posteriormente, serão descritas as etapas do processamento aplicado ao dado real, mostrando os resultados parciais até a obtenção da imagem final da geologia em subsuperfície.

Este trabalho é composto por cinco capítulos. O capítulo 2 apresenta os aspectos teóricos que fundamentam toda a compreensão do trabalho, como ondas sísmicas, a Técnica CDP e algumas etapas principais do processamento sísmico. O capítulo 3 mostra os materiais e métodos utilizados, descrevendo os parâmetros da linha sísmica 204-239, abordando também o pacote Seismic Unix e BotoSeis. O capítulo 4 estão expostos os resultados obtidos com a aplicação dos softwares Seismic Unix e BotoSeis ao dado sísmico real e as discussões sobre os mesmos. As conclusões retiradas do desenvolvimento de todo o trabalho e as recomendações para trabalhos futuros são citadas no capítulo 5.

2 ASPECTOS TEÓRICOS

Neste capítulo, serão abordados aspectos fundamentais sobre ondas sísmicas, com os seus diferentes tipos, dando destaque as suas velocidades. Em seguida, apresenta-se uma breve revisão sobre a Técnica CDP aplicada na aquisição de dados sísmicos e de algumas etapas principais do processamento sísmico.

2.1 TIPOS DE ONDAS SÍSMICAS

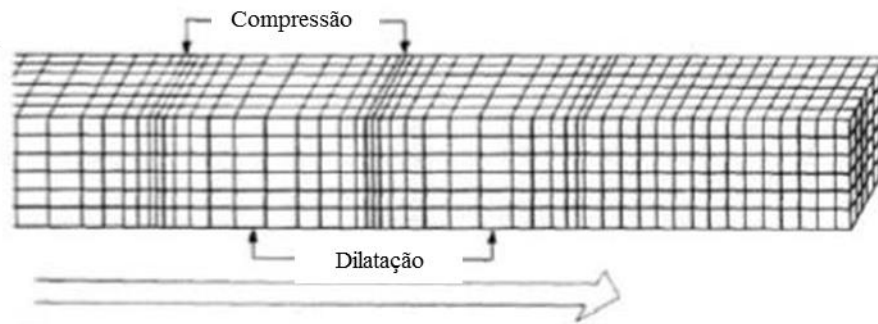
Os métodos sísmicos consistem na propagação de ondas sísmicas artificiais em superfície ou próximo a ela. São produzidas através de uma fonte que provoca uma deformação no meio, e suas reflexões em geofones quando em terra e hidrofones na água, trazendo consigo informações das propriedades físicas das formações rochosas da subsuperfície.

As ondas sísmicas são ondas mecânicas que se propagam através das rochas, carregando informações do interior do meio percorrido. Elas podem ser classificadas em ondas volumétricas, que são subdivididas em ondas longitudinais (ondas P) e ondas transversais (ondas S), e em ondas superficiais, dos tipos Rayleigh e Love. Tal classificação é realizada através de algumas características, como: (a) a direção do movimento ou vibração das partículas e (b) direção de propagação da energia.

2.1.1 Ondas longitudinais

São as ondas em que o movimento das partículas é na mesma direção da propagação da energia. Este movimento provoca zonas de compressão e de dilatação que se propagam através da matéria, conforme a Figura 2.1. Possuem a capacidade de se deslocar em todos os meios. Também podem ser chamadas de ondas “P”, ondas de compressão ou ondas primárias, por serem as mais rápidas de todas as ondas sísmicas, sendo as primeiras a serem registrada nos sismogramas.

Figura 2.1 - Onda longitudinal.

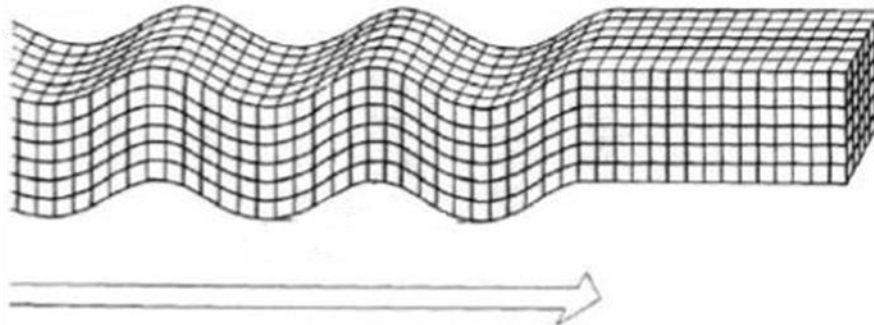


Fonte: Adaptado de Bolt, 1976.

2.1.2 Ondas transversais

São as ondas em que o movimento das partículas é perpendicular à direção de propagação da energia, como pode ser visto na Figura 2.2. Essas ondas não se propagam em meios líquidos e gasosos. Também podem ser chamadas de ondas secundárias, pois sua velocidade está entre 50% e 60% do valor da velocidade das ondas longitudinais.

Figura 2.2 - Onda transversal.

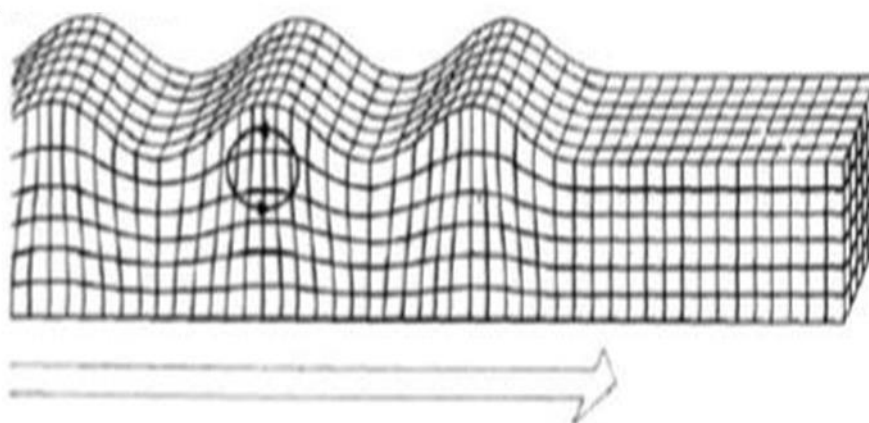


Fonte: Adaptado de Bolt, 1976.

2.1.3 Ondas Rayleigh

São as ondas que possuem o movimento das partículas em um plano vertical à direção de propagação da onda, apresentando um comportamento elíptico e retrógrado, como ilustra a Figura 2.3. Na sísmica aplicada à exploração de petróleo, são mais conhecidas como *ground roll*, que tem baixa velocidade, baixa frequência e alta amplitude, e normalmente mascaram as reflexões primárias.

Figura 2.3 - Onda Rayleigh.

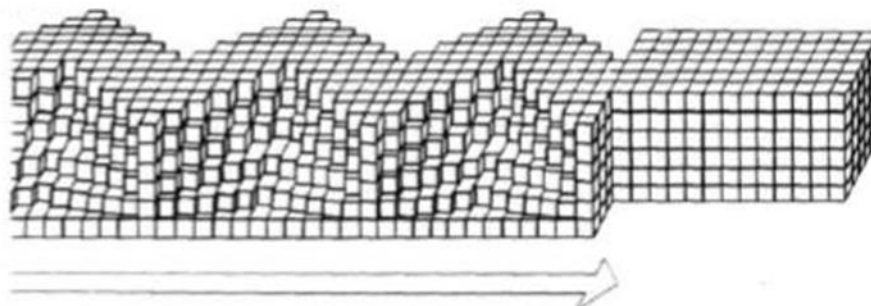


Fonte: Adaptado de Bolt, 1976.

2.1.4 Ondas Love

São as ondas que apresentam comportamento transversal, ou seja, suas vibrações ocorrem no plano horizontal e perpendicular à direção de propagação, como mostra a Figura 2.4.

Figura 2.4 - Onda Love.



Fonte: Adaptado de Bolt, 1976.

2.2 VELOCIDADES SÍSMICAS

A velocidade com que uma onda elástica se propaga no meio geológico é denominada velocidade sísmica. Assim, o conhecimento dessa propriedade é importante para a prospecção de hidrocarboneto, facilitando a interpretação sísmica, pois as características da reflexão dependem principalmente dos contrastes de velocidade e densidade entre as camadas.

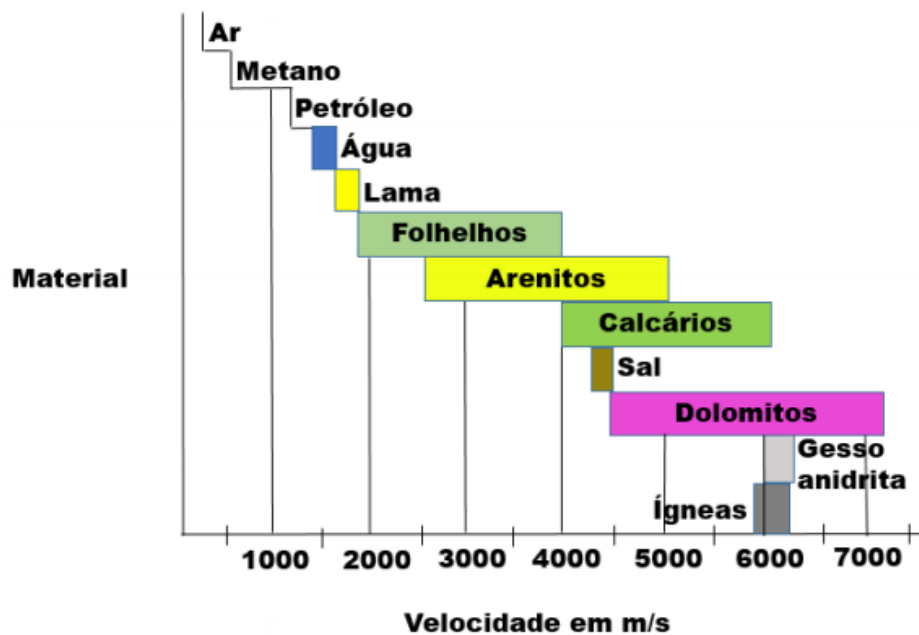
Para as ondas de corpo, a velocidade de propagação em meios elásticos é dada em função das propriedades elásticas e das densidades. A velocidade sísmica da onda P é descrita pela Equação 2.1:

$$V_p = \sqrt{\frac{k + \frac{4\mu}{3}}{\rho}} \quad (2.1)$$

Onde k é o módulo de bulk, μ é o módulo de cisalhamento e ρ a densidade. Estes três parâmetros são funções da estrutura e dos minerais que compõe as rochas.

Na Figura 2.5, mostra o intervalo de valores da velocidade em m/s dos tipos de rochas sedimentares mais comuns e os fluidos que podem estar presentes nos poros.

Figura 2.5 - Velocidades em diferentes rochas e fluidos.



Fonte: Adaptado do Kearey, Brooks, Hill, 2002.

Já a velocidade sísmica da onda S é descrita pela Equação 2.2:

$$V_s = \sqrt{\frac{\mu}{\rho}} \quad (2.2)$$

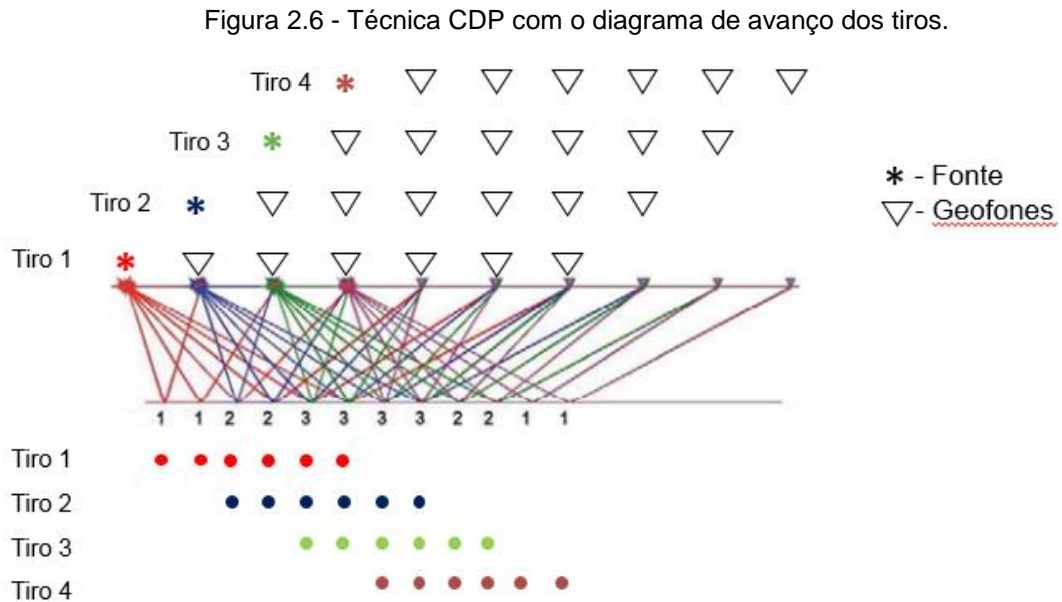
Conforme a Equação 2.2, a única propriedade elástica que determina a velocidade das ondas transversais é a rigidez do meio, μ , e essa propriedade em meios líquidos e gasosos é zero, sendo assim as ondas transversais não se propagam nesses meios.

2.3 AQUISIÇÃO TÉCNICA CDP

A técnica de registro CDP (*common depth point*) consegue amostrar um mesmo ponto em subsuperfície diversas vezes, cada uma delas com um afastamento fonte-receptor diferente, resultando em um aumento na amplitude do sinal amostrado em relação aos ruídos aleatórios.

Nessa técnica, o arranjo básico do levantamento sísmico consiste de uma fonte e dezenas a centenas de receptores. Quando a onda é gerada por uma fonte (tiro), propaga-se na subsuperfície e retorna para ser registrada nos receptores, em

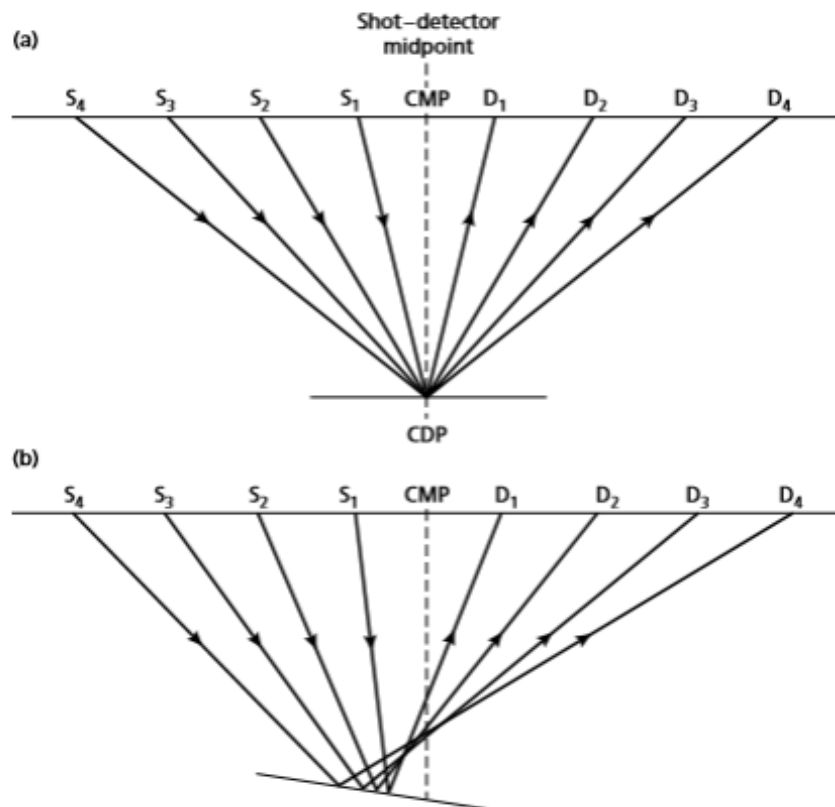
seguida desloca-se a fonte e as estações receptoras para as novas posições e detona-se um novo tiro, repetindo esse processo até o último registro, conforme a Figura 2.6.



Fonte: Adaptado de Wilson, 2003.

A denominação CDP é válida somente para camadas planas e horizontais onde as reflexões para diferentes pares fonte-receptor coincidem em um ponto comum, de acordo com a Figura 2.7(a), pois, para camadas inclinadas, os pontos de reflexão sofrerão uma dispersão por interferência do ângulo de inclinação, mostrando assim uma região e não mais um ponto comum em subsuperfície, como mostra a Figura 2.7(b). Desta forma, a denominação mais correta seria técnica CMP (*common midpoint*), uma vez que posiciona os traços registrados a meio caminho fonte-receptor, independentemente se corresponde a um ponto comum de amostragem em subsuperfície.

Figura 2.7 – (a) Representação do CDP para camadas planas e horizontais e (b) Representação do CDP para camadas inclinadas.



Fonte: Kearey, Brooks, Hill, 2002.

A principal vantagem dessa técnica, na amostragem dos mesmos pontos de um refletor, é a melhoria da razão sinal-ruído, pois nos registros que chegam à superfície, ocorrem determinados eventos indesejáveis, que interferem negativamente no sinal. Essa energia indesejada é chamada de ruídos. Portanto, a técnica CDP atenua facilmente os ruídos classificados como aleatórios, aqueles caracterizados como ruídos ambientais, causados por ventos, movimentos na linha, ruído elétrico, entre outros, uma vez que faz uma maior cobertura do dado.

2.4 ETAPAS PRINCIPAIS DO PROCESSAMENTO SÍSMICO

Como o presente trabalho tem o objetivo de aplicar o processamento sísmico padrão em uma linha sísmica real terrestre, nesta seção serão descritos os

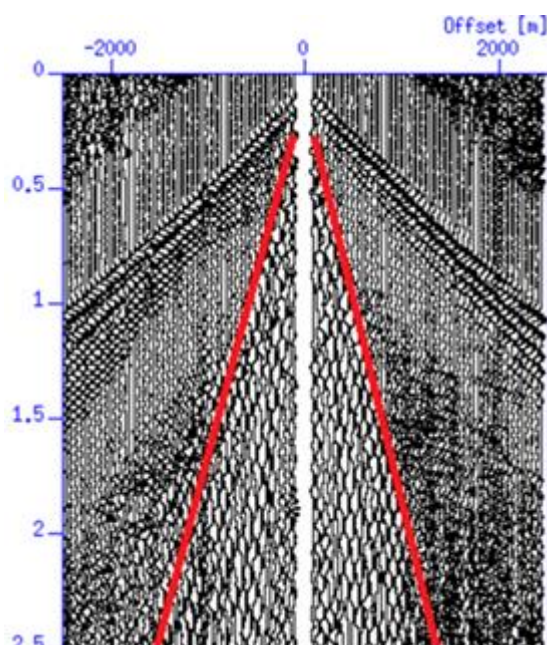
fundamentos teóricos e alguns exemplos em dados sintéticos de alguns processos que são mais importantes para o tratamento de dados sísmicos.

2.4.1 Técnica para remoção do Ground Roll

O *ground roll* ou ondas Rayleigh são ondas dispersivas, formada por ondas de compressão ou “P” e por ondas cisalhantes ou “S” que se propagam na superfície. Possuem características de baixa frequência, baixa velocidade e alta amplitude, que se misturam com as ondas de interesse, dificultando o processamento.

É considerado um dos principais ruídos na sísmica terrestre por dominarem a energia de uma importante faixa do sismograma, sendo visualizado com o formato de um cone superficial, como ilustrado na Figura 2.8. Portanto, é preciso atenuar para tornar visíveis as reflexões.

Figura 2.8 - Representação do Ground Roll no sismograma.

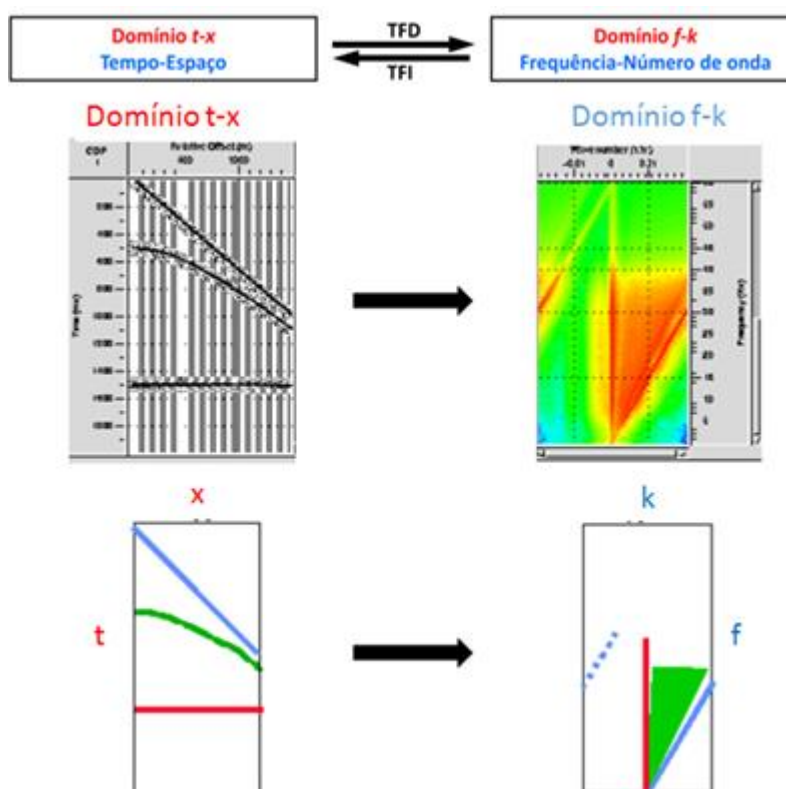


Fonte: Elaborada pelo autor.

Para atenuação desse ruído no processamento de dados sísmicos, executa-se o filtro F-K, o qual remove frequências indesejáveis no domínio da frequência –

número de onda. Esse filtro está baseado na Transformada de Fourier bidimensional da seção sísmica fonte-comum ou ponto-médio-comum. Nessa transição, o eixo do tempo é transformado para o domínio da frequência e o eixo espacial é transformado para o domínio de número de onda, conforme ilustrado na Figura 2.9.

Figura 2.9 – Transformada de Fourier bidimensional.

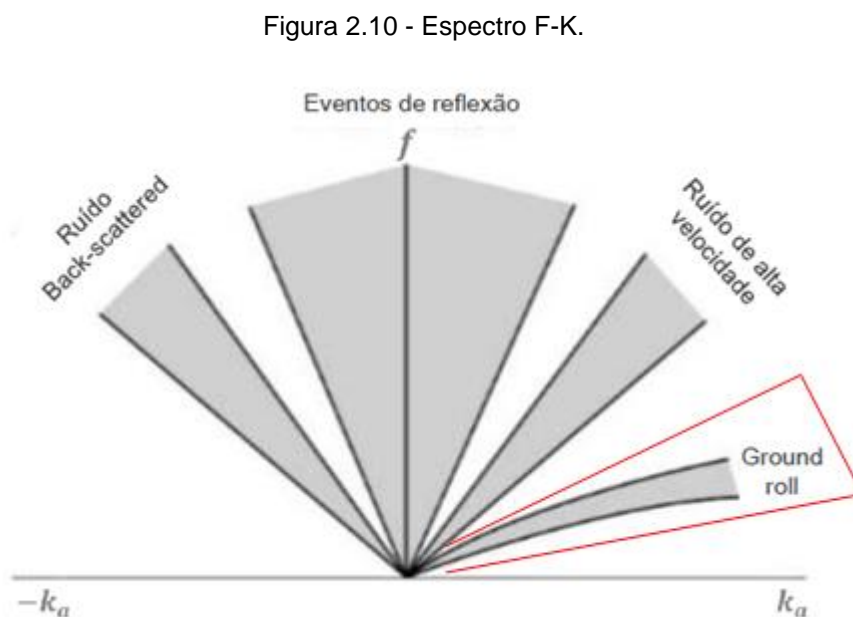


Fonte: Adaptado de Hardy, 2015.

Na Figura 2.9, as ondas que se propagam horizontalmente, no registro sísmico terão forma de uma linha reta inclinada (linha de cor azul) e na transformada f-k também aparecerão como uma linha reta inclinada. As ondas sísmicas que se propagam na direção vertical, no registro sísmico aparecerão com forma de uma linha reta horizontal (linha vermelha) e na transformada f-k como uma linha vertical. As ondas sísmicas correspondentes às reflexões emergem para a superfície formando uma frente de onda com certa curvatura. No registro sísmico, terão forma

hiperbólica se o meio for homogêneo (linha verde) e, na transformada f-k, a energia dessa onda é espalhada em uma certa área.

Portanto, o dado sísmico transformado para o domínio f-k, também conhecido como espectro f-k, mostra os sinais separados e plotados em função da frequência e velocidade aparente, como pode ser visto na Figura 2.10.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Nesse domínio é possível apagar uma certa parte de frequências indesejáveis, por exemplo, a área que contém as ondas *ground roll*, indicado na figura 2.10, em vermelho. E quando os dados são transformados de volta para o domínio t-x, as ondas *ground roll* são removidas do dado original.

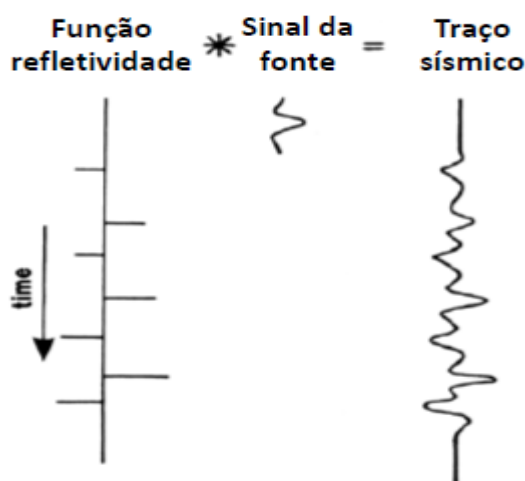
2.4.2 Deconvolução

A deconvolução pode ser definida como um processo de filtragem que retrocede o efeito da convolução, sendo fundamentada no modelo convolucional, conforme a Equação 2.3.

$$s(t) = w(t) * e(t) + n(t) \quad (2.3)$$

De acordo com a Equação 2.3, o traço sísmico, $s(t)$, é definido como a convolução da função refletividade, $e(t)$, com o sinal da fonte, $w(t)$. O asterisco representa a operação de convolução e $n(t)$ está relacionado com o ruído aleatório. Tal procedimento pode ser melhor visto na Figura 2.11.

Figura 2.11 - Modelo convolucional.



Fonte: Adaptado de Kruk, 2005.

Portanto, a deconvolução é o inverso da convolução, podendo ser expressa pela Equação 2.4.

$$e(t) = s(t) * w(t)^{-1} = s(t) * f(t) \quad (2.4)$$

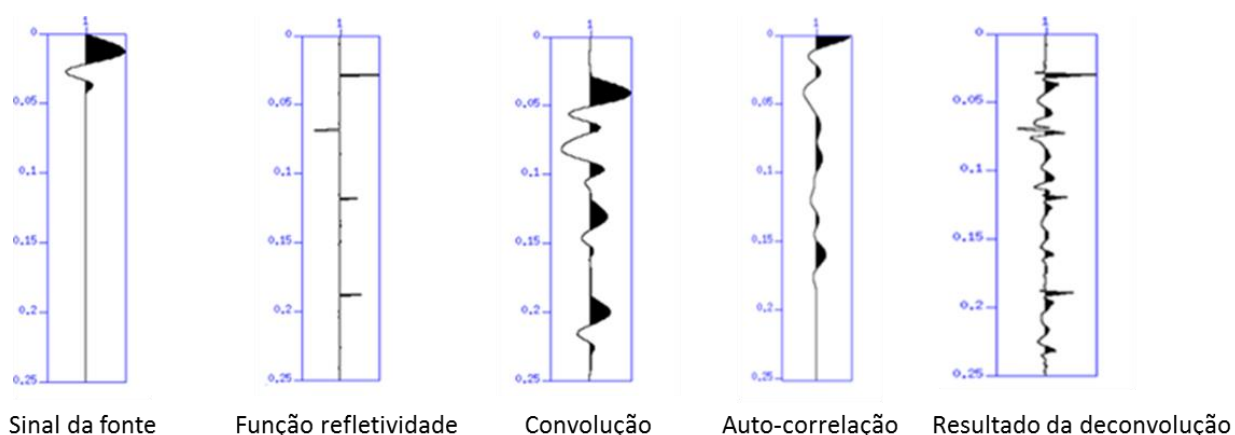
Este processo tem como principal objetivo a reconstrução da função refletividade que representa o meio geológico. Na prática, não se obtém a função de refletividade real, mas obtêm-se resultados com um aumento da resolução temporal devido a compressão do sinal da fonte e atenuação dos ruídos.

A partir da Equação 2.4, pode-se notar que a solução da deconvolução depende do sinal da fonte, $w(t)$, para calcular o filtro $f(t)$, uma vez que necessita

descobrir quem é o inverso da fonte. Caso o sinal da fonte não seja conhecida, como acontece na prática, então a deconvolução pode ser resolvido por meio da teoria do filtro de Wiener. Esta solução é baseada na condição de que a refletividade seja uma função aleatória, significando que o traço sísmico tem as características do sinal da fonte, sendo suas autocorrelações e espectros de amplitudes similares. A função autocorrelação do traço contém toda a informação da frequência do sinal da fonte original, mas nenhuma informação da fase, essa informação vem da suposição da fase mínima.

O filtro de Wiener pode ser aplicado a vários problemas, pois existem diferentes tipos ou formas de saídas desejadas, uma delas é a deconvolução ao impulso, em que a saída desejada é uma função *spike*, como pode ser visto na Figura 2.12.

Figura 2.12 - Deconvolução ao impulso.



Fonte: Elaborada pelo autor.

2.4.3 Correção NMO

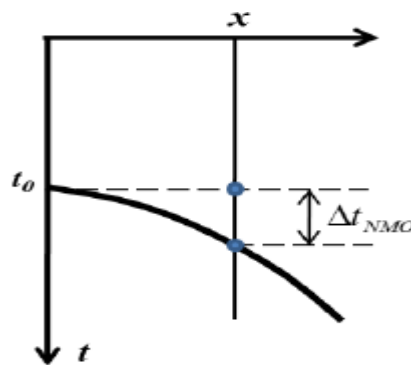
Este processo ocorre no domínio do tempo-afastamento envolvendo um conjunto de traços sísmicos, possuindo como objetivo a formação de uma imagem das estruturas geológicas. Para aplicar essa correção, é necessário conhecer o modelo de velocidade que pode ser obtido por meio do processo de análise de velocidades, o qual será visto no tópico 2.4.4.

A correção NMO tem como principal característica horizontalizar as reflexões nos traços de uma seção CMP, sendo dependente da velocidade e do afastamento fonte-receptor. O tempo de trânsito das reflexões na interface de camada homogênea é governado pela Equação 2.5.

$$t(x)^2 = t_0^2 + \frac{x^2}{v^2} \quad (2.5)$$

Onde t_0 corresponde ao tempo de afastamento nulo, x é o afastamento fonte-receptor e v é a velocidade de propagação da onda no meio. A Equação 2.5, corresponde à equação que define uma hipérbole, conforme representado pela curva na Figura 2.13.

Figura 2.13 - Representação em gráfico da correção NMO.



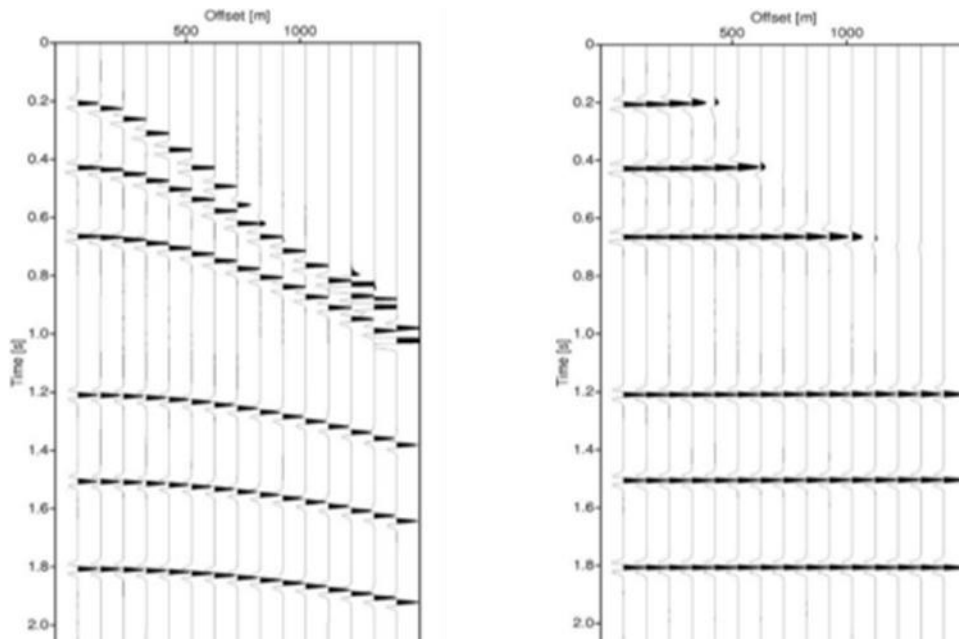
Fonte: Elaborada pelo autor.

A correção de sobretempo normal (ou *normal moveout*) é a diferença no tempo de trânsito para um receptor na distância x da fonte e o tempo de trânsito t_0 no afastamento zero, conforme a Figura 2.13. Sendo descrita através da Equação 2.6.

$$\Delta t_{NMO} = t(x) - t_0 = t_0 \left[\sqrt{1 + \left(\frac{x}{vt_0} \right)^2} - 1 \right] \quad (2.6)$$

Portanto, a correção NMO faz com que os eventos que estejam com seu tempo atrasado sejam corrigidos para o tempo de afastamento nulo ou zero, como pode ser visto na Figura 2.14.

Figura 2.14 - Seção CMP seguido da sua correção NMO.

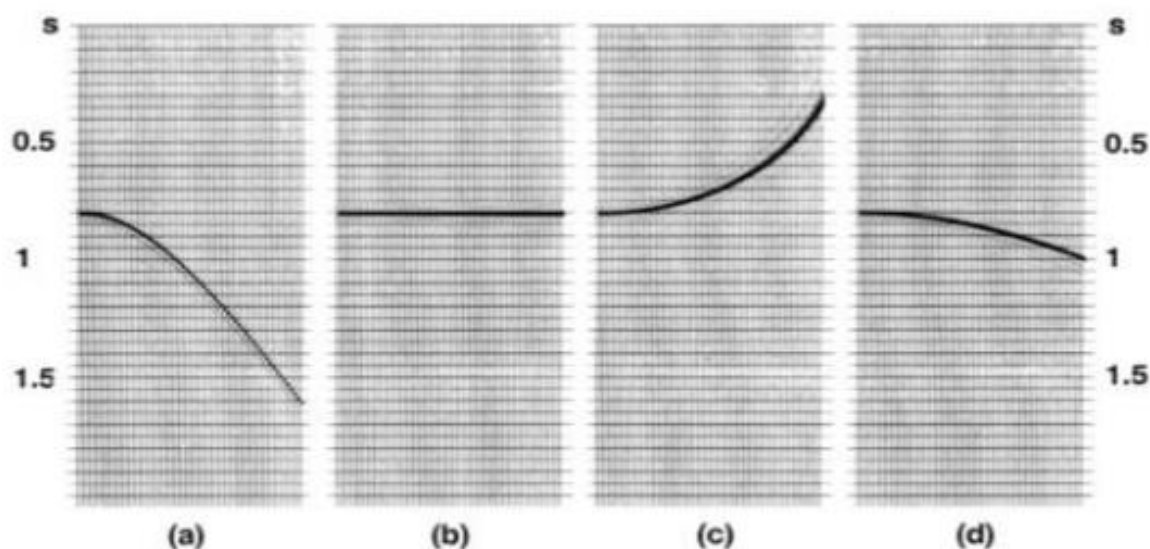


Fonte: Elaborada pelo autor.

2.4.4 Análise de velocidade

A correção NMO precisa do valor correto da velocidade para conseguir horizontalizar as reflexões. Quando o valor da velocidade usado é muito baixo, a reflexão se curva para cima e é chamada de reflexão supercorrigida. Já quando o valor da velocidade é muito alto, chama-se reflexão subcorrigida e a reflexão se curva para baixo, como mostra a Figura 2.15.

Figura 2.15 - (a) Seção CMP; (b) Sismograma corrigido com o valor v_{nmo} correto; (c) Sobrecorreção devido v_{nmo} mais baixa que a correta e (d) Subcorreção devido ao v_{nmo} ser mais alta do que a correta.



Fonte: Yilmaz et al. (2001).

O objetivo da análise de velocidade é encontrar a velocidade capaz de deixar horizontal uma hipérbole de reflexão e conseqüentemente retorna o melhor resultado quando o empilhamento é realizado.

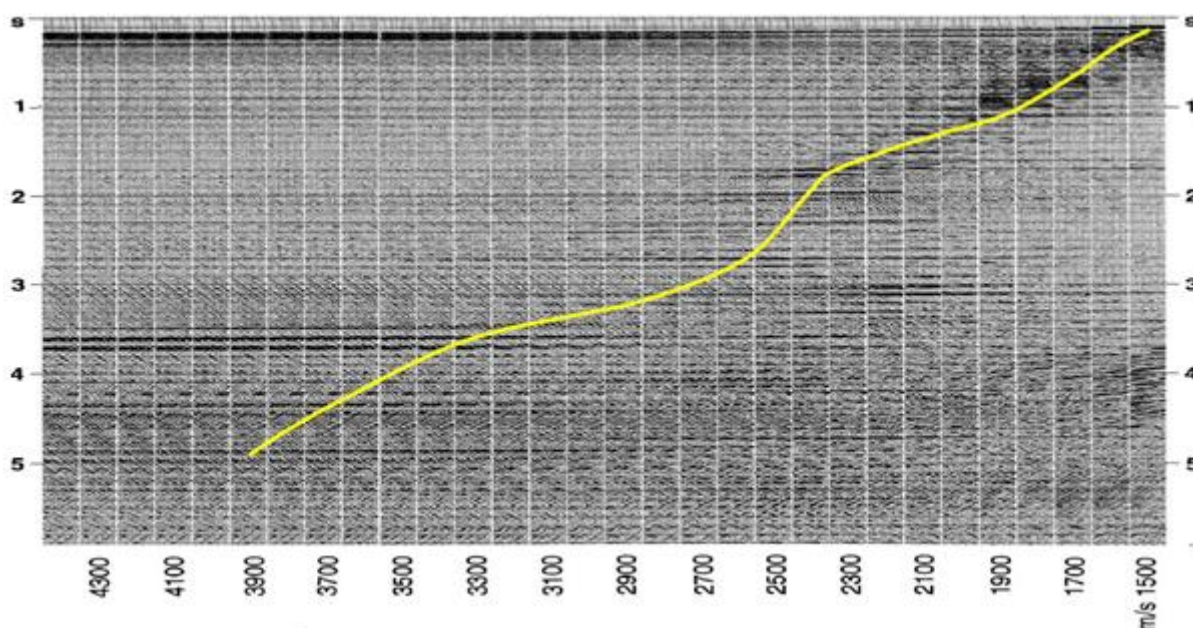
Existem diferentes métodos para determinar o modelo de velocidades e todos utilizam traços classificados em famílias de seções CMP. Dentre elas, estão a análise $(t^2 - x^2)$, painéis de velocidade constantes (CVP), empilhamentos com velocidades constantes (CVS) e análise do espectro de velocidades.

Neste trabalho, a análise de velocidade foi realizada por meio da combinação entre os métodos de CVS e análise do espectro de velocidade. O primeiro, um conjunto de CMPs com a correção de NMO já realizada e com velocidade constante e empilhados, são apresentados como um painel para cada diferente velocidade de empilhamento, sendo chamado de painel de empilhamento com velocidade constante (CVS).

As velocidades dos eventos de reflexões são identificadas através do painel com amplitudes mais altas ou continuidades maiores, podendo este ser o melhor método para um dado com baixa razão sinal-ruído, porém possui uma resolução

limitada para o intervalo de velocidade escolhido e tem, por objetivo principal, determinar qual a velocidade que proporcionou o empilhamento mais adequado para cada evento refletido (YLMAZ et al., 2001), conforme a Figura 2.16.

Figura 2.16 - Painel de empilhamento com velocidade constante (CVS).

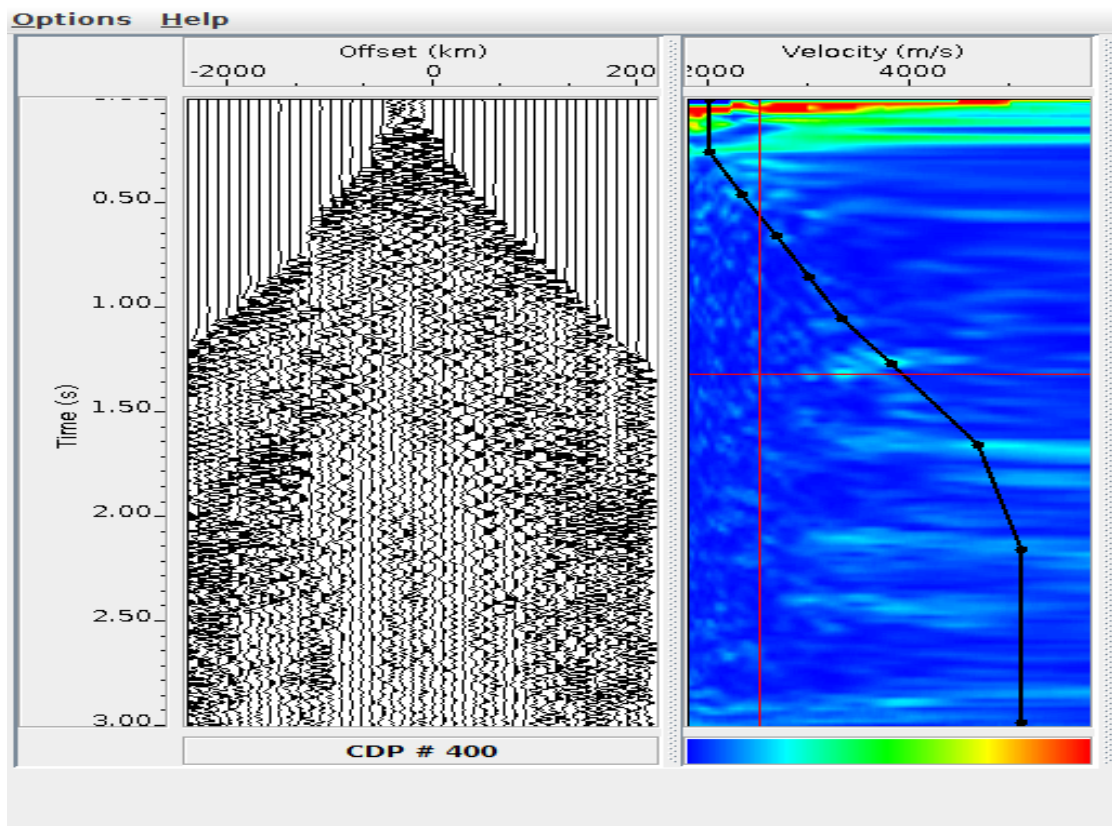


Fonte: Ylmaz et al.,2001.

As velocidades são selecionadas diretamente do painel CVS (linha amarela na Figura 2.16, escolhendo a velocidade que produz a melhor resposta do empilhamento para um evento selecionado.

Já o segundo método, é obtido através da medida de coerência Semblance, que é um tipo de medida que representa o grau de similaridade de sinais sísmicos nos traços em um agrupamento de CMP, sendo indicado por um espectro de velocidade exibido em mapas de cores, conforme a Figura 2.17, em que os picos de amplitude representam as maiores medidas de Semblance. Neste processo, a curva de tempo para medir a coerência é calculada através da fórmula do tempo de trânsito hiperbólico da Equação 2.5.

Figura 2.17 - Seção CMP e sua medida da qualidade do sinal (Semblance).



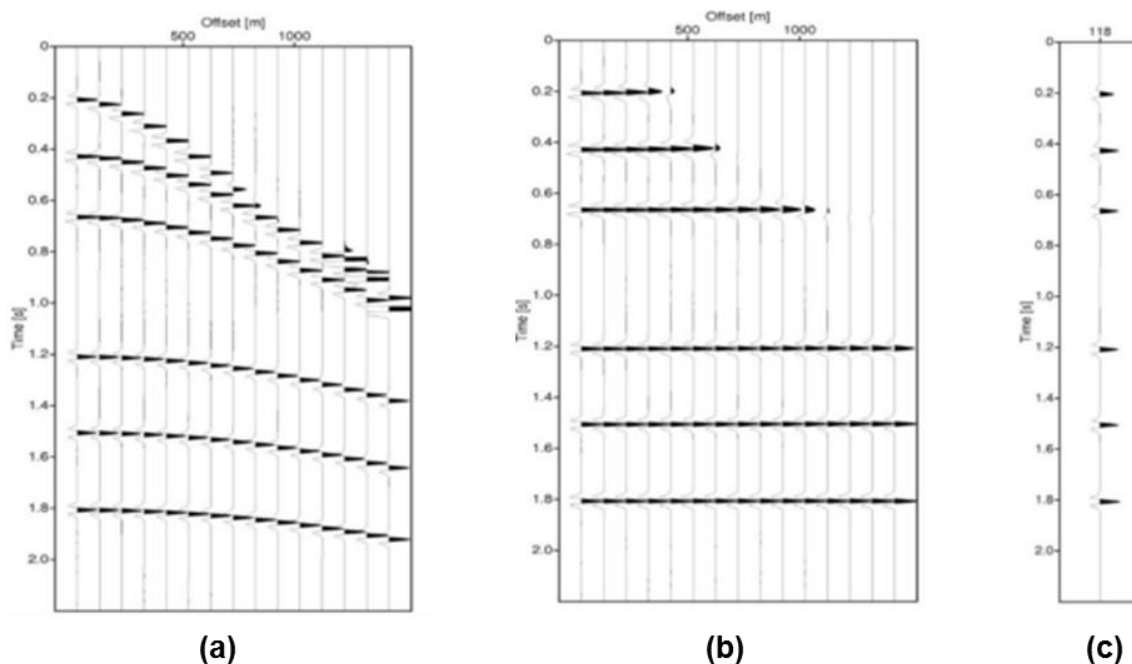
Fonte: Elaborada pelo autor. (Time – tempo; Velocity – velocidade e Offset – afastamento).

Os valores da Semblance estão relacionados com a coerência de eventos, de modo que os eventos mais coerentes terão valor de Semblance próximo a 1, correspondendo ao máximo do espectro, ao contrário disso, os eventos referentes aos ruídos terão valores próximos de zero.

2.4.6 Empilhamento CMP

O processo de empilhamento consiste na soma das amplitudes de todos os traços de mesma família CMP após a correção NMO, realça os eventos coerentes como as reflexões e atenua o ruído aleatório e sinal não coerente, conforme mostrado na Figura 2.18.

Figura 2.18 - (a) Seção CMP; (b) Seção CMP após correção NMO e (c) Seção empilhada CMP.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Com isso, essa técnica possui capacidade de aumentar a relação sinal-ruído dos dados, pois os ruídos aleatórios são atenuados e há um aumento da amplitude das reflexões. Além disso, provoca a redução do volume de dados para ser aplicados outros processos como a migração.

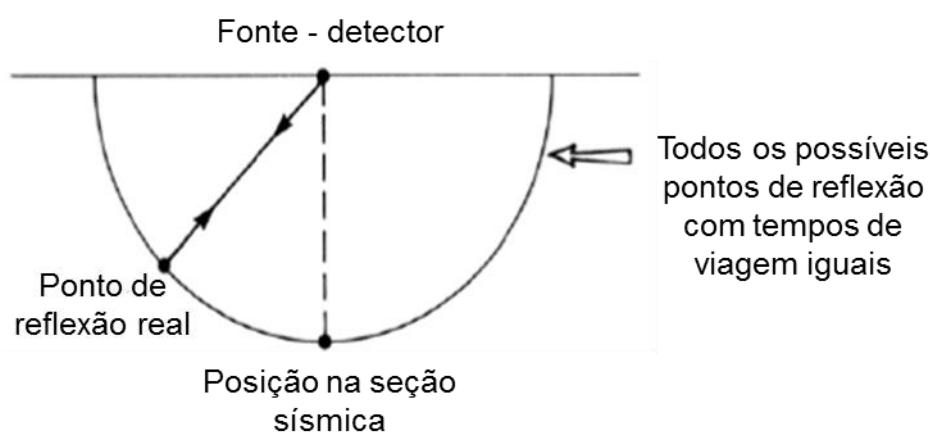
2.4.7 Migração pós-empilhamento

Na etapa anterior, o empilhamento CMP fornece a primeira imagem das estruturas geológicas da subsuperfície. Porém, esta imagem não reflete a realidade para meios geológicos com estruturas de geometria complexa, como, refletores mergulhantes, ou seja, refletores não horizontais, com curvaturas, com descontinuidades e heterogeneidades. Portanto, o processo de migração sísmica corrige os efeitos no posicionamento das reflexões mergulhantes, reflexões com curvatura e colapsa as hipérbolas de difração.

A migração corrige as distorções geométricas e para explicação da migração pós-empilhamento considera-se o dado ou seção formado por traços de afastamento zero entre fonte-receptor que são geradas pela correção NMO e em seguida pelo empilhamento CMP. As reflexões na seção de afastamento zero são plotadas como se os pontos de reflexão estivessem imediatamente abaixo da coordenada CMP, mas na realidade, a reflexão para afastamento zero ocorre com incidência perpendicular à camada.

Para uma camada horizontal, o ponto de reflexão estará abaixo ao CMP, entretanto, para uma camada não horizontal o ponto de reflexão não estará imediatamente abaixo ao CMP, então como não é conhecido o ponto onde acontece a reflexão, a migração estima que os possíveis pontos de reflexão estão em um semicírculo com raio dependente do tempo de trânsito, como mostra a Figura 2.19.

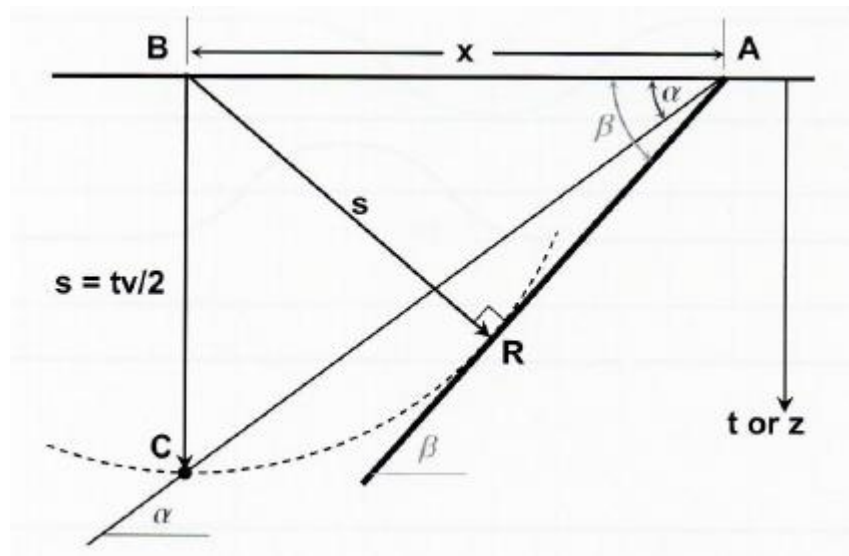
Figura 2.19 - Semicírculo de migração pós-empilhamento para um meio com velocidade constante.



Fonte: Adaptado do Kearey, Brooks, Hill, 2009.

Na seção de afastamento zero, as reflexões provenientes de um refletor mergulhante são mostradas como se elas tivessem viajado perpendicular para a superfície, portanto, a imagem obtida na seção empilhada é errada, como a reflexão do ponto C colocada abaixo do ponto B, conforme a Figura 2.20.

Figura 2.20 - Refletor inclinado na seção afastamento zero e deslocamento da reflexão pela migração.

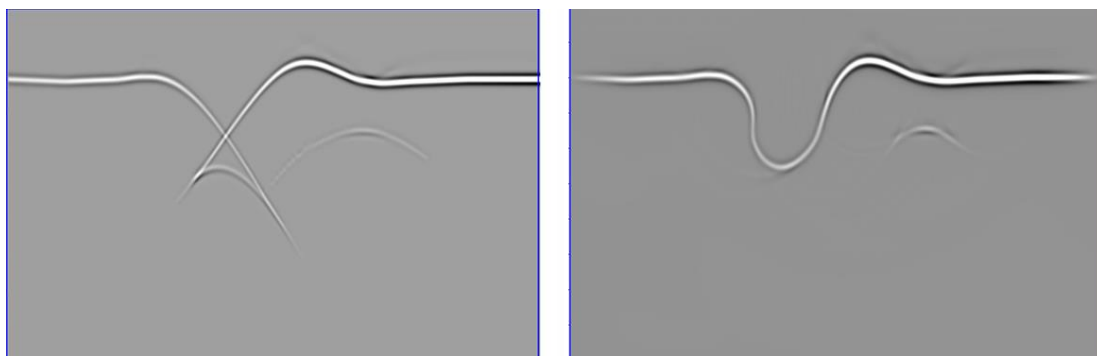


Fonte: Kearey, Brooks, Hill, 2009.

Considerando os triângulos ABC e ABR, pode-se perceber o erro entre o mergulho real, β , e o mergulho do refletor na seção empilhada, α .

Portanto, a migração sísmica reconstrói uma seção sísmica para que os eventos de reflexão sejam reposicionados sob sua localização superficial correta e em um tempo ou profundidade de reflexão vertical corrigido. Sendo a localização e mergulho das camadas ajustadas, os eventos de difrações são reduzidos a um ponto, são corrigidas as curvaturas as reflexões associadas a dobras geológicas e também promove um realce das amplitudes de todas as reflexões, conforme pode ser conferido na Figura 2.21.

Figura 2.21 - Seções empilhada e migrada de um refletor em forma de dobra sinclinal e uma difração.



Fonte: Elaborada pelo autor.

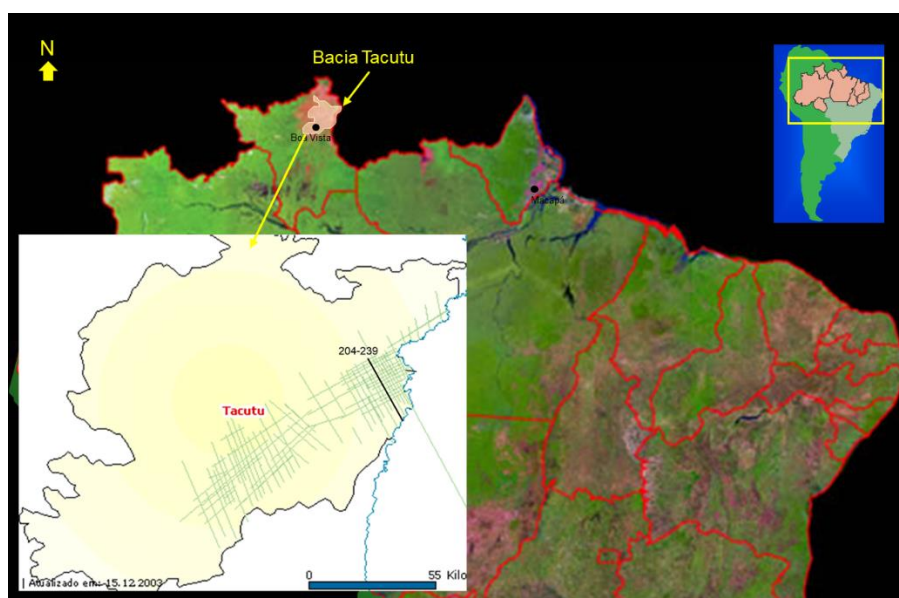
3 MATERIAS E MÉTODOS

Neste capítulo, serão descritos os parâmetros de levantamento da linha sísmica 204-239 utilizados para aplicar o processamento sísmico apresentado neste trabalho. Também serão brevemente descritos o pacote Seismic Unix e a interface BotoSeis, que serão utilizados para realizar as etapas do processamento sísmico.

3.1 LOCALIZAÇÃO DA LINHA SÍSMICA

O dado sísmico utilizado no presente trabalho foi adquirido na Bacia do Tacutu (Rondônia, Brasil), conforme mostrado na Figura 3.1, no ano de 1986, por meio da Petrobras com objetivo da exploração de petróleo. Os dados são gratuitos para uso em pesquisa em universidades e foram obtidos juntamente com a ANP para apoiar projetos acadêmicos.

Figura 3.1 - Mapa de localização da Bacia Tacutu e da linha sísmica 204-239.



Fonte: Jaime Eiras.

A bacia do Tacutu está localizada no extremo norte do Brasil, na fronteira entre o Brasil e a Guiana. A linha sísmica 204-239 que será processada neste

trabalho encontra-se localizada no extremo nordeste da bacia e está marcada com a linha reta preta.

3.2 PARÂMETROS CONSIDERADOS PARA A AQUISIÇÃO

A linha sísmica 204 -239 foi adquirida por meio de fonte explosiva e usando um arranjo de fonte e receptores composto por 96 canais usando duas configurações uma *split-spread* simétrico em uma primeira parte da linha e assimétrico na segunda parte. O arranjo simétrico está formado por 48 canais distribuídos em ambos lados da fonte, no entanto, na primeira parte o arranjo inicia com 48 canais ligados e à medida que os tiros são detonados são ligados progressivamente os outros 48 canais. A parte assimétrica tem 76 canais a um lado da fonte e 20 canais no outro lado. O intervalo entre fontes consecutivas é de 50 m e o intervalo entre estações é também de 50 m, tendo uma cobertura (ou *fold*) nominal de 48 traços. O *offset* absoluto mínimo é 150 m e o máximo é 3900 m. Toda a linha sísmica tem um total de 631 registros de tiros, mas neste trabalho foram descartados 231 por estarem localizados na borda da bacia onde a cobertura sedimentar é pouco espessa e não apresentaram eventos de reflexão. Os 400 tiros processados abrangem uma extensão de 21,05 km.

Um quadro resumo desses parâmetros pode ser visto conforme a Tabela 3.1.

Tabela 3.1 – Parâmetros de aquisição utilizados.

Grupo-Linha	204-239
Número de canais	96
Intervalo entre fontes consecutivas (m)	50
Intervalo entre geofones (m)	50
Fold	48
Offset mínimo (m)	150
Offset máximo (m)	3900
Número de tiros	631-231
Extensão da linha	400 tiros = 21,05 km

Fonte: Elaborada pelo autor.

3.3 PACOTE SEISMIC UNIX

O pacote Seismic Unix, também chamado de SU (COHEN & STOCKWEEL, 2010), foi inicialmente desenvolvido com o apoio da *Society of Exploration Geophysicist* (SEG) e do *Gas Research Institute* (GRI), e atualmente é sustentado pelo *Center for Wave Phenomena* (CWP) da *Colorado School of Mines*, Estados Unidos da América.

Pode ser definido como um conjunto de programas para o processamento de dados sísmicos de reflexão e estudos de modelagem sísmica, desenvolvido para uso em arquiteturas computacionais com sistema operacional Unix e Linux. O pacote pertence à categoria de *software* de código aberto e é distribuído sob a licença GPL (Licença Pública Geral GNU).

Esse pacote tem a capacidade de aplicar técnicas fundamentais de processamento de dados sísmicos, como por exemplo, filtro F-K, análise de velocidade, correção NMO, deconvolução e migração, através de linhas de comando ou arquivos do shell scripts. Podendo esse fato ser uma desvantagem para estudantes ou profissionais sem experiência no uso de comandos e scripts. Por outro lado, o SU tem sido utilizado com bastante sucesso na comunidade geofísica mundial da academia e da indústria.

3.3.1 Formato de dados SU

O formato SU é utilizado para armazenamento e manipulação de dados sísmicos com o pacote Seismic Unix. Cada traço sísmico tem suas informações identificadas com palavras-chave, também chamadas de *headers*, onde cada palavra chave tem seu tamanho pré-definido em bytes e sua posição no arquivo. Alguns tipos de palavras chave com sua descrição podem ser vistos na Tabela 3.2.

Tabela 3.2 - Exemplos de algumas palavras chaves ou headers do formato SU.

Bytes	Header	Descrição
1-4	Tracl	Número de traço sequencial dentro da linha
4-8	Tracr	Número de traço sequencial dentro do arquivo
9-12	Fldr	Número do registro original de campo
13-16	Tracf	Número sequencial do traço dentro do fldr
17-20	Ep	Número do ponto de tiro
21-24	Cdp	Número do CDP ou CMP
25-38	Cdpt	Número sequencial do traço dentro do CDP
...

Fonte: Elaborada pelo autor.

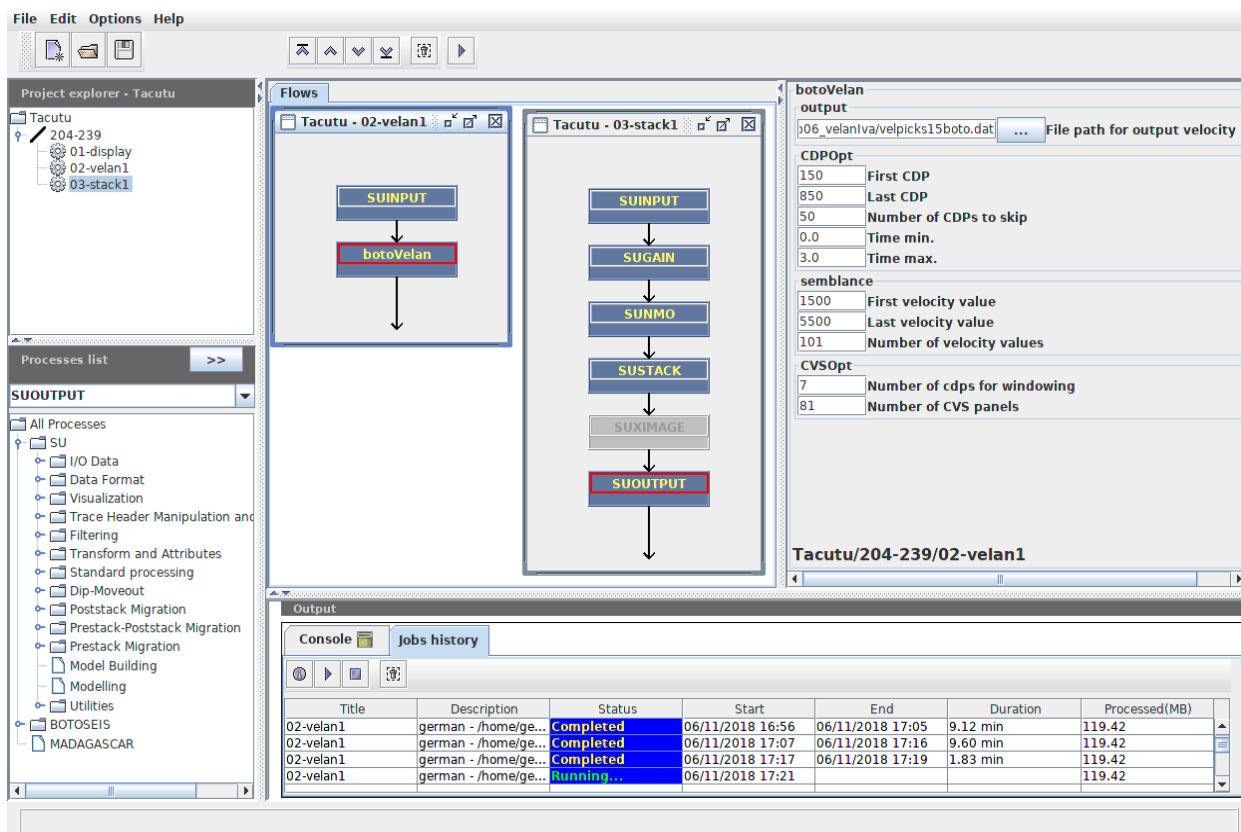
No arquivo SU depois das palavras chave são gravados os dados do traço ou as amostras sequenciais de tamanho fixo (4 bytes), onde os valores de ponto flutuante são gravados no formato binário da máquina em uso.

3.4 INTERFACE BOTOSEIS

O pacote Seismic Unix, além de ser o mais famoso *software* livre, ainda permite que estudantes e pesquisadores interessados no processamento de dados sísmicos produzam novos desenvolvimentos para facilitar o seu uso. Desse modo, foram realizados projetos para o desenvolvimento de interfaces gráficas para o SU.

Sendo assim, surgiu na Universidade Federal do Pará, a plataforma BotoSeis (GARABITO et al.; 2012), que é um *software* escrito na linguagem de programação Java com um ambiente gráfico para criar e gerenciar projetos, linhas e fluxogramas de processamento, como indica a Figura 3.2.

Figura 3.2 – Interface gráfica principal da plataforma BotoSeis.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Na plataforma BotoSeis, a tela principal é constituída de cinco áreas, na parte superior esquerda, encontra-se a visualização de projetos, linhas e fluxogramas; na janela inferior esquerda, mostra-se a visualização de programas agrupados em categorias; na janela central, estão a visualização e manipulação interativa de fluxogramas de processamento; na janela direita, para inserir parâmetros dos programas SU e, na parte inferior, as informações sobre a execução dos fluxogramas.

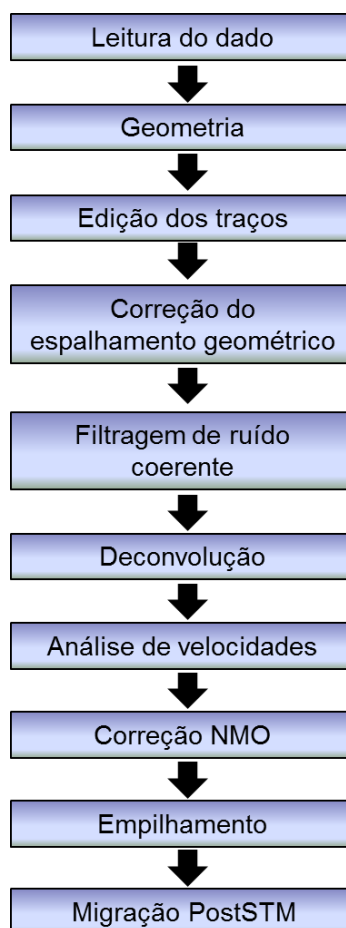
Portanto, o BotoSeis é considerado de fácil utilização e não necessita do usuário ou aluno ter experiência na área de linhas de comando do Linux, construção de shell script e programação shell, além de ser rápido e eficaz na execução de processamento sísmico.

3.5 PROCESSAMENTO

A sequência de um processamento sísmico não é única para todo dado sísmico de reflexão, dependendo da qualidade do dado, das ferramentas disponíveis, do objetivo a ser alcançado, tudo para chegar na imagem sísmica mais próxima possível da geologia.

O dado sísmico utilizado nesse trabalho passou pelas seguintes etapas, conforme a Figura 3.3.

Figura 3.3 - Fluxograma do processamento sísmico.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Inicialmente a leitura do dado, tem o intuito de realizar a conversão do formato SEG-Y, que é um padrão desenvolvido pela SEG (*Society Exploration Geophysics*),

para o formato interno do software, neste caso o formato SU (*Seismic Unix*), deixando o dado apto para as etapas seguintes. Em seguida, realizou-se o carregamento da geometria para inserir as informações de cada traço registrado, como: localização da fonte (tiro) e receptores (canal de geofones), afastamento entre fonte-receptor (*offset*) e ponto médio-comum (*Common midpoint* – CMP). Nas seções seguintes são relatadas todas as fases posteriores.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

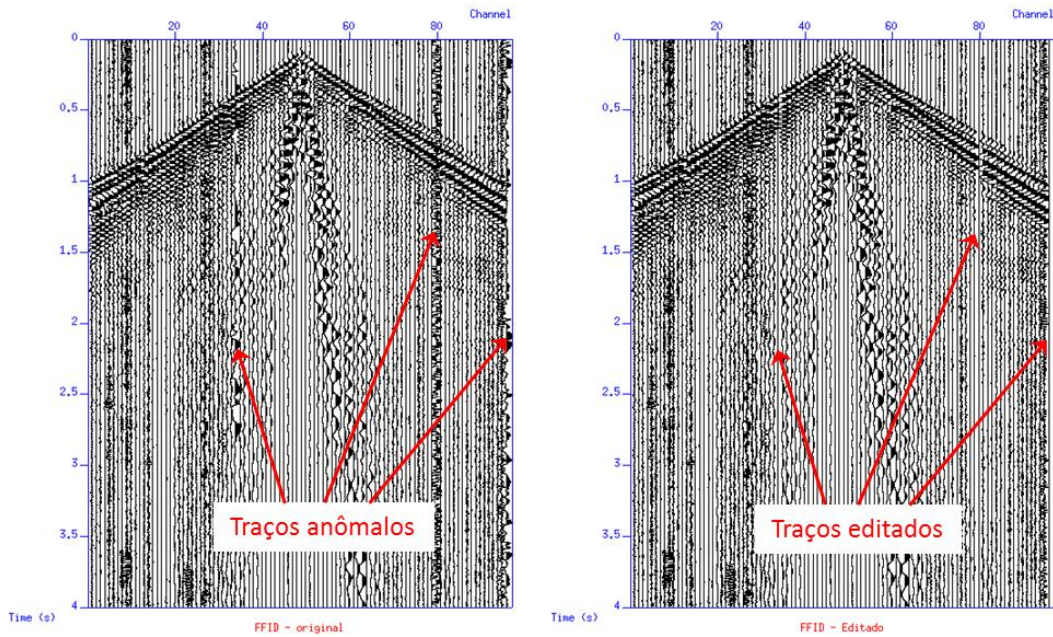
Neste capítulo, será apresentado o dado sísmico real utilizado no processamento de dados, em seguida, serão descritos os procedimentos e resultados obtidos com a aplicação das plataformas Seismic Unix nas etapas de edição de traços, correção do espalhamento geométrico, análise espectral e filtragem passa-banda, supressão de *Ground Roll* e deconvolução, e com o auxílio da plataforma Botoseis para a análise de velocidade, correção NMO, empilhamento CMP e migração pós-empilhamento.

4.1 EDIÇÃO DE TRAÇOS

Nesta etapa, ocorre a eliminação de traços que possam vir a comprometer a qualidade dos resultados. Sendo a edição feita de duas maneiras, uma para eliminação de traços com amplitudes anômalas, como mostra a Figura 4.1, e a outra para traços com polaridade invertida, de acordo com a Figura 4.2. Os traços editados serão aqueles com uma baixa razão sinal-ruído e que aparecem também como spikes (picos com amplitudes fortes) devido ao mau funcionamento do geofone, falhas do sistema de registro, vibração do cabo e geofones devido ao vento, tráfego de veículos, animais, etc.

Conforme a Figura 4.1, pode-se observar a necessidade de remover os traços da seção da esquerda destacado em vermelho, para tal procedimento é aplicado um script fornecendo as opções de apagar os traços ruidosos, resultando na seção da direita com os traços editados.

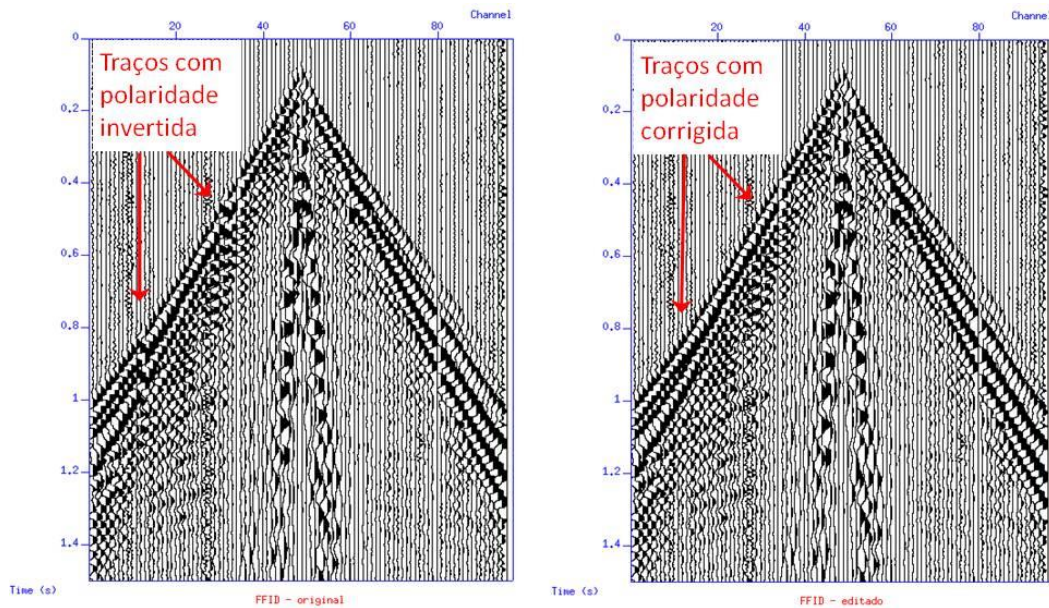
Figura 4.1 - Eliminação de traços anômalos.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Já para a Figura 4.2, os traços indicados em vermelho na seção da esquerda têm a necessidade de uma inversão de polaridade para manter a polaridade correta, sendo assim é aplicado um outro script, obtendo como resultado dessa operação a seção da direita. A edição de traços é realizada seção por seção de toda a linha sísmica.

Figura 4.2 - Edição de traços com polaridade invertida.

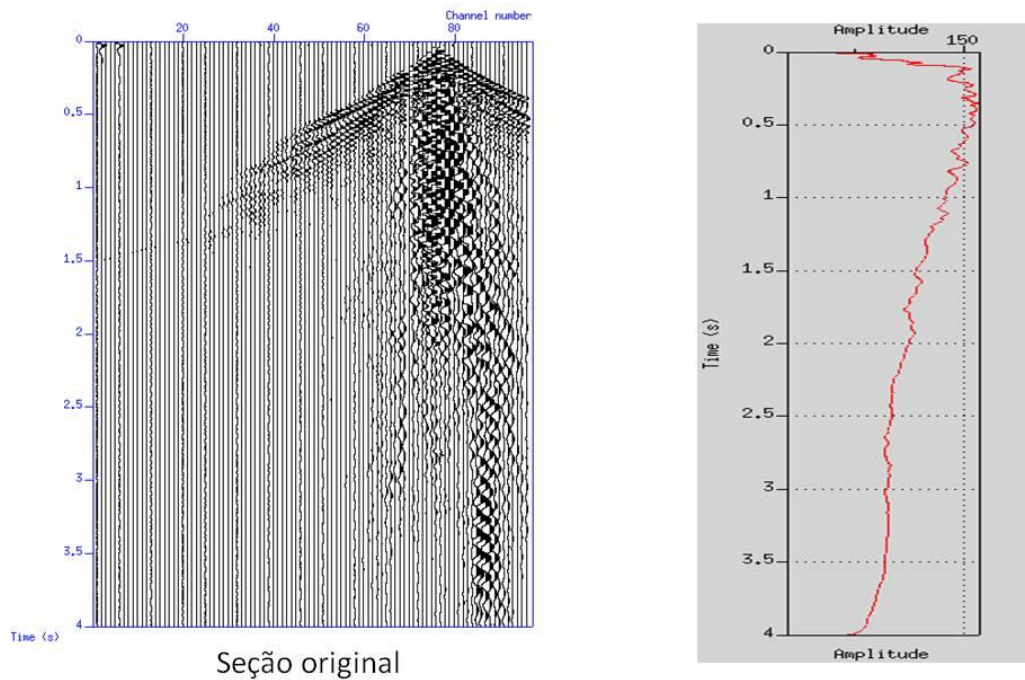


Fonte: Elaborada pelo autor.

4.2 CORREÇÃO DO ESPALHAMENTO GEOMÉTRICO

Ao se propagar pelo interior da terra, as ondas elásticas sofrem os efeitos de perda de energia ocasionada por diversos fatores como: espalhamento geométrico, absorção, reflexão e conversão de energia, transmissão, etc. Essa atenuação da energia nos traços sísmicos aparece com uma diminuição da amplitude do sinal sísmico com o incremento do tempo de propagação da onda sísmica, conforme mostra a Figura 4.3. Nesta figura, no lado esquerdo é o registro ou seção de um tiro e no lado direito é a soma das amplitudes dos traços da seção.

Figura 4.3 - Seção sísmica original e sua amplitude ao longo do tempo.

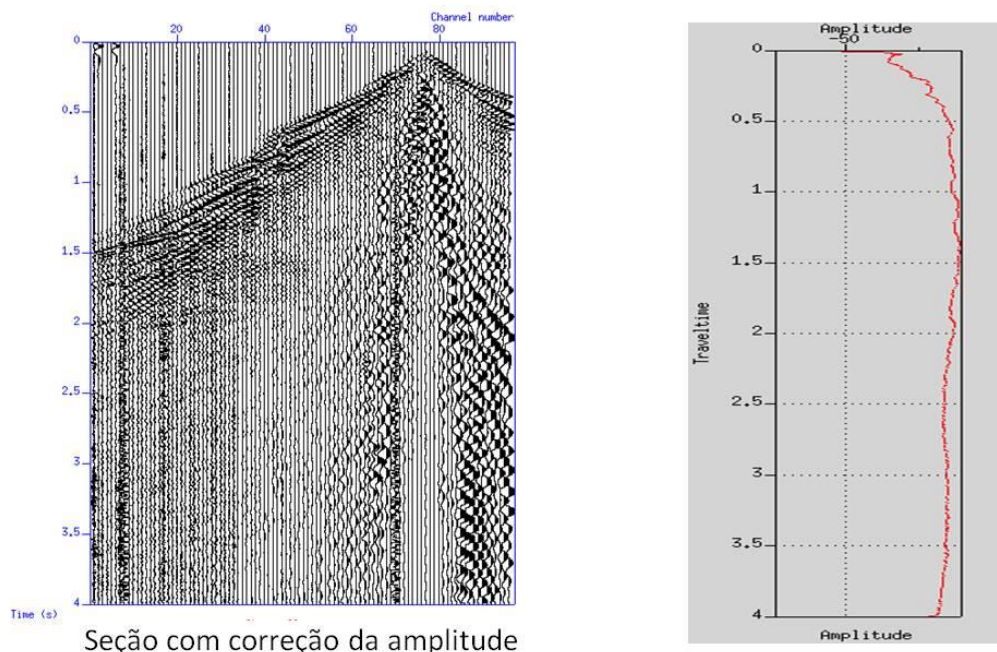


Fonte: Elaborada pelo autor.

Como mostra a Figura 4.3 no gráfico do lado direito, a amplitude se mantém alta somente na parte inicial, pois é no momento do tiro, com o passar do tempo ou com o aumento da distância de propagação ocorre o decaimento da amplitude do sinal sísmico, devido ao espelhamento geométrico ou também chamada de divergência esférica, nesse efeito à medida que a frente de onda se propaga no interior da terra, a área coberta por essa frente de onda cresce. A energia distribuída na frente de onda permanece a mesma, mas como ela é distribuída para áreas cada vez maior, com o passar do tempo, a amplitude do pulso sísmico tende a decrescer.

Portanto, com esta correção procura-se compensar a atenuação da amplitude com a distância de propagação e assim manter o valor do sinal sísmico sempre elevado ao longo do tempo no traço sísmico, para isso se é aplicado um ganho, sendo este mostrado na Figura 4.4.

Figura 4.4 - Seção com correção de amplitude e sua amplitude ao longo do tempo.



Seção com correção da amplitude

Fonte: Elaborada pelo autor.

4.3 FILTRAGEM PASSA-BANDA

O filtro passa-banda consiste em limitar o dado sísmico a uma determinada faixa de frequência, tentando retirar qualquer ruído. Para esta etapa são necessários quatro valores de frequência: frequência baixa de corte, frequência baixa de passagem, frequência alta de passagem e frequência alta de corte. Estes valores são retirados através de uma análise do espectro de amplitude em função da frequência.

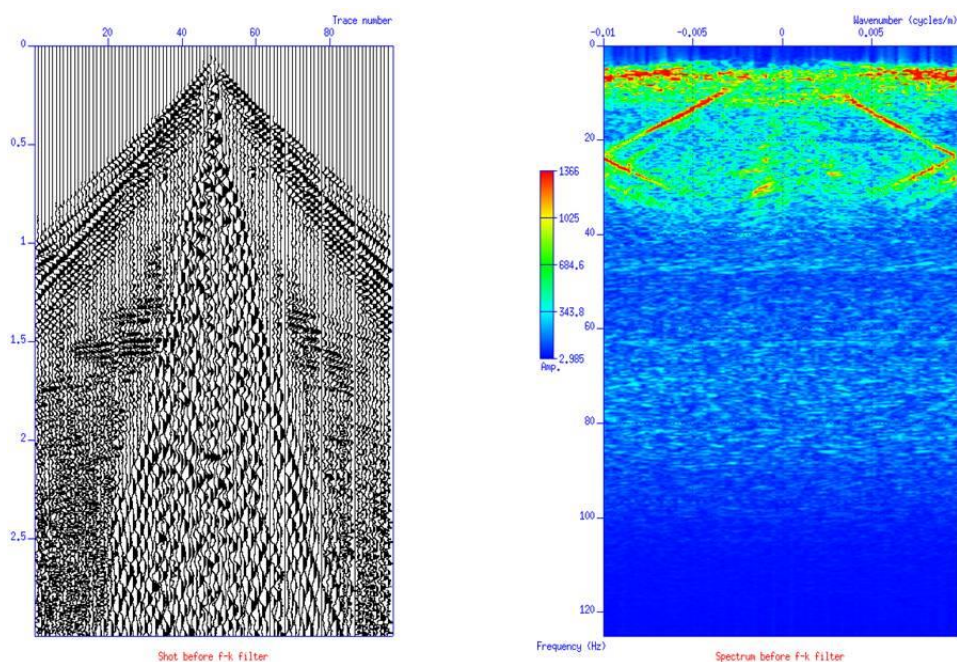
Sendo assim, o objetivo do filtro passa-banda é passar uma certa banda de frequência e suprimir a parte restante.

No presente trabalho, o filtro passa-banda será aplicado em várias etapas do processamento e principalmente para visualização dos resultados, em que foram utilizadas as seguintes frequências de corte: 5, 10, 50, 70.

4.4 SUPRESSÃO DE GROUND ROLL

Este processo se faz necessário para a remoção das ondas superficiais Rayleigh conhecidas como *ground roll*. Para tal, utiliza a filtragem F-K que consiste na aplicação da transformada de Fourier bidimensional para remover as frequências indesejáveis no domínio da frequência - número de onda, só que de eventos coerentes com uma determinada velocidade. Em uma seção fonte-comum, essas ondas são observadas como eventos de baixa frequência e grande amplitude, como indica a Figura 4.5, juntamente com seu espectro de frequência.

Figura 4.5 - Seção original seguido do seu espectro F-K.

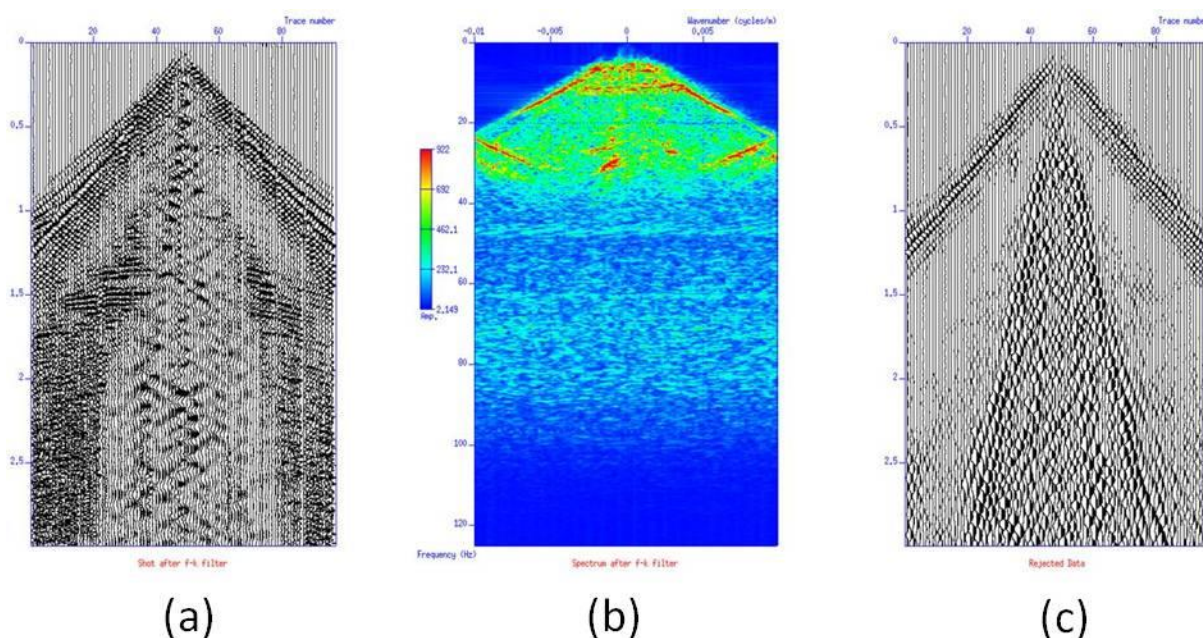


Fonte: Elaborada pelo autor.

Os resultados obtidos após a aplicação do filtro f-k, serão ilustrados em três imagens, na Figura 4.6, onde são mostrados da esquerda para a direita a seção após o filtro, seu espectro de frequência e a parte rejeitada. A rejeição do *ground roll* é realizado por meio de um filtro de mergulho (*dip filter*) que usa quatro valores de *dip* para eliminar a área do espectro correspondente ao *ground roll*. As áreas

triangulares na parte superior do espectro $f-k$ da Figura 4.6 correspondem as áreas rejeitadas conforme pode ser comparada com o espectro $f-k$ da figura 4.6.

Figura 4.6 - (a) Seção filtrada, (b) Espectro de frequência e (c) Parte rejeitada.

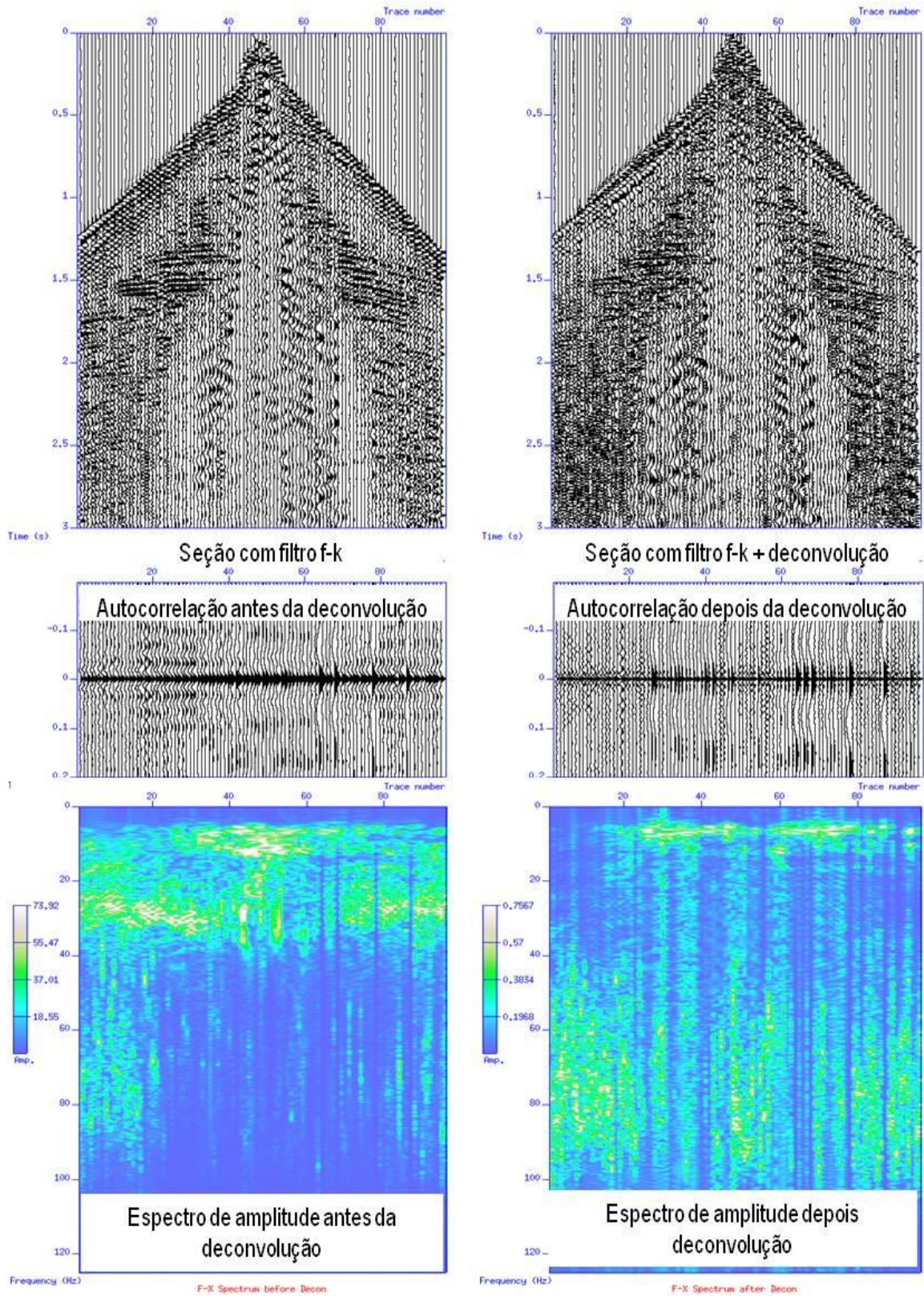


Fonte: Aatoria do autor.

4.5 DECONVOLUÇÃO

Foi aplicado a deconvolução tipo *spike*, conforme mostrado na Figura 4.7. O dado de entrada para a deconvolução é resultado da aplicação do filtro $f-k$ (seção da parte superior esquerda) e o resultado da deconvolução na referida seção é mostrado na parte superior direita da Figura 4.7. Na parte central, mostram-se as autocorreções de ambas as seções, e, no lado direito, o resultado da deconvolução mostra um *spike* (pico) bem definido no tempo zero. Conforme a teoria, a autocorrelação da função refletividade será um *spike* bem definido no tempo zero. Na parte inferior da Figura 4.7, mostram-se os espectros de frequência das ambas seções e, conforme esperado, o resultado da deconvolução mostra um realce do espectro de amplitudes das altas frequências, melhorando a resolução do sinal sísmico.

Figura 4.7 - Processo de deconvolução.

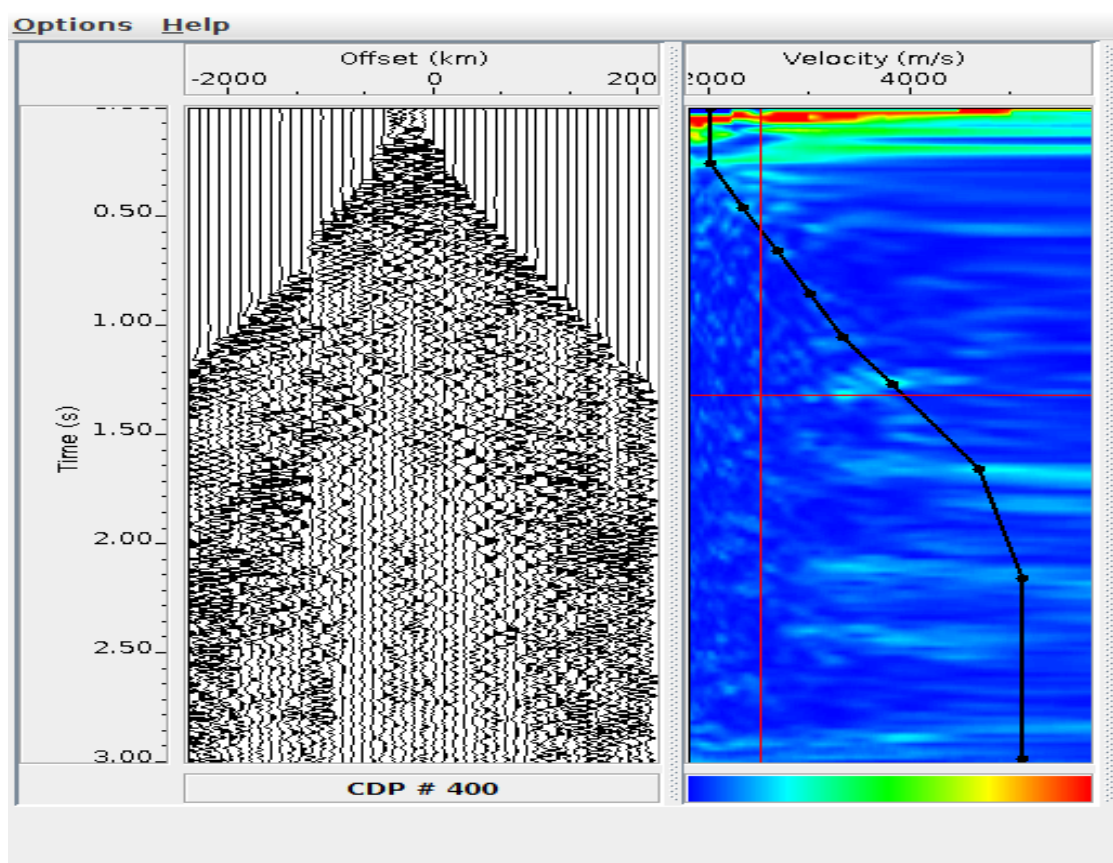


Fonte: Elaborada pelo autor.

4.6 ANÁLISE DE VELOCIDADES (COM BOTOSEIS)

Para iniciar o processo de análise de velocidade na linha 204-239, nota-se que as medidas de coerência (Semblance) não estão satisfatórias para realizar esta etapa, como pode ser visto na Figura 4.8. Fato esse ocorrido devido à baixa cobertura (48 traços por seção CDP) e, também, pela baixa razão sinal-ruído que apresenta o dado. A determinação das funções velocidade com este tipo de seções CDPs e mapas de coerência são imprecisas e podem levar a erros que comprometam etapas futuras do processamento.

Figura 4.8 - Seção CDP original e painel de coerência.



Fonte: Elaborada pelo autor. (Time – tempo; Velocity – velocidade e Offset – afastamento).

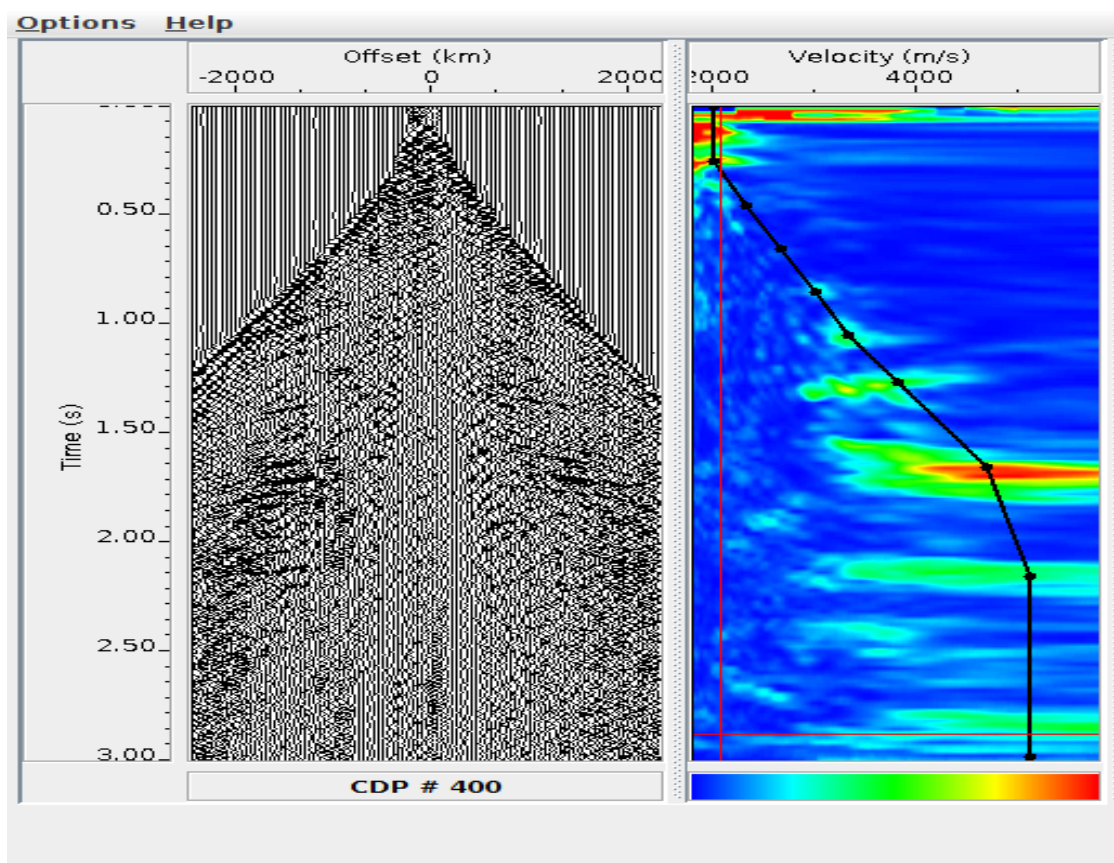
Com o objetivo de facilitar o processo de análise de velocidade e obter melhores resultados, aplica-se a técnica *super gathers* que aumenta o número de

traços dos CDPs a serem analisados e, assim, melhora a medida de coerência *Semblance*.

Essa técnica tem o propósito de escolher um número de CDPs vizinhos determinado pelo usuário, com o intuito de empilhar os traços com offsets iguais, sendo assim, obtendo um único CDP com maior número de traços e com isso aumenta a razão sinal-ruído.

A formação dos *super gathers* do dado analisado neste trabalho foi realizada utilizando 7 CDPs vizinhos para criar cada seção *super gather* do CDP, ou seja, a seção CDP central e 3 seções a cada lado, cujo resultado é apresentado na Figura 4.9.

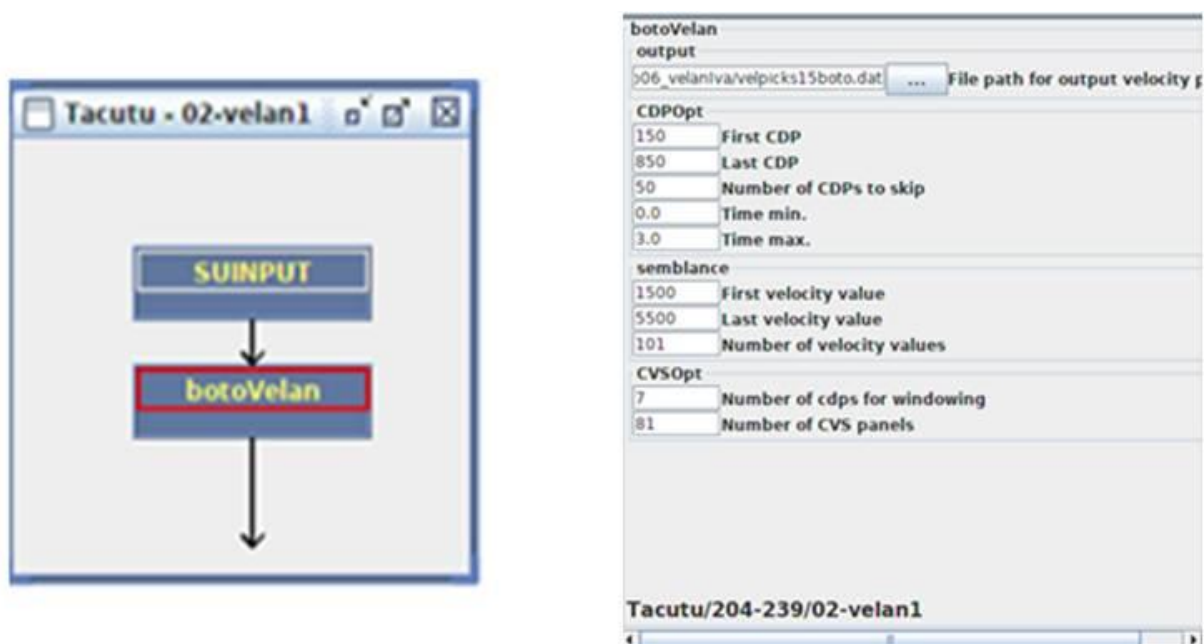
Figura 4.9 - Seção CDP *super gather* e painel de coerência.



Fonte: Elaborada pelo autor. (Time – tempo; Velocity – velocidade e Offset – afastamento).

No processo de análise de velocidade com a interface Botoseis, é necessário montar um fluxograma que consiste em duas etapas, como ilustra a Figura 4.10 a). A primeira, para selecionar o arquivo de entrada que foi utilizado, ou seja, o dado ordenado em famílias CDPs da linha 204-239 com *super gathers*. A segunda, utiliza o programa Botovelan, com o objetivo de iniciar o processo de análise de velocidade. O resultado desse processo será um arquivo que fornece o par tempo-velocidade dos *picks* (ou marcação dos pares tempo-velocidade). Para isso deve-se definir o valor das variáveis para a manipulação da seção CDP, Semblance e do painel CVS, como representado na Figura 4.10 b).

Figura 4.10 - (a) Fluxograma na interface Botoseis e (b) Parâmetros de entrada utilizados na análise realizada no BotoVelan.

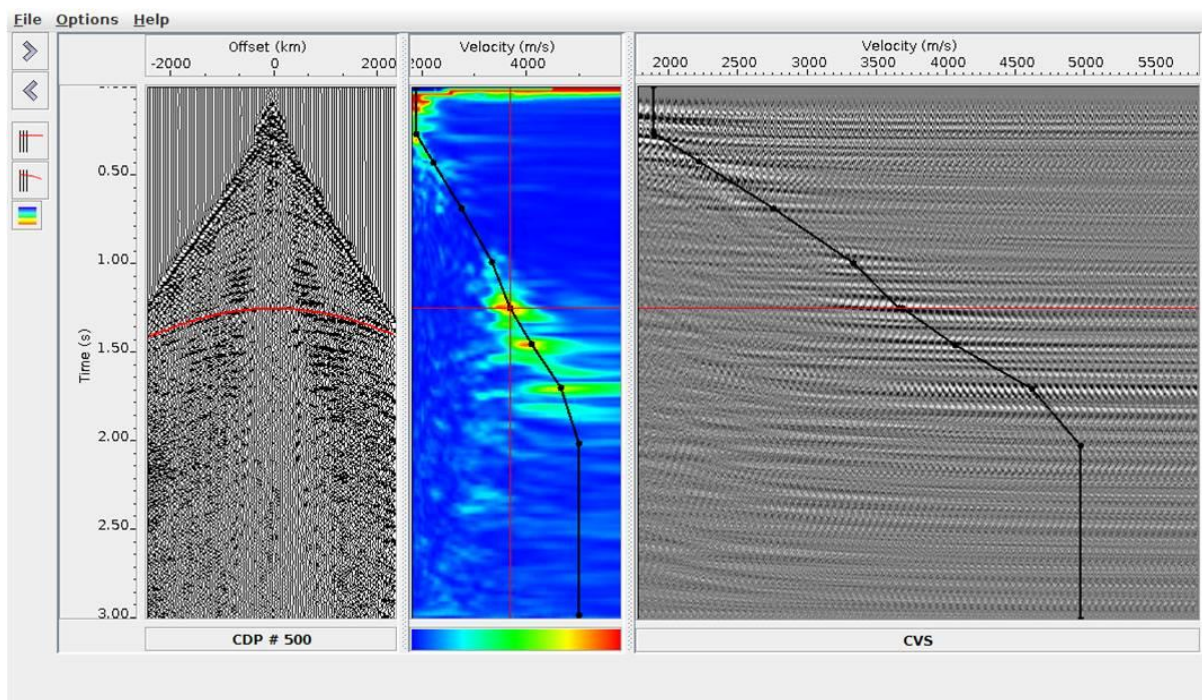


Fonte: Elaborada pelo autor.

Os resultados obtidos pela execução do fluxograma são mostrados em três painéis da Figura 4.11. No painel central, são observados os locais de maior coerência para iniciar a marcação ou *picking* das velocidades. O processo de *picking* é efetuado de forma simples clicando com o botão esquerdo do mouse no ponto escolhido de maior coerência no painel de coerência, conforme a Figura 4.11. No lado direito é mostrado o painel CVS (*constant velocity stack*) que também auxilia no *picking* das velocidades com base no aumento da amplitude empilhada quando a

velocidade é correta. A linha curva preta que une os pontos marcados é a função velocidade da seção CDP em análise.

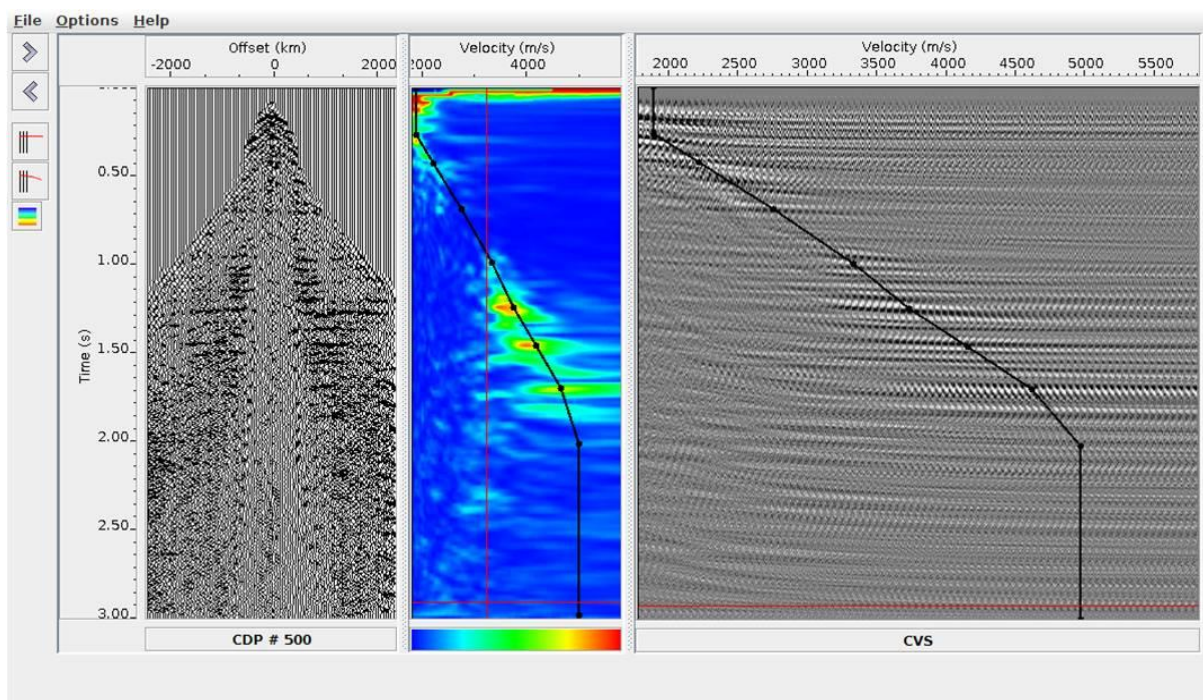
Figura 4.11 – Análise de velocidades com BotoVelan: Seção CDP, painéis de coerência e CVS com os pontos selecionados no processo de *picking*.



Fonte: Elaborada pelo autor. (Time – tempo; Velocity – velocidade e Offset – afastamento).

Para verificação ou controle de qualidade das velocidades escolhidas, com um botão na parte esquerda aplica-se a correção NMO cujo resultado mostra-se na Figura 4.12, onde a seção CDP do lado esquerdo da figura mostra as reflexões sísmicas horizontalizadas, o que comprova que as velocidades são satisfatórias. Da repetição deste processo em todos os CDPs *super-gather* selecionados resulta o modelo de velocidades para a linha sísmica que será utilizado para a correção NMO, o empilhamento e migração pós-empilhamento.

Figura 4.12 - Representação da Seção CDP corrigida de NMO, painéis de coerência e CVS com os pontos selecionados no processo de *picking*.



Fonte: Elaborada pelo autor. (Time – tempo; Velocity – velocidade e Offset – afastamento).

A interface BotoSeis apresenta ferramentas capazes de o usuário visualizar os pontos selecionados no processo de *picking* em cada seção CMP, apagar os *pickings* efetuados de forma incorreta, corrigir os pontos em todas as seções CMPs presentes até o fim do processo de *picking* e realizar o processo de *picking* em diferentes momentos. Além dos fatores citados anteriormente, a interface também disponibiliza o mapa de velocidades obtido com os *picks* realizados, que tem como finalidade fornecer ao usuário uma visualização do modelo de velocidades em tempo real.

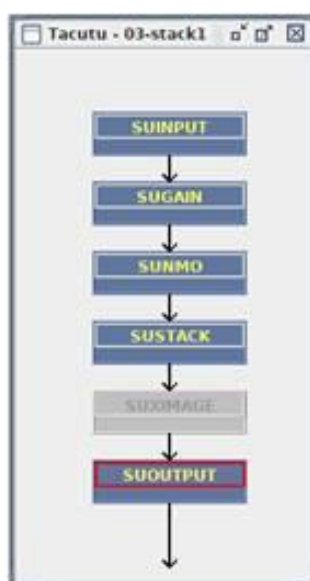
4.7 EMPILHAMENTO CMP

O empilhamento é realizado por soma horizontal dos traços de uma seção CDP/CMP após a correção NMO, produzindo um único traço empilhado de cada seção CMP, ou seja, uma seção empilhada CMP é composta pelo somatório de todos os CMP's da linha sísmica, também conhecida como seção empilhada com

afastamento nulo, tendo como resultado uma primeira imagem da estrutura geológica da subsuperfície. Para realizar o processo de empilhamento necessitou da organização de outro fluxograma na interface principal do BotoSeis, como pode ser visto na Figura 4.13.

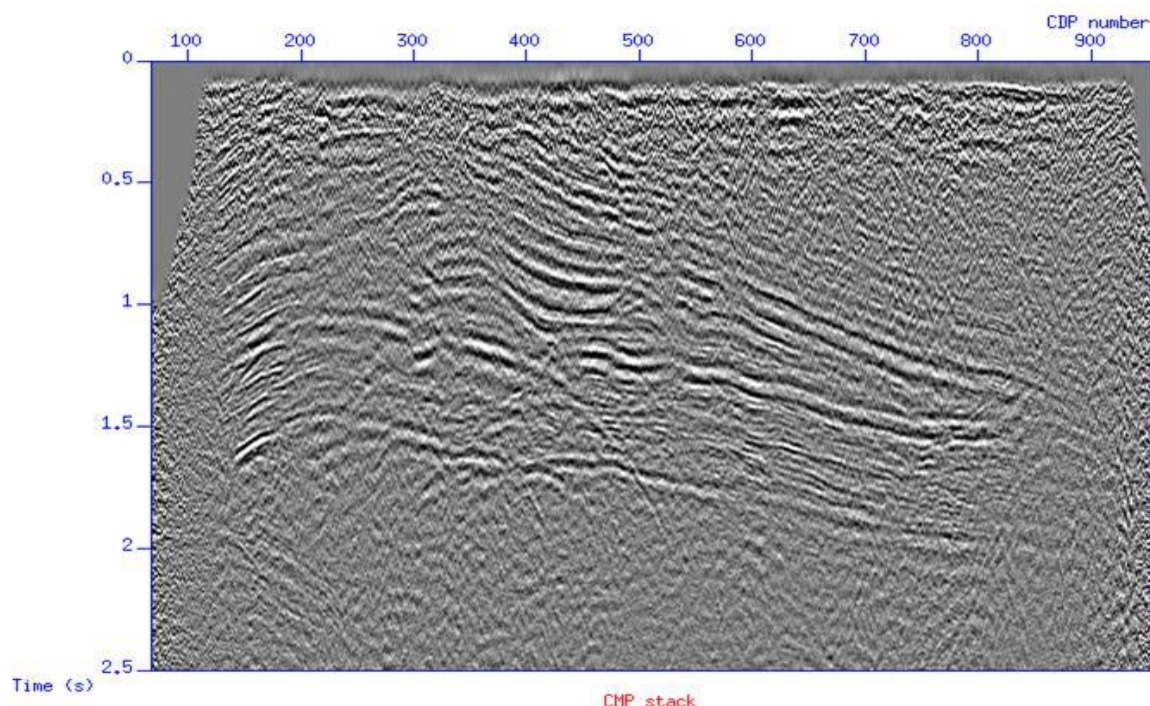
Conforme o fluxograma da Figura 4.13, aos dados de entrada organizados em CMP's aplica-se um ganho, depois a correção NMO com as velocidades resultantes da análise de velocidades da etapa anterior, seguido da aplicação do empilhamento das seções CMP's e finalmente a saída que é a seção empilhada que pode ser visualizada ou gravada em um arquivo. O resultado obtido do processo de empilhamento CMP aplicado pelo referido fluxograma é apresentado na figura 4.14, obtendo-se assim a seção empilhada CMP que mostra uma primeira imagem da subsuperfície.

Figura 4.13 - Fluxograma na interface principal do BotoSeis para realizar o empilhamento.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 4.14 - Seção empilhada CMP usando o modelo de velocidade obtida pelo programa BotoVelan.



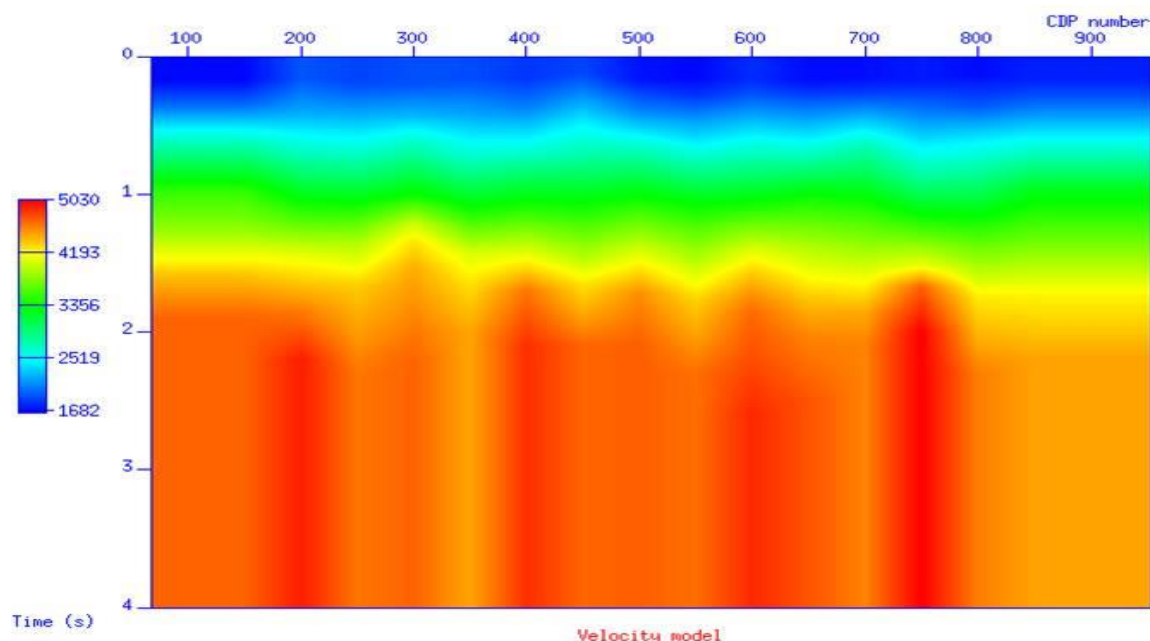
Fonte: Elaborada pelo autor. (Time – tempo e CDP number – número do CDP)

4.8 MIGRAÇÃO PÓS-EMPILHAMENTO

A migração pós-empilhamento no domínio do tempo é um processo que tem o objetivo de obter imagens da subsuperfície ainda melhores através da seção sísmica empilhada CMP, buscando focalizar as difrações, reposicionar as reflexões inclinadas para a posição correta, aumentar a continuidade e resolução lateral dos refletores.

Para a realização das tarefas citadas acima, a migração requer um modelo de velocidades conforme mostrado na Figura 4.15. No modelo de velocidades mostrado, o eixo-y representa o tempo, o eixo-x a posição CDP/CMP e no lado esquerdo a barra de cores das velocidades com os seus valores. Este modelo resulta do *picking* das velocidades em todos os CMP's pré-definidos da linha sísmica, que foram interpolados e extrapolados para todos os CMP's da linha sísmica e depois suavizado para ser usado pelo processo de migração.

Figura 4.15 - Modelo de velocidades interpolado sem suavização.

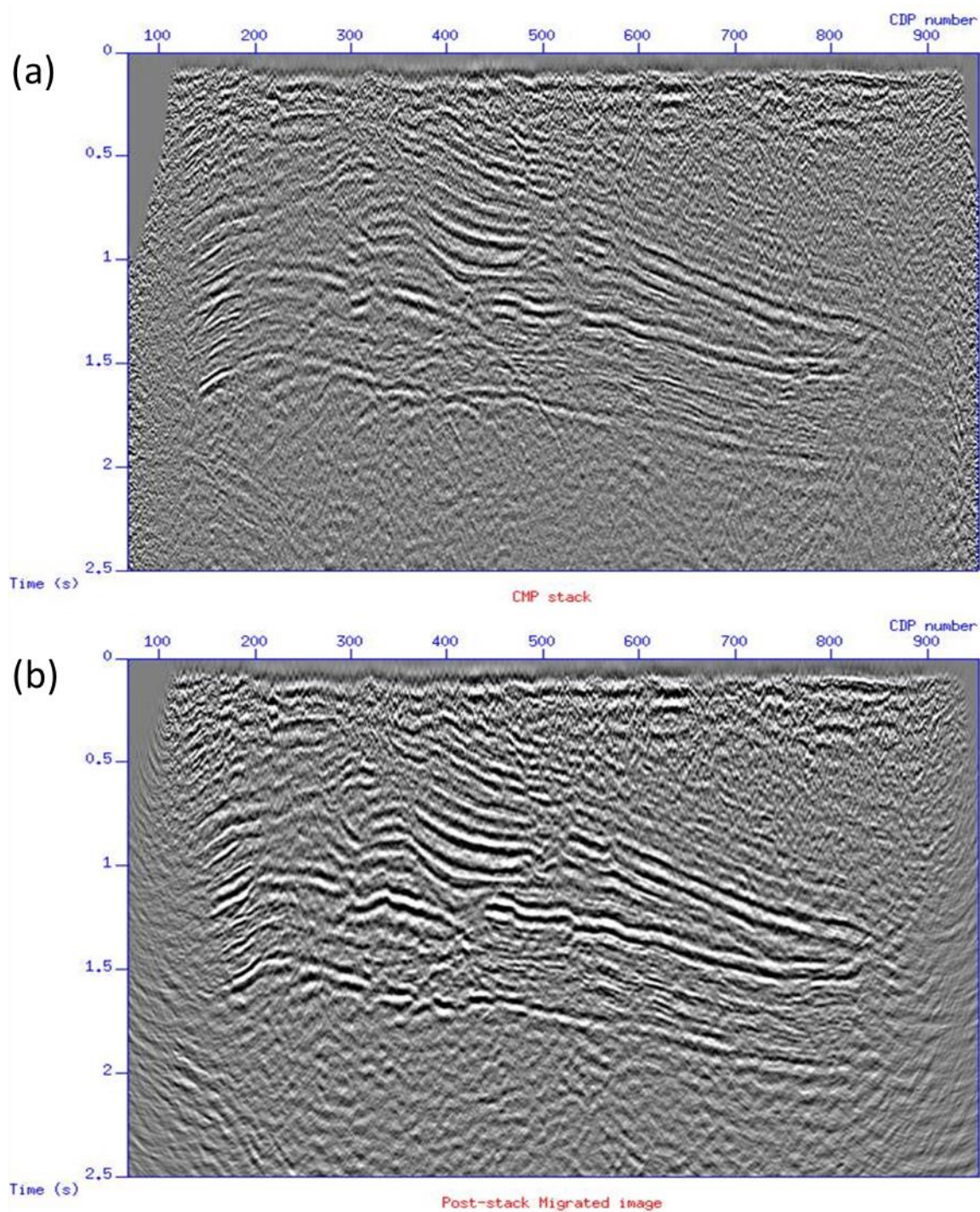


Fonte: Elaborada pelo autor. (Velocidade m/s, Time – tempo e CDP number – número do CDP)

No mapa de velocidades, pode-se perceber grandes variações verticais de velocidade mostradas pelo contraste de cores. As velocidades que estão representadas em tempos menores correspondem a valores baixos (cor azul) em torno de 1700 m/s, e à medida que o tempo aumenta as velocidades mostram um aumento passando do amarelo em torno de 3300 m/s para o vermelho com valor máximo de 5030 m/s.

Usando o modelo de velocidades da Figura 4.15, foi aplicado o método de migração pós-empilhamento Kirchhoff, cujo resultado é mostrado na Figura 4.16 (b). A característica principal desta migração é a soma das amplitudes na seção empilhada ao longo de hipérboles definidas analiticamente usando o modelo de velocidades, em que a soma ao longo da curva de difração, também chamado de operador de migração, é ponderada.

Figura 4.16 – (a) Seção empilhada e (b) Seção migrada pós-empilhamento.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Após a migração Kirchhoff, mostrada na Figura 4.16 (b), foram aplicadas um filtro passa banda, a deconvolução F-X que é um processo que remove ruído aleatório e uma normalização de amplitudes.

Comparando as seções empilhada da Figura 4.16 (a) e migrada da Figura 4.16 (b), observa-se uma melhoria notória na qualidade da seção migrada, isto se deve ao fato de que processo de migração efetuou de maneira satisfatórias seus objetivos.

5 CONCLUSÕES

Este trabalho apresenta um estudo do processamento de dados sísmicos com o objetivo de mostrar detalhadamente suas principais etapas realizadas por meio dos programas do pacote Seismic Unix e com o auxílio do software BotoSeis.

Comparando essas duas ferramentas, percebe-se que a plataforma BotoSeis é mais prática e eficaz para executar as etapas de análise de velocidades, empilhamento e migração, pois disponibiliza um ambiente gráfico para criar e gerenciar projetos, linhas e fluxogramas, não necessitando ao usuário ter experiência no uso de linhas de comando do Linux.

Portanto, através dos dados fornecidos pela ANP da linha sísmica 204-239, da Bacia do Tacutu, com o auxílio dos referidos programas computacionais foi possível aplicar todas as etapas principais do processamento sísmico padrão, obtendo-se como resultado final uma seção migrada pós-empilhamento com uma boa resolução e boa definição das estruturas ou feições geológicas.

5.1 RECOMENDAÇÕES

Devido à sua interatividade e uso amigável, recomenda-se continuar o desenvolvimento da plataforma BotoSeis, incluindo-o processos interativos como edição de traços, teste e aplicação do filtro f-k, aplicação do processo de deconvolução e outros, de forma a realizar todo o processamento de uma linha sísmica usando esta plataforma.

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AYE-AYE, M.; FOMEL, S.; HENNENFENT, G.; SAVA, P. **Madagascar documentation**. Madagascar Community, 2012.

BILOTI, R. **Seismic Un*x installation made easy**. Disponível em: <http://www.gebrproject.com/?p=1119> Acesso em: 09/11/2018.

BOLT, B. 1976. **Nuclear explosions and earthquakes: the parted veil**. W.H. Freeman & Co. p 48

COHEN, J. K.; STOCKWELL, J. W. **CWP/SU: Seismic Un*x Release No. 42: an open source software package for seismic research and processing**: Center for Wave Phenomena, Colorado School of Mines. USA, 2010.

GARABITO, G. et al. **BOTSEIS: An interactive interface for seismic data processing with Seismic Unix**. Expanded Abstract, 74th EAGE Conference & Exhibition incorporating, Copenhagen. Denmark, 2012.

Hardy, R. **Basic seismic processing for interpreters**. Disponível em: <http://www.xsgeo.com/course/contents.htm> Acesso em: 05/10/2018.

KEAREY, P.; BROOKS, M.; HILL, Ian. **An introduction to geophysical exploration**. Blackwell Science, Malden, MA, 2002.

KRUK, J. **Reflection seismic I: Lecture notes**, Institut für Geophysik, ETH Zürich, 2005.

VARELA, Heloizy de Carvalho Figueiredo. **Análise de velocidade de dados sísmicos com shell scripts e a interface BotoSeis** 2017. 76 f. TCC

(Graduação) - Curso de Engenharia de Petróleo, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, Brasil, 2017.

WILSON, T. **Reflection seismology**: A basic introduction. Disponível em: <https://www.slideshare.net/oncel/reflection-seismology-overview> Acesso: 07/11/2018.

YILMAZ, Ö; et al. **Seismic data analysis**. Society of Exploration Geophysicists, Tulsa, 2001.