



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

GEO213 – TRABALHO DE GRADUAÇÃO

ATENUAÇÃO DO *GROUND ROLL*
UTILIZANDO FILTRO NÃO CAUSAL TIPO
WIENER-LEVINSON

QUÉZIA CAVALCANTE DOS SANTOS

SALVADOR – BAHIA

AGOSTO – 2007

Atenuação do *ground roll* utilizando filtro não causal tipo Wiener-Levinson

por

QUÉZIA CAVALCANTE DOS SANTOS

GEO213 – TRABALHO DE GRADUAÇÃO

DEPARTAMENTO DE GEOLOGIA E GEOFÍSICA APLICADA

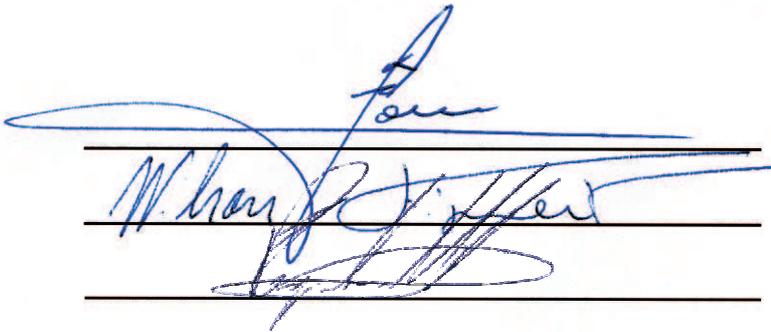
DO

INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

DA

UNIVERSIDADE FEDERAL DA BAHIA

Comissão Examinadora



Dr. Milton José Porsani - Orientador

Dr. Wilson Mouzer Figueiró

Dr. Paulo Espinheira Menezes de Melo

Data da aprovação: 08/08/2007

A todas as pessoas que eu amo.

RESUMO

O *ground roll* ou ruído de rolamento superficial ocorre em dados sísmicos terrestres, mascarando as reflexões de interesse. Ele está relacionado ao componente vertical da onda Rayleigh. Suas principais características são as altas amplitudes, baixas frequências e baixa velocidade. A atenuação do *ground roll* é um dos grandes problemas do processamento de dados sísmicos. Os métodos convencionais de filtragem empregados são os filtros passa-alta e $f - k$, ambos baseados na remoção de alguns componentes de frequência do dado. Este trabalho apresenta uma nova abordagem para filtragem do *ground roll* baseada no bem conhecido filtro de Wiener-Levinson, geralmente utilizado na etapa de deconvolução do pulso sísmico. Os filtros WL causal e anticausal são combinados para formar um só operador, não causal e anti-simétrico. O método foi testado em dados reais da bacia sedimentar do Tacutu e os resultados demonstram que a nova abordagem é bastante eficaz. As imagens sísmicas geradas mostram melhoras na resolução temporal e na continuidade das reflexões, quando comparadas àquelas geradas com os métodos convencionais.

ABSTRACT

Ground roll is a noise related to the vertical component of the Rayleigh wave that occurs in land seismic data and masks the reflections of interest. The main characteristics of this noise are the high amplitude, low frequency and low velocity. The attenuation or removal of ground roll represents a serious obstacle to the processing of seismic data. The conventional filtering methods are the high pass and $f - k$ filters, both based on the removal of some frequency component of the data. This work presents a new filtering approach based on the well-known Wiener-Levinson deconvolution method. The causal and anticausal Wiener-Levinson filters are combined to form an anti-symmetric noncausal filter. The new approach was tested on real seismic data from the Tacutu basin and the results demonstrate that this filtering method is very effective. The generated seismic images show an improved time resolution and better lateral continuity of the reflections, when compared to the conventional results of the $f - k$ and high pass methods.

ÍNDICE

RESUMO	iii
ABSTRACT	iv
ÍNDICE	v
ÍNDICE DE FIGURAS	vi
INTRODUÇÃO	1
CAPÍTULO 1 O <i>ground roll</i> e os métodos convencionais de filtragem . . .	3
1.1 O <i>ground roll</i>	3
1.2 Filtro passa-alta	4
1.3 Filtragem no domínio $f - k$	14
CAPÍTULO 2 Deconvolução de Wiener-Levinson	18
2.1 Deconvolução do pulso sísmico	18
2.2 Filtro Wiener de predição unitária	19
2.3 Filtro WL para baixas frequências	21
CAPÍTULO 3 Filtro não causal tipo Wiener-Levinson	25
CAPÍTULO 4 Conclusões	32
Agradecimentos	34
Referências Bibliográficas	35

ÍNDICE DE FIGURAS

1.1	Desenho esquemático ilustrando o movimento elíptico e retrógrado descrito pelas partículas na onda superficial Rayleigh. As grandezas u_x e u_z representam os deslocamentos nas direções x e z , respectivamente (Stein e Wysession, 2003).	4
1.2	Sismograma contaminado com o <i>ground roll</i> , com destaque para a região de maior abrangência deste ruído, que lembra a forma de um “cone”.	5
1.3	Espectro de amplitude de um filtro passa-alta (ou corta-baixa).	6
1.4	Diagrama ilustrando a aplicação do filtro passa-alta, no domínio da frequência (Yilmaz, 2001).	7
1.5	Diagrama ilustrando a aplicação do filtro passa-alta, no domínio do tempo (Yilmaz, 2001).	8
1.6	Família de tiro comum antes da filtragem do <i>ground roll</i>	9
1.7	Família de tiro comum após aplicação do filtro passa-alta. O ruído foi bastante atenuado, mas também houve perdas no sinal.	9
1.8	Espectro de amplitude da família de tiro comum mostrada na Figura 1.6. Note que há dois picos de amplitude: um em torno de 10 Hz, relacionado ao <i>ground roll</i> , e outro em torno de 25 Hz, onde se encontra a maior parte do sinal.	10
1.9	Espectro de amplitude da família de tiro comum após a aplicação do filtro passa-alta (ver Figura 1.7). Notar a grande perda de amplitude nas baixas frequências filtradas.	10
1.10	Trecho da seção sísmica empilhada da linha 50-RL-104 sem qualquer tipo de filtragem para atenuar o <i>ground roll</i>	11
1.11	Fluxograma com as etapas do processamento para obtenção da seção da Figura 1.10.	12
1.12	Mesmo trecho mostrado na Figura 1.10, após aplicação do filtro passa-alta (8-15 Hz).	12
1.13	Fluxograma com as etapas do processamento para obtenção da seção da Figura 1.12.	13
1.14	Espectro de amplitude bidimensional correspondente à família de tiro comum antes da filtragem (Figura 1.6).	15
1.15	Resultado da filtragem $f - k$. As amplitudes da região delimitada pelo polígono foram levadas a zero, atenuando tanto o <i>ground roll</i> quanto as reflexões (ver sismograma na Figura 1.16).	16
1.16	Sismograma resultante da filtragem $f - k$	16

1.17	Trecho da seção sísmica empilhada gerada após a filtragem $f - k$	17
1.18	Fluxograma com as etapas do processamento envolvidas na obtenção da seção sísmica empilhada ilustrada na Figura 1.17.	17
2.1	Sismograma de família de tiro comum após deconvolução de WL, com filtro de 4 coeficientes e 1% de luz branca.	21
2.2	Espectro de amplitude após deconvolução de WL. Note o aumento das amplitudes correspondentes às altas frequências.	22
2.3	Sismograma após a deconvolução de WL utilizando apenas as baixas frequências (4-12 Hz) no cálculo da função de autocorrelação.	23
2.4	Espectro de amplitude após a deconvolução de WL utilizando a FAC das frequências entre 4 e 12 Hz.	23
2.5	Seção empilhada gerada após a deconvolução de WL utilizando a FAC das baixas frequências.	24
2.6	Fluxograma para obtenção da seção da Figura 2.5.	24
3.1	Composição do operador não causal anti-simétrico f_t^a como a diferença entre os filtros de WL causal e anticausal, ou seja, $f_t^a = c_t^+ - c_t^-$	26
3.2	Sismograma após a aplicação do filtro anti-simétrico tipo WL.	26
3.3	Espectro unidimensional da família de tiro comum após aplicação do filtro anti-simétrico tipo WL.	27
3.4	Trecho da seção empilhada gerada após a aplicação do filtro anti-simétrico tipo WL.	28
3.5	Fluxograma para obtenção da seção empilhada ilustrada na Figura 3.4.	28
3.6	Sismograma após a aplicação do filtro anti-simétrico tipo WL pseudomulticanal.	29
3.7	Espectro de amplitude unidimensional da família de tiro comum após a aplicação do filtro anti-simétrico tipo WL pseudomulticanal.	30
3.8	Trecho da seção empilhada resultante da aplicação do filtro anti-simétrico tipo WL pseudomulticanal.	30
3.9	Fluxograma de processamento empregado para obter a seção sísmica empilhada da Figura 3.8.	31

INTRODUÇÃO

O termo genérico *ground roll* refere-se às ondas superficiais Love e Rayleigh, geradas pelas fontes sísmicas. Este trabalho trata, especificamente, da filtragem do componente vertical da onda Rayleigh (também referido como *ground roll*, na literatura) que, geralmente, está presente nos dados sísmicos terrestres e é considerado um ruído pela Sismologia de Exploração¹.

As principais características do *ground roll* (das quais, praticamente, todos os métodos de filtragem se aproveitam) são as altas amplitudes, baixas frequências e baixas velocidades.

Nos primórdios da Sismologia de Exploração, buscava-se atenuar esse ruído durante a aquisição dos dados, utilizando arranjos de fontes e receptores (Klipsch, 1936; Smith, 1945; Morse e Hildebrandt, 1989), largamente empregados até hoje. McKay (1954) mostra alguns bons exemplos de melhora na qualidade dos registros com o uso de diferentes arranjos. O problema é que, além de elevar os custos da aquisição (o que não chega a representar um grande impedimento, pelo menos na exploração de petróleo e gás), esse procedimento tem diversas limitações e os resultados nem sempre são satisfatórios. O espaçamento entre os componentes, tamanho e direção dos arranjos devem ser escolhidos com base nas características do ruído a ser eliminado. Mas, na prática, estes ruídos, a exemplo do *ground roll*, são constituídos de vários elementos com diferentes frequências, e provenientes de várias direções. Além disso, suas características podem mudar de um ponto para o outro. Outra limitação de natureza prática reside no fato de que os arranjos de campo raramente coincidem com os planejados (Newman e Mahoney, 1973), por causa das condições do terreno, topografia etc. Por último, devido à crescente necessidade de alta resolução temporal, os arranjos têm sido utilizados com muito cuidado, por atuarem como filtros corta-alta. Portanto, a supressão ou, pelo menos, a atenuação do *ground roll* deve ser alcançada durante o processamento dos dados, nas etapas de filtragem.

Os métodos de filtragem para atenuar o *ground roll* podem ser divididos em dois grandes grupos. O primeiro contempla os filtros de frequência (temporal e espacial) baseados na remoção, no domínio espectral, de porções indesejadas do dado. O segundo baseia-se na estimativa do ruído, que é, posteriormente, subtraído do dado original, no domínio do tempo (Karsli e Bayrak, 2004). Os filtros mais comumente usados, representantes do primeiro

¹A ausência da onda Love e do componente horizontal da onda Rayleigh nos sismogramas terrestres se deve, exclusivamente, ao fato de que, na grande maioria das aquisições sísmicas, são utilizados geofones capazes de registrar apenas as oscilações verticais do terreno.

grupo, são conhecidos como *passa-alta* (Yilmaz, 2001) e $f - k$ (Embree et al., 1963; Fail e Grau, 1963; Treitel et al., 1967). Pelo seu emprego freqüente, e por fazerem parte de qualquer software de processamento sísmico, estes últimos serão detalhados no capítulo 1. Adiantamos que os dois métodos têm suas limitações, e a principal delas é a atenuação do sinal juntamente com o ruído.

Métodos alternativos têm sido desenvolvidos ao longo dos anos, dentre os quais podemos citar: transformada Karhuren-Loeve (Liu, 1999), transformada wavelet (Deighan e Watts, 1997), freqüência modulada (Saatçilar e Canitez, 1988), derivada direcional (Melo et al., 2006) e alguns outros algoritmos que estimam o ruído a partir do dado, direta ou indiretamente (Linville e Meek, 1995; Karsli e Bayrak, 2004).

Neste trabalho, estamos propondo uma nova abordagem para atenuar o *ground roll* baseada no método clássico de deconvolução Wiener-Levinson (WL). Combinamos o filtro de WL causal e o anticausal, gerando um filtro não causal e anti-simétrico, que se mostrou bastante eficaz. O filtro foi aplicado em dados reais terrestres da bacia sedimentar do Tacutu (linha 50-RL-104) e os resultados demonstram que a seção sísmica empilhada apresenta melhor definição e continuidade dos refletores, comparada àquelas obtidas com os métodos de filtragem convencionais.

Antes dos testes com os métodos de filtragem, os dados foram submetidos a um tratamento inicial que consistiu na correção de amplitude (compensação das perdas por divergência esférica) e correção estática (compensação das diferenças no tempo de registro devido às elevações do terreno e à zona de baixa velocidade). Um único campo de velocidades foi utilizado para gerar as seções empilhadas, possibilitando uma análise focalizada apenas no método de filtragem em si, e não em suas implicações nas etapas posteriores do processamento, embora este seja um aspecto bastante relevante.

CAPÍTULO 1

O *ground roll* e os métodos convencionais de filtragem

Neste primeiro capítulo, são abordados alguns aspectos do *ground roll* e os dois métodos de filtragem mais utilizados para atenuá-lo. O primeiro deles, de caráter unidimensional, é conhecido como filtro passa-alta (ou corta-baixa), enquanto o outro, de caráter bidimensional, é mais conhecido como filtro $f - k$. Ambos foram aplicados nos dados sísmicos terrestres da bacia sedimentar do Tacutu, linha 50-RL-104, e os resultados podem ser comparados com aqueles mostrados nos capítulos subseqüentes.

1.1 O *ground roll*

O *ground roll*, geralmente presente em dados sísmicos terrestres, está relacionado às ondas superficiais Rayleigh. Na onda Rayleigh, as partículas descrevem um movimento elíptico e retrógrado (Figura 1.1), contido no plano vertical, contrário ao sentido de propagação no topo da elipse (Stein e Wysession, 2003). Sua amplitude decai rapidamente com a profundidade e é proporcional a $1/\sqrt{r}$, onde r é a distância percorrida ou o raio da frente de onda. Vale lembrar que esta proporção é característica das ondas superficiais em geral. Nas ondas de corpo, como P e S, as amplitudes são proporcionais a $1/r$.

Os aspectos que tornam este ruído reconhecível em um sismograma são as altas amplitudes, baixas frequências e velocidades e coerência traço a traço. Ele costuma aparecer na forma de um “cone” ou “semicone” (a depender do arranjo utilizado na aquisição) com ápice no traço mais próximo da fonte (Figura 1.2). Propriedades tais como baixa velocidade de propagação e dispersão estão relacionadas à natureza das camadas geológicas mais próximas à superfície (Al-Husseini et al., 1981).

Quando a camada superficial é muito espessa e desprovida de descontinuidades da mesma ordem de magnitude dos comprimentos de onda em questão (o que representaria uma aproximação de um semi-espaco homogêneo), o *ground roll* não é dispersivo. Porém, o mais comum é que os componentes de frequências diferentes se propaguem com velocidades de fase diferentes, o que caracteriza a dispersão (Dobrin, 1951; Al-Husseini et al., 1981).

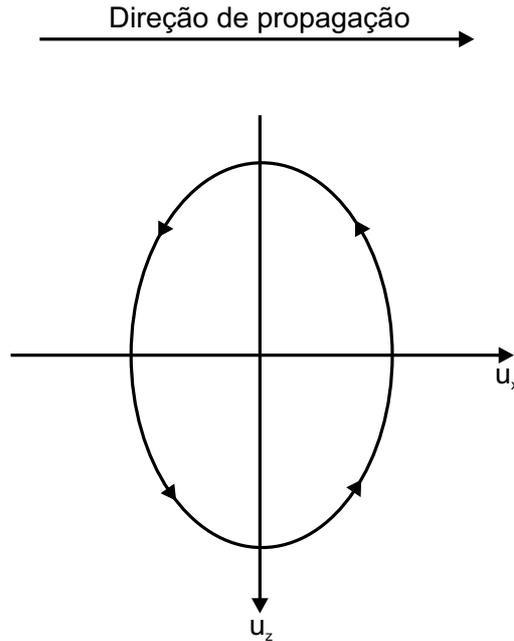


Figura 1.1: Desenho esquemático ilustrando o movimento elíptico e retrógrado descrito pelas partículas na onda superficial Rayleigh. As grandezas u_x e u_z representam os deslocamentos nas direções x e z , respectivamente (Stein e Wysession, 2003).

Desse modo, o ruído apresenta longa duração, abrangendo grande parte do sismograma e prejudicando a continuidade das reflexões de interesse, o que dificulta as etapas posteriores do processamento e a interpretação.

1.2 Filtro passa-alta

O traço sísmico é, usualmente, representado como uma função que varia no tempo. Ele pode ser, portanto, decomposto em um somatório de senóides, em que cada uma delas possui uma determinada amplitude, frequência temporal e fase, através da transformada direta de Fourier unidimensional. Desse modo, ele passa do domínio do tempo para o domínio da frequência temporal f , e a representação da amplitude de cada senóide em função de sua frequência é o que conhecemos como espectro de amplitude unidimensional. Semelhantemente, a representação da fase em função da frequência é o espectro de fase.

A transformada direta de Fourier unidimensional de uma função contínua $y(t)$ é definida como a integral

$$Y(\omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} y(t)e^{-i\omega t} dt, \quad (1.1)$$

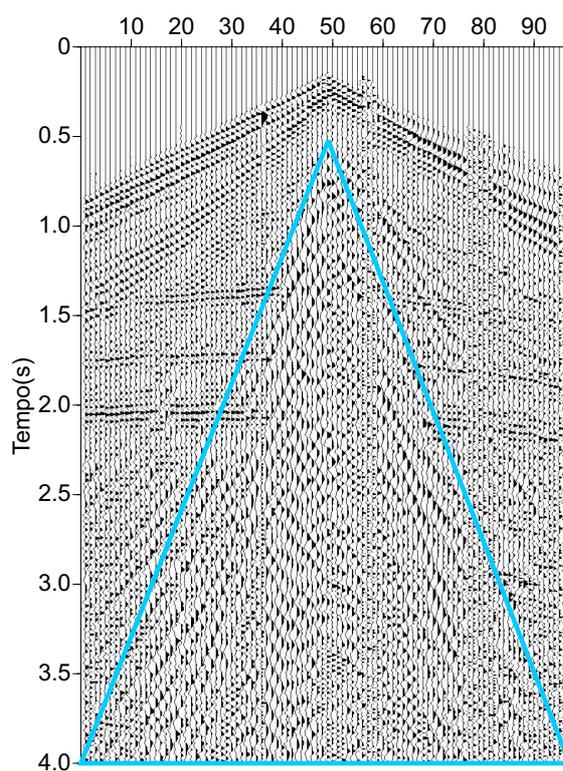


Figura 1.2: Sismograma contaminado com o *ground roll*, com destaque para a região de maior abrangência deste ruído, que lembra a forma de um “cone”.

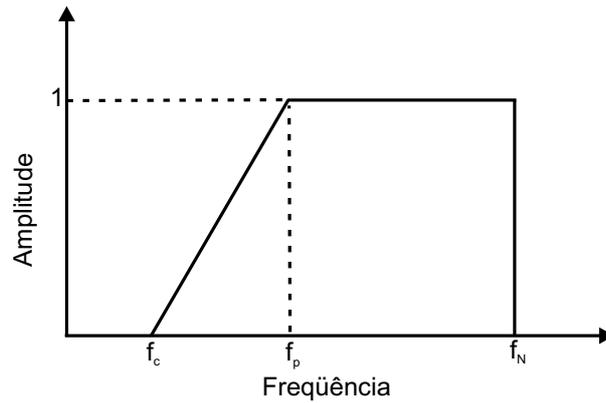


Figura 1.3: Espectro de amplitude de um filtro passa-alta (ou corta-baixa).

onde t é o tempo e ω é a frequência angular, dada por

$$\omega = 2\pi f. \quad (1.2)$$

O processo de transformação é reversível. Assim, a transformada inversa de Fourier unidimensional da função $Y(\omega)$ é

$$y(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} Y(\omega) e^{i\omega t} d\omega. \quad (1.3)$$

Como os dados sísmicos são discretos (ou seja, são amostrados a um intervalo de tempo regular, chamado de intervalo ou razão de amostragem), a transformação de um domínio para o outro é feita utilizando a transformada discreta de Fourier. A maior parte dos programas de computador utiliza um algoritmo conhecido como “transformada rápida de Fourier” (FFT, sigla da expressão *Fast Fourier transform*).

É importante lembrar que a amostragem de um dado a cada intervalo Δt faz com que a frequência máxima contida nele, chamada de frequência temporal de Nyquist, seja

$$f_N = \frac{1}{2\Delta t}. \quad (1.4)$$

Os filtros de frequência, de uma maneira geral, são necessários quando se deseja rejeitar ou preservar determinadas faixas de frequência. Portanto, o *ground roll* pode ser eliminado se rejeitarmos as baixas frequências, aplicando o filtro **passa-alta** ou **corta-baixa**. Para tanto, devemos escolher duas frequências: uma de corte, f_c , abaixo da qual as amplitudes serão levadas a zero, e outra de passagem, f_p , acima da qual as amplitudes serão preservadas. A Figura 1.3 ilustra o espectro de amplitude deste tipo de filtro.

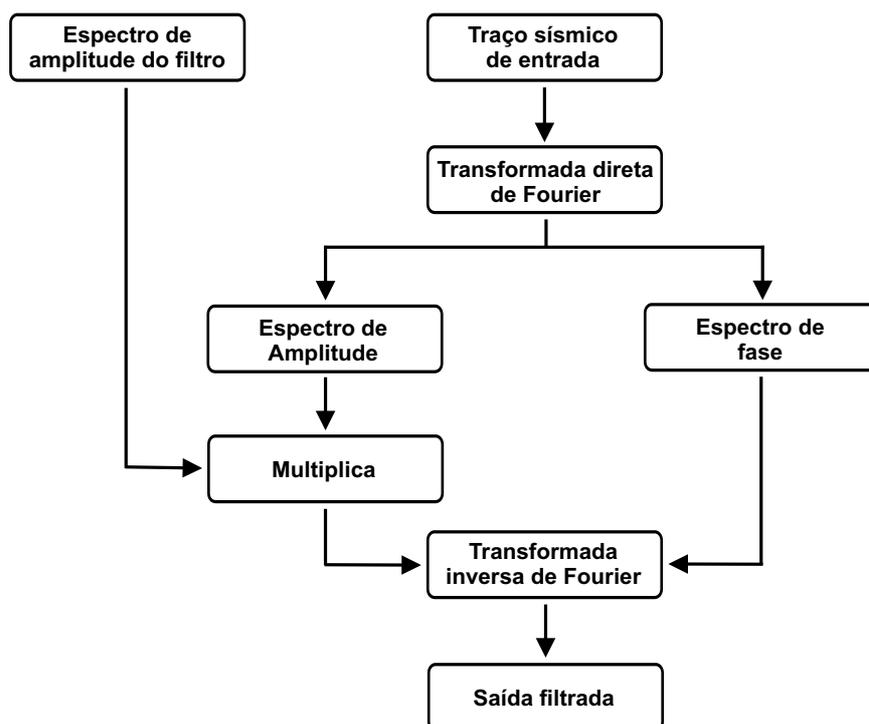


Figura 1.4: Diagrama ilustrando a aplicação do filtro passa-alta, no domínio da frequência (Yilmaz, 2001).

A escolha de dois valores é necessária para que uma rampa seja definida entre eles, de forma a evitar o chamado fenômeno de Gibbs (Bracewell, 1965).

Na prática, a filtragem pode ser realizada de duas maneiras, que levam a resultados semelhantes: no domínio da frequência, multiplicando os espectros de amplitude do traço de entrada e do filtro (Figura 1.4), ou no domínio do tempo, convolvendo o operador do filtro com o traço de entrada (Figura 1.5). Esse operador é, simplesmente, a transformada inversa de Fourier daquele filtro definido no domínio da frequência, com fase nula.

O resultado da aplicação do filtro passa-alta ($f_c = 8$ Hz e $f_p = 15$ Hz) nos dados sísmicos reais da linha 50-RL-104 pode ser visto nas figuras 1.6 e 1.7, que mostram os sismogramas de uma família de tiro comum antes e após a filtragem, respectivamente. Algumas informações sobre esta linha sísmica de reflexão podem ser vistas na Tabela 1.1. Embora o *ground roll* tenha sido bastante atenuado, houve perda de sinal correspondente às baixas frequências. Esse fato é melhor percebido nas figuras 1.8 e 1.9, que mostram os espectros de amplitude correspondentes.

É sabido que as rochas também se comportam como filtros, atenuando as frequências altas à medida que as ondas se propagam. Esse fenômeno faz com que as reflexões provenientes de refletores profundos sejam constituídas, basicamente, de frequências muito baixas, que são fortemente atenuadas com o uso do filtro passa-alta. E esses são, justamente, os

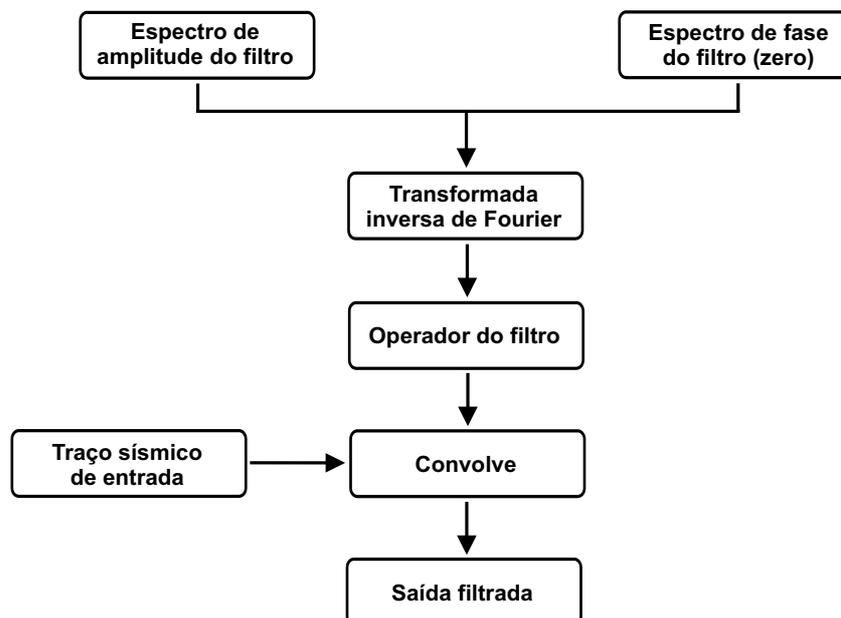


Figura 1.5: Diagrama ilustrando a aplicação do filtro passa-alta, no domínio do tempo (Yilmaz, 2001).

Tabela 1.1: Informações gerais sobre a linha sísmica de reflexão utilizada neste trabalho.

LINHA 50-RL-104	
Bacia	Tacutu
Localização	Roraima, Brasil
Lanço	2700 - 350 - 350 - 2700
Cobertura	1200%
Número de canais	96
Intervalo entre estações	50m
Intervalo entre pontos de tiro	200 m
Intervalo de amostragem (temporal)	4 ms

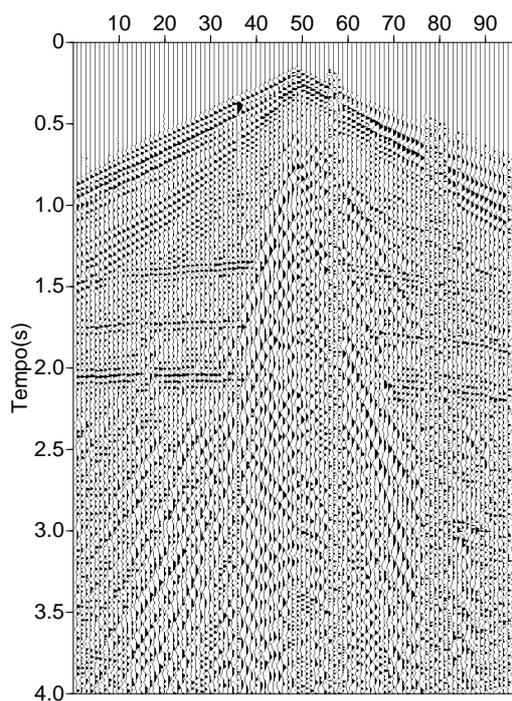


Figura 1.6: Família de tiro comum antes da filtragem do *ground roll*.

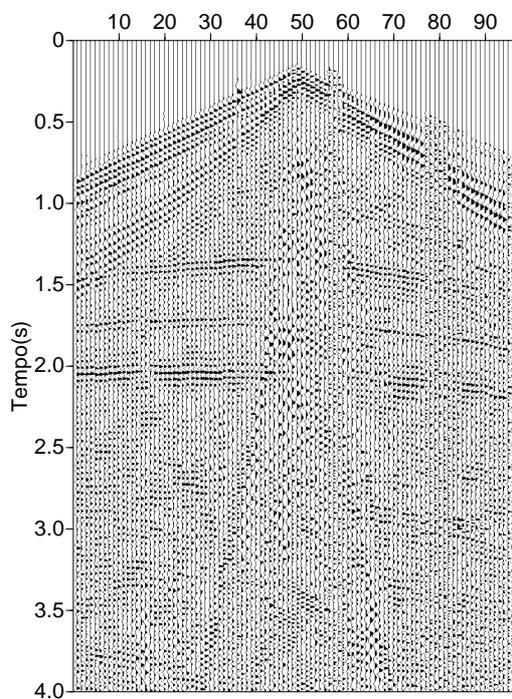


Figura 1.7: Família de tiro comum após aplicação do filtro passa-alta. O ruído foi bastante atenuado, mas também houve perdas no sinal.

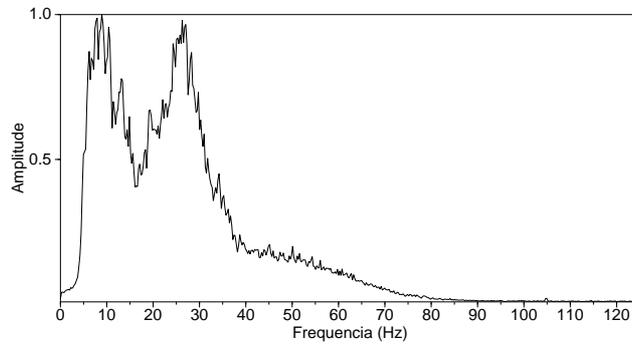


Figura 1.8: Espectro de amplitude da família de tiro comum mostrada na Figura 1.6. Note que há dois picos de amplitude: um em torno de 10 Hz, relacionado ao *ground roll*, e outro em torno de 25 Hz, onde se encontra a maior parte do sinal.

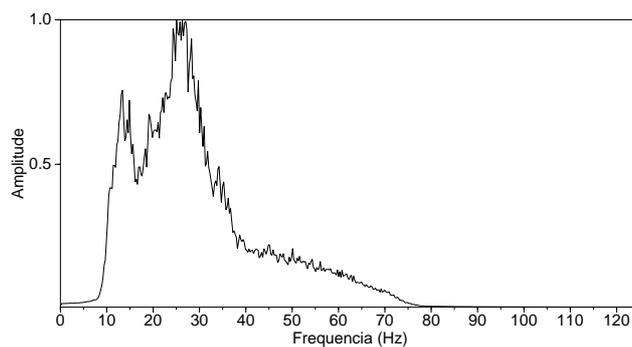


Figura 1.9: Espectro de amplitude da família de tiro comum após a aplicação do filtro passa-alta (ver Figura 1.7). Notar a grande perda de amplitude nas baixas frequências filtradas.

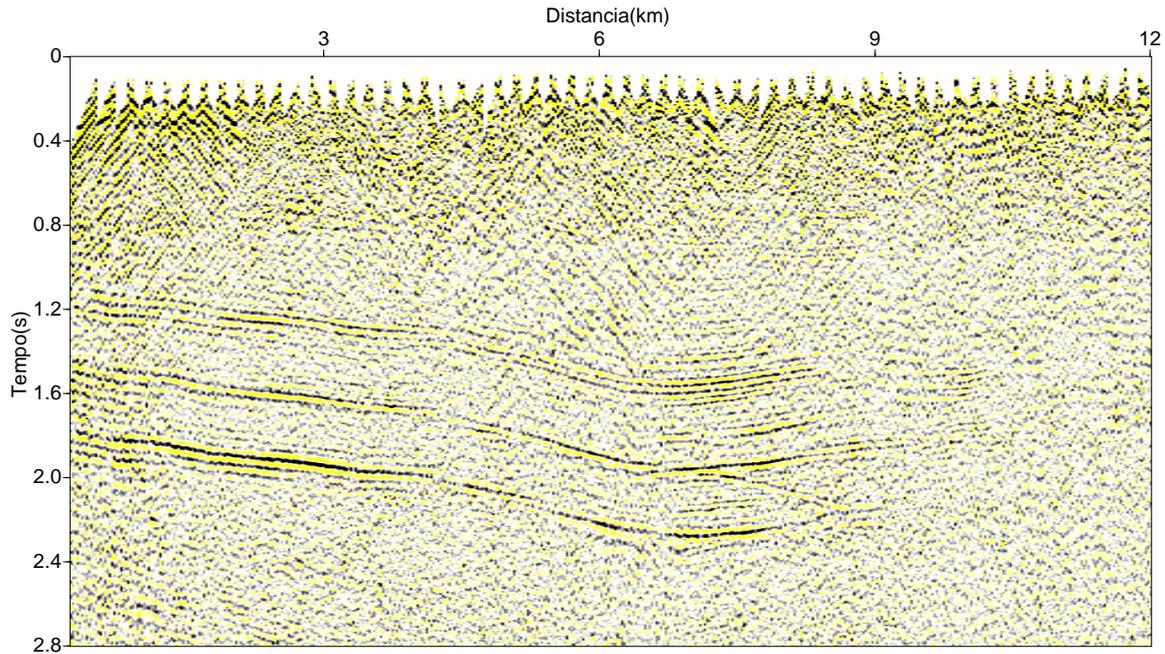


Figura 1.10: Trecho da seção sísmica empilhada da linha 50-RL-104 sem qualquer tipo de filtragem para atenuar o *ground roll*.

eventos mais afetados pelo ruído, nos sismogramas, por causa de sua baixa velocidade e seu caráter dispersivo.

Na Figura 1.10 está ilustrada parte da seção sísmica empilhada sem qualquer tipo de filtragem para atenuação do *ground roll*. O ruído aparece sob a forma de eventos lineares inclinados, com mergulho aparente para ambos os lados, e grande amplitude, principalmente no início do registro. Notar a interferência com as reflexões, prejudicando a continuidade destas. O fluxograma de processamento seguido para obter esta seção está ilustrado na Figura 1.11. Para efeito de comparação, o campo de velocidades para a correção de NMO (*normal moveout*) e posterior empilhamento foi o mesmo em todos os fluxogramas apresentados neste trabalho. Sua obtenção será abordada no capítulo 3.

A Figura 1.12 traz o mesmo trecho da seção, gerada após a aplicação do filtro passa-alta. O fluxograma correspondente está mostrado na Figura 1.13. A filtragem, além de atenuar o ruído, restaurou a continuidade dos eventos de reflexão. A escolha dos valores das frequências de corte e passagem (8 e 15 Hz, respectivamente) baseou-se no fato de que as amplitudes mais altas do ruído se concentram, basicamente, nesta faixa (Figura 1.8). Valores de frequências de passagem mais altos para o filtro devem levar a melhores resultados, mas as perdas também serão maiores.

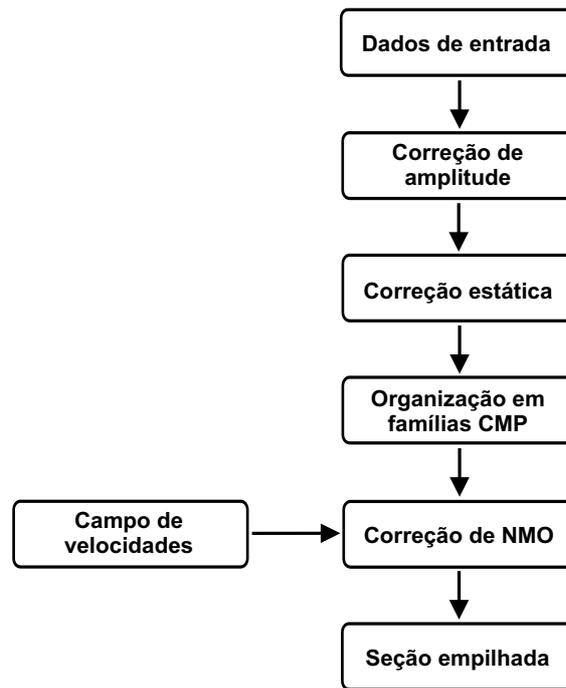


Figura 1.11: Fluxograma com as etapas do processamento para obtenção da seção da Figura 1.10.

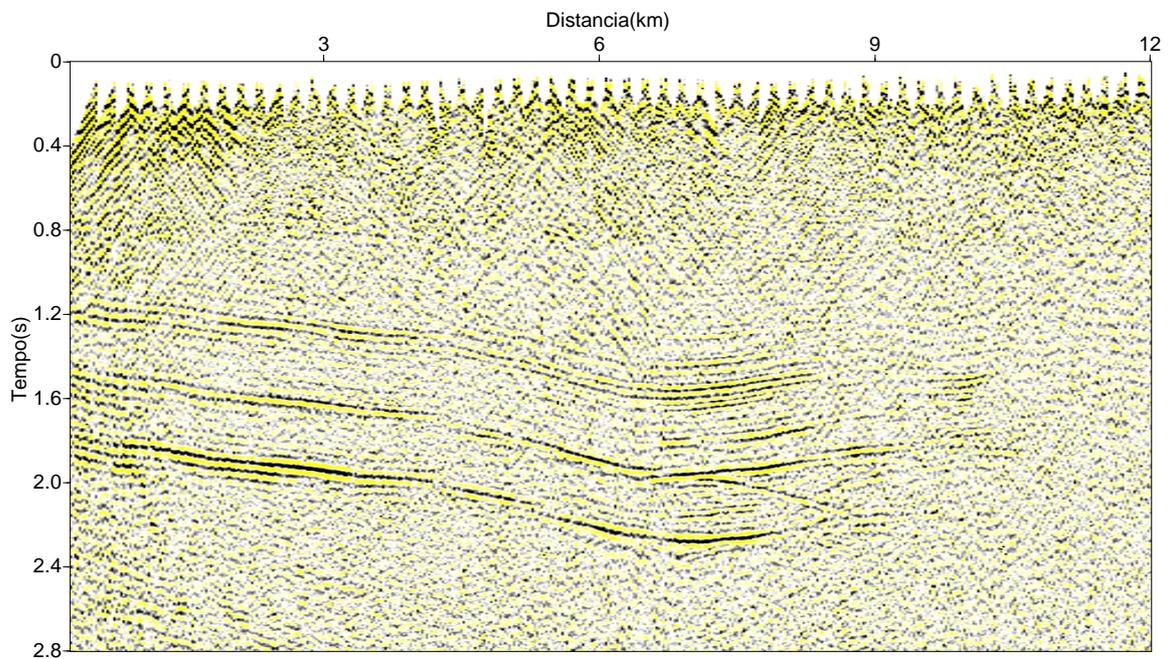


Figura 1.12: Mesmo trecho mostrado na Figura 1.10, após aplicação do filtro passa-alta (8-15 Hz).

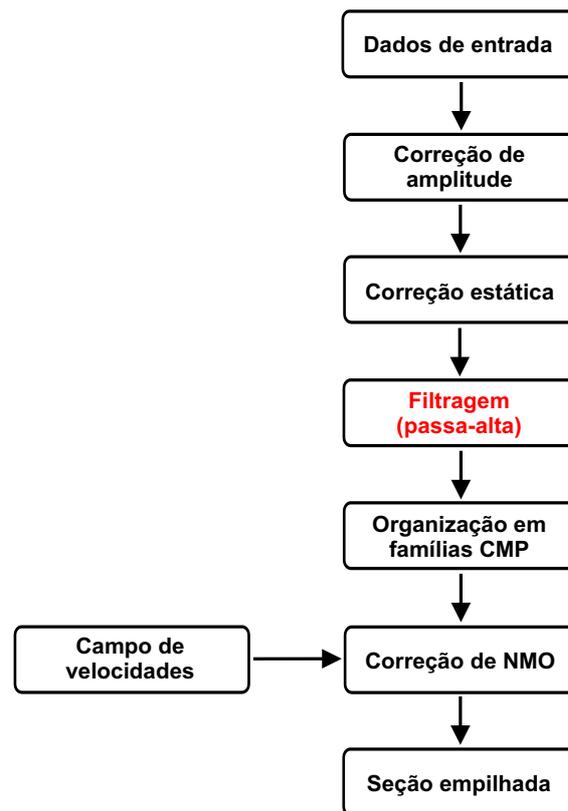


Figura 1.13: Fluxograma com as etapas do processamento para obtenção da seção da Figura 1.12.

1.3 Filtragem no domínio $f - k$

Na seção anterior, foi visto que a frequência temporal é a correspondente da variável tempo, no domínio Fourier. Mas a onda sísmica não é uma função do tempo, apenas, mas também do espaço. De forma análoga, a correspondente do espaço, no domínio Fourier, é a frequência espacial k , ou número de onda.

Como os dados sísmicos também são amostrados espacialmente (o intervalo de amostragem é a distância Δx entre os canais, ou receptores), há uma frequência máxima que pode ser “armazenada”, chamada de frequência espacial de Nyquist, dada por

$$k_N = \frac{1}{2\Delta x}. \quad (1.5)$$

A transformação de um dado do domínio $x - t$ (espaço e tempo) para o domínio $f - k$ é feita via transformada direta de Fourier bidimensional, que pode ser pensada como duas transformadas de Fourier unidimensionais sucessivas, uma temporal, e outra espacial. Similarmente à transformada unidimensional, os programas de computador, normalmente, utilizam o algoritmo FFT.

A transformada direta de Fourier bidimensional de uma função contínua $y(x, t)$ é

$$Y(k_x, \omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} y(x, t) e^{(ik_x x - i\omega t)} dx dt. \quad (1.6)$$

A função $y(x, t)$ pode ser recuperada pela transformada inversa de Fourier bidimensional, dada por

$$y(x, t) = \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} Y(k_x, \omega) e^{(-ik_x x + i\omega t)} dk_x d\omega. \quad (1.7)$$

Eventos lineares com mesmo mergulho aparente (ou velocidade aparente) no domínio $t - x$ são mapeados, no domínio $f - k$, como uma linha reta partindo da origem. Eventos que se interferem num domínio (a exemplo do *ground roll* e das reflexões) podem ser isolados no outro.

A Figura 1.14 mostra o espectro de amplitude bidimensional da família de tiro comum ilustrada na Figura 1.6. No espectro, a frequência temporal está representada no eixo vertical, enquanto a espacial está representada no eixo horizontal. O *ground roll* aparece na forma de eventos lineares (B), próximos ao eixo horizontal, levemente inclinados, de cor avermelhada, partindo da origem do gráfico. Os outros eventos mais inclinados (A) correspondem às ondas refratadas, vistas no início do sismograma. Na escala de cores, as amplitudes mais altas correspondem às cores mais “quentes”. O polígono desenhado em preto circunscreve

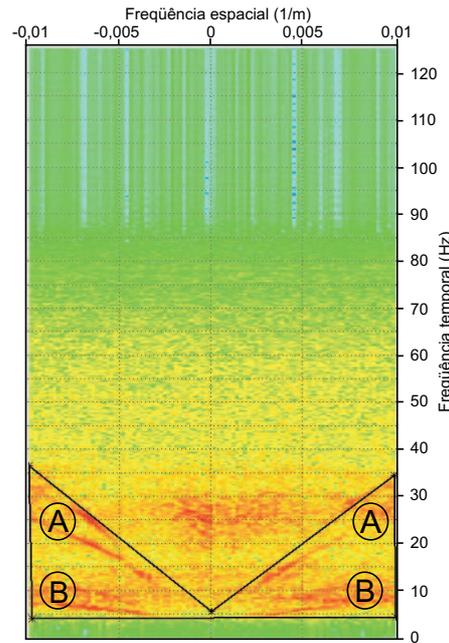


Figura 1.14: Espectro de amplitude bidimensional correspondente à família de tiro comum antes da filtragem (Figura 1.6).

a região do espectro contaminada com estes eventos, e que será eliminada no processo de filtragem.

No domínio $f - k$, a região a ser eliminada pode ser definida utilizando polígonos, de formas arbitrárias, como neste exemplo, ou duas linhas retas partindo da origem, com inclinações arbitrárias (os chamados *fan filters* ou “filtros em leque”), se estendendo até k_N .

No espectro bidimensional da Figura 1.15, após a filtragem $f - k$, vê-se que as amplitudes da região definida pelo polígono foram levadas a zero. O efeito disso pode ser visto no sismograma (Figura 1.16), onde o *ground roll* e as refrações foram bastante atenuados.

A Figura 1.17 mostra o mesmo trecho da seção empilhada, desta vez gerado após a filtragem $f - k$. Note que os eventos lineares foram bastante reduzidos, e as reflexões apresentam-se mais contínuas. A Figura 1.18 traz o fluxograma de processamento correspondente.

Sob condições ideais, os resultados deste método são bastante satisfatórios. Entenda-se “condições ideais” como a ausência do fenômeno denominado *aliasing* espacial (Yilmaz, 2001), termo, às vezes, traduzido como “falseamento”. Nestes casos, o ruído cruza a região do sinal, no espectro $f - k$, e sua remoção leva a perdas de frequências.

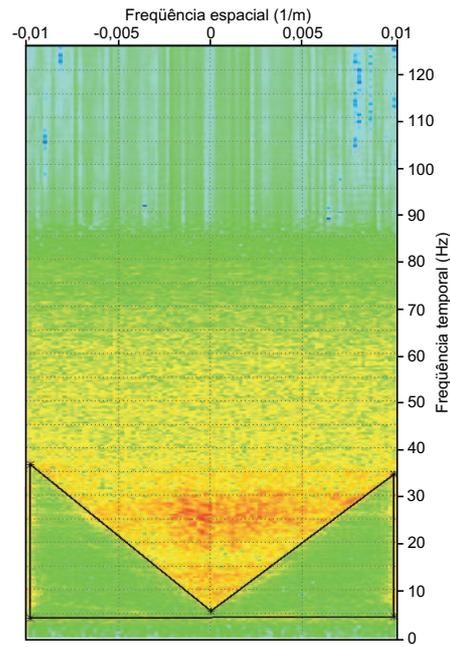


Figura 1.15: Resultado da filtragem $f - k$. As amplitudes da região delimitada pelo polígono foram levadas a zero, atenuando tanto o *ground roll* quanto as refrações (ver sismograma na Figura 1.16).

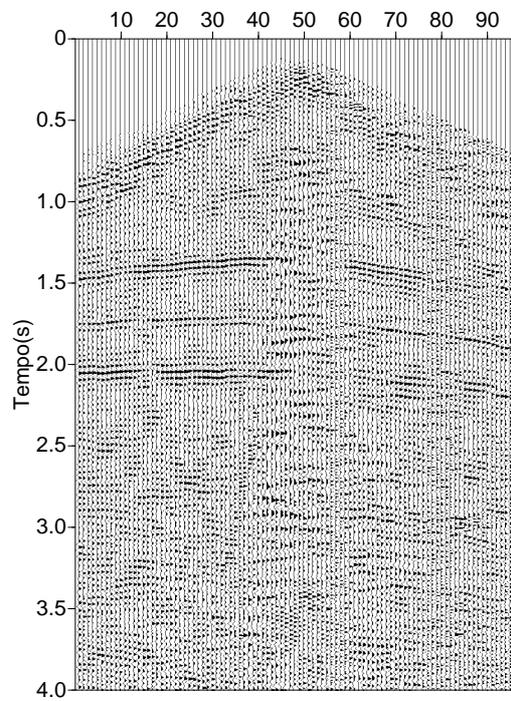


Figura 1.16: Sismograma resultante da filtragem $f - k$.

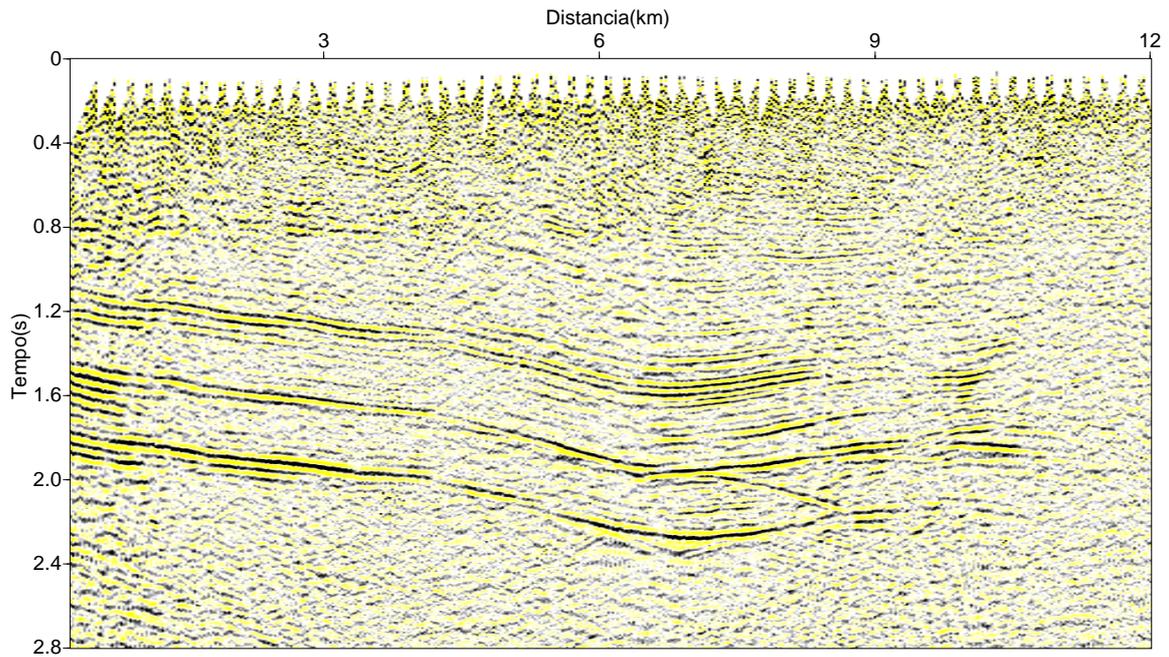


Figura 1.17: Trecho da seção sísmica empilhada gerada após a filtragem $f - k$.

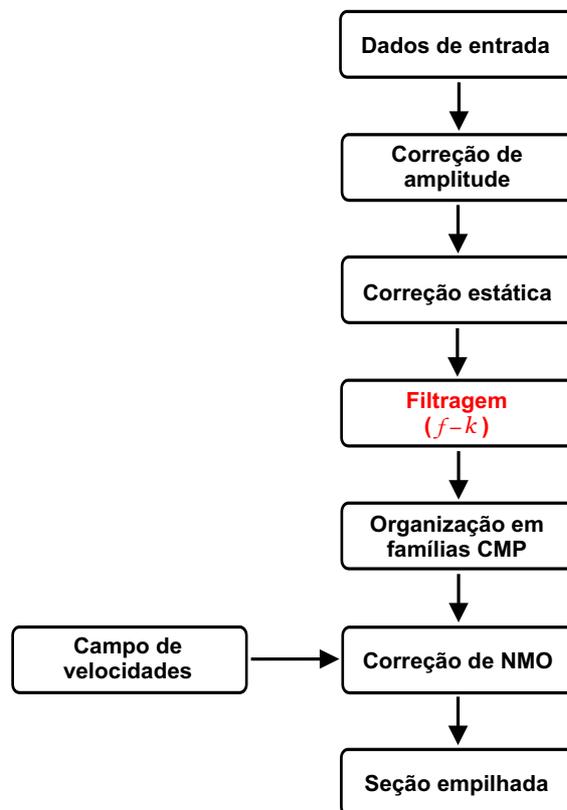


Figura 1.18: Fluxograma com as etapas do processamento envolvidas na obtenção da seção sísmica empilhada ilustrada na Figura 1.17.

CAPÍTULO 2

Deconvolução de Wiener-Levinson

2.1 Deconvolução do pulso sísmico

A deconvolução do pulso é uma etapa do processamento sísmico que busca aumentar a resolução temporal dos dados, por meio da compressão do pulso emitido pela fonte. O método mais usado é a bem conhecida deconvolução de WL, um caso particular da deconvolução preditiva (Peacock e Treitel, 1969), em que a distância de predição é unitária.

Este processo baseia-se no modelo convolucional do traço sísmico, segundo o qual o sismograma registrado x_t resulta da convolução de um pulso p_t , gerado por uma fonte próxima à superfície, com a resposta impulsiva da terra e_t . A isso adicionem-se os ruídos η_t de diversas origens. Matematicamente,

$$x_t = p_t * e_t + \eta_t. \quad (2.1)$$

A resposta impulsiva, também chamada de função refletividade, representa a resposta do meio a uma fonte impulsional, e contém todas as reflexões primárias e múltiplas. O símbolo $*$ representa a operação de convolução e por isso a equação 2.1 é chamada de modelo convolucional. Neste modelo, assumem-se as seguintes premissas (Yilmaz, 2001):

- a terra é constituída por camadas horizontais com velocidade constante;
- a fonte sísmica gera uma onda compressional plana que atinge as camadas em incidência normal;
- a forma da onda não muda com a propagação em subsuperfície, ou seja, ela é estacionária. Não se consideram o decaimento da amplitude e a atenuação das altas frequências;
- o ruído η_t é desprezível;
- o pulso é conhecido.

Para recuperar a refletividade, é preciso convolver o traço x_t com o inverso do pulso p_t , ou seja, deconvolver o pulso, convertendo-o em um impulso. Se h_t for o inverso do pulso ($h_t = p_t^{-1}$),

$$h_t * p_t = \delta_t, \quad (2.2)$$

onde

$$\delta_t = \begin{cases} 0, & \text{se } t \neq 0 \\ 1, & \text{se } t = 0 \end{cases}. \quad (2.3)$$

Como o ruído é considerado desprezível, a convolução de h_t com o traço x_t resulta em

$$h_t * x_t = h_t * p_t * e_t = \delta_t * e_t = e_t. \quad (2.4)$$

Quando o pulso é, de fato, conhecido, a deconvolução é dita determinística, e o filtro inverso pode ser calculado com base no método dos mínimos quadrados (Berkhout, 1977). O sistema de equações a ser resolvido, para $N + 1$ coeficientes, é:

$$\begin{pmatrix} r_0 & r_{-1} & \cdots & r_{-N} \\ r_1 & r_0 & \cdots & \vdots \\ \vdots & \ddots & \ddots & r_{-1} \\ r_N & \cdots & r_1 & r_0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} h_0 \\ h_1 \\ \vdots \\ h_N \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} p_0 \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \end{pmatrix}, \quad (2.5)$$

onde r_k representa o k -ésimo coeficiente da função de autocorrelação (FAC) do pulso, dado por

$$r_k = \sum_t p_t p_{t+k}. \quad (2.6)$$

Note que $r_k = r_{-k}$. O caráter causal imposto a este filtro faz com que ele seja uma aproximação do inverso do pulso de fase mínima que possui esta FAC (Robinson e Treitel, 2000). Quando o pulso não é conhecido, a deconvolução é dita estatística, e para calcular o filtro inverso, a FAC do próprio traço sísmico é utilizada como uma estimativa da FAC do pulso. Assim, surgem duas outras premissas (Robinson e Treitel, 2000), quais sejam:

- a refletividade é aleatória e
- o pulso sísmico é de fase mínima.

A obtenção do sistema de equações 2.5 é explicada, em detalhes, em Robinson e Treitel (2000) e Yilmaz (2001).

2.2 Filtro Wiener de predição unitária

O sistema de equações para filtros inversos de pulsos não conhecidos pode ser obtido a partir do modelo de predição unitária do traço sísmico. Segundo este modelo, também chamado de auto-regressivo (Ulrych e Clayton, 1976), cada amostra no tempo t é uma combinação linear das N amostras em tempos passados. Matematicamente,

$$\tilde{x}_t = \sum_{j=1}^N \tilde{a}_j x_{t-j} = \tilde{a}_1 x_{t-1} + \dots + \tilde{a}_N x_{t-N}. \quad (2.7)$$

Neste caso, o operador é causal e o erro de predição pode ser representado como

$$e_t = x_t - \tilde{a}_1 x_{t-1} - \dots - \tilde{a}_N x_{t-N}. \quad (2.8)$$

É importante distinguir o filtro ou operador preditivo Wiener ($\tilde{a}_1, \dots, \tilde{a}_N$) do operador de erro de predição Wiener ($1, -\tilde{a}_1, \dots, -\tilde{a}_N$). Para facilitar a manipulação das equações, façamos a substituição $c_j = -\tilde{a}_j$, $j = 1, \dots, N$. Se utilizarmos amostras futuras na combinação linear, os operadores serão anticausais. Os operadores de erro de predição causal e anticausal podem ser calculados com o método dos mínimos quadrados, resolvendo o sistema de equações normais

$$\begin{pmatrix} r_0 & r_{-1} & \cdots & r_{-N} \\ r_1 & r_0 & \ddots & \vdots \\ \vdots & \ddots & \ddots & r_{-1} \\ r_N & \cdots & r_1 & r_0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & c_N^- \\ c_1^+ & \vdots \\ \vdots & c_1^- \\ c_N^+ & 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} E_N^+ & 0 \\ 0 & \vdots \\ \vdots & 0 \\ 0 & E_N^- \end{pmatrix}. \quad (2.9)$$

Agora, r_k representa o k -ésimo coeficiente da FAC do traço sísmico x_t , dado por

$$r_k = \sum_t x_t x_{t+k}. \quad (2.10)$$

Em conseqüência da estrutura Toeplitz da matriz de autocorrelação (bandeamentos co-diagonais e simetria com relação às diagonais principal e secundária), os coeficientes de mesmo índice do filtro causal (indicado pelo sobrescrito +) e anticausal (sobrescrito -) são iguais, isto é, $c_j^+ = c_j^-$, $j = 1, \dots, N$.

O sistema de equações 2.9 costuma ser resolvido através da recursão de Levinson (Levinson, 1947) e os filtros assim calculados são denominados filtros de Wiener-Levinson (WL). Normalmente, o sistema é resolvido utilizando-se um fator de regularização, denominado de luz branca, que tem a função de estabilizar o filtro, impedindo que a magnitude dos coeficientes cresça demasiadamente. Este fator é definido como um percentual dos elementos da

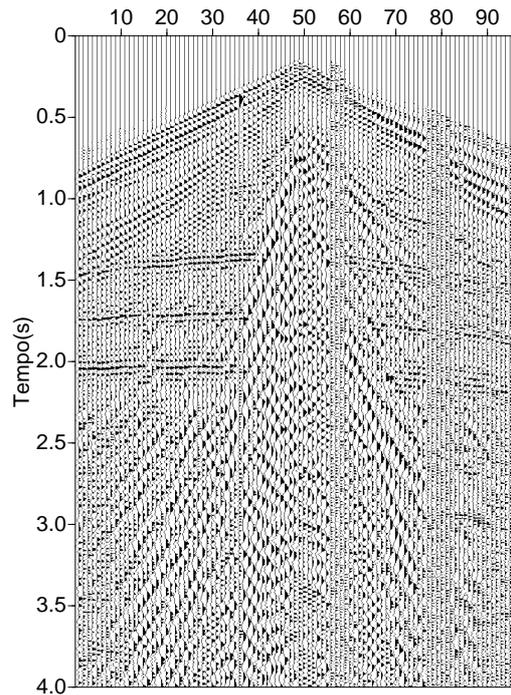


Figura 2.1: Sismograma de família de tiro comum após deconvolução de WL, com filtro de 4 coeficientes e 1% de luz branca.

diagonal principal da matriz de autocorrelação (Yilmaz, 2001).

Cada ponto de dado do traço sísmico, no tempo t , pode ser deconvolvido com o filtro de WL causal ou anticausal e a energia dos traços deconvolvidos (ou a soma total dos erros quadrados minimizados) é a mesma, ou seja, $E_N^+ = E_N^-$.

O filtro WL, como é aplicado normalmente, não é tão efetivo nas baixas frequências do *ground roll*, embora aumente as amplitudes relativas às frequências altas dos dados, um dos objetivos da deconvolução. A Figura 2.1 mostra o sismograma da família de tiro comum (já apresentada no capítulo anterior) após a deconvolução de WL, com o filtro causal de 4 coeficientes e 1% de luz branca. A Figura 2.2 ilustra o espectro de amplitude unidimensional correspondente. Esses valores de luz branca e número de coeficientes foram escolhidos para manter a coerência com os resultados mostrados mais adiante.

2.3 Filtro WL para baixas frequências

Na seção anterior, vimos que o filtro WL corriqueiramente usado para deconvolver o pulso sísmico, e dessa forma, recuperar a refletividade, não é recomendável para atenuar o *ground*

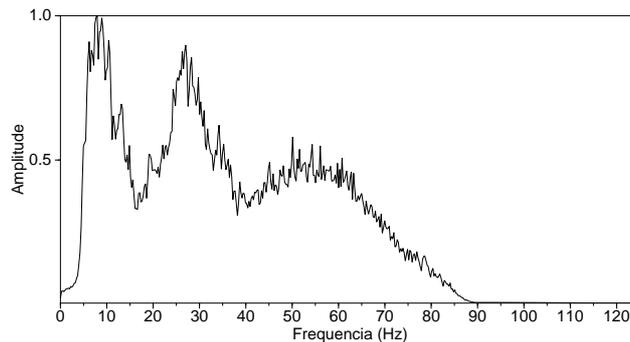


Figura 2.2: Espectro de amplitude após deconvolução de WL. Note o aumento das amplitudes correspondentes às altas frequências.

roll. Para o cálculo dos filtros causal e anticausal, como o pulso, normalmente, não é conhecido, utiliza-se a função de autocorrelação (FAC) do próprio traço sísmico. O filtro WL pressupõe que as duas últimas premissas (aleatoriedade da refletividade e caráter de fase mínima do pulso) sejam obedecidas.

Porém, se no cálculo da FAC, utilizarmos apenas a faixa de frequências que compreende o *ground roll*, o resultado é bastante interessante. O filtro preditivo assim obtido é capaz de prever as baixas frequências relacionadas ao ruído e, conseqüentemente, o erro de predição (ou o traço convolvido com o operador de erro) é uma aproximação do dado filtrado. Esse procedimento é semelhante à aplicação do filtro passa-alta, com uma simples diferença: no caso WL, as frequências que devem ser atenuadas, ao invés de terem suas amplitudes zeradas, diretamente, são previstas e subtraídas. Como existe um erro associado à predição, parte das amplitudes é mantida.

A Figura 2.3 mostra o sismograma após a deconvolução de WL com filtro de 4 coeficientes. Para o cálculo da autocorrelação, foram utilizadas as frequências entre 4 e 12 Hz, faixa em que se encontra grande parte do *ground roll*. O filtro é bastante sensível à luz branca, e o melhor resultado foi obtido com apenas 1%. A Figura 2.4 ilustra o espectro de amplitude unidimensional correspondente a essa família de traços. Nota-se que houve significativa redução das amplitudes nas baixas frequências, já que o ruído foi bastante atenuado, mas elas não foram completamente perdidas (devido ao erro de predição).

Parte da seção empilhada desses dados está apresentada na Figura 2.5. De forma análoga ao resultado da filtragem em frequência (passa-alta), houve redução dos eventos lineares relacionados ao ruído e a reconstituição dos eventos de reflexão. A Figura 2.6 ilustra o fluxograma de processamento para obtenção dessa seção sísmica.

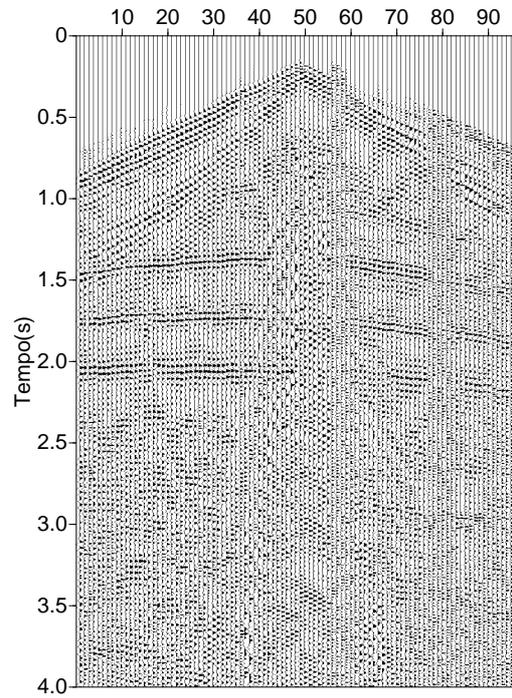


Figura 2.3: Sismograma após a deconvolução de WL utilizando apenas as baixas frequências (4-12 Hz) no cálculo da função de autocorrelação.

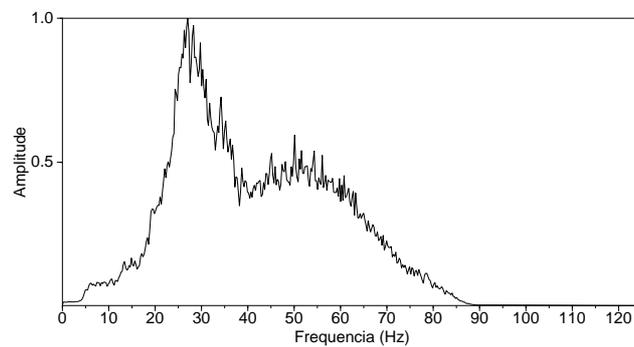


Figura 2.4: Espectro de amplitude após a deconvolução de WL utilizando a FAC das frequências entre 4 e 12 Hz.

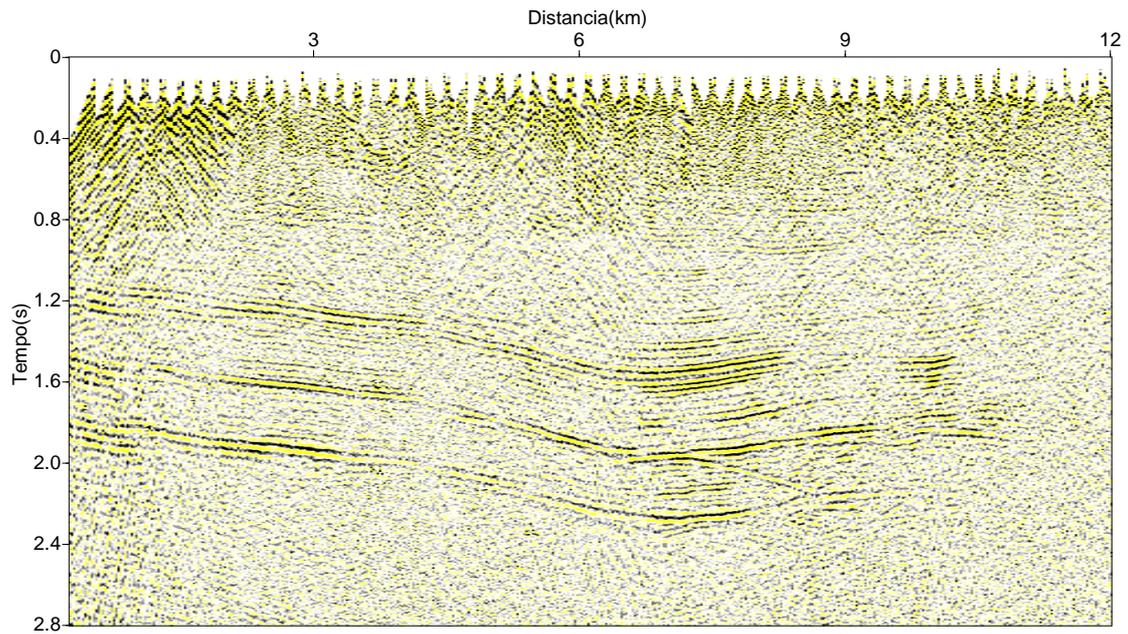


Figura 2.5: Seção empilhada gerada após a deconvolução de WL utilizando a FAC das baixas frequências.

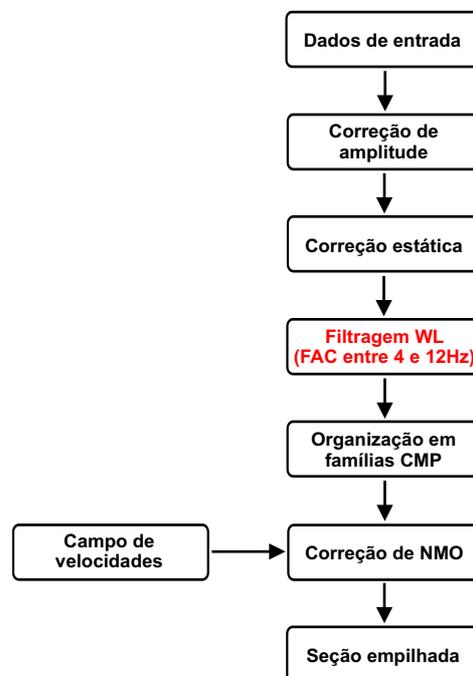


Figura 2.6: Fluxograma para obtenção da seção da Figura 2.5.

CAPÍTULO 3

Filtro não causal tipo Wiener-Levinson

Neste capítulo, apresentamos uma outra possibilidade de modificação do filtro WL que, diferentemente da anterior, utiliza apenas a autocorrelação do traço sísmico, dispensando a análise espectral e a transformada de Fourier.

De forma análoga ao método de atenuação do *ground roll* proposto por Melo et al. (2006), que utiliza filtros anti-simétricos para obter a derivada temporal dos dados, podemos gerar filtros não causais e anti-simétricos construídos com os filtros de WL causal e anticausal, conforme ilustra a Figura 3.1. O filtro anti-simétrico assim obtido tem seus coeficientes calculados com o método dos mínimos quadrados e estes dependem da autocorrelação dos traços sísmicos.

Para entender a atuação do filtro anti-simétrico tipo WL, consideremos um traço x_t . A convolução deste com o filtro f_t^a é representada como

$$e_t^a = x_t * f_t^a, \quad (3.1)$$

onde $f_t^a = (-c_N^-, \dots, -c_1^-, 0, c_1^+, \dots, c_N^+)$ e o sobrescrito “a” indica a anti-simetria do filtro. Portanto,

$$e_t^a = x_t * (c_t^+ - c_t^-) = e_t^+ - e_t^-. \quad (3.2)$$

e_t^+ e e_t^- são os traços deconvolvidos com o filtro causal e anticausal (ou erros de predição causal e anticausal), dados por

$$e_t^+ = x_t - x_t^+ \quad (3.3)$$

e

$$e_t^- = x_t - x_t^-. \quad (3.4)$$

Logo,

$$e_t^a = x_t^- - x_t^+. \quad (3.5)$$

Vemos que a combinação dos filtros causal e anticausal é equivalente a convolvê-los com o traço, separadamente, e subtrair os resultados.

O filtro anti-simétrico, assim como o filtro WL, pode ser calculado e aplicado traço a traço ou pode ser obtido a partir de uma FAC média para cada painel (família de tiro comum

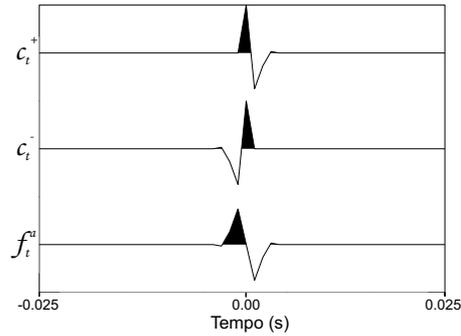


Figura 3.1: Composição do operador não causal anti-simétrico f_t^a como a diferença entre os filtros de WL causal e anticausal, ou seja, $f_t^a = c_t^+ - c_t^-$.

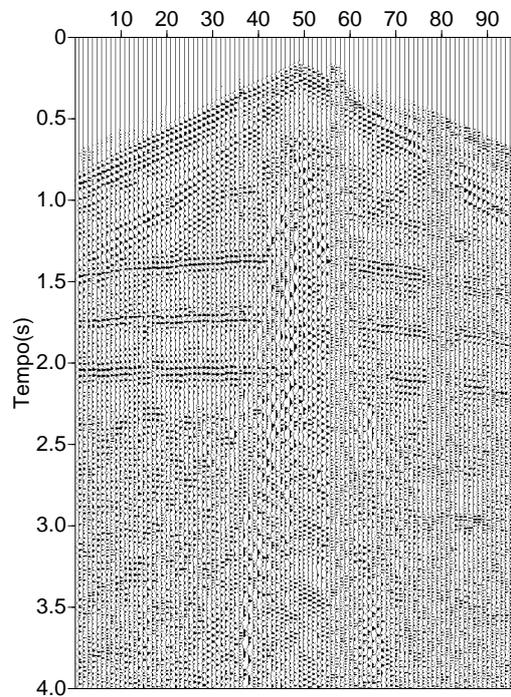


Figura 3.2: Sismograma após a aplicação do filtro anti-simétrico tipo WL.

ou painel de afastamento comum, por exemplo). Neste caso, um único filtro é calculado para todo o painel.

A Figura 3.2 mostra o resultado da aplicação do filtro anti-simétrico tipo WL de 7 coeficientes. Este, por sua vez, foi composto a partir dos filtros WL (causal e anticausal) de 4 coeficientes. Um filtro com número pequeno de coeficientes é premissa básica para a boa atenuação do ruído com este método, pois para o seu cálculo são utilizados apenas os primeiros coeficientes da FAC, que estão mais relacionados à coerência presente no traço sísmico. Esta coerência, por sua vez, relaciona-se ao pulso e ao *ground roll*.

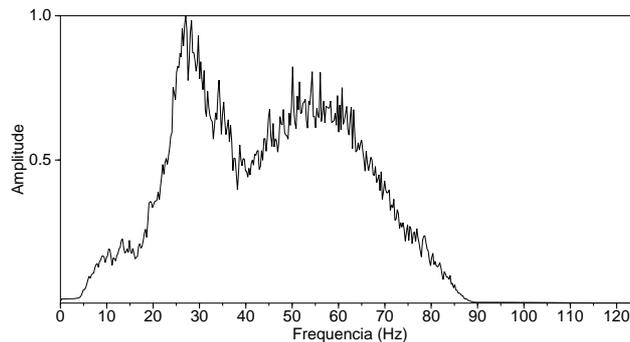


Figura 3.3: Espectro unidimensional da família de tiro comum após aplicação do filtro anti-simétrico tipo WL.

O espectro de amplitude unidimensional correspondente à Figura 3.2 pode ser visto na Figura 3.3. Sua forma é semelhante à do espectro resultante da filtragem WL para baixas frequências, o que é confirmado observando o trecho da seção empilhada, na Figura 3.4. Embora tenha ocorrido redução das amplitudes do ruído, aquelas relativas às frequências baixas não são completamente perdidas. Também houve aumento nas amplitudes correspondentes às altas frequências e, conseqüentemente, aumento da resolução temporal, o que é inerente ao processo de deconvolução, seja ele baseado em filtros causais ou não causais.

O fluxograma de processamento com as etapas envolvidas na obtenção da seção empilhada está ilustrado na Figura 3.5.

Esses resultados comprovam a aplicabilidade do filtro não causal e anti-simétrico tipo WL para atenuar o *ground roll*. No entanto, observando as figuras 3.2 e 3.4, nota-se que ainda há resquícios do ruído. Apresentamos aqui uma alternativa, denominada de “pseudomulticanal”, que, ao se aproveitar tanto da defasagem do ruído (traço a traço) quanto da coerência lateral das reflexões, consegue melhorar ainda mais o resultado da filtragem.

Assim, para o caso de filtros anti-simétricos com 3 canais, ou traços, o traço deconvolvido é dado por

$$e_t^a = \frac{1}{3} \{x_t * f_t^a + y_t * g_t^a + z_t * h_t^a\}, \quad (3.6)$$

onde x_t é o traço (ou canal) a ser filtrado, y_t e z_t são canais vizinhos, e f_t^a , g_t^a e h_t^a são os filtros WL anti-simétricos calculados para cada canal.

Na filtragem WL multicanal propriamente dita, cada traço também é deconvolvido utilizando as informações dos traços adjacentes, mas a relação entre estes é diferente. No cálculo do filtro, além da autocorrelação de cada canal, é levada em consideração a correlação cruzada entre os canais. Neste caso, denominado de pseudomulticanal, apenas a FAC dos traços é utilizada, e os pesos dos canais são iguais. Esse procedimento é uma espécie de

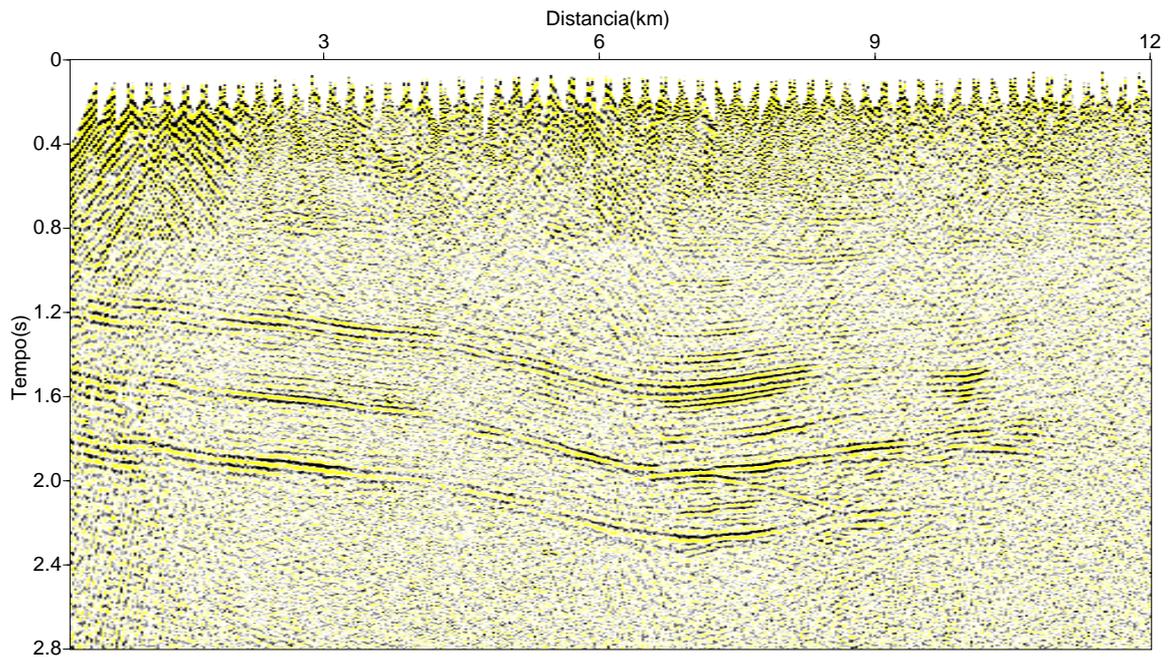


Figura 3.4: Trecho da seção empilhada gerada após a aplicação do filtro anti-simétrico tipo WL.

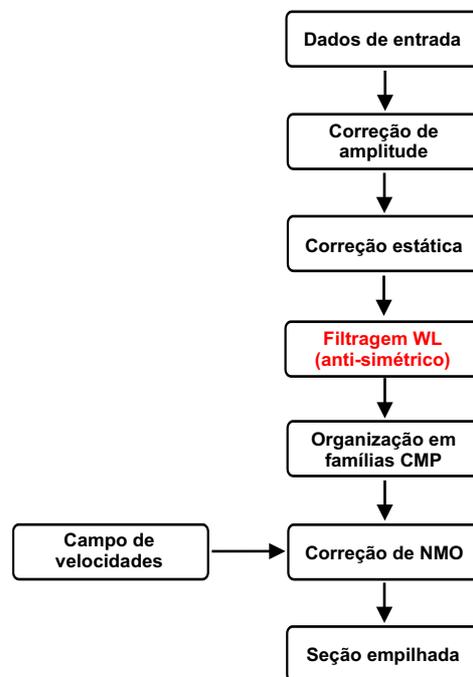


Figura 3.5: Fluxograma para obtenção da seção empilhada ilustrada na Figura 3.4.

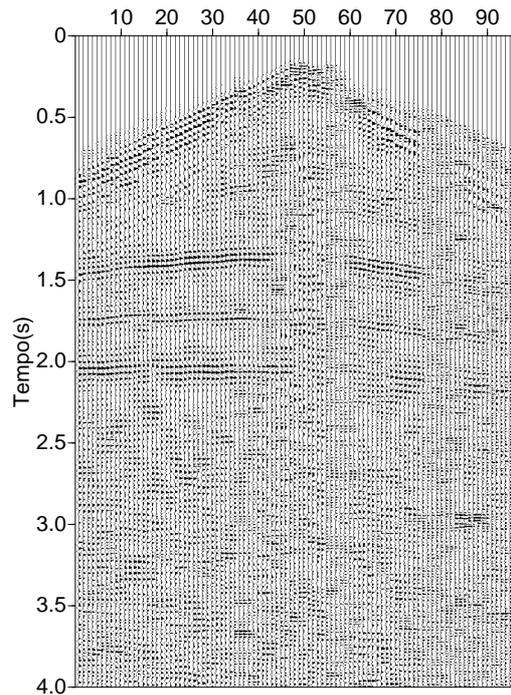


Figura 3.6: Sismograma após a aplicação do filtro anti-simétrico tipo WL pseudo-multicanal.

empilhamento parcial, referido, na literatura, como *mixing*.

O sismograma da família de tiro comum após a aplicação do filtro WL anti-simétrico com esta abordagem pseudomulticanal pode ser visto na Figura 3.6. O filtro anti-simétrico usado contém 7 coeficientes e 1% de luz branca. Como era esperado, a atenuação do ruído foi mais efetiva, mas as baixas frequências ainda foram preservadas. Além disso, as amplitudes das reflexões foram reforçadas. O espectro de amplitude correspondente está ilustrado na Figura 3.7.

O mesmo trecho da seção empilhada, desta vez, gerada após a filtragem WL pseudo-multicanal, está mostrado na Figura 3.8. Vê-se que as reflexões, em geral, ficaram mais bem definidas e contínuas, e os eventos lineares foram suprimidos. Comparada às seções anteriores (inclusive àquela ilustrada na Figura 1.17, resultante da filtragem no domínio $f - k$), esta apresenta qualidade superior. Notar a melhora significativa nas porções mais rasas (tempos menores).

A Figura 3.9 traz o fluxograma com as etapas do processamento para obtenção desta seção empilhada. Note que apenas neste fluxograma a importante etapa da análise de velocidades é mencionada. O campo de velocidades utilizado para gerar todas as outras seções, inclusive esta última, foi obtido após a filtragem tipo WL pseudomulticanal, já que ela demonstrou os melhores resultados.

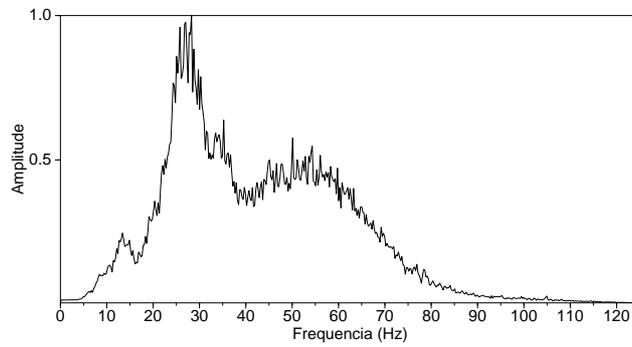


Figura 3.7: Espectro de amplitude unidimensional da família de tiro comum após a aplicação do filtro anti-simétrico tipo WL pseudomulticanal.

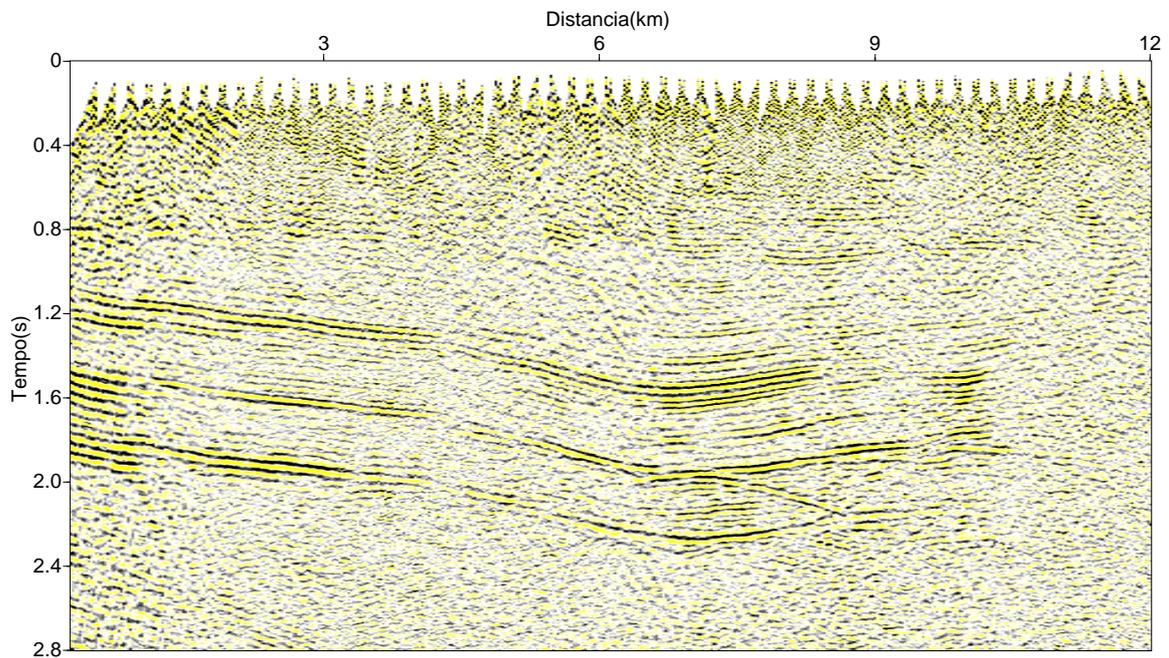


Figura 3.8: Trecho da seção empilhada resultante da aplicação do filtro anti-simétrico tipo WL pseudomulticanal.



Figura 3.9: Fluxograma de processamento empregado para obter a seção sísmica empilhada da Figura 3.8.

CAPÍTULO 4

Conclusões

A presença do *ground roll* em dados sísmicos terrestres impõe sérias dificuldades para etapas importantes do processamento, como a análise de velocidade, e para a interpretação.

Os métodos de filtragem mais usados com o objetivo de atenuá-lo são baseados na distinção entre o sinal e o ruído no domínio espectral. O filtro passa-alta apresenta a desvantagem de atenuar e/ou remover as baixas frequências do sinal juntamente com o ruído, enquanto a filtragem no domínio $f - k$, em geral, leva a bons resultados.

Este trabalho apresentou, de forma breve, os resultados das experiências de filtragem do *ground roll* utilizando estes métodos convencionais, e uma abordagem diferente do filtro de Wiener-Levinson, que se mostrou eficiente na atenuação do ruído em questão.

A utilização do filtro de WL é bastante simples, por se tratar de um algoritmo conhecido e disponível em qualquer pacote de processamento de dados sísmicos. Vimos que, se apenas as baixas frequências participarem do cálculo da função de autocorrelação (FAC), a deconvolução de WL já é capaz de gerar um traço sísmico com o ruído bastante reduzido.

O método aqui proposto baseia-se na composição de um operador não causal e anti-simétrico, a partir dos filtros de WL causal e anticausal, não havendo a necessidade de se estimar a autocorrelação do *ground roll* através da análise espectral. Os espectros de amplitude referentes aos resultados mostram que uma outra vantagem de seu uso é a preservação de parte das amplitudes correspondentes às baixas frequências, ao contrário do que ocorre com o filtro passa-alta, por exemplo.

A aplicação do filtro anti-simétrico em conjunto com o empilhamento parcial (procedimento ao qual nos referimos como “pseudomulticanal”) melhorou a qualidade dos sismogramas e da seção empilhada de forma significativa. A seção apresenta melhor continuidade dos refletores comparada àquela gerada com a filtragem no domínio $f - k$. Isto nos faz supor que o filtro de WL anti-simétrico na forma multicanal propriamente dita leve a resultados igualmente bons.

O método também pode ser implementado utilizando algoritmos tipo Wiener-Levinson (Lima e Porsani, 2003; Porsani e Ursin, 2007), os quais fornecem os traços filtrados diretamente, sem que precisemos calcular a autocorrelação ou os filtros. Neste caso, não seria

necessário compor um operador anti-simétrico. O traço filtrado seria, simplesmente, a diferença entre os erros de predição (ou traços deconvolvidos) causal e anticausal.

Agradecimentos

Gostaria de agradecer a todos aqueles que, de alguma forma, estiveram envolvidos na minha formação: minha família, amigos, ex-professores, professores eternos e colegas.

Agradeço ao meu orientador pela sua indispensável orientação, paciência e solicitude, ao geofísico João José pela grande ajuda e aos demais membros da comissão examinadora, Dr. Wilson Figueiró e Dr. Paulo Espinheira.

Também preciso agradecer aos que me deram o suporte necessário para a realização deste trabalho e para o meu aprendizado, embora, a cada dia que passa, eu tenha a certeza ainda maior de que nada sei (os amantes de Sócrates, desculpem a paródia). Este suporte foi dado pela PETROBRAS, ANP, projetos financiados pela FINEP, FABESB e CNPq, e pelas empresas Paradigm e Landmark.

Finalmente, agradeço aos grandes autores dos grandes livros, porque estes sim, ensinam a escrever, a ver, a pensar e a viver.

Referências Bibliográficas

- Al-Husseini, M.; Glover, J. B. e Barley, B. J. (1981) Dispersion patterns of the ground roll in eastern Saudi Arabia, *Geophysics*, **46**:121–137.
- Berkhout, A. J. (1977) Least squares inverse filtering and wavelet deconvolution, *Geophysics*, **42**:1369–1383.
- Bracewell, R. N. (1965) *The Fourier transform and its applications*, McGraw-Hill.
- Deighan, A. e Watts, D. (1997) Ground-roll suppression using the wavelet transform, *Geophysics*, **62**:1896–1903.
- Dobrin, M. B. (1951) Dispersion in seismic surface waves, *Geophysics*, **16**:63–80.
- Embree, P.; Burg, J. P. e Backus, M. M. (1963) Wide band velocity filtering – the pie-slice process, *Geophysics*, **28**:948–974.
- Fail, J. P. e Grau, G. (1963) Les filters on eventail, *Geophysical Prospecting*, **11**:131–163.
- Karsli, H. e Bayrak, Y. (2004) Using the Wiener-Levinson algorithm to suppress ground-roll, *Journal of Applied Geophysics*, **55**:187–197.
- Klipsch, P. W. (1936) Some aspects of multiple recording in seismic prospecting, *Geophysics*, **1**:365–377.
- Levinson, N. (1947) The Wiener rms (root mean square) criterion in filter design and prediction, *J. Math. Phys.*, **25**:261–278.
- Lima, A. e Porsani, M. J. (2003) Deconvolução preditiva de reflexões múltiplas e peg-legs utilizando filtragem Wiener-Levinson multicanal, *Revista da Sociedade Brasileira de Geofísica*, **19**:303–313.
- Linville, A. F. e Meek, R. A. (1995) A procedure for optimally removing localized coherent noise, *Geophysics*, **60**:191–203.
- Liu, X. (1999) Ground roll suppression using the Karhunen-Loeve transform, *Geophysics*, **64**:564–566.
- McKay, A. E. (1954) Review of pattern shooting, *Geophysics*, **19**:420–437.
- Melo, P. E. M.; Silva, M. G. e Porsani, M. J. (2006) Atenuação do ground roll utilizando filtragem direcional 2d, In: *Resumos Expandidos, 2o. Simpósio Brasileiro de Geofísica*, Natal-RN, SBGf.
- Morse, P. F. e Hildebrandt, G. F. (1989) Ground-roll suppression by the stackarray, *Geophysics*, **54**:290–301.

- Newman, P. e Mahoney, J. T. (1973) Patterns - with a pinch of salt, *Geophysical Prospecting*, **21**:197–219.
- Peacock, K. L. e Treitel, S. (1969) Predictive deconvolution: Theory and practice, *Geophysics*, **34**:155–169.
- Porsani, M. J. e Ursin, B. (2007) Direct multichannel predictive deconvolution, *Geophysics*, **72**:H11–H27.
- Robinson, E. e Treitel, S. (2000) *Geophysical Signal Analysis*, Society of Exploration Geophysicists, Tulsa.
- Saatçılar, R. e Canitez (1988) A method of ground-roll elimination, *Geophysics*, **53**:894–902.
- Smith, M. K. (1945) Noise analysis and multiple seismometer theory, *Geophysics*, **21**:337–360.
- Stein, S. e Wysession, M. (2003) *An introduction to Seismology, earthquakes and Earth structure*, Blackwell Publishing.
- Treitel, S.; Shanks, J. L. e Fraster, C. W. (1967) Some aspects of fan filtering, *Geophysics*, **32**:789–800.
- Ulrych, T. J. e Clayton, R. W. (1976) Time series modeling and maximum entropy, *Phys. of the Earth and Plan. Int.*, **12**:188–200.
- Yilmaz, O. (2001) *Seismic Data Analysis: Processing, Inversion and Interpretation of Seismic Data*, Society of Exploration Geophysicists, Tulsa.