

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

APLICAÇÕES DA FILTRAGEM
SVD NA ANÁLISE DE
VELOCIDADES E NO
EMPILHAMENTO CMP

OSCAR FABIAN MOJICA LADINO

SALVADOR – BAHIA
AGOSTO – 2011

Aplicações da Filtragem SVD na Análise de velocidades e no Empilhamento CMP

por

OSCAR FABIAN MOJICA LADINO

Geólogo(Universidad Industrial de Santander – 2009)

Orientador: Prof. Dr. Milton José Porsani

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

Submetida em satisfação parcial dos requisitos ao grau de

MESTRE EM CIÊNCIAS

EM

GEOFÍSICA

à

Câmara de Ensino de Pós-Graduação e Pesquisa

da

Universidade Federal da Bahia

Comissão Examinadora

Dr. Milton José Porsani - Orientador

Dr. Amin Bassrei

Dr. Sérgio Adriano Moura Oliveira

Aprovada em 26 de agosto de 2011

A presente pesquisa foi desenvolvida no Centro de Pesquisa em Geofísica e Geologia da UFBA, com recursos próprios, da CAPES, da CNPq, CTPETRO, ANP

Q999 Mojica Ladino, Oscar Fabian,

Aplicações da Filtragem SVD na Análise de velocidades e no Empilhamento CMP / Oscar Fabian Mojica Ladino. — Salvador, 2011.

48 f.: il., mapas, fotos.

Orientador: Prof. Dr. Milton José Porsani

Dissertação (Mestrado) - Pós-Graduação em Geofísica. Instituto de Geociências da Universidade Federal da Bahia, 2011.

1. Bahia - Geofísica. I. Título.

911.6(813.8)(043)

*“Ame muitas coisas, porque em
amar está a verdadeira força. Quem
ama muito conquistará muito, e o
que for feito com amor estará bem
feito”.*
(Vincent Van Gogh).

À minha família, especialmente à
minha irmã Milena, dedico.

Resumo

A qualidade da seção empilhada esta diretamente ligada a uma boa estimativa das velocidades usadas na correção NMO, a chamada velocidade NMO (v_{NMO}). Essa estimativa é feita dentro da etapa de análise de velocidade, na qual a definição da velocidade NMO é efetuada manualmente sobre o “*semblance*” de alguns CMP’s previamente selecionados. Geralmente, na análise de velocidade, emprega-se uma medida de coerência do sinal, dentro de uma janela de tempo, para o cálculo da velocidade ao longo da trajetória hiperbólica dos eventos de reflexão. A baixa relação S/R (sinal/ruído) tem um efeito direto na qualidade do espectro de velocidade sendo um dos problemas que afetam a estimativa da velocidade NMO e consequentemente a qualidade final da imagem sísmica gerada através do empilhamento CMP.

No presente trabalho aplicamos o método de filtragem adaptativa baseada no método SVD (*Singular Value Decomposition*) para a melhoria da análise de velocidades e do empilhamento CMP. Antes da aplicação do método é feita a correção normal *moveout* (NMO) dos sismogramas, tendo como finalidade deixar as reflexões de interesse aproximadamente horizontais. A filtragem SVD trabalha na forma multicanal e pode ser aplicada seguindo um procedimento padrão que consiste na seleção de um conjunto de traços vizinhos tomados ao redor do traço alvo da filtragem. Desta forma traços de diferentes tiros podem ser utilizados na filtragem SVD. A coleta de traços de mais que um tiro, no mapa de cobertura, pode ser representada por um operador espacial. No presente trabalho utilizamos um operador de cinco pontos que denominamos operador em cruz que opera sobre todos os traços do mapa de cobertura do levantamento sísmico. A cada posição do operador, o traço filtrado (centro do operador) é obtido tomando-se a apenas a primeira autoimagem ou somando-se as primeiras autoimagens do painel de 5 traços selecionados. Desta forma reforçamos a coerência correspondente às reflexões primárias, em detrimento do sinal restante (*ground-roll*, múltiplas e demais eventos não correlacionados), localizado nas demais autoimagens. A filtragem SVD pode ser vista como um método de filtragem adaptativa multicanal onde cada traço filtrado guarda certo grau de coerência com os traços imediatamente vizinhos.

No trabalho foram utilizados basicamente o pacote SU-CWP e o software de processa-

mento FOCUS, e envolveu as etapas básicas do pré-processamento e o do processamento sísmico. Ilustramos o método utilizando um dado sísmico terrestre da Bacia do Tacutu. Os resultados obtidos mostram espectros de velocidades com melhor definição, como também seções empilhadas exibindo melhor continuidade das reflexões e menor ruído *ground-roll*, comparado com os resultados do processamento bruto (sem a filtragem SVD).

Abstract

The quality of the stacked section is directly connected to a good estimate of the velocities used in the NMO correction. The called NMO velocity (v_{NMO}). This estimation is performed within of the velocity analysis stage, in which the definition of the NMO velocity is done manually on some semblance of CMP's previously selected. Generally, the velocity analysis, employs a measure of coherence of the signal within a time gate for calculating the velocity along the hyperbolic paths of reflection events. The poor SNR (sinal-to-noise ratio) has a direct effect on the quality of the velocity spectrum seing one of the problems that affect the NMO velocity estimation and hence the final quality of seismic image generated for CMP stacking.

In this paper we apply an adaptative filtering method based on SVD (Singular Value Decomposition) to improve velocity analysis and CMP stacking. Before the SVD computation, the normal move-out (NMO) correction is applied to the seismograms, with the purpose of flattening the reflections. The SVD filtering approach works in the multichannel form and may be applied following a standard procedure which consists in the selection of neighbouring set traces taken around the target trace filtering. Thus traces of different shots can be used in the SVD filtering. The collection of traces of different shots in the coverage map, can be represented by a spatial operator. In the present work we use a five-point operator designed cross operator that operates on all traces of the coverage map of the seismic survey. In each position of the operator, the filtered trace (center of operator) is obtained taking the first or adding the first(s) eigenimage(s) of the five traces panel selected. Thus we reinforce the coherence corresponding to primary reflections, instead of remaining signal (ground-roll, multiples and many other events unrelated), located in the other eigenimages. The SVD filtering approach may be seen as multichannel filtering method where each filtered seismic trace retains the coherence of the neighbouring seismic traces.

In the work we basically use the package SU-CWP and the processing software FOCUS, it involved the basic steps in a pre-processing and seismic processing flowchart. We illustrated the method using a land seismic data from Tacutu Basin. The results obatined show velocity spectrums with better definition, as also stacked sections showing better continuity

of reflections and less noise ground-roll, compared with the results of raw processing (without SVD filtering)

Índice

Resumo	4
Abstract	6
Índice	8
Índice de Tabelas	10
Índice de Figuras	11
Introdução	15
1 Fundamentos Teóricos	17
1.1 Matrizes de Covariância	17
1.2 Autovalores e Autovetores	18
1.3 Decomposição em Valores Singulares SVD	19
1.4 Filtragem SVD	20
2 Método de Empilhamento CMP	24
2.1 Correção Normal Moveout (NMO)	24
2.2 Análise de velocidade	27
2.2.1 Espectro de velocidade	28
2.2.2 Coerência	28
2.2.3 Medição da Coerência	29
2.3 Empilhamento	31
3 Aplicação do Método	33
3.1 Operadores de filtragem SVD	33
3.1.1 Aplicação da Filtragem SVD em diferentes famílias de traço comum	35
3.1.2 Aplicação da Filtragem SVD em duas etapas	48
3.1.3 Aplicação da Filtragem SVD de forma iterativa	51
3.1.4 Aplicação da Filtragem SVD usando o operador cruz	54

4	Conclusões	68
	Agradecimentos	70
	Referências Bibliográficas	71

Índice de Tabelas

2.1	Vários fatores que afetam a estimativa da velocidade	31
-----	--	----

Índice de Figuras

1.1	Representação da matriz \mathbf{D} em autoimagens através da decomposição em valores singulares SVD. $\hat{\mathbf{D}}_k = \sigma_k \mathbf{u}_k \mathbf{v}_k^T$	23
2.1	Geometria para uma onda refletida numa única camada horizontal. O ponto M corresponde ao ponto médio entre a fonte S e o receptor R	25
2.2	Traços de uma família CMP:(a) antes da correção NMO, (b) após a correção NMO. Pares fonte-receptor são simétricos em relação ao ponto médio comum e têm diferentes <i>offsets</i> (x_i) e tempos <i>normal moveout</i> (Δt).	26
2.3	Detalhe de uma família CMP e o seu espectro de velocidade. O <i>display colorido</i> do espectro de velocidade é usado na escolha iterativa das velocidades (<i>picks</i>). A quantidade apresentada no espectro desta figura é o <i>semblance</i>	29
2.4	Amplitude de empilhamento ao longo da trajetória hiperbólica. As amplitudes f_i, t_i são somadas para obter a <i>stacked amplitude</i> S . Tomado de Yilmaz (2003)	30
2.5	Empilhamento ponto médio comum CMP. Cada ponto numerado de 1 a 24 representa um traço num registro e os asteriscos numerados de 1 a 6 são tiros sucessivos, Após da correção normal move-out ser aplicada os traços numa família CMP são somados para obter um traço empilhado. Adaptado de Parasnis (1997)	32
3.1	Mapa de cobertura e desenho dos operadores adotados para a seleção de traços. Operador janela espacial de três traços e operador espacial de cinco pontos tendo como referência o traço central (alvo da filtragem SVD) representado pelo círculo preenchido, em a) e b) respectivamente	34
3.2	Fluxograma que foi utilizado no trabalho	35
3.3	Comparação da filtragem SVD janela de três traços em varias famílias de traço comum corregidas de NMO. Dado de entrada a) dado após da aplicação da filtragem SVD no domínio do tiro, domínio cdp e domínio do <i>offset</i> em b) c) e d) respectivamente.	37

3.4	Comparação da filtragem SVD janela de três traços em varias famílias de traço comum corregidas de NMO inverso. Dado de entrada a) dado após da aplicação da filtragem SVD no domínio do tiro, domínio cdp e domínio do <i>offset</i> em b) c) e d) respectivamente.	38
3.5	Espectro de amplitude médio dos sismogramas representados na figura 3.4. .	39
3.6	Comparação da filtragem SVD numa família de tiro comum corregido NMO. Dado original em a) dado filtrado SVD com a primeira, segunda e terceira autoimagem em b) c) e d) respectivamente.	41
3.7	Resultado da filtragem SVD após a aplicação da correção NMO inverso nos sismogramas da figura 3.6. Dado original em a) dado filtrado SVD com a primeira autoimagem (sinal) em b) e segunda e terceira autoimagem da decomposição SVD em c).	42
3.8	Espectro de amplitude médio dos sismogramas representados na figura 3.7. .	43
3.9	Painel de <i>offset</i> comum original em a) e depois da aplicação da filtragem SVD usando o operador janela de três traços em b).	44
3.10	Análise de velocidades de um “ <i>supergather</i> ” formado por 50 CMPs, dado original em a) dado após a filtragem SVD usando o operador janela de três traços em c) e análise de velocidades em b) e d).	45
3.11	Seção sísmica original da bacia de Tacutu, linha 204-RL-242.	46
3.12	Seção sísmica da bacia de Tacutu obtida com os tiros filtrados pelo método SVD (janela de três traços).	47
3.13	Comparação da filtragem SVD usando o operador janela de três traços aplicada em duas etapas em duas famílias de traço comum diferentes corregidas de NMO. Dado original em a) dado após a aplicação da filtragem SVD primeiro em família de tiro comum e logo em família de <i>offset</i> comum em b) dado após a aplicação da filtragem SVD primeiro em família de <i>offset</i> comum e logo em família de tiro comum em c) .	49
3.14	Comparação da filtragem SVD usando o operador janela de três traços aplicada em duas etapas em duas famílias de traço comum diferentes corregidas de NMO inverso. Dado original em a) dado após a aplicação da filtragem SVD primeiro em família de tiro comum e logo em família de <i>offset</i> comum em b) dado após a aplicação da filtragem SVD primeiro em família de <i>offset</i> comum e logo em família de tiro comum em c)	49
3.15	Espectro de amplitude médio dos sismogramas representados na figura 3.14 .	50
3.16	Resultados obtidos após da aplicação iterativa da filtragem SVD no domínio do tiro corregido de NMO. Dado original em a) dado após a primeira aplicação da filtragem SVD em b) e dado após uma segunda aplicação em c).	52
3.17	Resultados obtidos após da aplicação iterativa da filtragem SVD no domínio do tiro corregido de NMO inverso. Dado original em a) dado após a primeira aplicação da filtragem SVD em b) e dado após uma segunda aplicação em c).	52
3.18	Espectro de amplitude médio dos sismogramas representados na figura 3.17 .	53

3.19	Resultado da Filtragem SVD usando o operador cruz em uma família de tiro comum corregido NMO. Dado original em a) dado filtrado SVD com a primeira autoimagem em b), segunda autoimagem em c), e terceira, quarta e quinta autoimagem em d) respectivamente.	55
3.20	Resultado da Filtragem SVD usando o operador cruz após a aplicação da correção NMO inverso nos sismogramas da figura 3.19 a) Dado original b) dado filtrado SVD com a primeira autoimagem (sinal) e c) demais autoimagens da decomposição SVD.	56
3.21	Espectro de amplitude médio dos sismogramas representados na figura 3.20.	57
3.22	Painel de <i>offset</i> comum original em a) e depois da aplicação da filtragem SVD usando o operador em cruz em b).	58
3.23	Análise de velocidades de um “ <i>supergather</i> ” formado por 50 CMPs, dado original em a) dado após a filtragem SVD usando o operador cruz em c) e análise de velocidades em b) e d)	59
3.24	Seção sísmica da bacia do Tacutu após a aplicação da filtragem SVD (operador em cruz), linha 204-RL-242	61
3.25	Comparação da filtragem SVD usando o operador janela de três traços aplicada em famílias de traço comum corregidas de NMO. Dado original em a) dado após a aplicação da filtragem SVD em família de tiro comum em b) dado após a aplicação da filtragem SVD em duas etapas em duas famílias de traço comum diferentes; primeiro em família de tiro comum e logo em família de <i>offset</i> comum em c).	62
3.26	Comparação da filtragem SVD usando o operador janela de três traços aplicada em famílias de traço comum corregidas de NMO inverso. Dado original em a) dado após a aplicação da filtragem SVD em família de tiro comum em b) dado após a aplicação da filtragem SVD em duas etapas em duas famílias de traço comum diferentes; primeiro em família de tiro comum e logo em família de <i>offset</i> comum em c).	62
3.27	Resultados obtidos após a aplicação da filtragem SVD em famílias de traço comum corregidas de NMO usando os dois operadores. Dado após a aplicação da filtragem SVD em duas etapas em duas famílias de traço comum diferentes; primeiro em família de tiro comum e logo em família de <i>offset</i> comum usando o operador janela de três traços a) dado após a aplicação da filtragem SVD usando o operador em cruz que utiliza traços de dois domínios: ponto médio comum e tiro comum em b).	63

3.28	Resultados obtidos após a aplicação da filtragem SVD em famílias de traço comum corrigidas de NMO inverso usando os dois operadores. Dado após a aplicação da filtragem SVD em duas etapas em duas famílias de traço comum diferentes; primeiro em família de tiro comum e logo em família de <i>offset</i> comum usando o operador janela de três traços a) dado após a aplicação da filtragem SVD usando o operador em cruz que utiliza traços de dois domínios: ponto médio comum e tiro comum b).	64
3.29	Espectro de amplitude médio dos sismogramas representados na figura 3.28 .	65
3.30	Seções empilhadas. Dado original (a), dado filtrado SVD usando o operador janela de três traços em duas etapas em duas famílias de traço comum diferentes; primeiro em família de tiro comum e logo em família de <i>offset</i> comum em (b) e dado filtrado SVD usando o operador cruz (c).	66
3.31	Detalhe da seção original em (a), e após das filtragem SVD usando o operador janela de três traços em duas etapas em duas famílias de traço comum diferentes; primeiro em família de tiro comum e logo em família de <i>offset</i> comum em (b) e o operador cruz em (c).	67

Introdução

O método de filtragem SVD tem importantes aplicações no processamento de dados sísmicos. A Filtragem SVD pode ser utilizada para reforçar a coerência espacial dos dados sísmicos, tornando mais evidente as reflexões, e ao mesmo tempo atenuar o ruído não coerente. Esta técnica de filtragem SVD tem sido implementada e aplicada em vários tipos de problemas do processamento de dados sísmicos (Freire, 1986, Freire e Ulrych, 1988, Bekara e Baan, 2007, Porsani et al., 2009, 2010a, 2010b)

Kendall et al. (2005) propôs o uso do método SVD para obtenção de filtros de polarização para atenuação do *ground-roll* em dados multicomponentes. Tyapkin et al. (2003) propôs o uso do método de alinhamento dos eventos para tornar o ruído horizontal em uma ou mais seções dos sismogramas de ponto de tiro comum. Em cada seção o ruído coerente (*ground-roll*) é preservado nas primeiras autoimagens. As demais autoimagens representam o sinal e esta parte é transformada de volta para o domínio tempo-espço. Chiu e Howell (2008) propôs o método que usa SVD para gerar autoimagens que representam o ruído coerente em uma dada janela no domínio tempo-espço. Os dados dentro de janelas são transformados no sinal analítico e procede-se a obtenção da decomposição SVD complexa, extraíndo-se autoimagens a parte coerente do ruído. Karsli e Bayrak (2008) propôs o uso de filtros Wiener para estimativa do *ground-roll* através de um ruído de referência linear (ou não linear), correspondente ao *sweep* gerado na banda do *ground-roll*

A filtragem SVD na forma utilizada por Porsani et al. (2009, 2010a, 2010b) opera com a decomposição SVD de um subconjunto de traços extraído de uma linha sísmica 2D ou volume sísmico 3D. Apenas um traço do interior da janela móvel (2D ou 3D) associados às primeiras autoimagens, é escolhido para representar o traço filtrado. Este procedimento preserva a amplitude relativa e realça a continuidade e a coerência dos eventos de reflexão e atenua o ruído que esta associado às demais autoimagens que são descartadas. A filtragem SVD pode ser vista como um método de filtragem multicanal onde cada traço filtrado guarda certo grau de coerência com os traços imediatamente vizinhos.

No presente trabalho estendemos a abordagem utilizada por Porsani et al. (2010b),

onde a filtragem SVD têm sido aplicada em traços adjacentes pertencentes à mesma família de traço comum. Aqui implementamos um operador que trabalha na área circunvizinha do traço alvo, explorando assim a redundância das informações coletadas agora nos domínios de tiro comum e ponto médio comum. Também exploramos a aplicação da filtragem SVD de diversas formas objetivando revelar a melhor forma de aplicação, capaz de aumentar a qualidade da seção empilhada final assim como dos espectros de velocidade. Ilustramos o método de filtragem SVD sobre uma linha sísmica terrestre da Bacia de Tacutu

Estruturamos o texto da seguinte forma: No capítulo 1, apresentamos os fundamentos teóricos e conceitos da decomposição em valores singulares SVD, incluindo a descrição do método de filtragem SVD. No capítulo 2, apresentamos os princípios do método de empilhamento CMP e a análise de velocidades. No capítulo 3 apresentamos a metodologia desenvolvida, e os resultados obtidos na aplicação da filtragem SVD sobre dados sísmicos reais da Bacia de Tacutu. O capítulo 4 contém as conclusões deste trabalho.

1

Fundamentos Teóricos

Neste capítulo apresentamos os fundamentos básicos da decomposição de uma matriz em valores singulares, que servirão como introdução para descrever o método de Filtragem SVD (*singular value decomposition*).

Neste trabalho a aplicação da decomposição em valores singulares SVD em dados sísmicos, tais como, seções sísmicas, sismogramas CDP, registros VSP, etc. é feita em uma matriz \mathbf{D} organizada na forma $n \times m$. O elemento \mathbf{D}_{ij} dessa matriz representa a amplitude captada pelo receptor j em um determinado instante de tempo i , devido a uma excitação imposta ao sistema Terra (Freire, 1986).

A notação utilizada para representar a matriz D é a seguinte

$$\mathbf{D} = d_{i,j} \quad \begin{array}{l} i = 1, 2, \dots, n \\ j = 1, 2, \dots, m \end{array}$$

onde $d_{i,j}$ é o elemento de \mathbf{D} na posição (i, j) , m é o numero de traços de \mathbf{D} e n é o número de amostras por traço.

1.1 Matrizes de Covariância

As matrizes simétricas reais semi-positivas definidas do tipo $\mathbf{D}^T \mathbf{D}$ e $\mathbf{D} \mathbf{D}^T$ são denominadas de matrizes de covariância. Estas matrizes tem uma importância fundamental no teorema da decomposição em valores singulares ou teorema de Lanczos, pois os vetores de base da decomposição são autovetores associados a estas matrizes.

A matriz $\mathbf{D}^T \mathbf{D}$ da forma $(m \times m)$ é obtida pelo produto interno dos traços sísmicos. Ou seja o elemento (i, j) de $\mathbf{D} \mathbf{D}^T$ é a projeção do traço i de \mathbf{D} sobre o traço j

$$\mathbf{D}^T \mathbf{D} = \begin{bmatrix} \sum_i d_{i,1}^2 & \sum_i d_{i,1}d_{i,2} & \dots & \sum_i d_{i,1}d_{i,m} \\ \sum_i d_{i,2}d_{i,1} & \sum_i d_{i,2}^2 & \dots & \sum_i d_{i,2}d_{i,m} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \sum_i d_{i,m}d_{i,1} & \sum_i d_{i,m}d_{i,2} & \dots & \sum_i d_{i,m}^2 \end{bmatrix} \quad (1.1)$$

Em particular cada elemento da diagonal principal de $\mathbf{D}^T \mathbf{D}$ é a energia do traço correspondente em \mathbf{D} ou a auto correlação, e os de fora da diagonal são correlações cruzadas entre os traços. Assim, a soma dos elementos da diagonal de $\mathbf{D}^T \mathbf{D}$ representa o conteúdo total de energia em \mathbf{D} e os elementos de fora da diagonal representam o grau de correlação entre os traços⁽¹⁾.

A outra matriz de covariância $\mathbf{D} \mathbf{D}^T$, da forma $(n \times n)$, é formada pelo produto interno entre as linhas de \mathbf{D} que contém as amostras de \mathbf{D} em um determinado instante de tempo i , ou seja

$$\mathbf{D} \mathbf{D}^T = \begin{bmatrix} \sum_j d_{1,j}^2 & \sum_j d_{1,j}d_{2,j} & \dots & \sum_j d_{1,j}d_{n,j} \\ \sum_j d_{2,j}d_{1,j} & \sum_j d_{2,j}^2 & \dots & \sum_j d_{2,j}d_{n,j} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \sum_j d_{n,j}d_{1,j} & \sum_j d_{n,j}d_{2,j} & \dots & \sum_j d_{n,j}^2 \end{bmatrix} \quad (1.2)$$

onde, os elementos de $\mathbf{D} \mathbf{D}^T$ indicam a intensidade e em que posição a correlação existe. A informação presente em cada instante de tempo é medida na diagonal principal enquanto os elementos de fora da diagonal fornecem uma medida do grau de correlação entre dois instantes de tempo⁽²⁾.

1.2 Autovalores e Autovetores

De acordo com Lanczos (1961), toda matriz de covariância é caracterizada por seus autovalores e autovetores. Seja \mathbf{A} uma matriz de covariância $\mathbf{D} \mathbf{D}^T$ de ordem n , um vetor \mathbf{v} não nulo, e um escalar λ são ditos autovetor e autovalor de \mathbf{A} se

¹(Freire, 1986)

²(Freire, 1986)

$$\mathbf{A}\mathbf{v} = \lambda\mathbf{v} \quad (1.3)$$

usando I a matriz identidade, a equação acima pode ser escrita na forma

$$\mathbf{A}\mathbf{v} = (\lambda I)\mathbf{v} \text{ ou } (\mathbf{A} - \lambda I)\mathbf{v} = 0 \quad (1.4)$$

esta expressão gera um sistema de equações cujas incógnitas são os coeficientes do vetor \mathbf{v} . Para que haja uma solução não trivial, $v \neq 0$ o determinante da matriz dos coeficientes deve ser igual a zero, ou seja:

$$g(\lambda) = \det(\mathbf{A} - \lambda I) = 0 \quad (1.5)$$

A função $g(\lambda)$ é um polinômio de grau n conhecido como polinômio característico e suas raízes são os autovalores de \mathbf{A} .

Após a determinação dos autovalores λ_j , $j = 1, 2, \dots, n$, retorna-se a (1.3) e calcula-se o autovetor associado a cada autovalor.

As principais propriedades dos autovalores e autovetores de matrizes simétricas e de covariância são

- i) Se \mathbf{A} é uma matriz simétrica, seus autovalores são reais;
- ii) Se \mathbf{A} é uma matriz simétrica e seus autovalores são distintos, então os autovetores associados são ortogonais entre si e formam uma base do espaço vetorial;
- iii) Se \mathbf{A} é uma matriz de covariância seus autovalores são sempre positivos;
- iv) Se λ_i , com $i = 1, 2, \dots, p$ são os autovalores de \mathbf{A} então o traço de \mathbf{A} , $T_r(\mathbf{A}) = \sum_{i=1}^p \lambda_i$ e o determinante de \mathbf{A} , $\det(\mathbf{A}) = \prod_{i=1}^p \lambda_i$;
- v) Seja \mathbf{D} uma matriz retangular de ordem $n \times m$, cujo posto seja $p < \min(m, n)$. Então os p autovalores não nulos de $\mathbf{D}\mathbf{D}^T$ são iguais aos p autovalores não nulos de $\mathbf{D}^T\mathbf{D}$. Os demais autovalores são iguais a zero.

1.3 Decomposição em Valores Singulares SVD

A decomposição SVD é uma importante ferramenta da Álgebra Linear que nos permite fatorar grandes matrizes subdividindo-a em um produto de outras três matrizes. Assim para

toda matriz \mathbf{X} ($n \times m$) com “rank” $r \leq \min(m, n)$ é sempre possível encontrar uma matriz ortogonal \mathbf{U} do tipo $n \times n$ uma matriz ortogonal \mathbf{V} do tipo $m \times m$ tal que

$$\mathbf{X} = \mathbf{U}\mathbf{\Sigma}\mathbf{V}^T \quad (1.6)$$

onde $\mathbf{\Sigma}$ é uma matriz diagonal, retangular, do mesmo tipo que \mathbf{X} , cujos elementos da diagonal principal são números não negativos, \mathbf{U} é uma matriz cujas colunas são os autovetores de $\mathbf{X}\mathbf{X}^T$ enquanto que as colunas de \mathbf{V} são autovetores de $\mathbf{X}^T\mathbf{X}$, ordenados de acordo com a magnitude dos autovalores correspondentes. Os elementos diagonais de $\mathbf{\Sigma}$ são os valores singulares de \mathbf{X} , que são iguais a raiz quadrada positiva dos autovalores associados.

Vemos na expressão (1.6) a forma mais usual de representação da decomposição em valores singulares (SVD) de \mathbf{X} porém na utilização desta como um filtro bidimensional de coerência (Freire, 1986), é mais útil que \mathbf{X} seja definida de uma forma equivalente como uma soma de matrizes de posto unitário, ponderadas pelos valores singulares. Ou seja

$$\mathbf{X} = \sum_{i=1}^r \sigma_i \mathbf{u}_i \mathbf{v}_i^T \quad (1.7)$$

onde \mathbf{u}_i é o i -ésimo autovetor de $\mathbf{X}\mathbf{X}^T$, \mathbf{v}_i é o i -ésimo autovetor de $\mathbf{X}^T\mathbf{X}$ e σ_i é o i -ésimo valor singular de \mathbf{X}

1.4 Filtragem SVD

Considerando o subconjunto de M traços sísmicos selecionados de uma seção sísmica 2D ou de um volume sísmico 3D dado por, $d(t, x_n)$, $t = 1, \dots, N_t$ e $n = 1, \dots, M$. A matriz de dados $\mathbf{D} = [\mathbf{d}_1 \dots \mathbf{d}_M] = \{d(t, x_1), \dots, d(t, x_M)\}$, $t = 1, \dots, N_t$ pode ser decomposta através do método de decomposição em valores singulares, “*singular value decomposition*” (SVD) conforme representado a seguir (Golub e Van Loan, 1996).

$$\mathbf{D} = \mathbf{U}\mathbf{\Sigma}\mathbf{V}^T \quad (1.8)$$

onde \mathbf{U} e \mathbf{V} são matrizes unitárias e ortogonais tal que $\mathbf{U}^{-1} = \mathbf{U}^T$ e $\mathbf{V}^{-1} = \mathbf{V}^T$.

$\mathbf{\Sigma} = \text{diag}\{\sigma_1, \dots, \sigma_M\}$ matriz dos valores singulares ($N_t \times M$), $\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \dots \geq \sigma_M \geq 0$

$\mathbf{U} = [\mathbf{u}_1 \dots \mathbf{u}_M]$ matriz dos autovetores ($N_t \times N_t$) associada à dimensão do tempo

$\mathbf{V} = [\mathbf{v}_1 \dots \mathbf{v}_M]$ matriz dos autovetores ($M \times M$) associada à dimensão do espaço.

Deixando $\tilde{\mathbf{U}} = \mathbf{U}\mathbf{\Sigma} = [\sigma_1 \mathbf{u}_1 \dots \sigma_M \mathbf{u}_M]$ podemos reescrever a equação (1.8) como segue,

$$\begin{aligned}
[\mathbf{d}_1 \dots \mathbf{d}_j \dots \mathbf{d}_M] &= \tilde{\mathbf{U}} \mathbf{V}^T \\
&= [\sigma_1 \mathbf{u}_1 \dots \sigma_M \mathbf{u}_M] \begin{bmatrix} \mathbf{v}_1^T \\ \vdots \\ \mathbf{v}_M^T \end{bmatrix} \\
&= [\sigma_1 \mathbf{u}_1 \dots \sigma_j \mathbf{u}_j \dots \sigma_M \mathbf{u}_M] \begin{bmatrix} v_{1,1} & \dots & v_{1,j} & \dots & v_{1,M} \\ \vdots & \dots & \vdots & \dots & \vdots \\ v_{M,1} & \dots & v_{M,j} & \dots & v_{M,M} \end{bmatrix}
\end{aligned} \tag{1.9}$$

De onde obtemos a equação para decomposição SVD de um traço do subconjunto de M traços da seção original.

$$\begin{aligned}
\mathbf{d}_j &= [\sigma_1 \mathbf{u}_1 \dots \sigma_M \mathbf{u}_M] \begin{bmatrix} v_{1,j} \\ \vdots \\ v_{M,j} \end{bmatrix} \\
&= \hat{\mathbf{d}}_1^j + \dots + \hat{\mathbf{d}}_k^j + \dots + \hat{\mathbf{d}}_M^j = \sum_{k=1}^M \sigma_k \mathbf{u}_k v_{k,j}
\end{aligned} \tag{1.10}$$

Nota-se que o traço sísmico $d(t, x_j)$, (colunas j da matriz \mathbf{D}) pode ser obtido através da combinação linear de autovetores associados à dimensão temporal. Os pesos utilizados na combinação linear são os coeficientes dos autovetores associados à dimensão espacial escalonado pelos valores singulares correspondentes.

Outra maneira de escrever a equação (1.8) está apresentada a seguir,

$$\begin{aligned}
\mathbf{D} &= [\mathbf{u}_1 \dots \mathbf{u}_M] \begin{bmatrix} \sigma_1 \mathbf{v}_1^T \\ \vdots \\ \sigma_M \mathbf{v}_M^T \end{bmatrix} \\
&= \sigma_1 \mathbf{u}_1 \mathbf{v}_1^T + \dots + \sigma_M \mathbf{u}_M \mathbf{v}_M^T \\
&= \hat{\mathbf{D}}_1 + \hat{\mathbf{D}}_k + \dots + \hat{\mathbf{D}}_M = \sum_{k=1}^M \sigma_k \mathbf{u}_k \mathbf{v}_k^T
\end{aligned} \tag{1.11}$$

$\hat{\mathbf{D}}_k = \sigma_k \mathbf{u}_k \mathbf{v}_k^T$ é uma matriz de posto unitário que também é denominada de autoimagem k da matriz de dados \mathbf{D} , enquanto que $\hat{\mathbf{d}}_k^j$ na equação (1.10) é o traço j da autoimagem $\hat{\mathbf{D}}_k$.

A equação (1.10) representa a decomposição SVD de um traço, enquanto a equação (1.11) representa a decomposição SVD de toda a imagem associada à matriz original. Limitando o somatório nessas equações podemos obter representações aproximadas de cada traço sísmico ou de toda a imagem.

Os primeiros autovalores possuem maior amplitude fazendo com que as autoimagens associadas preservem as feições de maior correlação espacial (Freire, 1986). Desta forma os primeiros autovetores são responsáveis pela reconstituição dos eventos predominantemente horizontais ou sub-horizontais de maior amplitude. Porsani et al. (2009) utilizou este método para enfatizar os eventos horizontais e sub-horizontais e atenuar os eventos inclinados associados ao *groundroll*

Para cada traço de uma seção sísmica 2D ou de um volume 3D que se deseja filtrar, podemos coletar o subconjunto de M traços imediatamente vizinhos, efetuar a decomposição SVD da matriz de dados correspondente e restituir parcialmente o traço $\tilde{\mathbf{d}}_j$ através da equação,

$$\tilde{d}(t, x_j) = \sum_{k=1}^K \sigma_k u_k(t) v_k(x_j). \quad (1.12)$$

Assim, o traço $\tilde{d}(t, x_j)$ obtido a partir dos K primeiros autovetores representará o traço filtrado. Os valores pequenos de K serão responsáveis pela geração de traços, seções e volumes, de maior coerência espacial. A filtragem SVD pode ser vista como um método de filtragem multicanal onde cada traço filtrado guarda certo grau de coerência com os traços imediatamente vizinhos.

O método de filtragem SVD proposto consiste na aplicação sistemática da equação (1.12) sobre todos os traços de uma linha sísmica ou de um volume 3D, seguindo o procedimento:

- (i) Seleção do subconjunto de M traços imediatamente vizinhos a cada traço $d(t, x_j)$ da seção ou volume sísmico.
- (ii) Decomposição SVD.
- (iii) Reconstituição parcial do traço $\tilde{d}(t, x_j)$ utilizando apenas K valores singulares.

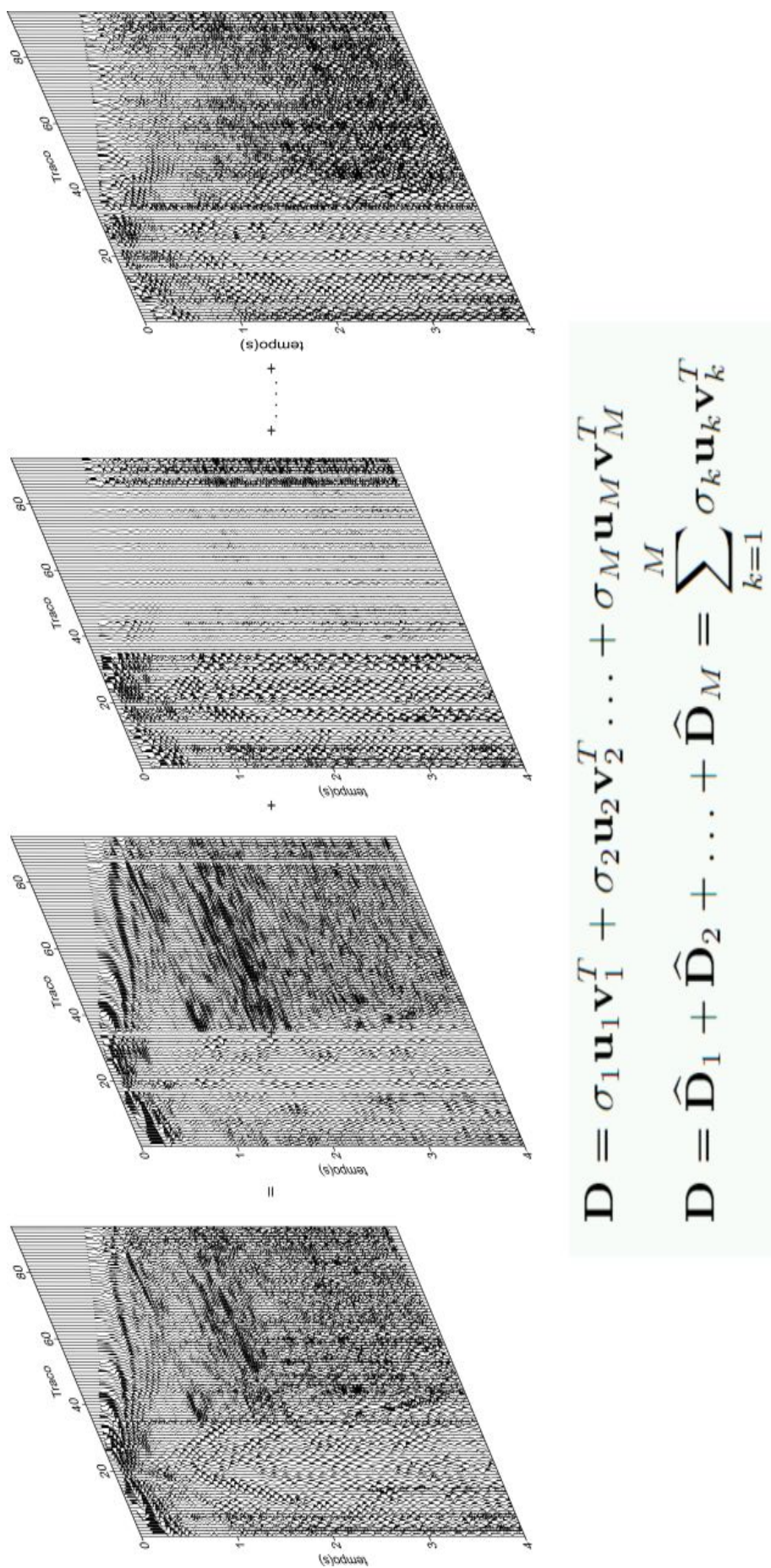


Figura 1.1: Representação da matriz \mathbf{D} em autoimagens através da decomposição em valores singulares SVD. $\hat{\mathbf{D}}_k = \sigma_k \mathbf{u}_k \mathbf{v}_k^T$

2

Método de Empilhamento CMP

O empilhamento sísmico consiste na soma ou superposição de dados multicobertura ao longo de curvas de tempo de trânsito visando aumentar a razão sinal-ruído e simular a seção de afastamento nulo (AN), a qual não pode ser adquirida na prática, mas é usualmente simulada a partir do empilhamento dos dados. O método de empilhamento CMP introduzido por Mayne (1962) aplica a correção de *normalmoveout* (NMO) e em caso que os refletores apresentem mergulho é necessário ainda aplicar a correção de *dipmoveout* (DMO) antes do empilhamento. Desta forma o método depende da disponibilidade de um modelo de velocidades, o qual é obtido através de uma análise de velocidades dos dados. A redundância dos dados sísmicos, quando a técnica CDP é empregada e as velocidades são corretamente estimadas, torna possível o aumento da razão sinal ruído através de uma simples soma dos traços, que seria utilizada para reduzir o ruído aleatório dos dados.

2.1 Correção Normal Moveout (NMO)

Em aquisições de dados sísmicos 2D, fontes e receptores são movidos mais ou menos ao longo de uma linha reta. A distância entre a fonte e cada receptor é chamado afastamento ou offset. A posição do CMP é definida como sendo o ponto médio entre uma fonte e um receptor. Pares de fonte receptor com a mesma posição de CMP são reunidos formando uma família de CMPs. Para um meio horizontalmente estratificado com velocidade constante, uma geometria CMP compreende todos os raios que incidem no mesmo ponto refletor. Portanto, uma família CMP contém informação redundante da subsuperfície. Esta é a base para o empilhamento CMP. Admitindo, um modelo de um refletor plano e horizontal em subsuperfície (figura 2.1) nós queremos determinar o tempo t ao longo do caminho *SDR*. Usando o teorema de

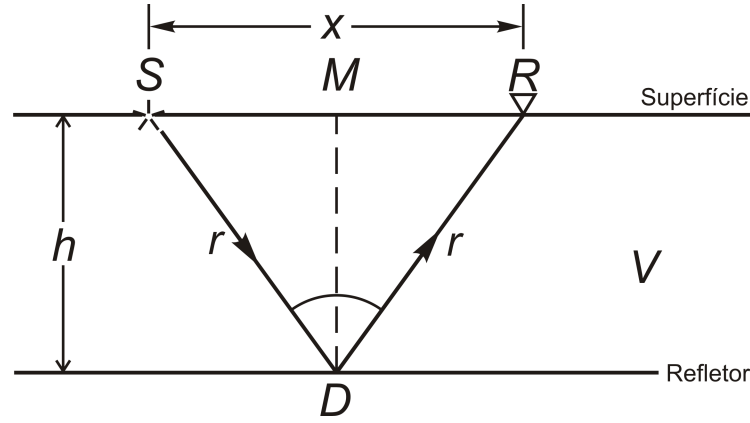


Figura 2.1: Geometria para uma onda refletida numa única camada horizontal. O ponto M corresponde ao ponto médio entre a fonte S e o receptor R

Pitágoras obtemos o tempo em função do offset, assim:

$$t = 2\sqrt{\frac{\frac{x^2}{4} + h^2}{V^2}}$$

elevando ambos lados ao quadrado

$$t^2 = \frac{x^2}{V^2} + \frac{4h^2}{V^2}$$

em termos de t_0

$$t^2 = t_0^2 + \frac{x^2}{V^2} \quad (2.1)$$

Onde x é a distancia (*offset*) entre fonte e receptor, V é a velocidade do meio acima do refletor, e t_0 é o tempo de percurso de afastamento nulo, ou seja, o tempo de percurso medido para fonte e receptor coincidentes ($x = 0$). Note que a projeção vertical do ponto D na superfície, ao longo da normal ao refletor, coincide com o ponto médio M . Isto ocorre só quando o refletor é horizontal.

A equação (2.1) representa a forma de uma hipérbole. A diferença de tempo Δt_{NMO} entre o tempo de percurso para um afastamento específico t e o tempo de percurso para o afastamento nulo t_0 é chamada de *normal moveout* (NMO). Este efeito hiperbólico pode ser removido através da correção *normal moveout* que implica em trazer eventos de tempo de percurso t para tempos de percurso de afastamento zero (t_0). A correção NMO é dada pela diferença entre t e t_0 :

$$\Delta t_{NMO} = t - t_0$$

ou , usando (2.1),

$$\Delta t_{NMO} = t_0 \left[\sqrt{1 + \left(\frac{x}{Vt_0} \right)^2} - 1 \right] \quad (2.2)$$

Após aplicarmos a correção NMO nas famílias CMP's os eventos hiperbólicos associados aos eventos em subsuperfície estarão horizontalizados. A velocidade utilizada na correção NMO, recebe a denominação de velocidade de NMO (V_{NMO}). Quando os traços de uma família CMP já estão corregidos do normal moveout, eles são somados, e teremos um traço, conhecido como traço de afastamento nulo ou *zero-offset*. Caso a velocidade NMO usada na equação (2.2), seja maior que a velocidade do meio, ocorrerá uma subcorreção, por outro lado, se a velocidade utilizada for inferior a velocidade do meio, teremos uma sobrecorreção, e assim o evento não estará totalmente horizontalizado.

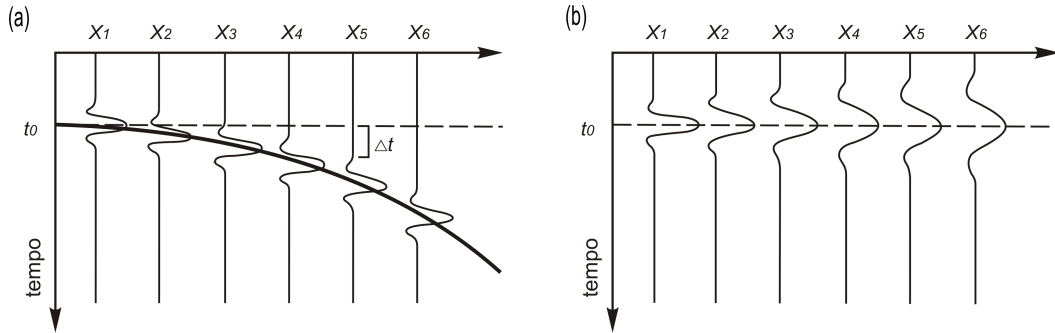


Figura 2.2: Traços de uma família CMP:(a) antes da correção NMO, (b) após a correção NMO. Pares fonte-receptor são simétricos em relação ao ponto médio comum e têm diferentes *offsets* (x_i) e tempos *normal moveout* (Δt).

Para um modelo estratificado de camadas horizontais, com velocidades para N camadas dadas por v_j ($j = 1, \dots, N$) (Taner e Koehler, 1969) definiram a seguinte aproximação para o tempo de trânsito (t):

$$t^2 = C_0 + C_1 X^2 + C_2 X^4 + C_3 X^6 + \dots \quad (2.3)$$

O termo C_0 da expressão (2.3), corresponde ao tempo duplo de incidência normal t_0^2 e $C_1 x^2$ é igual a $\frac{1}{v_{rms}^2}$. Os outros termos da expressão (2.3), são funções complicadas pois dependem da profundidade e das velocidades intervalares.

Considerando agora, afastamentos entre traços pequenos, quando comparamos a profundidade do refletor, a expressão (2.3) pode ser truncada e escrita da seguinte forma:

$$t^2 = t_0^2 + \left(\frac{x}{v_{rms}} \right)^2 \quad (2.4)$$

onde V_{rms} é definida como:

$$V_{rms}^2 = \frac{1}{t_0} \sum_{i=1}^N V_i^2 \Delta t_i$$

com Δt_i sendo o tempo duplo de percurso vertical através da i -ésima camada, V_i a velocidade da i -ésima camada e $t_0 = \sum_{i=1}^N \Delta t_i$. Desta forma, podemos concluir que ao ser assumido um modelo horizontalmente estratificado, a velocidade média quadrática (V_{rms}) será igual a velocidade normal moveout (V_{NMO}).

Para um meio com único refletor mergulhante Levin (1971) derivo a seguinte expressão para o tempo de trânsito:

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

sendo ϕ o ângulo de mergulho do refletor. A velocidade de NMO é dada por:

$$V_{NMO} = \frac{v}{\cos \phi} \quad (2.6)$$

A equação (2.5) do tempo de trânsito para um refletor mergulhante representa uma hipérbole como a equação (2.1) para um refletor plano. Porém agora a velocidade de NMO é dada pela velocidade do meio dividida pelo cosseno do ângulo de mergulho como é definido pela equação (2.6)

Assumindo um modelo de múltiplas camadas com mergulhos arbitrários, Hubral e Krey (1980) definiram a seguinte equação para o cálculo do tempo de trânsito:

$$t^2 = t_0^2 + \frac{x^2}{v_{NMO}^2} + \text{termos de alta ordem}, \quad (2.7)$$

onde a velocidade de NMO é dada por

$$v_{NMO}^2 = \frac{1}{t_0 \cos^2 \beta_0} \sum_{i=1}^N v_i^2 \Delta t_i \prod_{k=1}^{i-1} \left(\frac{\cos^2 \alpha_k}{\cos^2 \beta_k} \right) \quad (2.8)$$

Para uma única camada mergulhante a equação (2.8) se reduz à equação (2.6). Além disso, para um modelo estratificado de camadas horizontais, a equação (2.7) é reduzida à equação (2.4). Enquanto os mergulhos são moderados e o afastamento é pequeno, a equação do tempo de trânsito é aproximadamente representada por uma hipérbole, e a velocidade necessária para a correção NMO é aproximadamente a velocidade média quadrática V_{rms}

2.2 Análise de velocidade

Na análise de velocidade procura-se a velocidade que possa horizontalizar cada uma das reflexões hiperbólicas, de modo que ao empilharmos os traços com os refletores horizontalizados,

vamos otimizar o empilhamento, atingindo uma boa razão sinal-ruído. As velocidades de empilhamento são conhecidas através da análise de velocidade no domínio CMP. A análise de velocidade tem como objetivo a definição das funções velocidades que melhor compensem as diferenças de sobretempo normal (NMO) das reflexões. A análise de velocidade no processamento de uma seção sísmica não é realizada com apenas um CMP e sim com alguns CMP's regularmente distribuídos no comprimento da seção dos quais são então interpoladas as velocidades para corrigir de NMO e empilhar os CMP's restantes

2.2.1 Espectro de velocidade

O espectro de velocidade é comumente usado em softwares iterativos onde o resultado do empilhamento para intervalos de velocidade diferentes é plotado, lado a lado, num plano de velocidade \times tempo. O espectro de velocidade normalmente é exibido em dois tipos de “displays” que são utilizados para escolher ou picar as velocidades, plotagem tipo mosaico (*gated raw plot*), e plotagem tipo curvas de contorno (*contour plot*), a qual é mostrada na figura 2.3. A estratégia para escolher as velocidades a partir do espectro de velocidade é baseada no rastreamento da tendência das velocidades que coincidem com os máximos no semblance, associados com as reflexões primárias. As trajetórias hiperbólicas dos tempo de trânsito que correspondem às velocidades picadas são sobrepostas na família CMP para observar qualquer discrepância entre os tempos de trânsito modelados e reais e, portanto, verificar a precisão das velocidades picadas. Uma quantidade que ajuda na picagem é o valor ou valores máximos de coerência para cada janela de tempo exibidos como uma função do tempo ao lado do espectro de velocidade. Outra forma de melhorar a qualidade do espectro de velocidade é a utilização de varias famílias CMP's vizinhas na análise. Na construção do espectro de velocidade são utilizadas medidas de coerência da sinal. Neidell e Taner (1971) descreveram vários tipos medidas que podem ser escolhidas na geração destes espectros.

2.2.2 Coerência

Sempre que uma mesma onda é detectada por um arranjo de geofones, ela produz quase exatamente o mesmo efeito em cada geofone. Se, no momento em que é captada por um geofone, a onda tiver energia suficiente para se sobrepor a qualquer outro nível de energia (ruídos), que também é captada pelos geofones, a resposta do traço vai ser mais ou menos similar em cada geofone. Essa similaridade denunciada traço a traço é denominada coerência e é a condição necessária para o reconhecimento de qualquer evento. A coerência traço-a-traço, como definida acima pode oferecer, de várias maneiras, um valor quantitativo. Para um grande número de traços podemos aproveitar o fato de que quando empilhamos vários

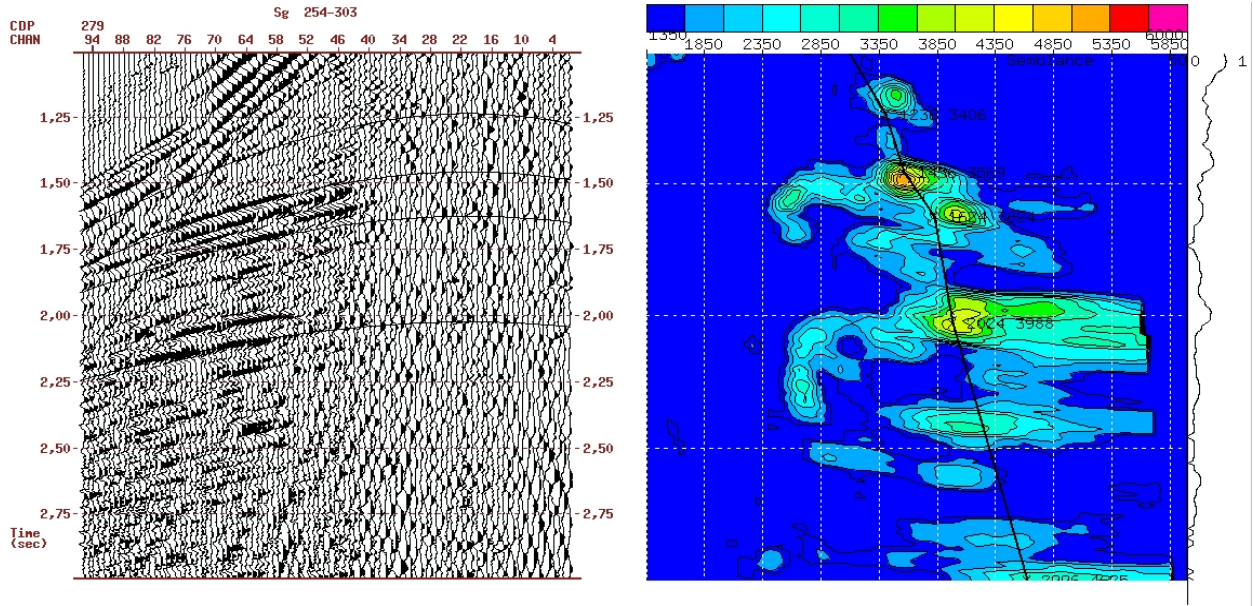


Figura 2.3: Detalhe de uma família CMP e o seu espectro de velocidade. O *display* colorido do espectro de velocidade é usado na escolha iterativa das velocidades (*picks*). A quantidade apresentada no espectro desta figura é o *semblance*.

canais a amplitude resultante é geralmente muito maior onde cada traço (cada sinal) é similar (coerente), logo estão empilhados em fase, e menor onde não são similares (incoerentes). Um dos focos na análise de velocidade é obter picos que correspondam a pontos com melhor coerência do sinal ao longo de uma hipérbole por toda a família CMP.

2.2.3 Medição da Coerência

Geralmente, na análise de velocidade, emprega-se uma medida de coerência do sinal, dentro de uma janela de tempo, para o cálculo do espectro de velocidade ao longo da trajetória hiperbólica dos eventos de reflexão. Considerando uma família CMP com uma única reflexão como na figura 2.1, temos que Amplitude de empilhamento (*Stacked amplitude*) é definida como:

$$S = \sum_{i=1}^N f_i, t_i \quad (2.9)$$

onde S -amplitude de empilhamento para o tempo duplo t_0 , N -número de traços da família de ponto médio comum e f_i, t_i -valor da amplitude do traço i no tempo duplo t_i . O tempo-duplo t_i é definido por

$$t_i = \sqrt{t_0^2 + \frac{x_i^2}{v_{stk}^2}} \quad (2.10)$$

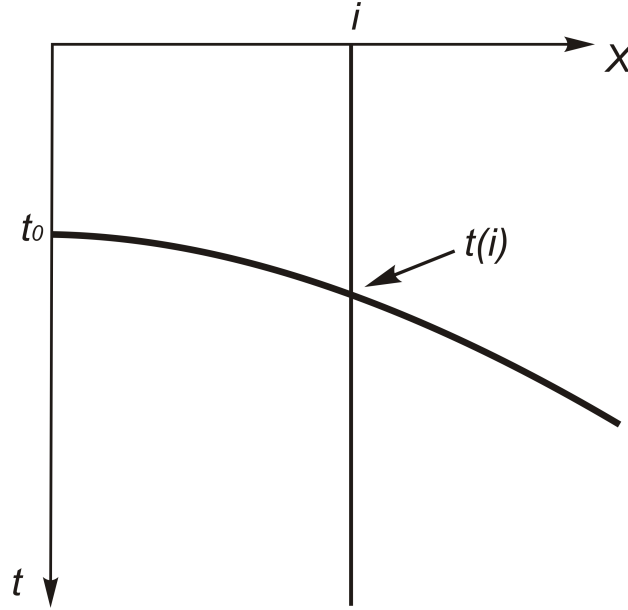


Figura 2.4: Amplitude de empilhamento ao longo da trajetória hiperbólica. As amplitudes f_i, t_i são somadas para obter a *stacked amplitude* S . Tomado de Yilmaz (2003)

sendo v_{stk} a velocidade de empilhamento.

Além da amplitude de empilhamento S dada pela equação (2.9), outras medidas de coerência podem ser usadas no calculo do espectro de velocidades, a saber: a amplitude de empilhamento normalizada NS , o somatório da correlação cruzada sem normalizar CC , e normalizado NC , o somatório da energia da correlação cruzada EC , e finalmente o semblance NE , que é a razão normalizada energia de saída-energia de entrada , e é dada por

$$NE = \frac{1}{M} \frac{\sum_t \sum_{i=1}^M f_{i,t_i}}{\sum_t \sum_{i=1}^M f_{i,t_i}^2} \quad (2.11)$$

onde, $0 \leq NE \leq 1$. O *semblance* não apenas tenderá a ser alto quando um evento com boa coerência ocorrer, mas também é sensível quer os traços contribuam igualmente ou não. Consequentemente, eventos "fortes" irão exibir *semblance* alto, e eventos fracos irão exibir valores moderados para o *semblance*, ao passo que informações incoerentes possuem um *semblance* muito baixo.

A estimativa da velocidade em dados sísmicos é limitada em precisão e resolução por vários fatores entre os quais se destaca a razão sinal-ruído. Ver tabela 2.1 O ruído em dados sísmicos tem um efeito direto na qualidade do espectro de velocidade. Assim a precisão do espectro de velocidade será limitada quando a razão sinal-ruído (SNR) for baixa, por exemplo na presença de bastante ruído aleatório numa família CMP a distinção de sinal ao longo de trajetos hiperbólicos será afetada e alguns eventos poderão ser picados, mas outros

a	Comprimento do arranjo (lanço)
b	Comprimento da janela de tempo
c	Cobertura CMP
d	Razão sinal-ruído
e	Silenciamento “ <i>Muting</i> ”
f	Velocidade de amostragem
g	Escolha da medida de coerência
h	Largura da banda do dado

Tabela 2.1: Vários fatores que afetam a estimativa da velocidade

serão difíceis de distinguir devido ao alto nível de ruído presente.

2.3 Empilhamento

Na etapa do empilhamento horizontal simplesmente é realizada a soma aritmética das amplitudes dos traços das famílias CMP’s, após a correção do sobretempo normal. A melhora da razão sinal-ruído dos dados, nesse caso, dependerá do grau de coerência alcançada nos eventos de interesse (reflexões). A equação para o empilhamento normalizado é dada por:

$$A(t) = \frac{1}{N} \sum_{i=1} N a_i(t) \quad (2.12)$$

sendo $A(t)$ -amplitude do traço empilhado no tempo t ; N -número de traços ou cobertura da família CMP; i -índice indicador do traço; $a_i(t)$ -valor da amplitude do traço i no tempo t . Como vemos, o empilhamento produz um traço para cada família CMP, normalizado pela média aritmética, preservando as relações entre as amplitudes. Para melhorar os resultados nessa etapa, é comum a prática do *mute stretch* nas famílias CDP, buscando eliminar o estiramento gerado pela correção NMO. É bom salientar que o sucesso dessa etapa está totalmente condicionado às velocidades ótimas de empilhamento (*stack*), que são estimadas na análise de velocidade. O princípio do Empilhamento CMP pode ser visto na figura 2.5. Assumindo um refletor horizontal vemos que o traço 24 no sismograma do tiro 1 tem o ponto médio igual ao traço 20 do tiro 2, ao traço 16 do tiro 3, etc. Os traços 24,20,16,12,8 e 4 dos tiros 1,2,3,4,5,e 6 respectivamente formam uma família CMP como foi definido em subseções anteriores. A correção normal move-out é aplicada a cada família CMP para que as hipérboles de reflexão sejam horizontalizadas, após cada um dos traços são somados para obter um traço de afastamento nulo na seção empilhada final correspondente ao ponto médio em questão.

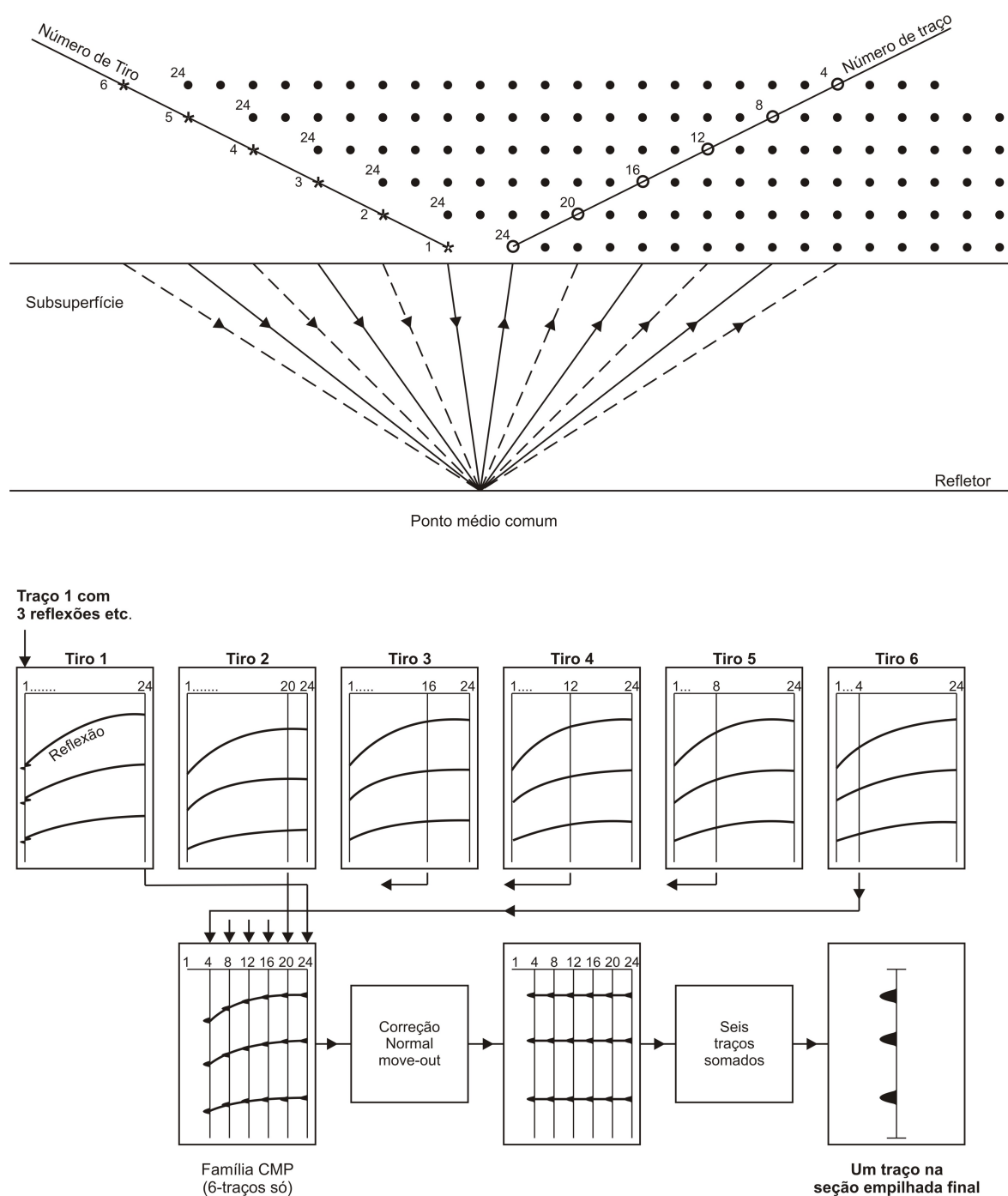


Figura 2.5: Empilhamento ponto médio comum CMP. Cada ponto numerado de 1 a 24 representa um traço num registro e os asteriscos numerados de 1 a 6 são tiros sucessivos. Após da correção normal move-out ser aplicada os traços numa família CMP são somados para obter um traço empilhado. Adaptado de Parasnis (1997)

3

Aplicação do Método

O método de filtragem SVD foi aplicado na linha sísmica terrestre 204-242 da Bacia do Tacutu. A linha contém 462 tiros registrados a 4ms de intervalo de amostras. O levantamento foi feito com 96 canais por tiro e foi utilizada a geometria *split-spread* assimétrico com *offsets* 1050-100-0-100-3850 m. A distância entre geofones e entre tiros foi de 50 m. O pré-processamento do dado de entrada incluiu as seguintes etapas: leitura e importação dos dados, montagem da geometria de aquisição, correção estática, edição e mute dos traços, e a correção de amplitude. Organizamos os dados em famílias de ponto médio comum (CMP), e estimamos um campo de velocidades. Após realizamos a correção do sobretempo normal (NMO), reorganizamos o dado em famílias de tiro e aplicamos a filtragem SVD. Finalmente, organizamos os dados filtrados em famílias CMP e geramos a seção empilhada (fluxograma do processamento; figura 3.2).

A filtragem SVD foi aplicada basicamente de duas formas, é dizer usando dois operadores na filtragem SVD: janela espacial de três traços e operador espacial de cinco pontos. Este ponto é discutido na próxima subseção com maior detalhe

3.1 Operadores de filtragem SVD

A filtragem SVD, na forma utilizada por Porsani et al. (2009), é feita sobre um painel de traços sísmicos corrigidos de NMO no domínio ponto de tiro comum. Uma janela móvel de 3 ou 5 traços, por exemplo, recolhe os traços ao longo de todo o painel e os submete à filtragem SVD. No entanto, ao observarmos a geometria do levantamento de campo observa-se que outros traços de tiros vizinhos também podem ser utilizados.

A partir desse fato desenvolvemos um operador de filtragem SVD que filtra o traço alvo usando os traços mais próximos de cada CMP do dado. Neste caso selecionamos, além do traço central, os quatro traços imediatamente vizinhos, resultando assim um operador em forma de cruz (figura 3.1b). Este operador espacial de 5 pontos opera sobre todo o mapa de cobertura do levantamento, extraindo 5 traços que são submetidos à filtragem SVD. Após a seleção dos traços é realizada a decomposição SVD e um novo traço filtrado é gerado na posição do traço central do operador.

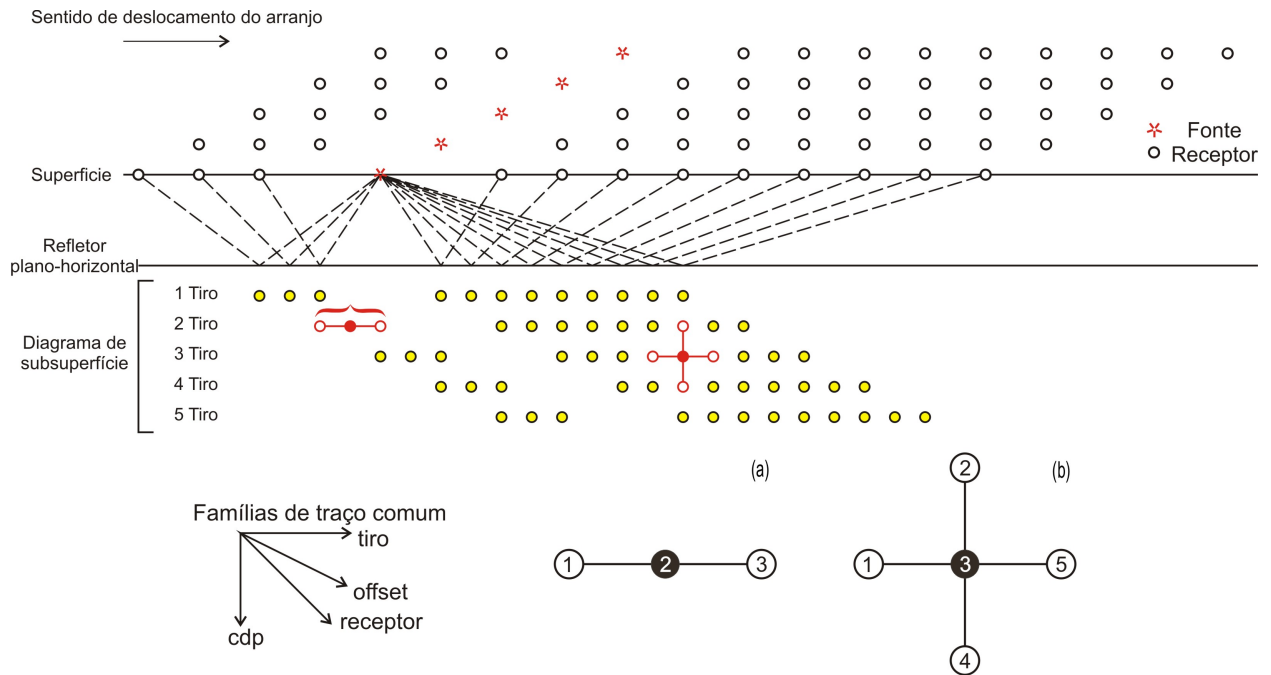


Figura 3.1: Mapa de cobertura e desenho dos operadores adotados para a seleção de traços. Operador janela espacial de três traços e operador espacial de cinco pontos tendo como referência o traço central (alvo da filtragem SVD) representado pelo círculo preenchido, em a) e b) respectivamente

A figura 3.1 ilustra os operadores adotados para a seleção dos traços. Neste capítulo mostramos os resultados obtidos ao aplicar a filtragem SVD, primeiro na forma convencional considerando uma janela com traços pertencentes a uma mesma família de tiro comum e depois ao aplicar a filtragem SVD com o operador em cruz que considera traços na área circunvizinha do traço alvo da filtragem. Adicionalmente são mostrados os resultados obtidos na realização de diferentes experimentos, tais como a aplicação da filtragem SVD no dado organizado em diferentes famílias de traço comum, a aplicação da filtragem SVD em duas etapas; em duas famílias de traço comum diferentes, e a aplicação da filtragem SVD de forma iterativa. Os resultados obtidos são mostrados nas figuras 3.3 a 3.31

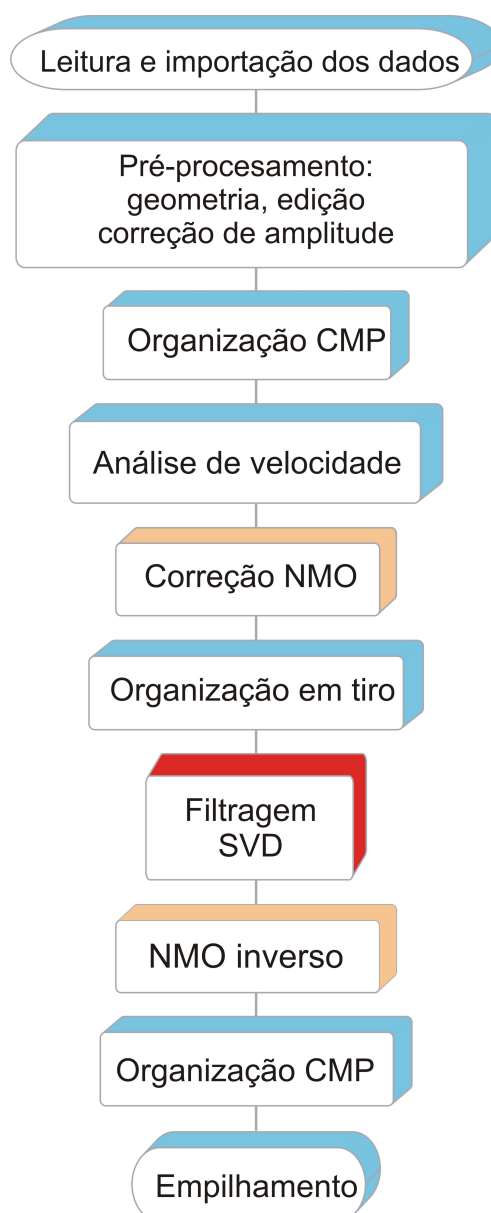


Figura 3.2: Fluxograma que foi utilizado no trabalho

3.1.1 Aplicação da Filtragem SVD em diferentes famílias de traço comum

Nesta subseção apresentamos a aplicação da filtragem SVD utilizando o operador janela espacial de três traços. A filtragem é realizada sobre um conjunto de traços (*três*) numa janela móvel que se desloca desde o primeiro até o último traço de uma família de traço comum, utilizando-se para tanto sismogramas corrigidos de NMO. A correção NMO tem a finalidade de deixar as reflexões de interesse aproximadamente horizontais. Apenas o traço central associado às primeiras autoimagens é escolhido para representar o traço filtrado.

Para a investigação da eficácia do método, a filtragem SVD foi feita no dado reorganizado

nos domínios do tiro, cdp e *offset* utilizando uma janela de 3 traços, e preservamos apenas a primeira autoimagem ($K=1$ na equação (1.12))

A figura 3.3 mostra o dado original corrigido de normal move out (NMO) e os resultados após da aplicação da filtragem SVD no dado organizado em famílias de tiro comum, cdp e *offset* comum. Pode se observar que a filtragem SVD se mostra mais eficaz quando é aplicada no dado organizado em família de tiro comum. A figura 3.4 mostra os sismogramas após a correção do sobretempo normal inverso da figura 3.3. O espectro de amplitude médio, correspondente aos resultados obtidos na figura 3.4 é apresentado na figura 3.5. Pode-se observar que os espectros de amplitude dos sismogramas com a aplicação da filtragem SVD nos domínios do offset e cdp apresentam um comportamento similar com o conteúdo das baixas frequências diminuído, mas é no espectro do sismograma com aplicação da filtragem SVD no domínio do tiro que este conteúdo é bem mais menor, fato que acentua a eficácia do método quando é aplicado neste domínio.

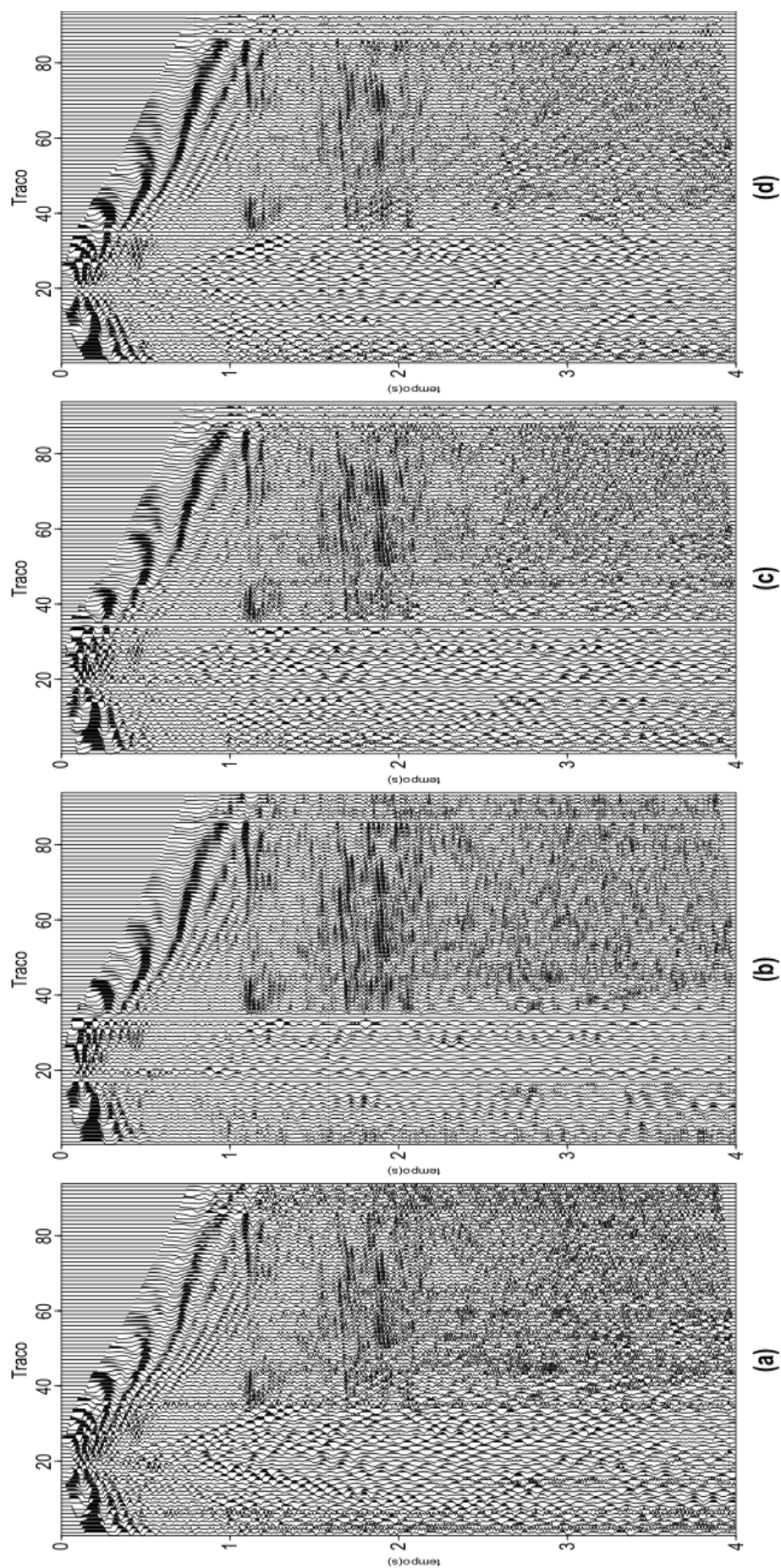


Figura 3.3: Comparação da filtragem SVD janela de três traços em varias famílias de traço comum corrigidas de NMO. Dado de entrada a) dado após da aplicação da filtragem SVD no domínio do tiro, domínio cdp e domínio do *offset* em b) c) e d) respectivamente.

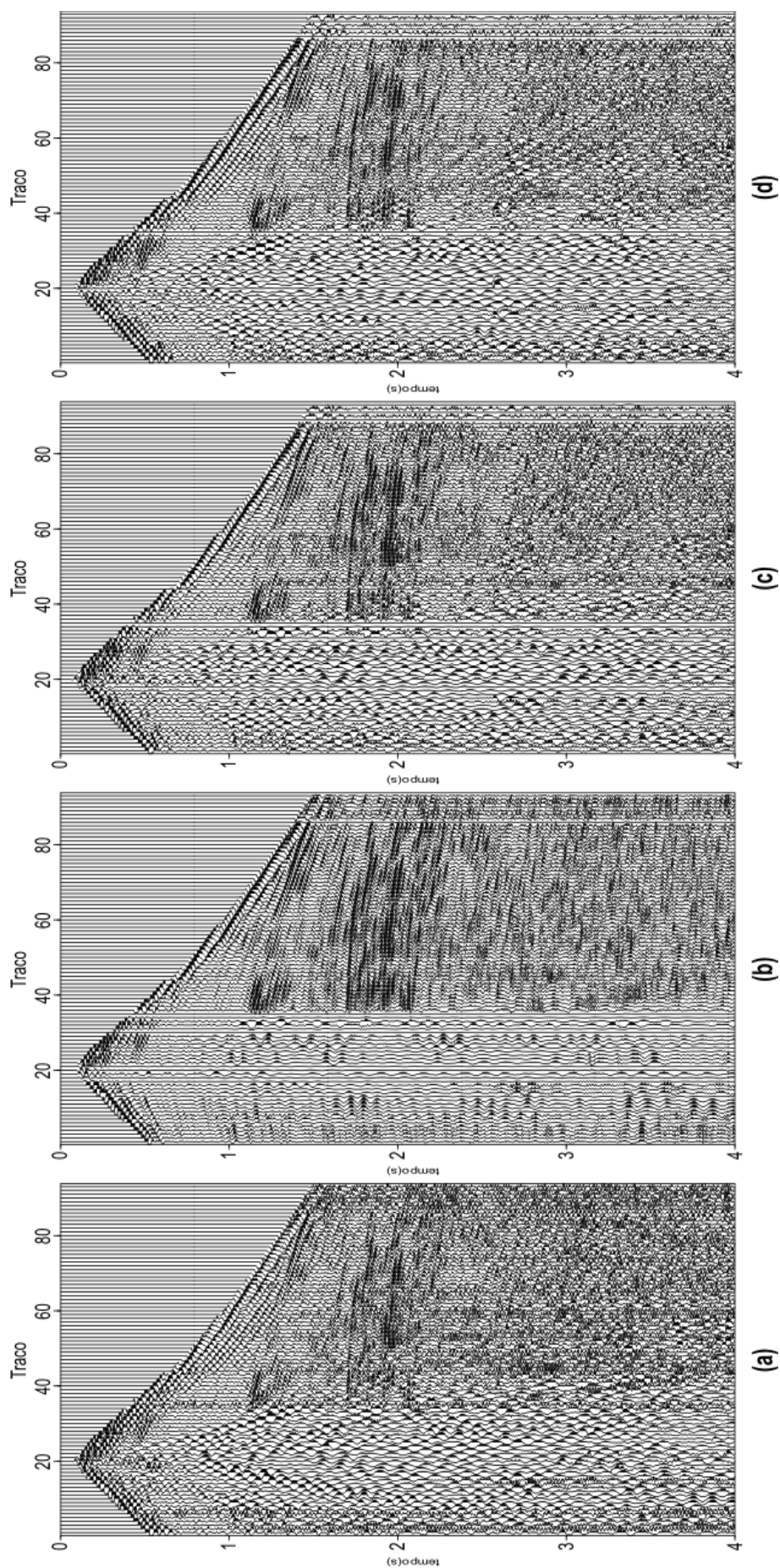


Figura 3.4: Comparação da filtragem SVD janela de três traços em várias famílias de traço comum corrigidas de NMO inverso. Dado de entrada a) dado após a aplicação da filtragem SVD no domínio do tiro, domínio cdp e domínio do *offset* em b) c) e d) respectivamente.

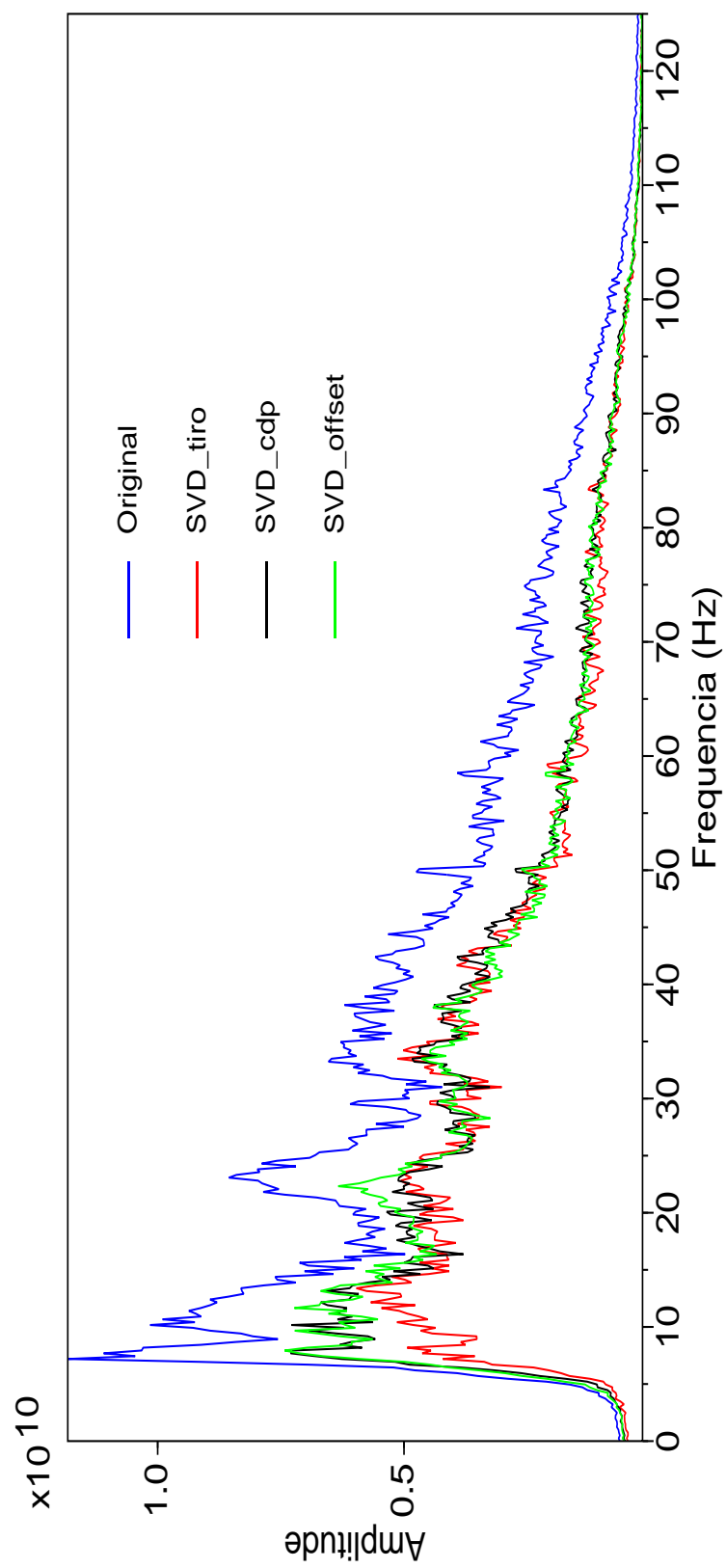


Figura 3.5: Espectro de amplitude médio dos sismogramas representados na figura 3.4.

Aplicação da Filtragem SVD usando o operador janela de três traços

A seguir apresentamos os resultados obtidos na aplicação da filtragem SVD no domínio do tiro, uma vez que neste domínio a filtragem se mostrou mais efetiva. Ilustramos os benefícios desta aplicação na melhora da análise de velocidade e da seção empilhada.

A figura 3.6 mostra o tiro original corrigido de normal move out (NMO), o tiro filtrado com o método SVD associado a primeira autoimagem (figura 3.6.b) e o tiro filtrado SVD com as demais autoimagens. Pode-se observar que a primeira autoimagem conserva a maior parte da informação correlacionável. A figura 3.7 apresenta os sismogramas após a correção do sobretempo normal inverso da figura 3.6. O espectro de amplitude médio, correspondente aos resultados obtidos na figura 3.7 está mostrado na figura 3.8. Pode-se observar que o conteúdo das baixas frequências encontra-se concentrado em maior parte na segunda e terceira autoimagem, enquanto na primeira autoimagem este é muito menor, ou seja a filtragem SVD remove parte substancial, mas não tudo, da baixa-frequência dos dados originais.

A figura 3.9 mostra o detalhe de um painel de *offset* comum (*offset*=-1750) após da aplicação da filtragem SVD no domínio do tiro usando a janela de três traços. A remoção de ruído quanto a melhora na continuidade das reflexões pode ser observada quando comparamos as figuras 3.9.a e 3.9.b.

A figura 3.10 apresenta a análise de velocidades em um “*supergather*” formado por 50 famílias CMP’s. O *ground roll* presente no dado degrada seriamente a análise de velocidades. O mesmo “*supergather*” após a filtragem SVD usando a janela de três traços, junto com seu espectro de velocidades são mostrados nas figuras 3.10.c e 3.10.d. Vê-se que neste espectro de velocidades estão muito melhor definidos os máximos valores do *semblance* do que no espectro da figura 3.10.b.

As figuras 3.11, 3.12 apresentam a seção sísmica original da Bacia de Tacutu e a seção sísmica após a filtragem SVD usando a janela de três traços. Na figura 3.11 observa-se a contaminação do groundroll ao longo de toda a seção. Observando a figura 3.12 verificamos uma atenuação do groundroll e uma melhora na definição dos eventos de reflexão.

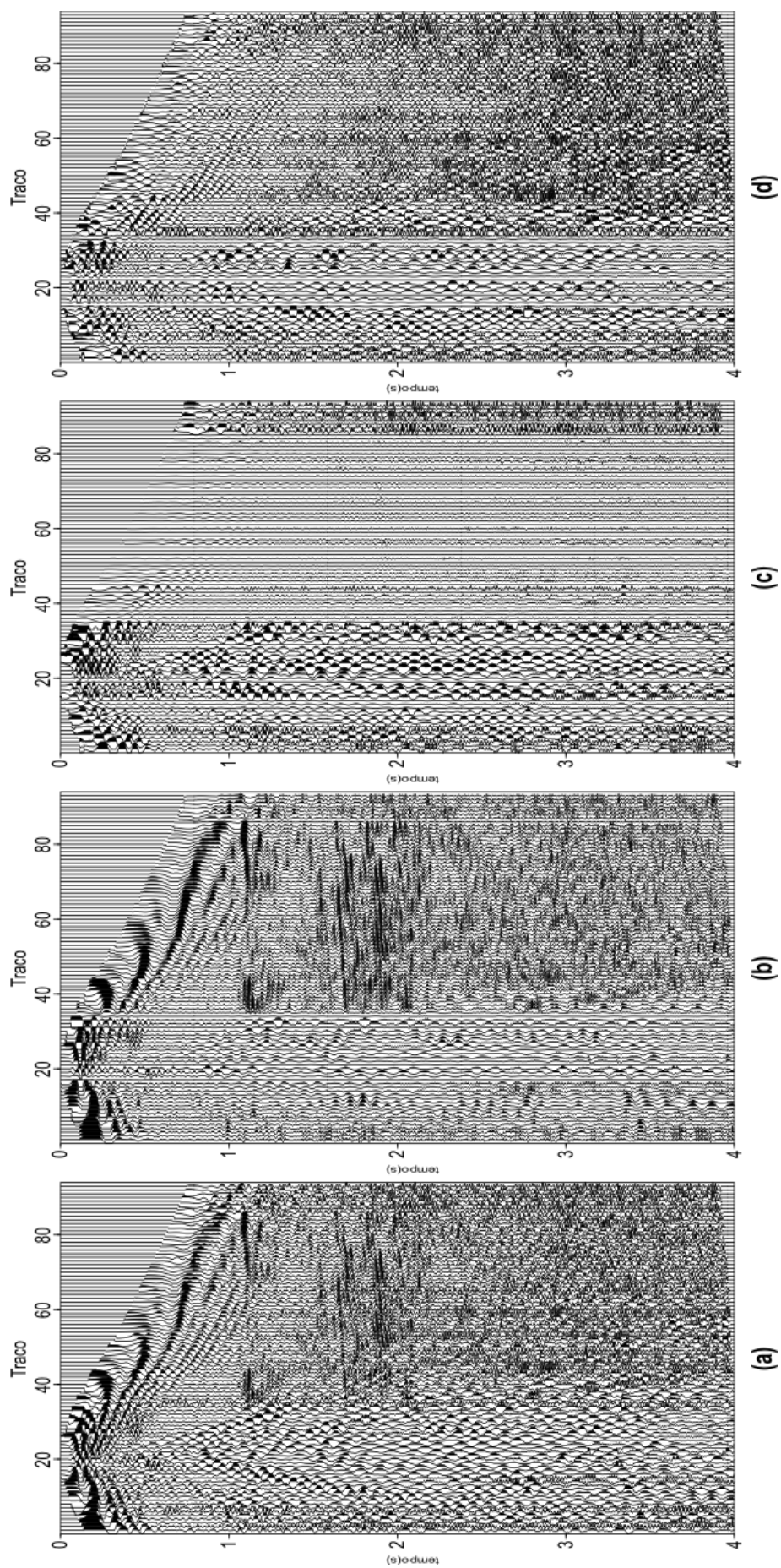


Figura 3.6: Comparação da filtragem SVD numa família de tiro comum corrigido NMO. Dado original em a) dado filtrado SVD com a primeira, segunda e terceira autoimagem em b) c) e d) respectivamente.

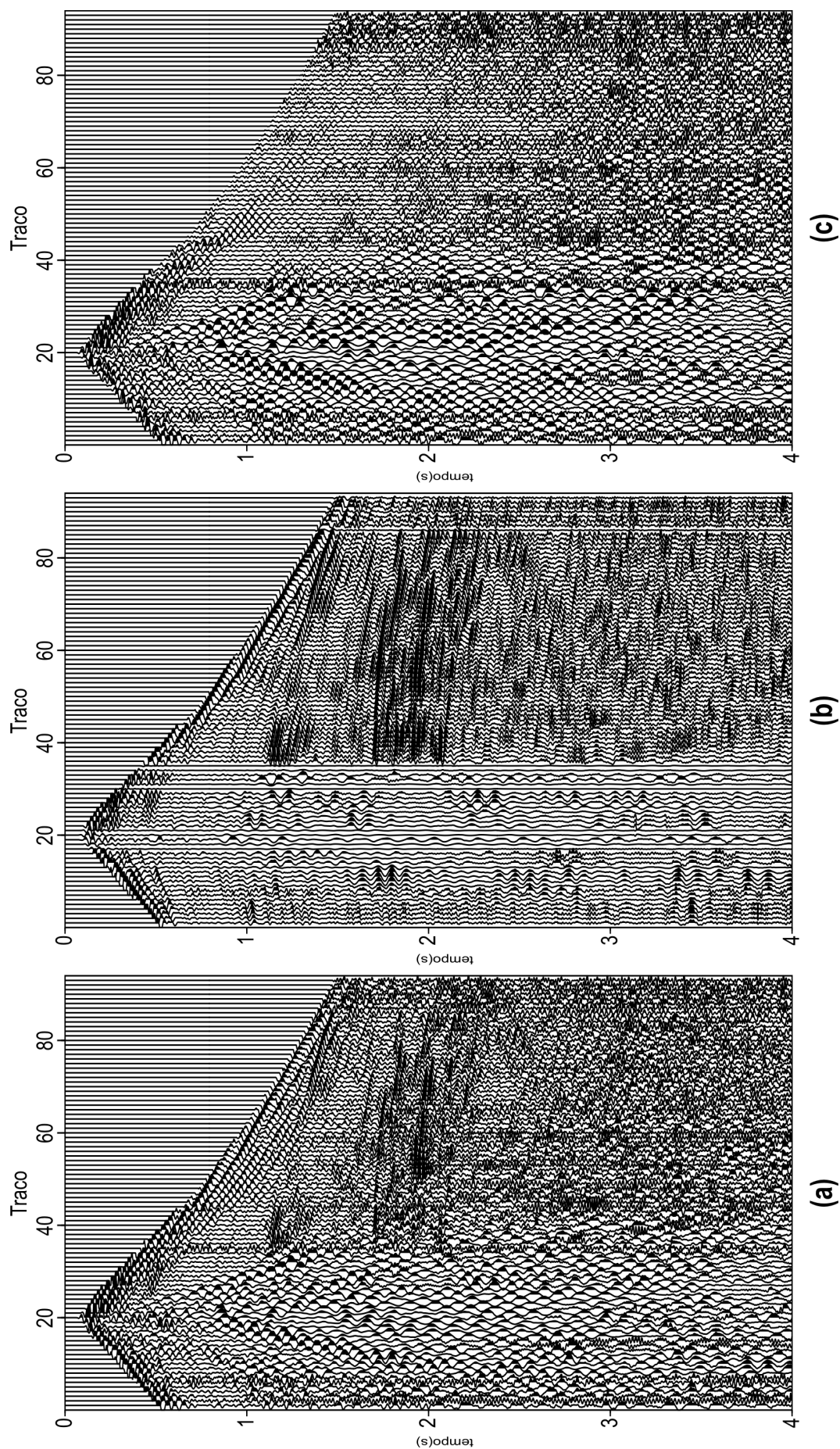


Figura 3.7: Resultado da filtragem SVD após a aplicação da correção NMO inverso nos sismogramas da figura 3.6. Dado original em a) dado filtrado SVD com a primeira autoimagem (sinal) em b) e segunda e terceira autoimagem da decomposição SVD em c).

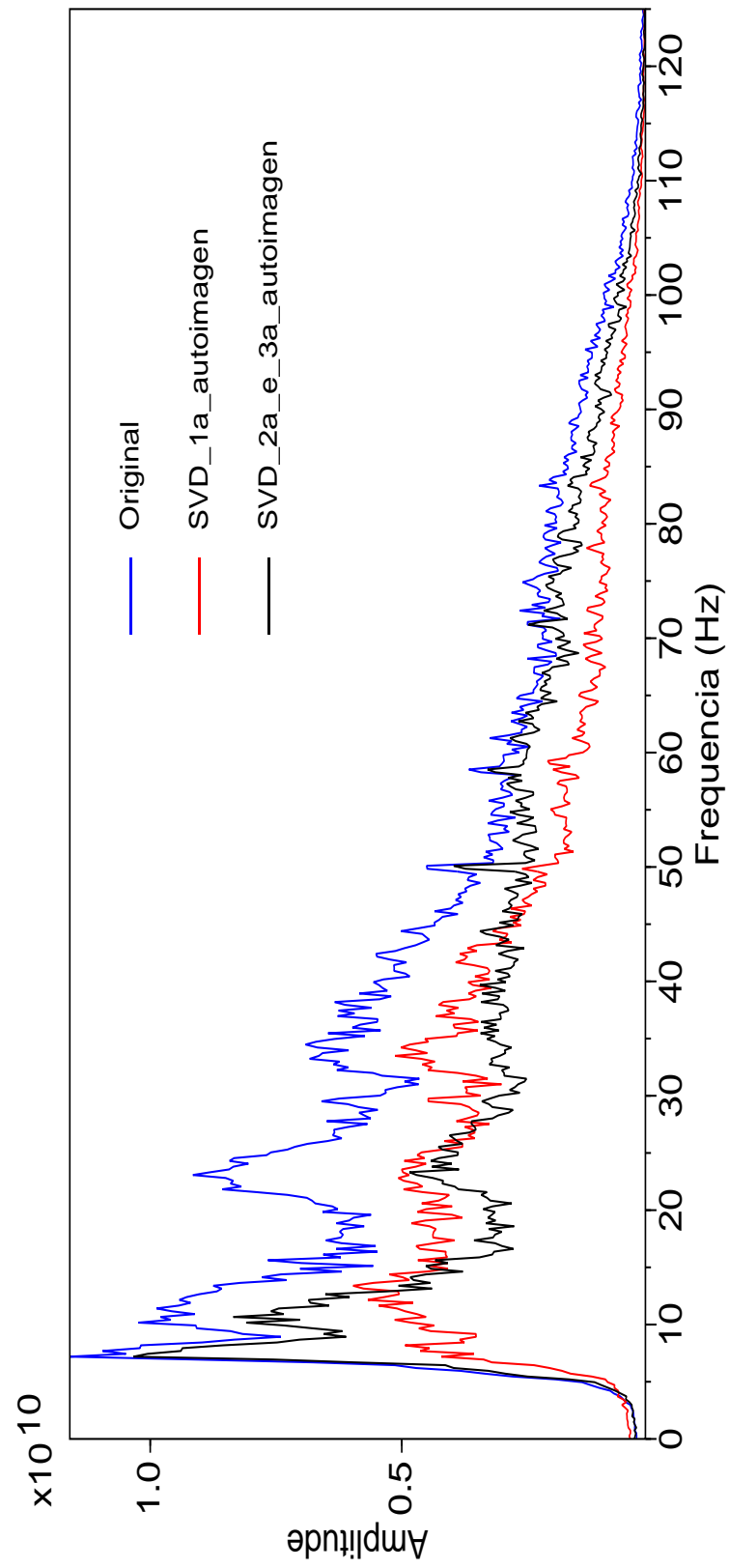


Figura 3.8: Espectro de amplitude médio dos sismogramas representados na figura 3.7.

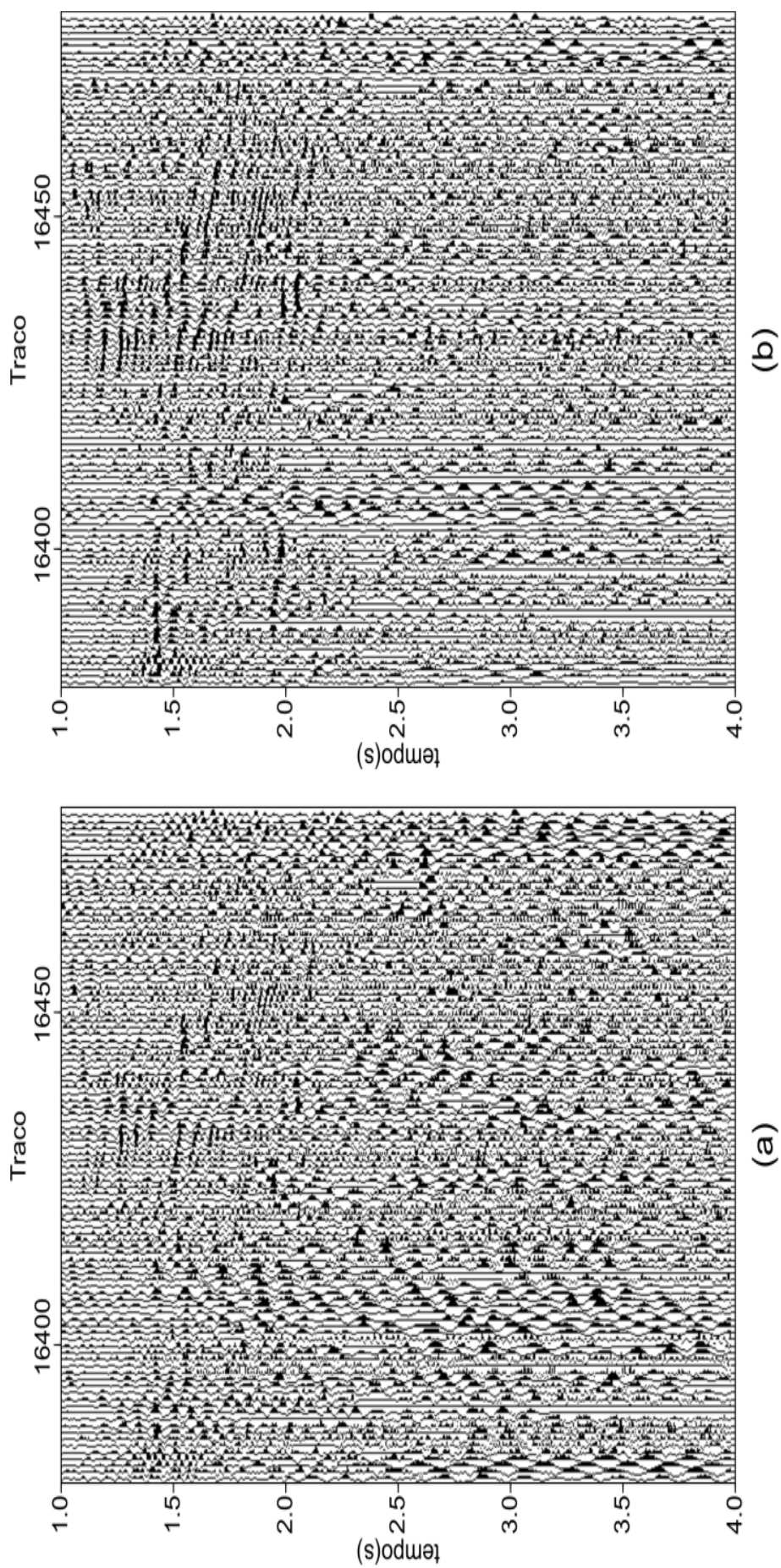


Figura 3.9: Painel de *offset* comum original em a) e depois da aplicação da filtragem SVD usando o operador janela de três traços em b).

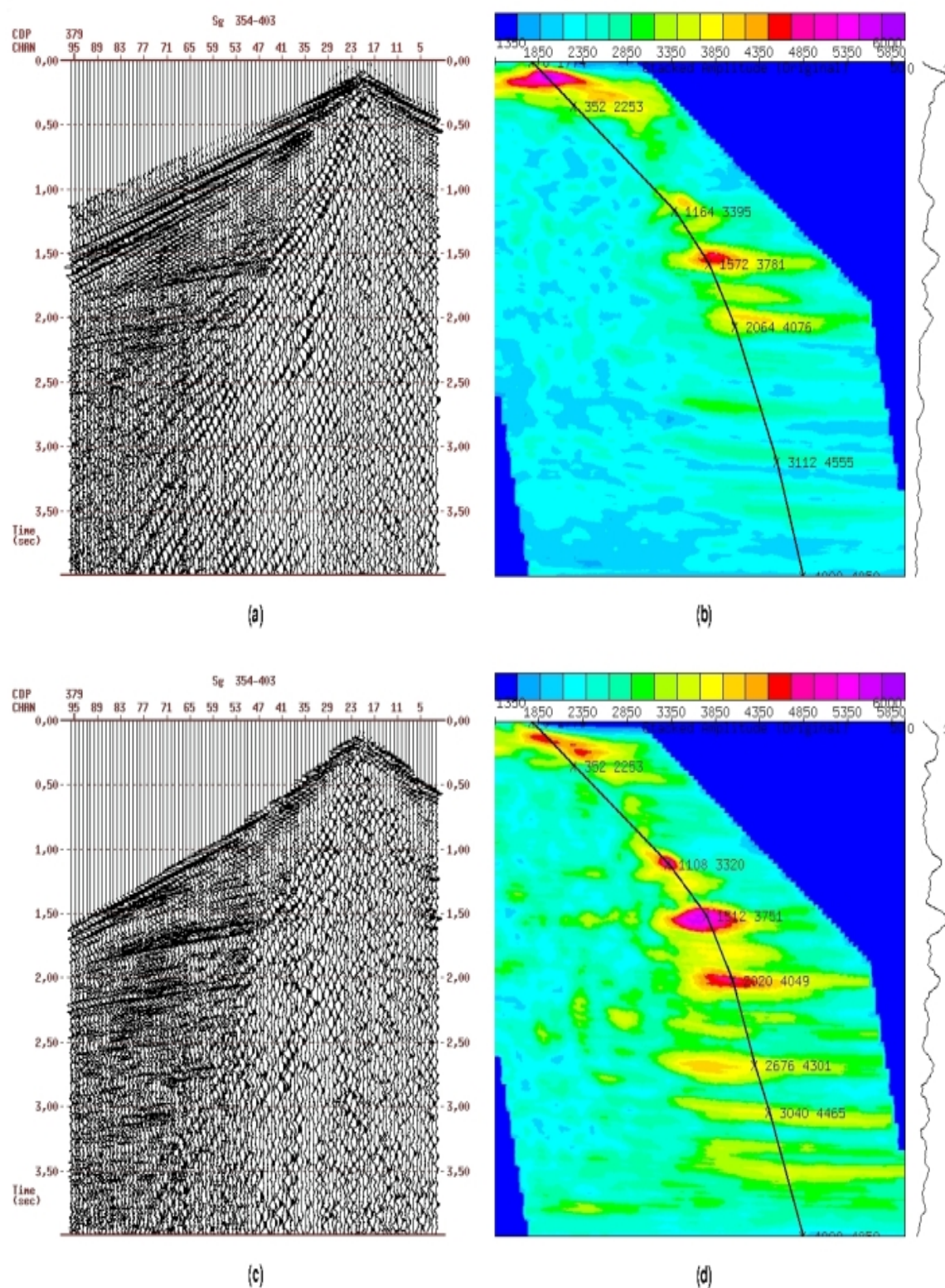


Figura 3.10: Análise de velocidades de um "supergather" formado por 50 CMPs, dado original em a) dado após a filtragem SVD usando o operador janela de três traços em c) e análise de velocidades em b) e d).

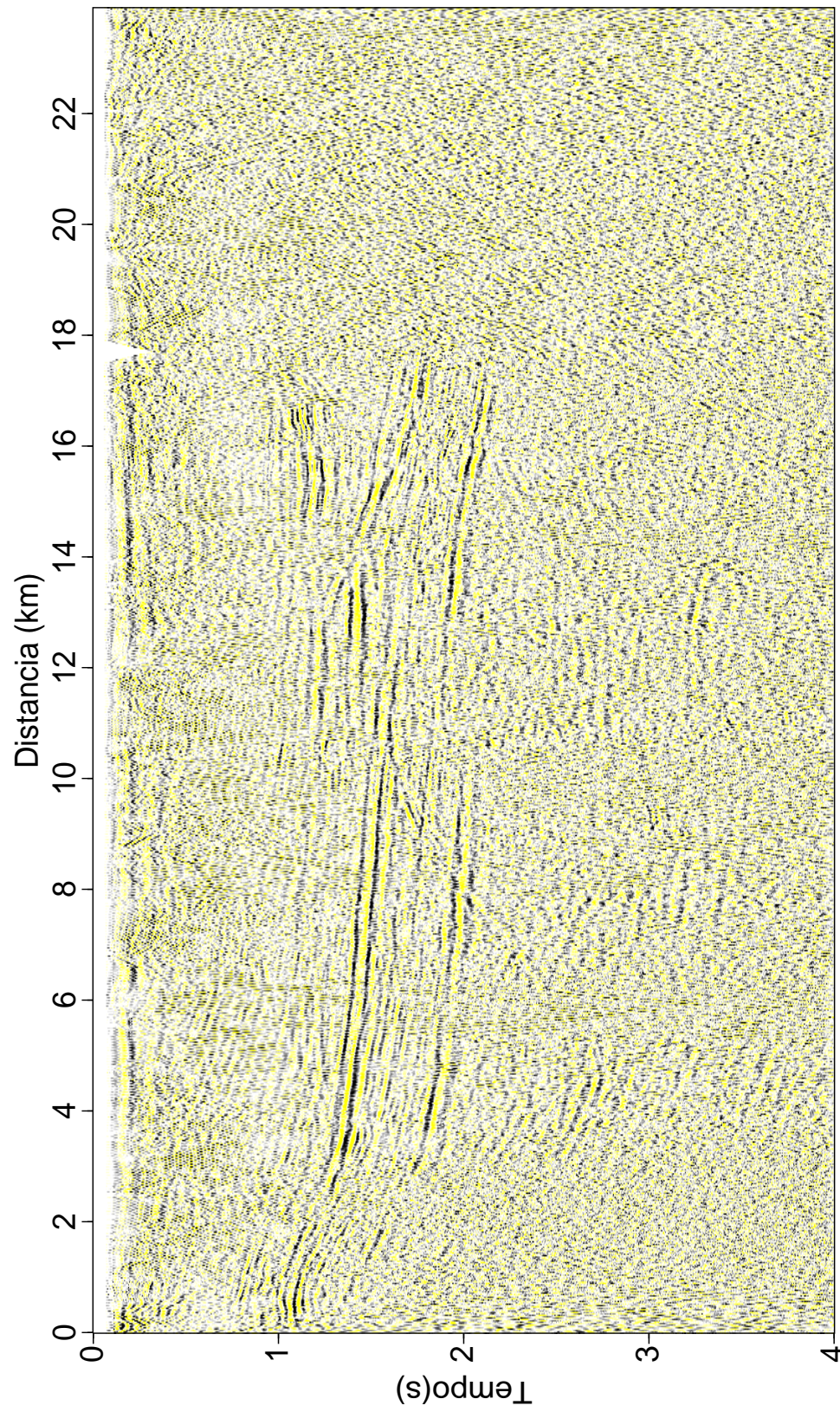


Figura 3.11: Seção sísmica original da bacia de Tacutu, linha 204-RL-242.

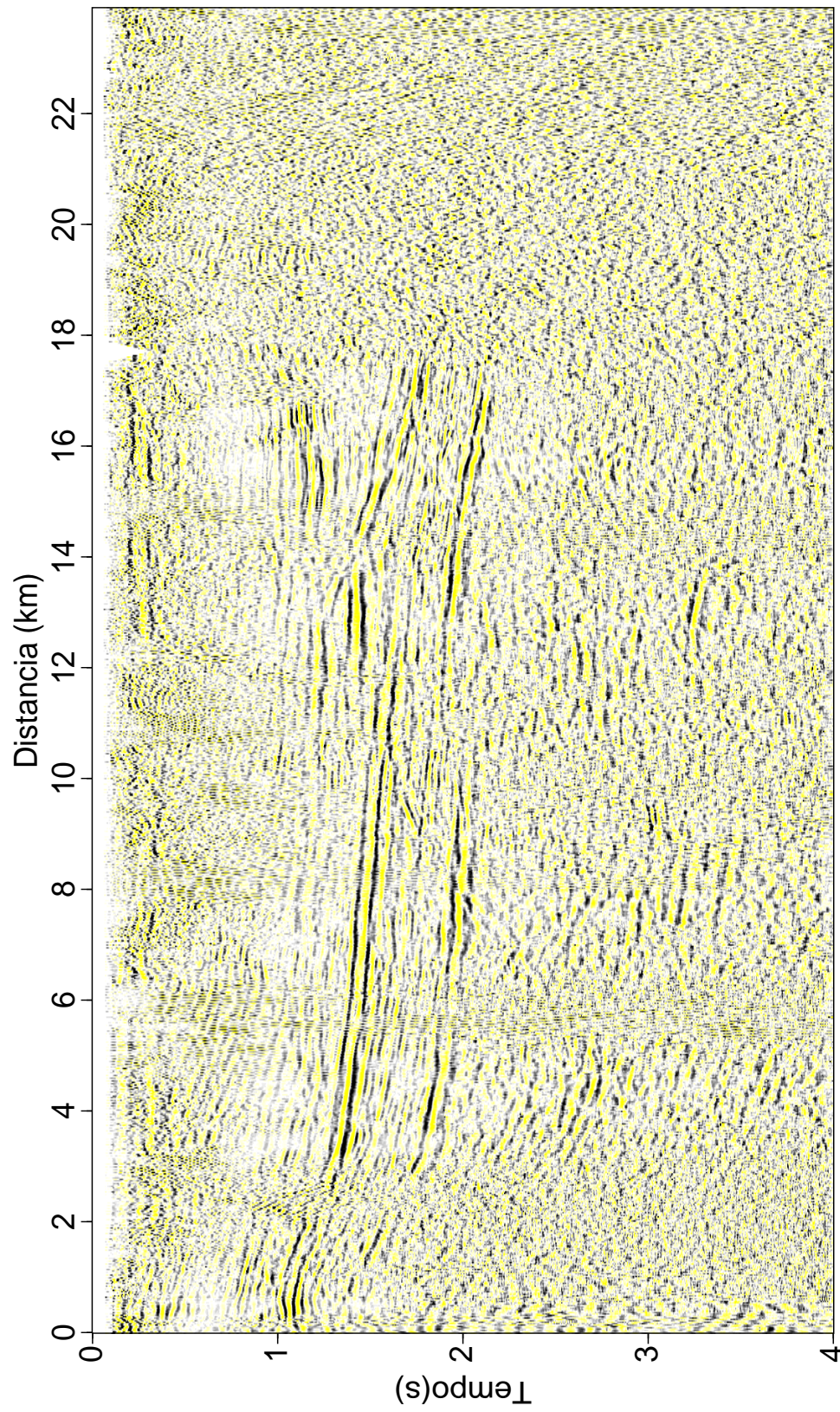


Figura 3.12: Seção sísmica da bacia de Tacutu obtida com os tiros filtrados pelo método SVD (janela de três traços).

3.1.2 Aplicação da Filtragem SVD em duas etapas

Nesta subseção apresentamos a aplicação da filtragem SVD em duas etapas; em duas famílias de traço comum diferentes. A filtragem é realizada usando o procedimento discutido na anterior subseção com a janela móvel de três traços. Primeiramente é aplicada a filtragem SVD no dado organizado em família de tiro comum, após esta aplicação o dado é reorganizado no domínio do *offset* comum e uma segunda aplicação é realizada. Também foi experimentado o caso contrario em que a primeira filtragem é realizada no domínio do *offset* comum, logo o dado é reorganizado e uma segunda aplicação da filtragem é realizada no domínio do tiro comum.

A figura 3.13 apresenta os resultados da filtragem SVD aplicada em duas etapas, em duas famílias de traço comum. Pode ser observado que as filtrações apresentaram nível de atenuação do *groundroll* muito próximo, mas os eventos a tempos maiores mostram menor contaminação por ruído além de melhor definição lateral na filtragem com a primeira aplicação feita no domínio do tiro. A figura 3.14 apresenta os sismogramas após a correção do sobretempo normal inverso da figura 3.13. Podemos comprovar a melhora nos resultados analisando os espectros de amplitude médio do dado original, e dos dados filtrados 3.15. Observamos que a filtragem realizada em duas etapas, primeiro no domínio do tiro e logo no domínio do *offset* consegue uma maior atenuação da banda de frequência (0-20Hz) do *groundroll*.

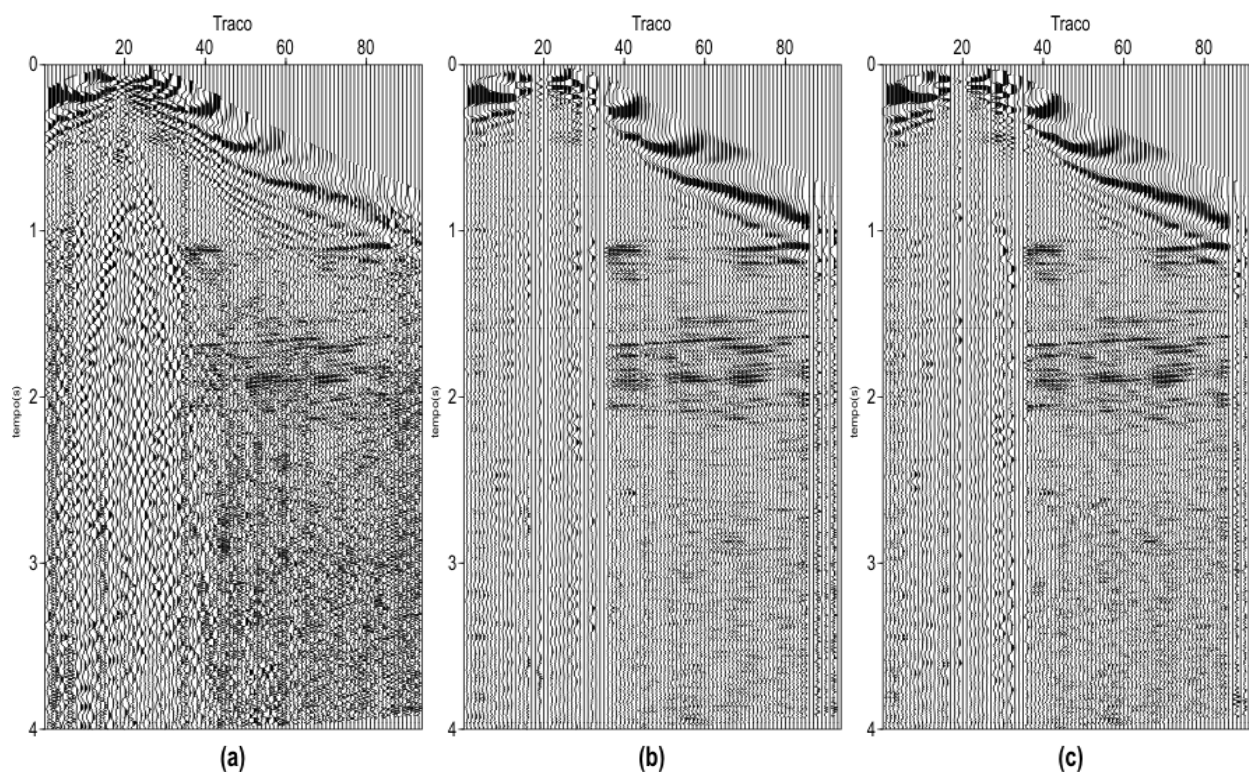


Figura 3.13: Comparação da filtragem SVD usando o operador janela de três traços aplicada em duas etapas em duas famílias de traço comum diferentes corrigidas de NMO. Dado original em a) dado após a aplicação da filtragem SVD primeiro em família de tiro comum e logo em família de *offset* comum em b) dado após a aplicação da filtragem SVD primeiro em família de *offset* comum e logo em família de tiro comum em c)

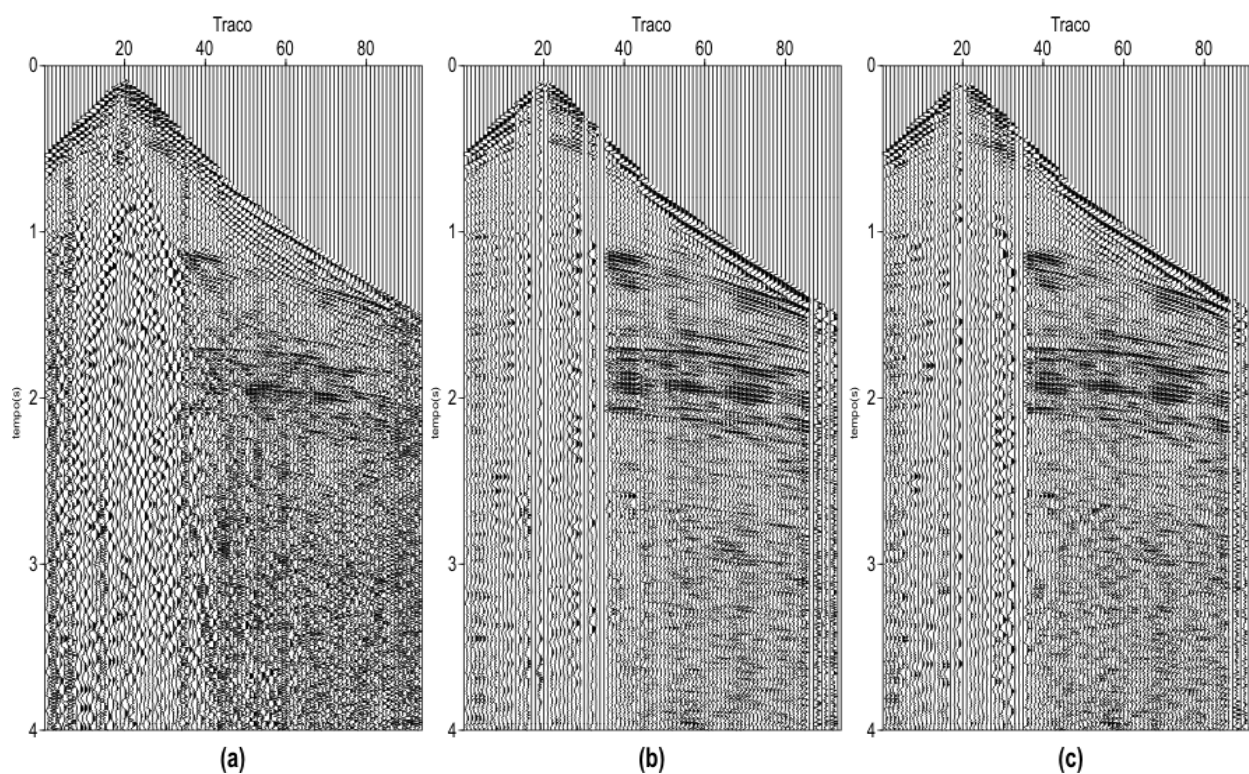


Figura 3.14: Comparação da filtragem SVD usando o operador janela de três traços aplicada em duas etapas em duas famílias de traço comum diferentes corrigidas de NMO inverso. Dado original em a) dado após a aplicação da filtragem SVD primeiro em família de tiro comum e logo em família de *offset* comum em b) dado após a aplicação da filtragem SVD primeiro em família de *offset* comum e logo em família de tiro comum em c)

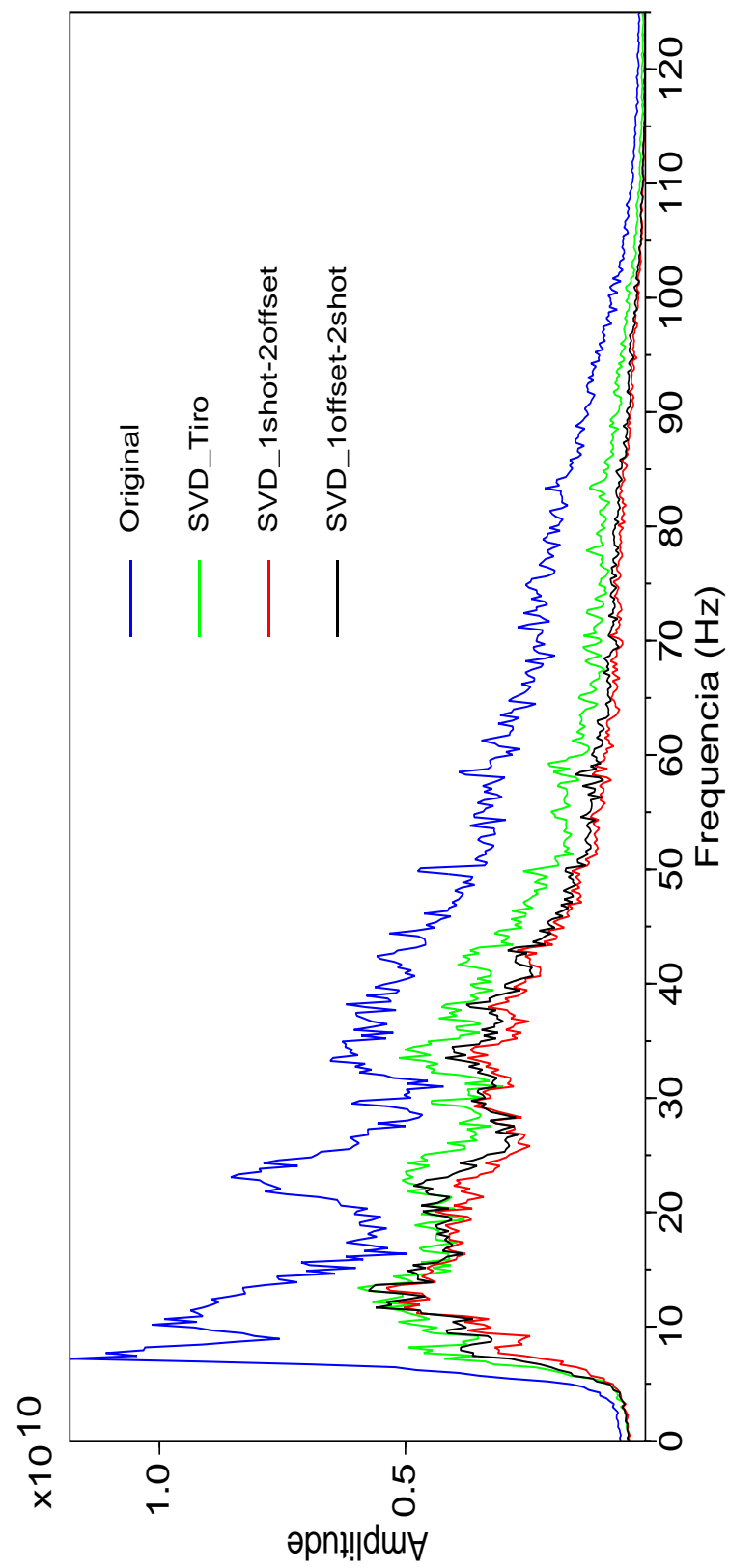


Figura 3.15: Espectro de amplitude médio dos sismogramas representados na figura 3.14

3.1.3 Aplicação da Filtragem SVD de forma iterativa

Nesta subseção é mostrado o resultado da aplicação da filtragem SVD de maneira iterativa. A filtragem é realizada em duas etapas ou duas iterações seguindo o procedimento discutido na subseção 3.1.1. Efetuamos uma primeira filtragem no dado organizado em família de tiro comum usando a janela móvel de três traços, após ter filtrado o dado repetimos o procedimento sendo o dado de entrada para esta segunda iteração o dado filtrado SVD obtido na primeira etapa.

A figura 3.16 apresenta os resultados da filtragem SVD aplicada de forma iterativa (duas iterações), em famílias de tiro comum. A figura 3.17 apresenta os sismogramas após a correção do sobretempo normal inverso da figura 3.16. Os espectros de amplitude são mostrados na figura 3.18. Nota-se que não existe uma diferença significativa entre a segunda e a primeira iteração da filtragem SVD, tanto o nível de atenuação do *groundroll*, como a melhora na definição lateral das reflexões mostram resultados bastante similares. Isto também pode ser observado ao comparar os espectros de amplitude médio obtidos com a primeira e segunda filtragem, as curvas mostram uma atenuação das baixas frequências (0-20Hz) do *groundroll* e diferem em pouco comportando-se de forma bastante e semelhante. Ressaltamos que não há uma melhora significativa dos resultados ao ser aplicada uma segunda iteração.

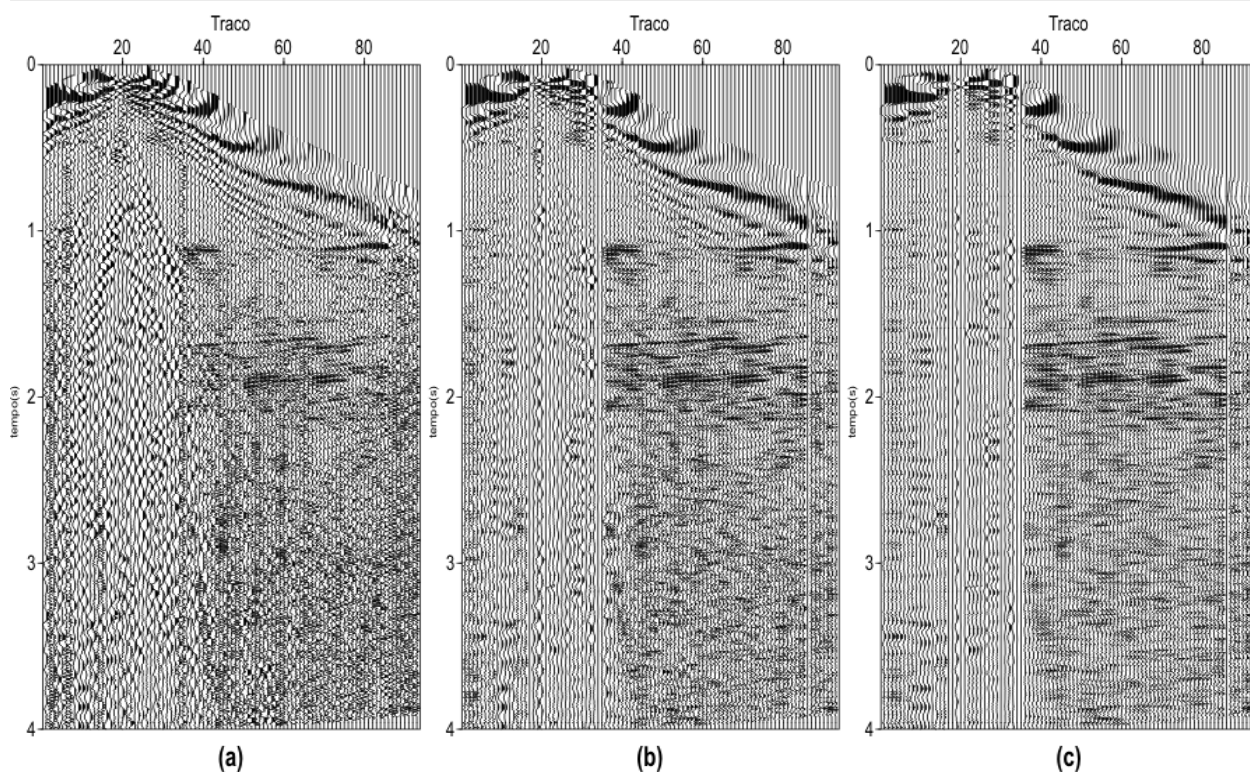


Figura 3.16: Resultados obtidos após da aplicação iterativa da filtragem SVD no domínio do tiro corrigido de NMO. Dado original em a) dado após a primeira aplicação da filtragem SVD em b) e dado após uma segunda aplicação em c).

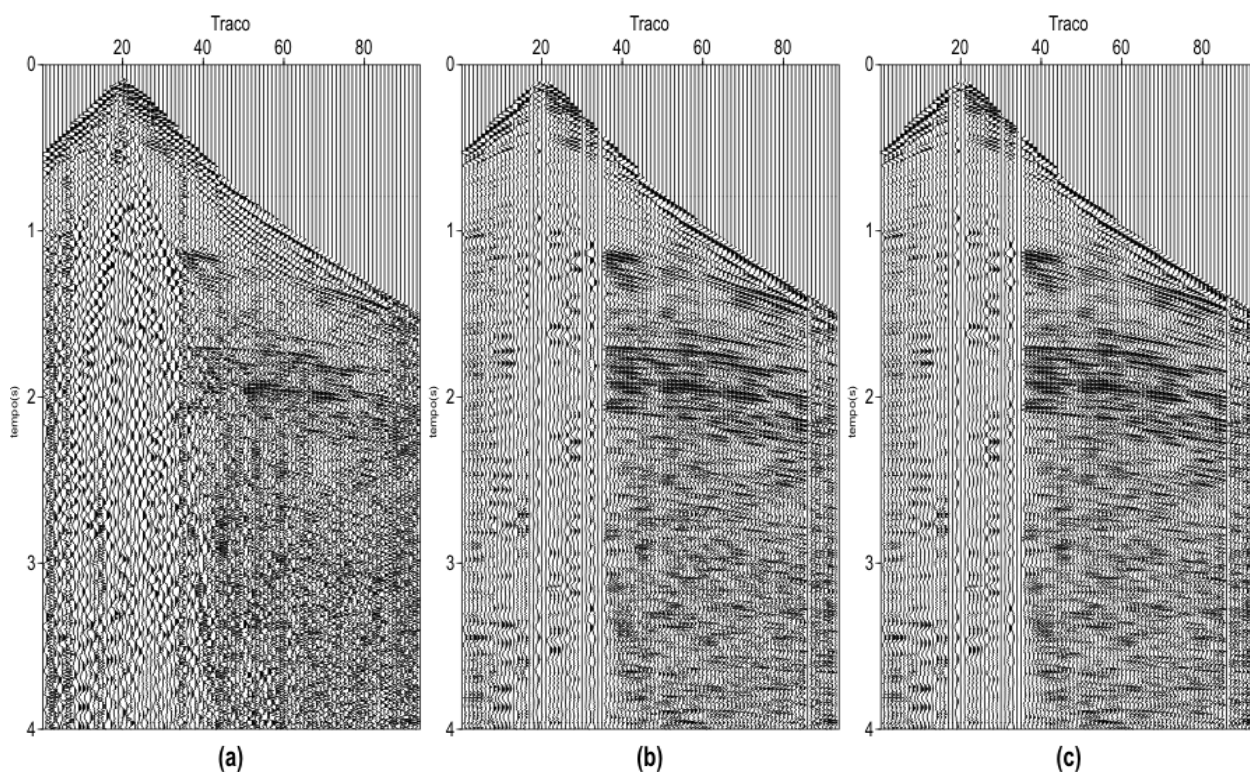


Figura 3.17: Resultados obtidos após da aplicação iterativa da filtragem SVD no domínio do tiro corrigido de NMO inverso. Dado original em a) dado após a primeira aplicação da filtragem SVD em b) e dado após uma segunda aplicação em c).

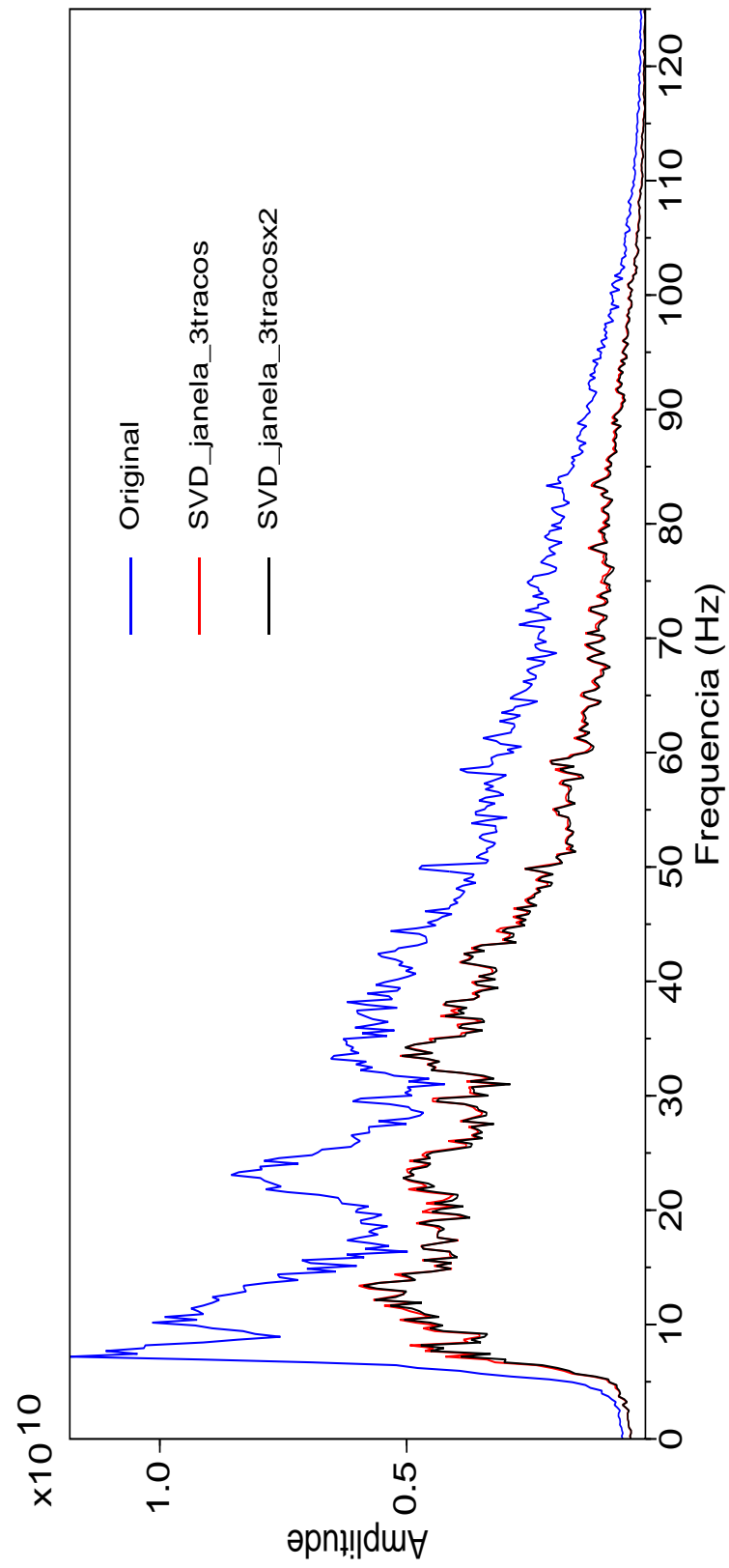


Figura 3.18: Espectro de amplitude médio dos sismogramas representados na figura 3.17

3.1.4 Aplicação da Filtragem SVD usando o operador cruz

A seguir apresentamos os resultados obtidos na aplicação da filtragem SVD usando o operador cruz. Ilustramos os benefícios desta aplicação na melhora da análise de velocidade e da seção empilhada.

A figura 3.19 mostra o tiro original corrigido de normal move out (NMO), o tiro filtrado com o método SVD usando o operador cruz associado a primeira autoimagem (figura 3.19.b) e o tiro filtrado SVD com as demais autoimagens. Da mesma forma de quando usamos o operador convencional janela de três traços podemos observar que a primeira autoimagem conserva a maior parte da informação correlacionável. A figura 3.20 apresenta os sismogramas após a correção do sobretempo normal inverso da figura 3.19. O espectro de amplitude médio, correspondente aos resultados obtidos na figura 3.20 está mostrado na figura 3.21. Pode-se observar que o conteúdo das baixas frequências encontra-se concentrado em maior parte na segunda até a quinta autoimagem, enquanto na primeira autoimagem este é muito menor, ou seja a filtragem SVD remove parte substancial, mas não tudo, da baixa-frequência dos dados originais.

A figura 3.22 mostra o detalhe de um painel de offset comum ($offset=-1750$) após da aplicação da filtragem SVD usando o operador cruz. A remoção de ruído quanto a melhora na continuidade das reflexões pode ser observada quando comparamos as figuras 3.22a e 3.22b.

A figura 3.23 apresenta a análise de velocidades em um “*supergather*” formado por 50 famílias CMP’s. O *ground roll* presente no dado degrada seriamente a análise de velocidades. O mesmo “*supergather*” após a filtragem SVD usando o operador cruz, junto com seu espectro de velocidades são mostrados nas figuras 3.23c e 3.23d. Vê-se que neste espectro de velocidades estão muito melhor definidos os máximos valores do *semblance* do que no espectro da figura 3.23b. Os resultados obtidos nos espectros de velocidade usando o operador janela de três traços foram bem parecidos.

A figura 3.24, apresenta a seção sísmica da Bacia de Tacutu após a filtragem SVD usando o operador cruz. Neste caso também verificamos uma atenuação do *groundroll* e uma melhora na definição dos eventos de reflexão como nos resultados apresentados anteriormente usando o operador convencional janela de três traços.

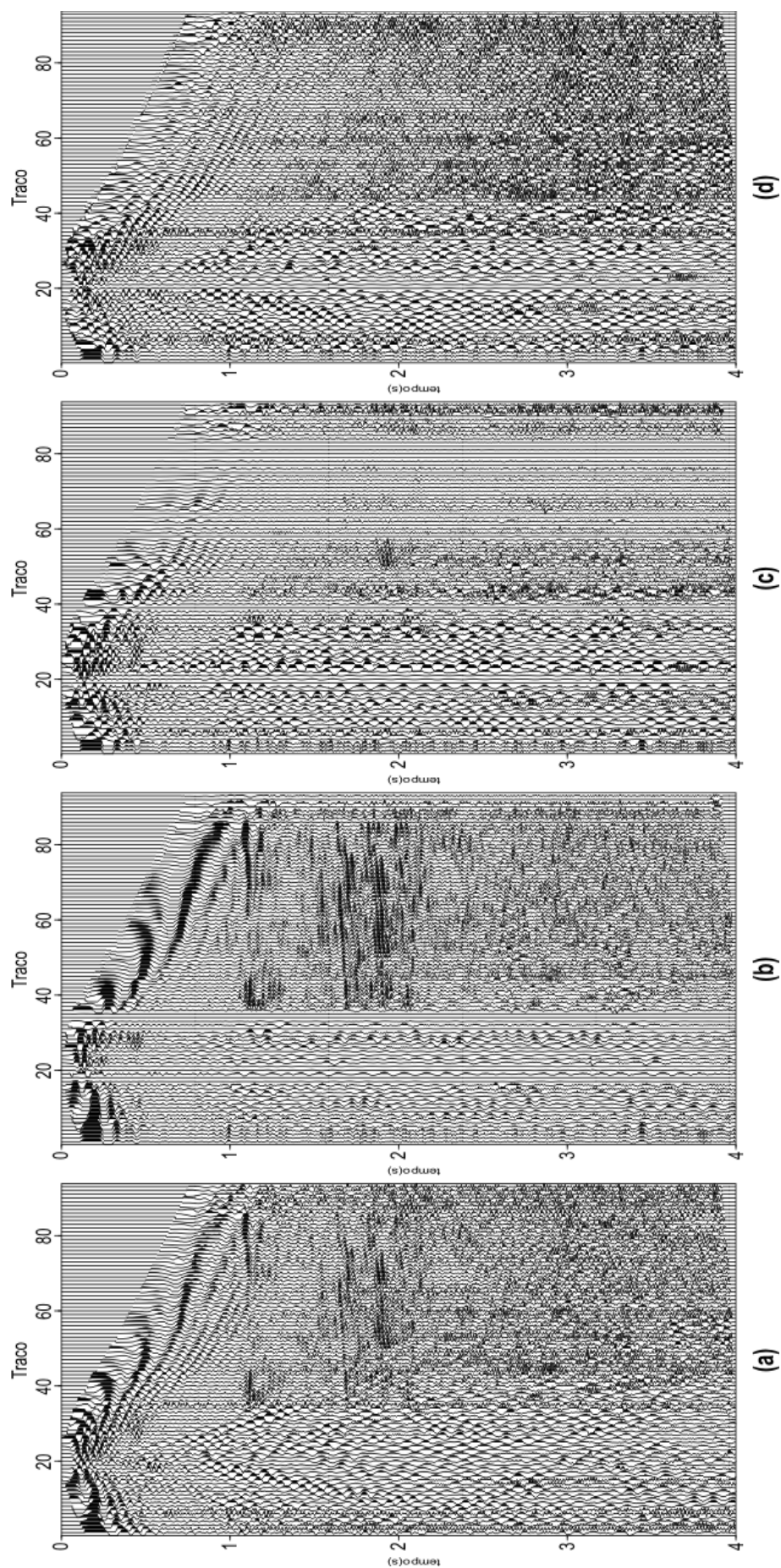


Figura 3.19: Resultado da Filtragem SVD usando o operador cruz em uma família de tiro comum corrigido NMO. Dado original em a) dado filtrado SVD com a primeira autoimagem em b), segunda autoimagem em c), e terceira, quarta e quinta autoimagem em d) respectivamente.

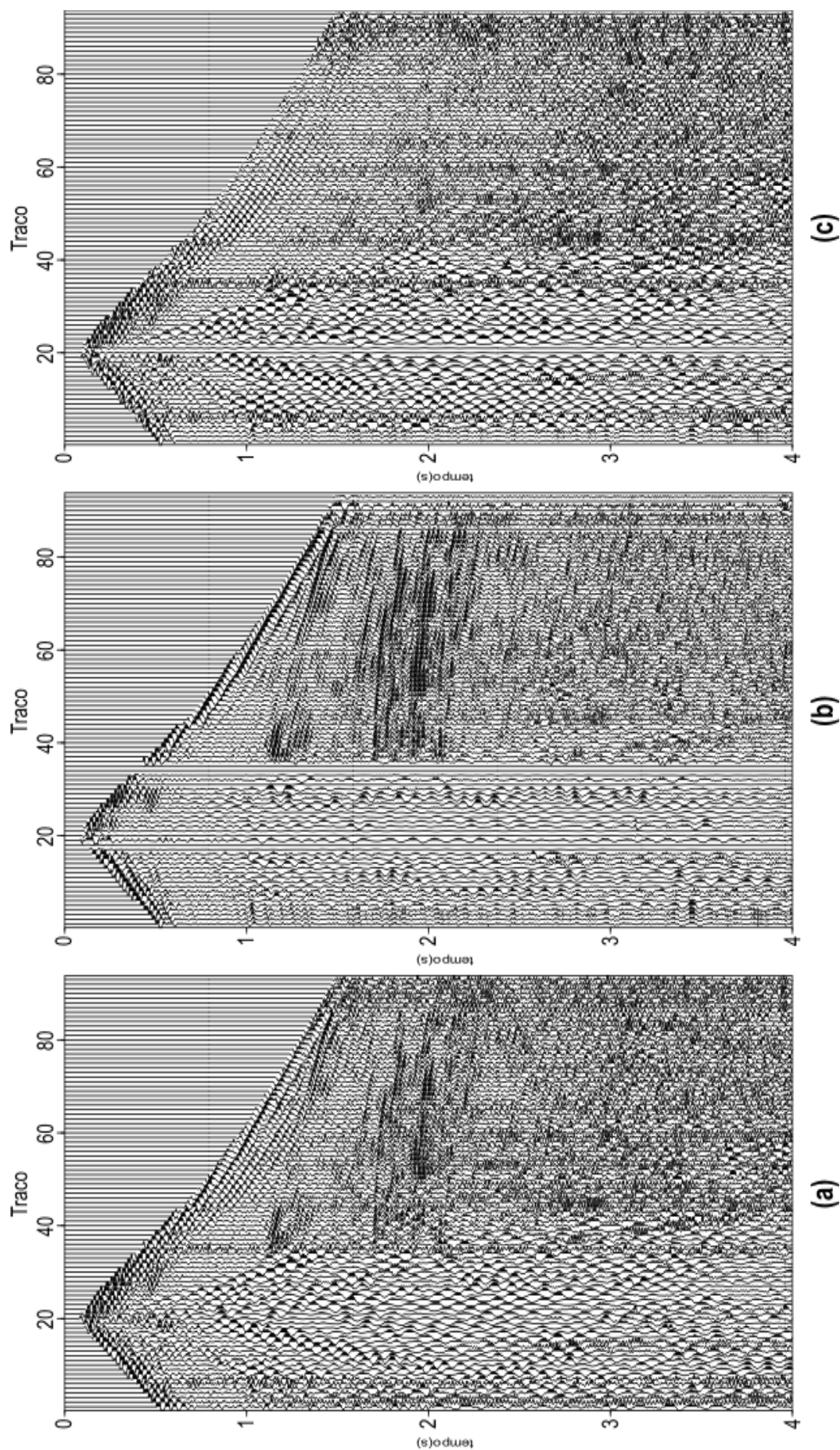


Figura 3.20: Resultado da Filtragem SVD usando o operador cruz após a aplicação da correção NMO inverso nos sismogramas da figura 3.19 a) Dado original b) Dado filtrado SVD com a primeira autoimagem (sinal) e c) demais autoimagens da decomposição SVD.

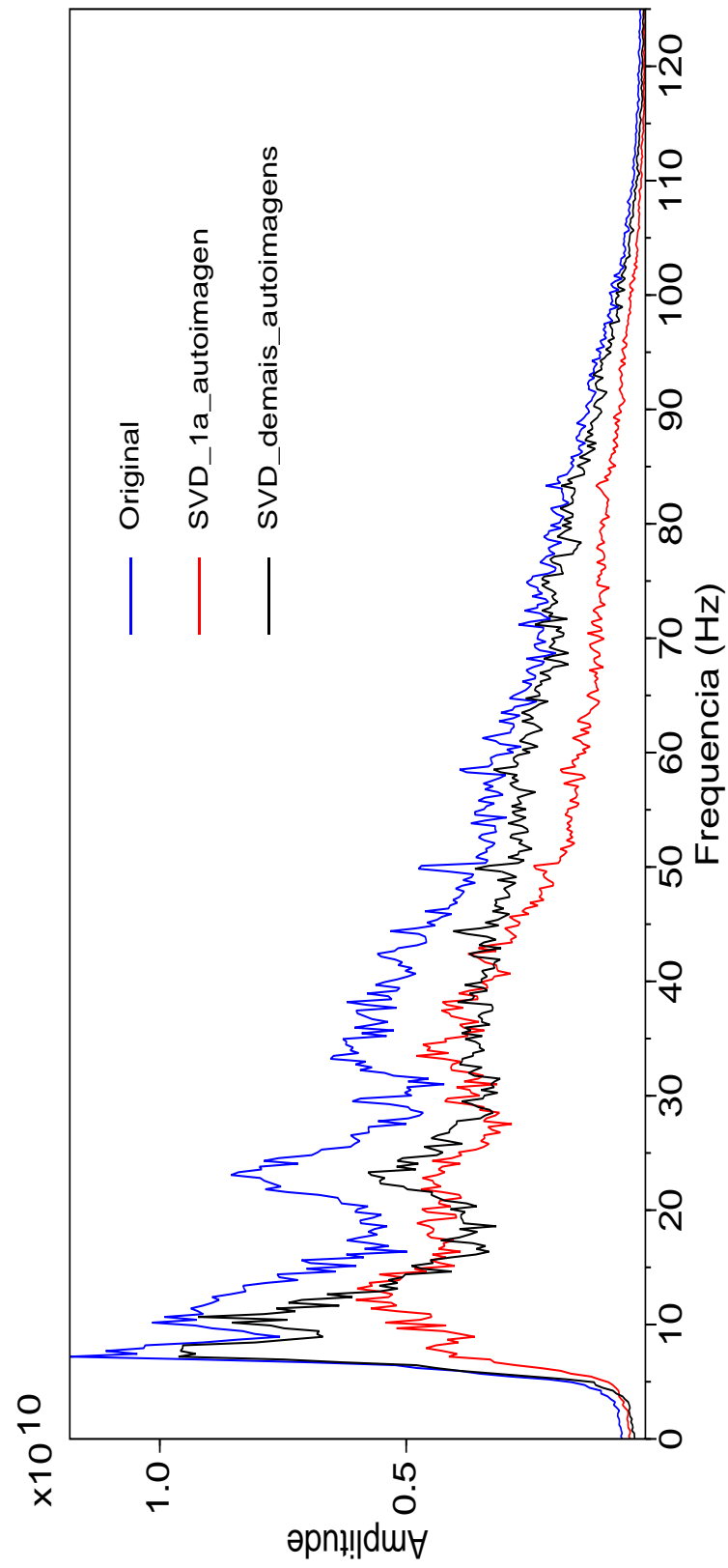


Figura 3.21: Espectro de amplitude médio dos sismogramas representados na figura 3.20.

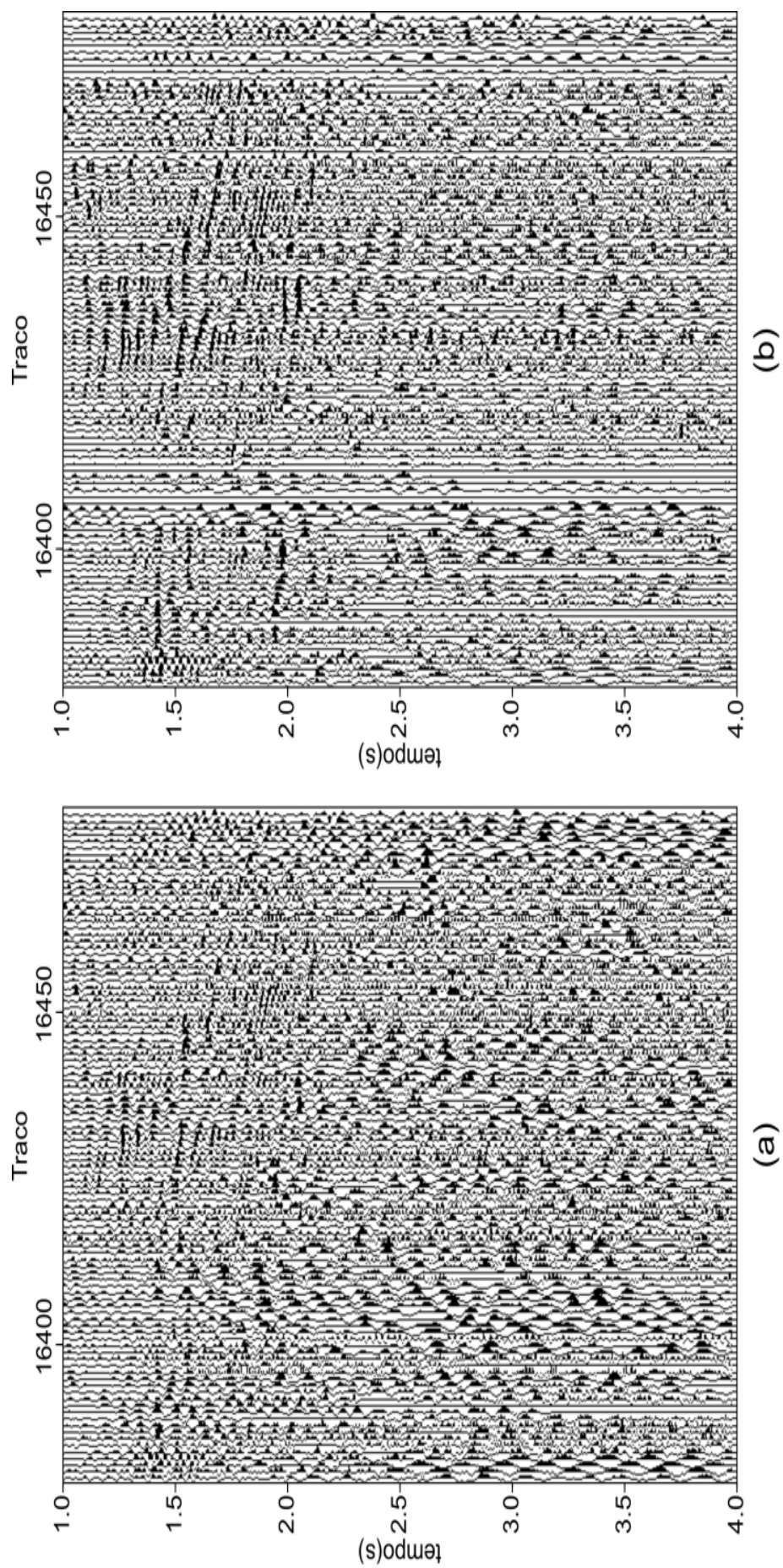


Figura 3.22: Painel de *offset* comum original em a) e depois da aplicação da filtragem SVD usando o operador em cruz em b).

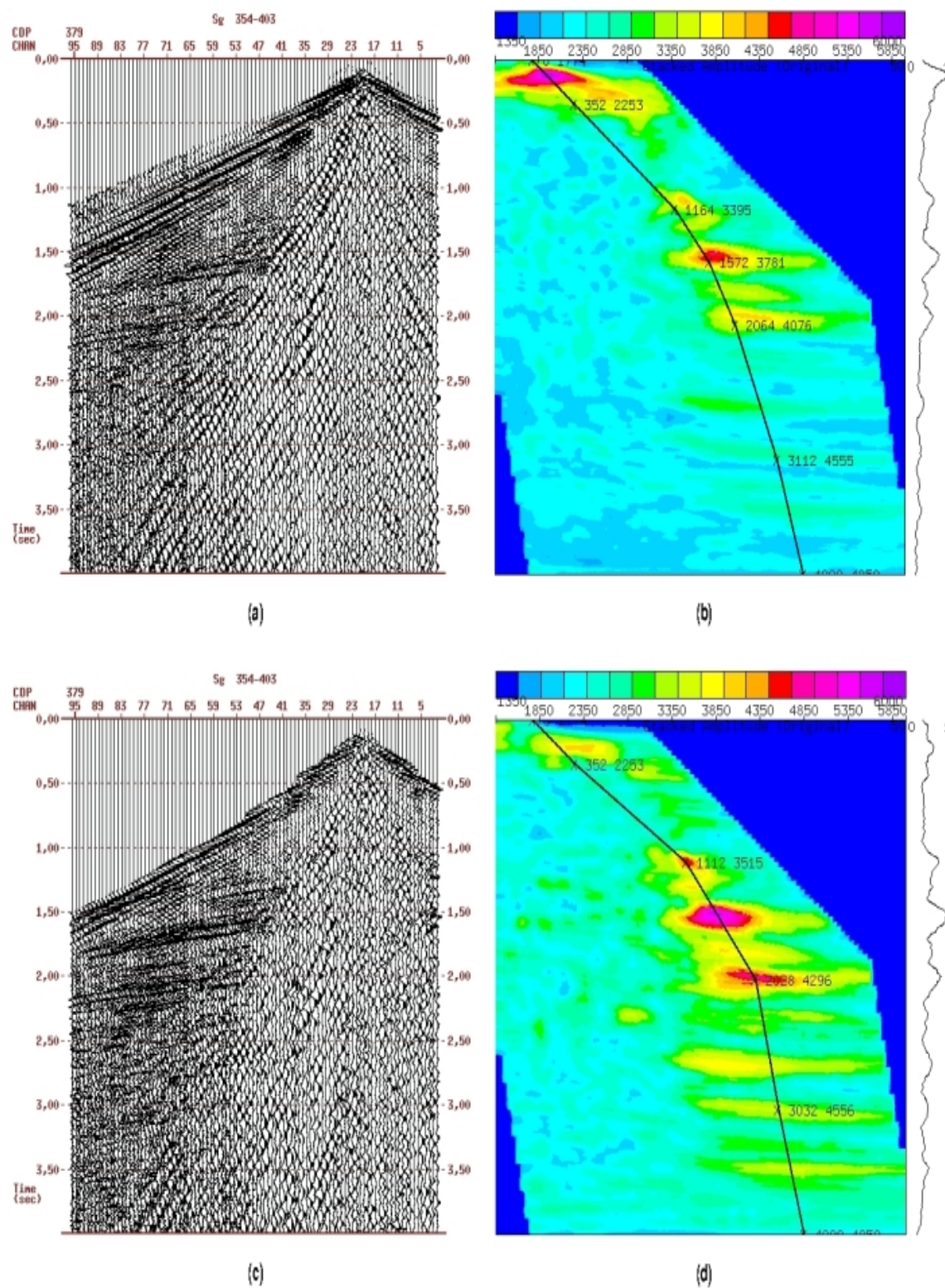


Figura 3.23: Análise de velocidades de um "supergather" formado por 50 CMPs, dado original em a) dado após a filtragem SVD usando o operador cruz em c) e análise de velocidades em b) e d)

Operador cruz *versus* Operador convencional

Nesta seção nós comparamos o desempenho dos operadores usados na filtragem SVD, o operador cruz e o operador convencional quando é utilizado em duas etapas. Consideramos dados corrigidos de NMO.

Na figura 3.25 mostramos o dado original corrigido de normal move out (NMO), o dado filtrado com o método SVD operador convencional janela móvel de três traços no domínio do tiro (3.25b) e o dado filtrado SVD operador convencional janela móvel de três traços em duas etapas; primeiro no domínio do tiro comum e logo no domínio do offset comum. Aplicamos nos resultados da figura 3.25 a correção do sobretempo normal inverso (figura 3.26)

A figura 3.27 apresenta os resultados da filtragem SVD usando o operador convencional janela móvel de três traços realizada em duas etapas nos domínios do tiro e receptor comum (3.27a), e da filtragem SVD usando o operador cruz que utiliza as informações dos traços na área circunvizinha, no caso coleta quatro traços vizinhos conforme a figura 3.1b sendo por isso denominado operador cruz. A figura 3.28 apresenta os sismogramas após a correção de sobretempo normal inverso da figura 3.27. Também, geramos os seus espectros de amplitude (3.29). Observe que ambas filtrações SVD mostram resultados satisfatórios. Ainda que no intervalo de tempo de 2 a 4s a contaminação por ruído aleatório é menor para o caso da filtragem SVD convencional em duas etapas. A curva do espectro de amplitude do dado filtrado SVD da forma convencional em duas etapas mostra maior suavização da banda de frequência baixa do sinal, entre 0 e 10Hz, quando comparado com o espectro associado ao dado filtrado SVD com o operador cruz.

A figura 3.30 apresenta a seção sísmica original da Bacia de Tacutu e as seções após as filtrações SVD usando o operador convencional janela móvel de três traços em duas etapas e o operador cruz. As seções empilhadas mostram uma significativa atenuação do ruído coerente quando utilizamos a técnica SVD com ambos operadores em relação à seção original. A segunda seção (3.30b) está menos corrompida pelo ruído, havendo uma melhor minimização do *groundroll*. Também observa-se uma melhor definição dos refletores no intervalo de tempo 2 a 4s em relação à seção obtida empregando o operador em cruz (3.30c), isto pode ser claramente observado quando comparamos os resultados mostrados na figura 3.31, que apresenta um detalhe da figura 3.30. Em ambos casos conseguimos resultados satisfatórios.

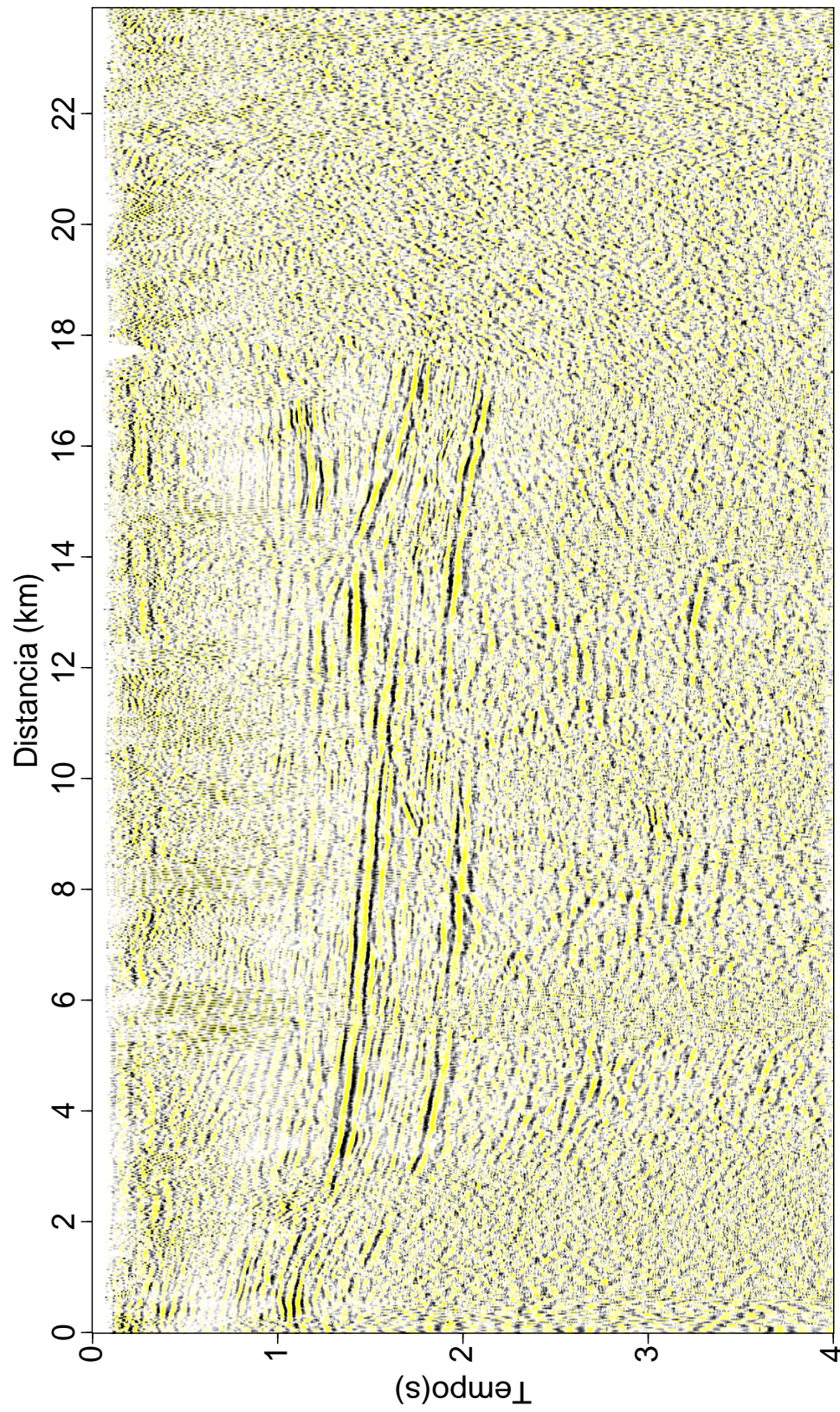


Figura 3.24: Seção sísmica da bacia do Tacutu após a aplicação da filtragem SVD (operador em cruz), linha 204-RL-242

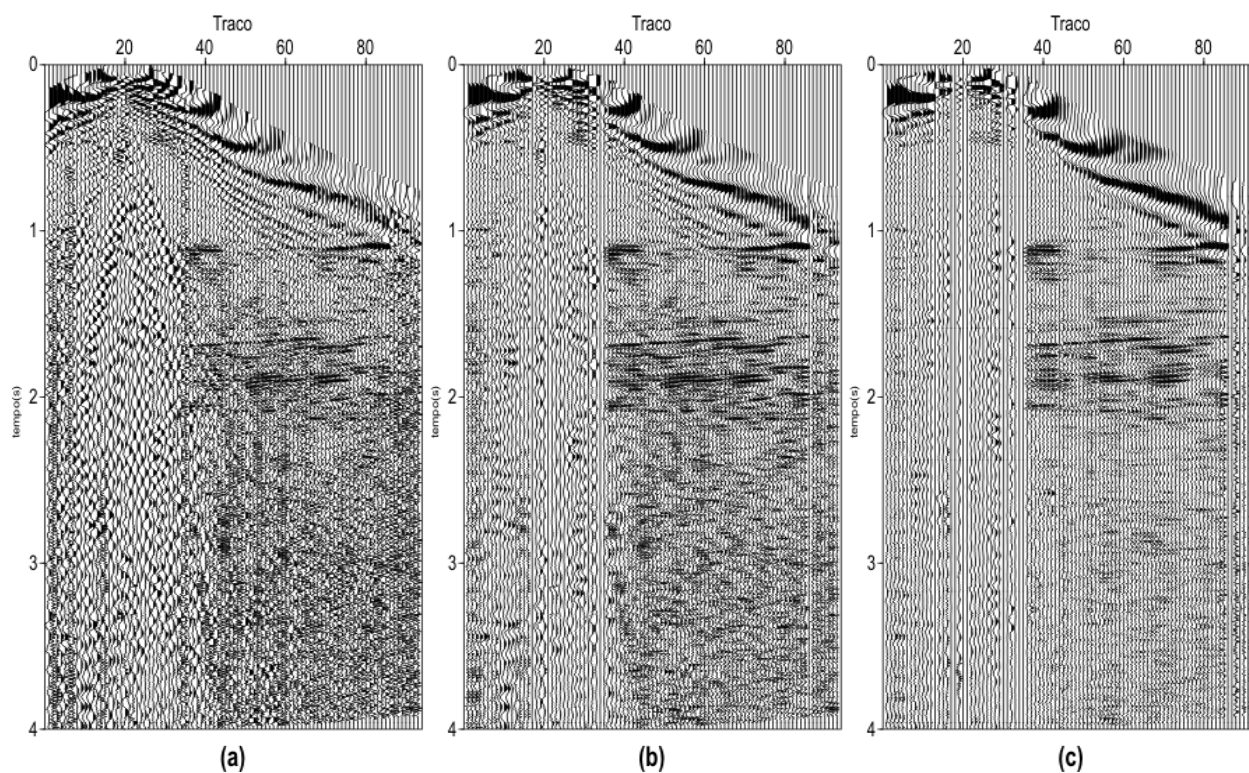


Figura 3.25: Comparação da filtragem SVD usando o operador janela de três traços aplicada em famílias de traço comum corrigidas de NMO. Dado original em a) dado após a aplicação da filtragem SVD em família de tiro comum em b) dado após a aplicação da filtragem SVD em duas etapas em duas famílias de traço comum diferentes; primeiro em família de tiro comum e logo em família de *offset* comum em c).

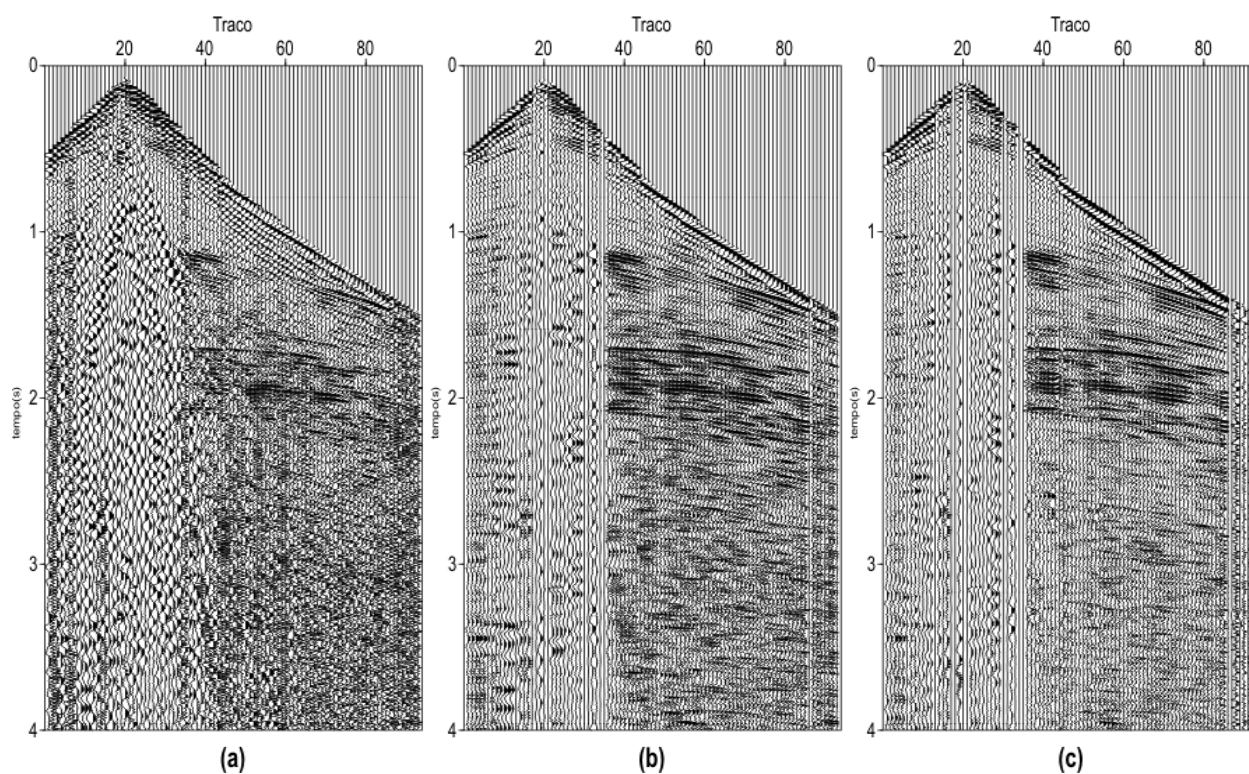


Figura 3.26: Comparação da filtragem SVD usando o operador janela de três traços aplicada em famílias de traço comum corrigidas de NMO inverso. Dado original em a) dado após a aplicação da filtragem SVD em família de tiro comum em b) dado após a aplicação da filtragem SVD em duas etapas em duas famílias de traço comum diferentes; primeiro em família de tiro comum e logo em família de *offset* comum em c).

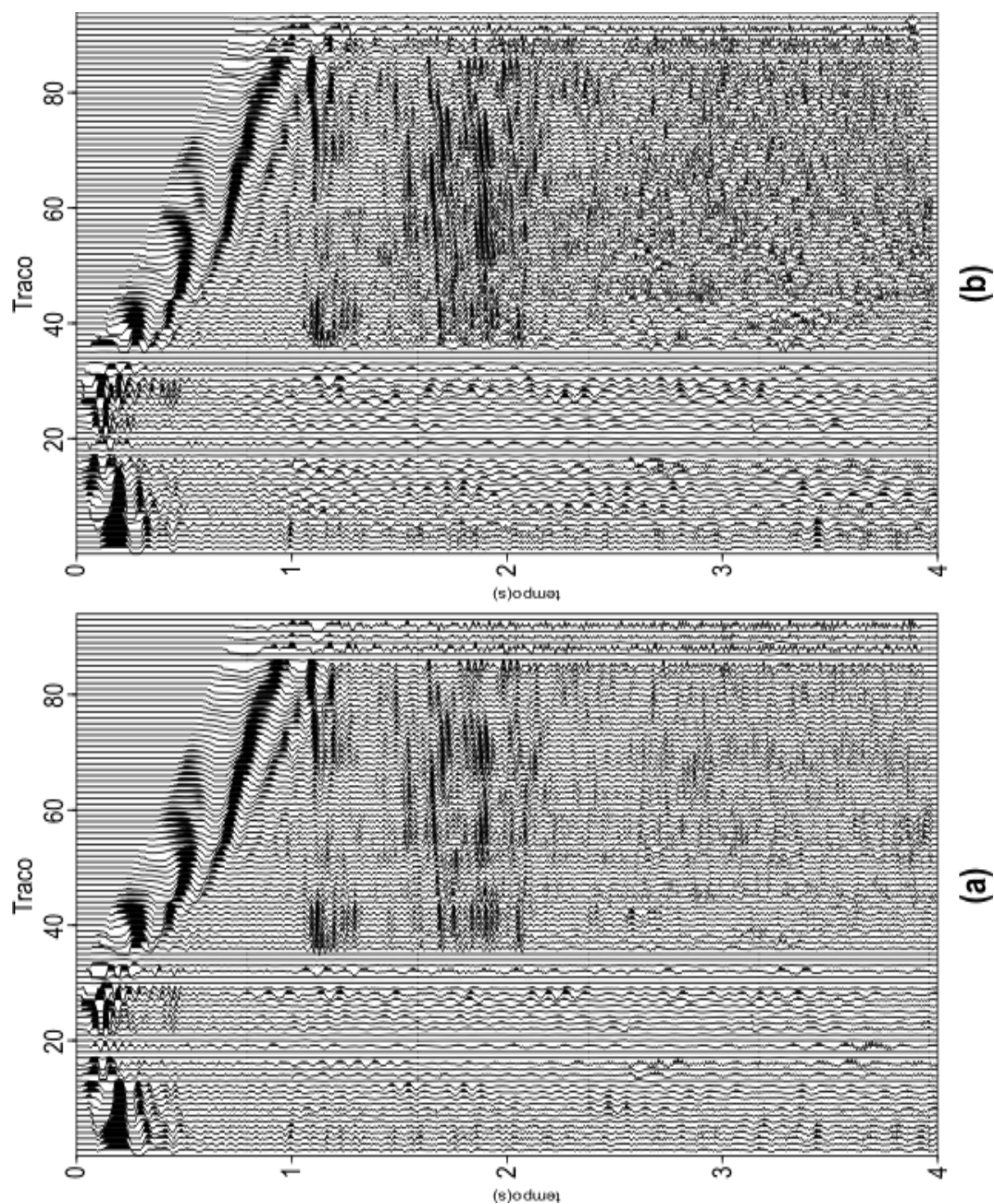


Figura 3.27: Resultados obtidos após a aplicação da filtragem SVD em famílias de traço comum corrigidas de NMO usando os dois operadores. Dado após a aplicação da filtragem SVD em duas etapas em duas famílias de traço comum diferentes; primeiro em família de tiro comum e logo em família de *offset* comum usando o operador janela de três traços a) dado após a aplicação da filtragem SVD usando o operador em cruz que utiliza traços de dois domínios: ponto médio comum e tiro comum em b).

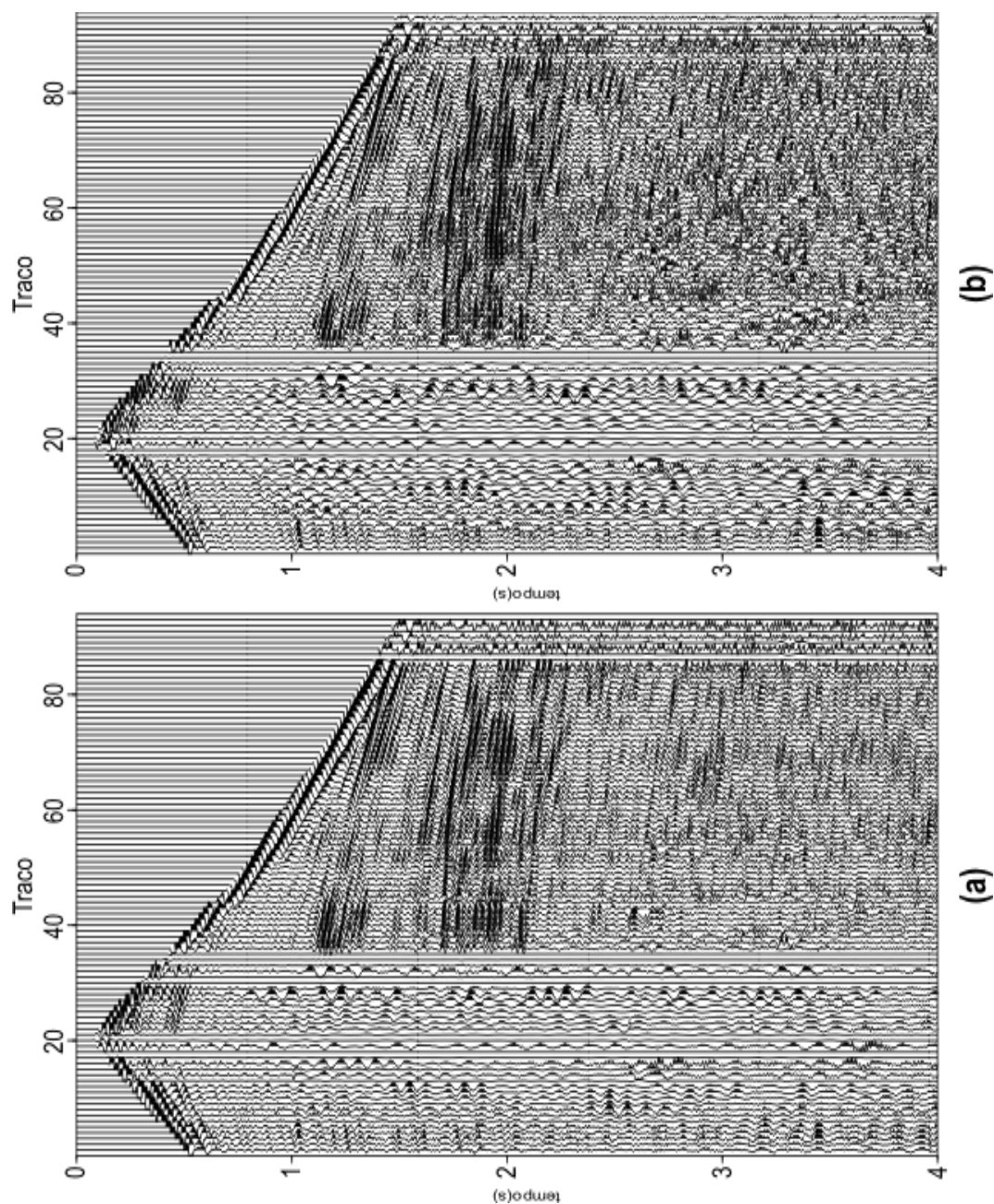


Figura 3.28: Resultados obtidos após a aplicação da filtragem SVD em famílias de traço comum corrigidas de NMO inverso usando os dois operadores. Dado após a aplicação da filtragem SVD em duas etapas em duas famílias de traço comum diferentes; primeiro em família de tiro comum e logo em família de *offset* comum usando o operador janela de três traços a) dado após a aplicação da filtragem SVD usando o operador em cruz que utiliza traços de dois domínios: ponto médio comum e tiro comum b).

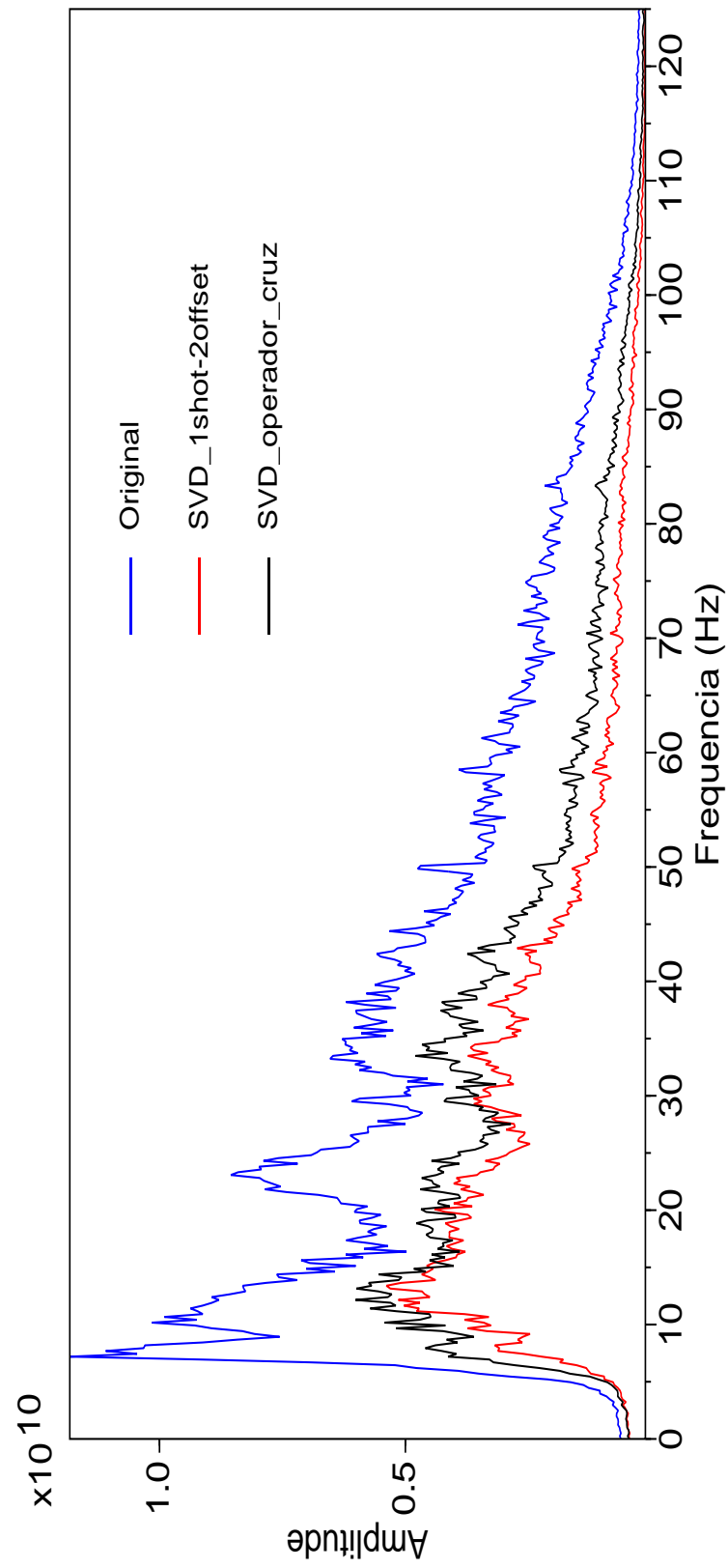


Figura 3.29: Espectro de amplitude médio dos sismogramas representados na figura 3.28

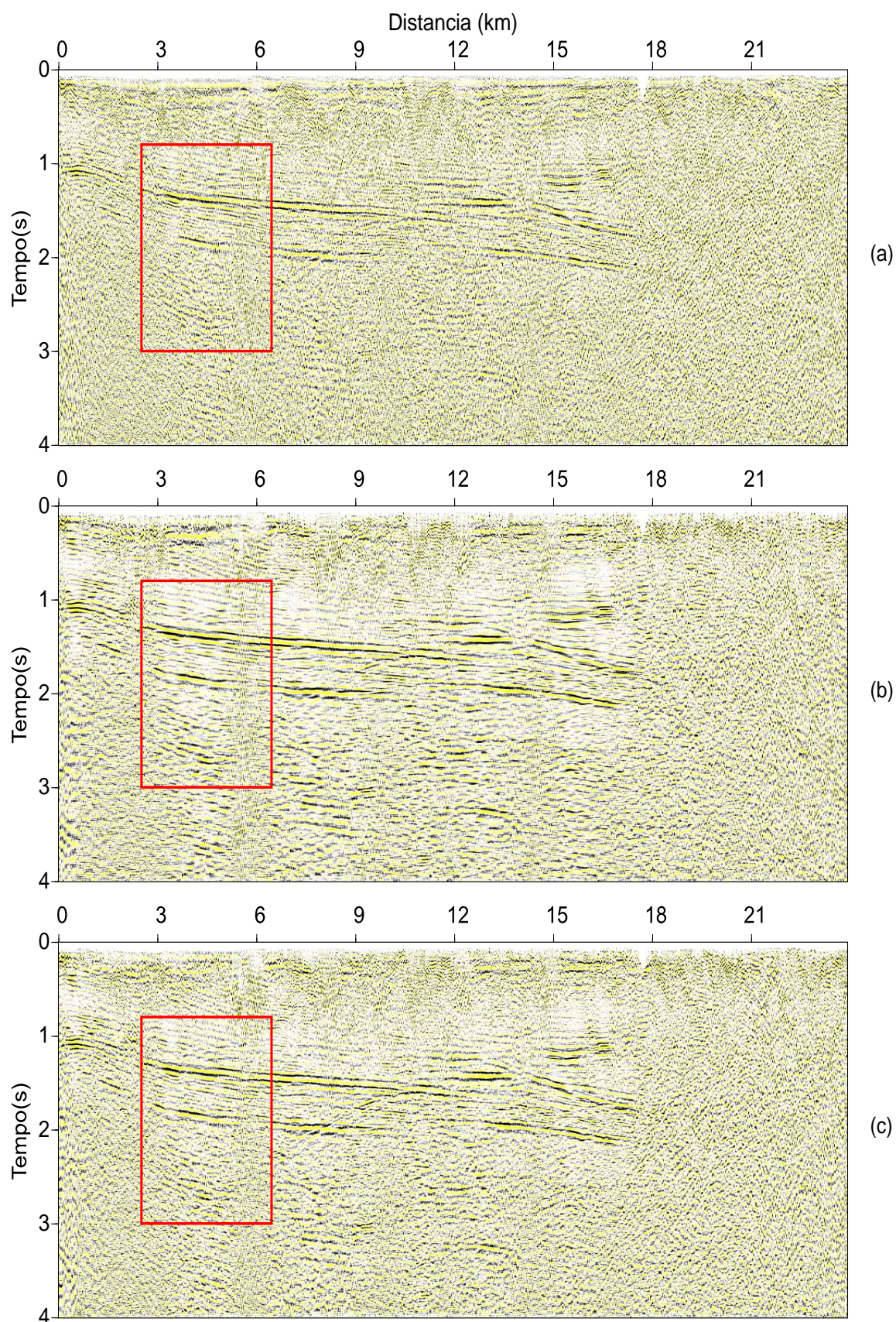


Figura 3.30: Seções empilhadas. Dado original (a), dado filtrado SVD usando o operador janela de três traços em duas etapas em duas famílias de traço comum diferentes; primeiro em família de tiro comum e logo em família de *offset* comum em (b) e dado filtrado SVD usando o operador cruz (c).

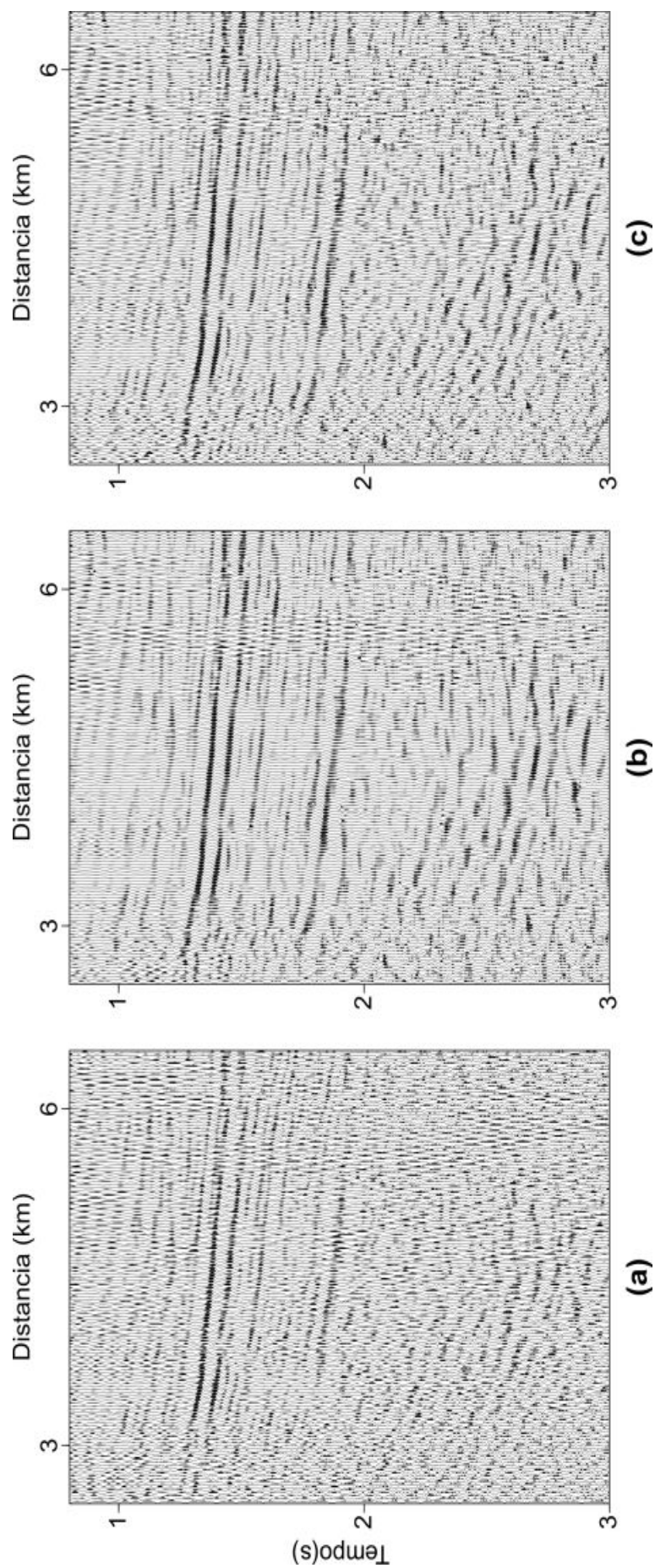


Figura 3.31: Detalhe da seção original em (a), e após das filtragem SVD usando o operador janela de três traços em duas etapas em duas famílias de traço comum diferentes; primeiro em família de tiro comum e logo em família de *offset* comum em (b) e o operador cruz em (c).

4

Conclusões

As aplicações realizadas neste trabalho mostraram a eficácia da técnica SVD como método de filtragem de coerência, A filtragem SVD possibilita o aumento da razão Sinal/Ruído, fator limitante na resolução dos espectros de velocidade e na análise da velocidade, além permite reforçar a coerência dos eventos nas seções sísmicas.

Inicialmente utilizamos a filtragem SVD da maneira convencional; sobre uma mesma família de traço comum corrigida de NMO usando uma janela móvel de três traços. O filtro demonstra um melhor desempenho quando é aplicado no domínio de tiro comum, obtendo resultados satisfatórios na melhora dos espectros de velocidade e na seção empilhada final.

No segundo instante aplicamos a mesma metodologia de duas formas.

- (i) O filtro foi aplicado de maneira iterativa no dado organizado em família de tiro comum.
- (ii) O filtro foi aplicado em duas etapas ao dado organizado em painéis de afastamento comum e tiro comum.

No primeiro caso não houve grande diferença com os resultados obtidos anteriormente, no segundo caso os resultados na seção empilhada mostraram uma maior redução nos níveis dos ruído aleatório e coerente e melhor definição lateral dos eventos a tempos maiores.

Por último realizamos a filtragem SVD utilizando o operador em cruz que trabalha na área circunvizinha do traço alvo. Nos resultados obtidos observamos a efetividade do operador no aumento da resolução dos espectros de velocidade e da qualidade da seção empilhada final.

Diante os resultados obtidos recomendamos a aplicação da filtragem SVD em duas etapas

nos domínios do tiro e *offset* comum. Onde se mostro mais efetiva. Porém de modo geral a aplicação da filtragem SVD em qualquer caso se apresenta bastante efetiva

Agradecimentos

Acima de tudo, agradeço a Deus

Agradeço ao Curso de Pós-graduação em Geofísica da UFBA, ao Centro de Pesquisa em Geofísica e Geologia da UFBA (CPGG/UFBA), e aos órgãos financiadores (CNPQ/INCT-GP) e a CAPES pela bolsa de mestrado.

Ao Prof. Dr. Amin Bassrei, pela sua preocupação comigo no começo deste curso.

Ao meu orientador Prof. Dr. Milton J. Porsani pela paciência, incentivo, apoio e atenção mostrado sempre no desenvolvimento deste trabalho.

Ao Geofísico Michelângelo Gomes pela sua amizade e a ajuda prestada na solução das dúvidas apresentadas durante a realização deste trabalho.

A todos os colegas do CPGG/UFBA pela receptividade e amizade, em especial a Ibrahim Zoukaneri.

Aos professores do curso de Pós-graduação da UFBA pelo muito que me ensinaram.

Ao meu colega e amigo Henry Ochoa principal responsável da minha vinda ao Brasil, obrigado pela motivação

À minha irmã Milena, para quem também dedico este trabalho, por todo o seu apoio e carinho mesmo na distância.

À todas as pessoas que tive o prazer de conhecer, durante estes dois anos de estadia em Salvador.

Referências Bibliográficas

- Bekara, M. e Baan, M. V. (2007) Local singular value decomposition for signal enhancement of seismic data, *Geophysics*, **72**:V59–V65.
- Chiu, S. K. e Howell, J. E. (2008) Attenuation of coherent noise using localized-adaptive eigenimage filter, In: *Expanded Abstract, 78th Annual SEG Meeting*, vol. 1, pp. 2541–2545, SEG.
- Freire, S. L. M. (1986) Aplicações do método de decomposição em valores singulares no processamento de dados sísmicos, Tese de doutorado, Universidade Federal da Bahia, Salvador, Brasil.
- Freire, S. L. M. e Ulrych, T. J. (1988) Application of singular value decomposition to vertical seismic profiling, *Geophysics*, **53**:778–785.
- Golub, G. H. e Van Loan, C. F. (1996) *Matrix Computations*, Johns Hopkins University Press, Baltimore.
- Hubral, P. e Krey, T. (1980) Interval velocities from seismic reflection time measurements, Society of Exploration Geophysicists.
- Karsli, H. e Bayrak, Y. (2008) Ground roll attenuation based on wiener filtering and benefits of time-frequency imaging, *The leading Edge*, **27**:206–209.
- Kendall, R.; Jin, S. e Ronen, S. (2005) An svd-polarization filter for ground roll attenuation on multicomponent data, In: *Expanded Abstract, 77th Annual SEG Meeting*, vol. 1, pp. 928–932, SEG.
- Lanczos, C. (1961) *Linear Differential Operators*, B. Van Nostrand Co. Ind.
- Levin, F. K. (1971) Seismic data procesing, *Geophysics*, **36**:510–516.
- Mayne, W. H. (1962) Common reflection point horizontal data stacking techniques, *Geophysics*, **27**:927–938.
- Neidell, N. S. e Taner, M. T. (1971) Semblance and other coherency measures for multichannel data, *Geophysics*, **34**:482–497.
- Parasnis, D. S. (1997) *Principles of applied geophysics*, vol. 5, Chapman and Hall.

- Porsani, M. J.; Silva, M. G.; Melo, P. M. e Ursin, B. (2009) Ground-roll attenuation based on svd filtering, In: *Expanded Abstract, 79th Annual SEG Meeting*, vol. 1, pp. 3381–3385, SEG.
- Porsani, M. J.; Silva, M. G.; Melo, P. M. e Ursin, B. (2010a) An adaptive local-slope svd filtering approach to enhance events on seismic sections, In: *Expanded Abstract, 80th Annual SEG Meeting*, vol. 1, pp. 3717–3722, SEG.
- Porsani, M. J.; Artola, F. A. V.; Silva, M. G. e Ursin, B. (2010b) Filtragem svd aplicada à melhoria do rastreamento de horizontes sísmicos, *Revista Brasileira de Geofísica*, **28**:473–480.
- Taner, M. M. e Koehler, F. (1969) Velocity spectra-digital computer derivation and applications of velocity functions, *Geophysics*, **39**:859–881.
- Tyapkin, Y. K.; Marmalyevskyy, N. Y. e Gornyak, Z. V. (2003) Source-generated noise attenuation using the singular valued decomposition, In: *Expanded Abstract, 75th Annual SEG Meeting*, vol. 1, pp. 2044–2047, SEG.
- Yilmaz, O. (2003) *Seismic data processing*, Society of Exploration Geophysicists, Tulsa, Oklahoma.