



## Atenuação do *ground-roll* utilizando filtragem adaptativa SVD no domínio da frequência

Rafaela Reis Lima e Milton J. Porsani, CPGG/IGEO/UFBA e INCT-GP/CNPq/Brasil

Copyright 2013, SBGf - Sociedade Brasileira de Geofísica.

This paper was prepared for presentation at the 13<sup>th</sup> International Congress of the Brazilian Geophysical Society, held in Rio de Janeiro, Brazil, August 26-29, 2013.

Contents of this paper were reviewed by the Technical Committee of the 13<sup>th</sup> International Congress of The Brazilian Geophysical Society and do not necessarily represent any position of the SBGf, its officers or members. Electronic reproduction or storage of any part of this paper for commercial purposes without the written consent of The Brazilian Geophysical Society is prohibited.

### Resumo

Neste trabalho utilizamos o método de filtragem adaptativa SVD (*Singular value decomposition*) no domínio da frequência, para atenuação do *ground-roll*. Inicialmente a família de traços de ponto de tiro comum é levada do domínio TX para domínio FX através da transformada de Fourier de cada traço sísmico. A filtragem é realizada na banda de frequências baixas dominada pelo *ground-roll*. Uma janela deslizante de  $L$  frequências é decomposta utilizando o método SVD e o espectro de frequências, correspondente à frequência central da primeira autoimagem, é subtraído do espectro original. Desta forma as amplitudes altas do espectro, na banda de frequências do *ground-roll*, são atenuadas sem serem aniquiladas. Este procedimento pode ser repetido um certo número de vezes. O método de filtragem proposto possui portanto dois parâmetros, o número de frequências ( $L$ ), que representa a largura da janela deslizante, e o número de iterações ( $N_{iter}$ ). O método foi aplicado sobre dados reais de uma linha sísmica terrestre da Bacia do Tacutu. Os resultados obtidos demonstram a eficácia do método na atenuação do *ground-roll* e a melhoria da continuidade das reflexões. As seções sísmicas empilhadas exibem melhor continuidade nas reflexões quando comparadas com a seção empilhada sem nenhuma filtragem.

### Introdução

A atenuação do ruído conhecido como *ground-roll* representa uma etapa importante do processamento de dados sísmicos terrestres. Nesses dados, há sempre a presença do *ground-roll* que é um ruído associado às ondas superficiais e tem como características a alta amplitude, baixa frequência e baixa velocidade. Ele aparece ocupando a região central dos sismogramas, sobrepondo-se e mascarando as reflexões ali presentes.

A transformada discreta de Fourier é um método de análise de sinais bastante utilizado no processamento de dados geofísicos. Através desse método, decompõe-se o sinal em somas de funções harmônicas complexas e passa-se a analisar o sinal no domínio da frequência. Analisa-se o espectro de frequências e pode-se então preservar ou rejeitar as frequências no interior de uma banda de interesse. A transformada inversa de Fourier restitui o sinal

filtrado no domínio do tempo (ou espaço).

Outro método de filtragem bastante utilizado no processamento de dados sísmicos é a filtragem SVD (*Singular value decomposition*). Entre suas várias aplicações destaca-se sua grande utilidade no reforço da coerência espacial dos dados sísmicos, atenuando o ruído e melhorando a continuidade e visibilidade das reflexões. A matriz dos dados sísmicos é decomposta em somatórios de autoimagens ponderadas pelos respectivos valores singulares. Nota-se que as primeiras autoimagens carregam a maior parte da informações coerentes necessárias para reconstrução do sinal original (Freire, 1986, Porsani et al., 2009)

A filtragem SVD utilizada por Porsani et al.(2009), realiza a decomposição adaptativa SVD de um subconjunto de traços extraídos de uma linha sísmica. Nesse subconjunto de traços, apenas o traço central é restituído parcialmente e representará o traço filtrado. Dessa forma as reflexões são realçadas e o ruído atenuado, pois está associado às últimas autoimagens que são desprezadas. No presente trabalho aplicamos aquele procedimento no domínio da frequência dentro da banda de frequência do *ground-roll*. Desta forma podemos ter um maior controle do sinal que pretendemos preservar ou rejeitar com a filtragem SVD.

### Transformada Discreta de Fourier

Considere uma sequência  $\{a_m = 0, a_1, \dots, a_{N-1}\}$  que representa os  $N$  valores do sinal  $a(t)$ , cada elemento do sinal obtido no ponto  $m\Delta t$ . Esse sinal pode ser obtido por meio da combinação linear de funções harmônicas complexas,

$$\{g_n(t)\} = \{\exp(iw_0nt)\} = \{\cos(w_0nt) + isen(w_0nt)\} \quad (1)$$

com  $w_0 = \frac{2\pi}{T}$ . O que desejamos é obter a representação do sinal  $a(t)$ , através da combinação linear das funções harmônicas dadas pela equação (1). Obtemos então um sistema linear de equações, determinado e complexo, de ordem  $N$ ,

$$\mathbf{W}\tilde{\mathbf{a}} = \mathbf{a} \quad (2)$$

Os elementos da matriz  $\mathbf{W}$  são dados por,

$$g_{mn} = \exp(i \frac{2\pi}{N\Delta t} nm\Delta t) = w^{mn} \quad (3)$$

Onde os elementos do vetor  $\tilde{\mathbf{a}}=(\tilde{a}_0, \dots, \tilde{a}_N)^T$  representam os coeficientes da Transformada Discreta de Fourier tomada sobre o vetor  $\mathbf{a}=(a_0, \dots, a_N)^T$ , ou equivalentemente,

$$a_n = \sum_{m=0}^{N-1} \tilde{a}_m w^{mn} \quad (4)$$

O índice  $n$  corresponde às colunas da matriz  $\mathbf{W}$ , e está relacionado com as frequências da função harmônica e o índice  $m$  corresponde às linhas daquela matriz e está relacionado com a variável tempo (ou espaço). Premultiplicando a equação (1) por sua matriz hermitiana, transposta conjugada,  $\mathbf{W}^H$ , obtemos os coeficientes da transformada direta de Fourier,

$$\tilde{a}_n = \frac{1}{N} \sum_{m=0}^{N-1} a_m w^{-mn} \quad (5)$$

As equações (4) e (5) fornecem os coeficientes da Transformada Discreta de Fourier, inversa e direta, respectivamente.

### Filtragem SVD

Considere a matriz dos dados sísmicos  $\mathbf{X}$ , ( $M \times N$ ), com  $N$  representando o número de traços e  $M$  o número de amostras. Cada elemento  $x_{i,j}$  dessa matriz, consiste na amplitude captada pelo receptor  $j$  em um instante  $i$ . O método SVD, na forma reduzida, decompõe a matriz  $\mathbf{X}$

$$\mathbf{X} = \mathbf{U}\Sigma\mathbf{V}^T \quad (6)$$

onde  $\mathbf{U}$  ( $M \times N$ ),  $\mathbf{V}$  ( $N \times N$ ) ( $\mathbf{U}$  e  $\mathbf{V}^T$  são matrizes ortogonais,  $\mathbf{U}^T\mathbf{U} = \mathbf{I}$  e  $\mathbf{V}^T\mathbf{V} = \mathbf{I}$ ).  $\mathbf{U}$  e  $\mathbf{V}$  são as matrizes dos autovetores dos espaços das observações e dos parâmetros, respectivamente.  $\Sigma$ , ( $N \times N$ ), é uma matriz diagonal formada pelos valores singulares,  $\sigma_1 > \sigma_2 > \dots > \sigma_N > 0$ .

Utilizando a decomposição SVD, podemos representar a matriz  $\mathbf{X}$  como soma de matrizes ortogonais, denominadas de autoimagens da matriz  $\mathbf{X}$ ,

$$\mathbf{X} = \sum_{i=1}^N \sigma_i \mathbf{u}_i \mathbf{v}_i^T \quad (7)$$

As primeiras autoimagens guardam a maior coerência espacial e correlação entre cada traço, desse modo elas são responsáveis pela reconstituição dos eventos predominantemente horizontais ou sub-horizontais associadas as reflexões presentes nos sismogramas. Enquanto que nas últimas autoimagens estão contidas as informações não coerentes associadas aos ruídos.

### Filtragem adaptativa SVD no domínio do tempo

A filtragem SVD é realizada numa seção sísmica, tomando-se uma janela móvel de tamanho  $L$  que contém um determinado número de traços sísmicos imediatamente vizinhos a um traço central, faz-se a decomposição SVD desse subconjunto de traços e depois é realizada a restituição parcial do traço central  $\tilde{d}(t, x_j)$  utilizando seus primeiros valores singulares, através da equação 7, obtemos

$$\tilde{d}(t, x_j) = \sum_{i=1}^k \sigma_i u_i(t) v_i(x_j) \quad (8)$$

O traço central estará filtrado e armazenando maior coerência e correlação com os traços vizinhos.

### Filtragem adaptativa SVD atuando no domínio da frequência

Nos dados sísmicos terrestres se percebe que o espectro do ruído *ground-roll* domina a banda de mais baixa frequência (0 – 10Hz), enquanto o sinal ocupa a porção de frequências maiores.

Para a filtragem SVD ser realizada no domínio da frequência, primeiro passamos o dado sísmico do domínio TX para o domínio FX através da Transformada Discreta Fourier direta. A filtragem é realizada de forma adaptativa dentro da banda de frequências do ruído que se deseja atenuar, utilizando uma janela móvel de dimensão  $L \times N_x$ ,  $N_x$  representa o número de traços do sismograma original. Para cada grupo de  $L$  frequências do espectro, o espectro correspondentes a  $L$  frequências é colecionado em uma matriz auxiliar  $\mathbf{Y}$ , ( $L \times N_x$ ). Procedese à decomposição SVD da matriz auxiliar  $\mathbf{Y}$ . O espectro filtrado, correspondente à frequência central da janela, é obtido subtraindo-se do espectro original o espectro correspondente à linha central da primeira autoimagem associada à matriz  $\mathbf{Y}$ . Desta forma as amplitudes altas, na banda de frequências do *ground-roll*, são atenuadas sem serem aniquiladas. Este procedimento pode ser repetido um certo número de vezes. O método de filtragem proposto possui portanto dois parâmetros, o número de frequências ( $L$ ), que representa a largura da janela deslizante, e o número de iterações ( $N_{iter}$ ).

Depois de concluída a filtragem SVD no domínio da frequência, retornamos do domínio FX para o domínio TX através da Transformada Discreta de Fourier inversa.

### Resultados Numéricos

A filtragem SVD no domínio da frequência foi aplicada à um dado sísmico terrestre, muito contaminado pelo *ground-roll*. Trata-se da linha sísmica de reflexão 50-RL-90 da Bacia Sedimentar do Tacutu, obtida com arranjo do tipo *split-spread* simétrico, intervalo de amostragem de 4ms, com 1001 amostras e cada tiro com 96 traços.

Inicialmente retiramos um tiro da linha sísmica para estudo mais detalhado. Observamos que o mesmo encontra-se bastante contaminado pelo *ground-roll*, que se sobrepõe aos eventos de interesse, como pode ser visto na Figura 3.

O próximo passo foi avaliar o espectro de amplitude médio desse dado e ver como o *ground-roll* está concentrado nas baixas frequências do espectro, com alta amplitude. Essa etapa auxilia na determinação da banda de frequência, para eliminação do ruído, a faixa escolhida foi de 2-15Hz.

Posteriormente aplicamos o método ao dado, variando-se os parâmetros  $L$  e  $N_{iter}$  e observarmos o comportamento da curva do espectro de amplitude médio, conforme pode ser visto na Figura 1 e Figura 2, respectivamente.

Quando mantemos  $N_{iter}$  constante, mas variamos o tamanho da janela  $L$  que coleta um subconjunto de traços, vimos que quanto menor o valor de  $L$  mais severa é a filtragem, o que pode eliminar bastante o *ground-roll*, mas pode jogar fora também as reflexões, eventos esses que desejamos preservar ao máximo.

Quando mantemos  $L$  constante, mas variamos o número de iterações  $N_{iter}$  que refina a primeira autoimagem, vimos

que quanto maior o número de iterações realizadas mais severa é a filtragem.

A Figura 3 mostra um tiro original extraído da linha sísmica e as Figuras 4a e 5a mostram o efeito da filtragem aplicado a um tiro da seção sísmica, para um determinado  $L$  e  $N_{iter}$  escolhido, respectivamente, além do resíduo entre o tiro original e o respectivo tiro filtrado, Figuras 4b e 5b.

Gerou-se para cada valor do parâmetro  $L$  e  $N_{iter}$  uma seção empilhada. Comparamos essas seções com a seção empilhada sem nenhuma filtragem e escolhemos a seção obtida com o parmetro  $L = 25$  Figura (6b) e a seção com o parâmetro  $N_{iter} = 5$  Figura 6c, pois foram as que apresentaram melhores resultados. A Figura 7 mostra uma janela que detalha das seções empilhadas. Nas figuras 7b e 7c podemos ver que o método realçou as reflexões, exibiu eventos antes encobertos pelo ruído e melhorou bastante a continuidade lateral dos eventos.

**Conclusões**

A filtragem SVD no domínio da frequência, se mostrou um método eficaz para filtragem do *ground-roll*, pois nesse domínio podemos atenuar o espectro correspondente às baixas frequências desse tipo de ruído. Esse tipo de filtragem atenua fortemente os eventos verticais e sub-verticais correspondentes ao *ground-roll* e colocam em evidência os eventos horizontais e sub-horizontais associados às reflexões que aparecerem onde antes estavam contaminadas pelos ruídos. O uso da filtragem adaptativa SVD no domínio da frequência se mostra atrativo uma vez que possibilita o uso do espectro para se ter um maior controle sobre o que preservar ou atenuar.

**Referências**

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.

Mojica, L. O. F. (2011). Aplicações da Filtragem SVD na Análise de velocidades e no Empilhamento CMP., Dissertação de Mestrado, Universidade Federal da Bahia, Salvador, Brasil.

Porsani, M. J.; Silva, M. G.; Melo, P.E. M e Ursin, B. (2009). Ground-roll attenuation based on SVD filtering.. Expanded Abstract, 79th Annual SEG Meeting, pp. 3381-3385, SEG.

**Agradecimentos**

Os autores agradecem às agências CNPq/MCT, CAPES, PETROBRAS, ANP e FINEP pelo financiamento e apoio à pesquisa. Também agradecem às empresas Landmark pelo acordo de cooperação para uso dos *softwares* de processamento e interpretação sísmica disponibilizados ao CPGG/IGEO/UFBA.

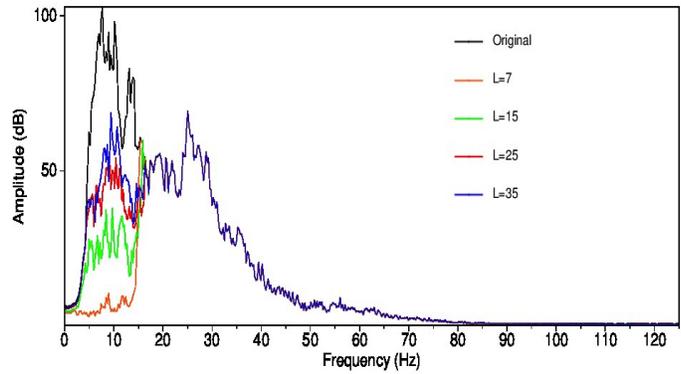


Figura 1: Espectro de amplitude médio do dado original e do dado filtrado variando-se o parâmetro L=7, 15, 25, 35.

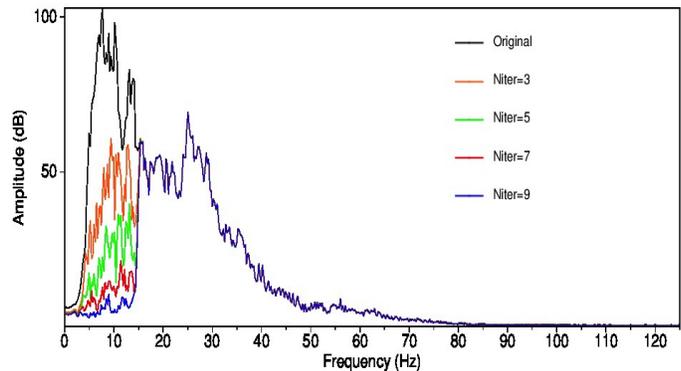


Figura 2: Espectro de amplitude médio do dado original e do dado filtrado variando-se o parâmetro Niter=3, 5, 7, 9.

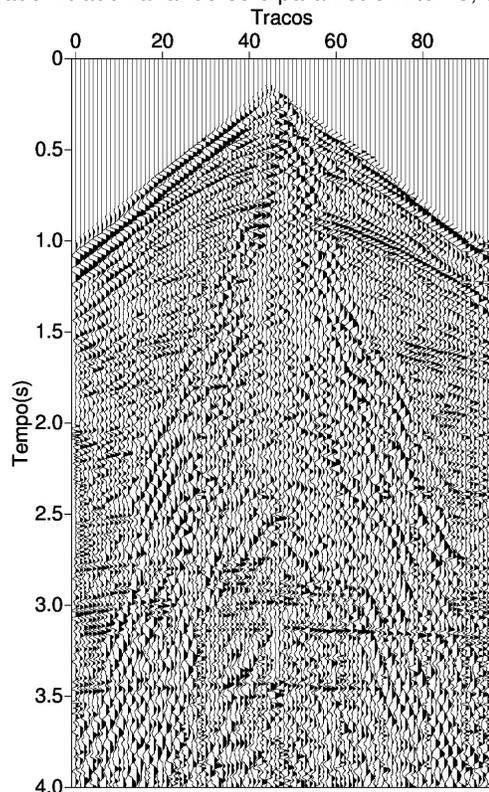


Figura 3: Família de traços sísmicos correspondente a um ponto de tiro comum.

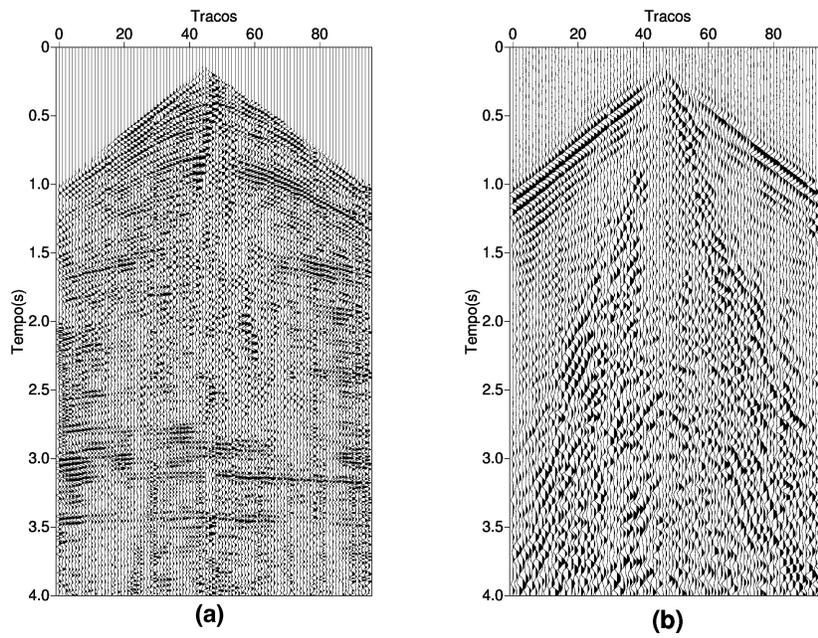


Figura 4: Sismograma indicando: (a) Tiro filtrado com  $L = 25$  e (b) Resíduo entre tiro original e tiro filtrado.

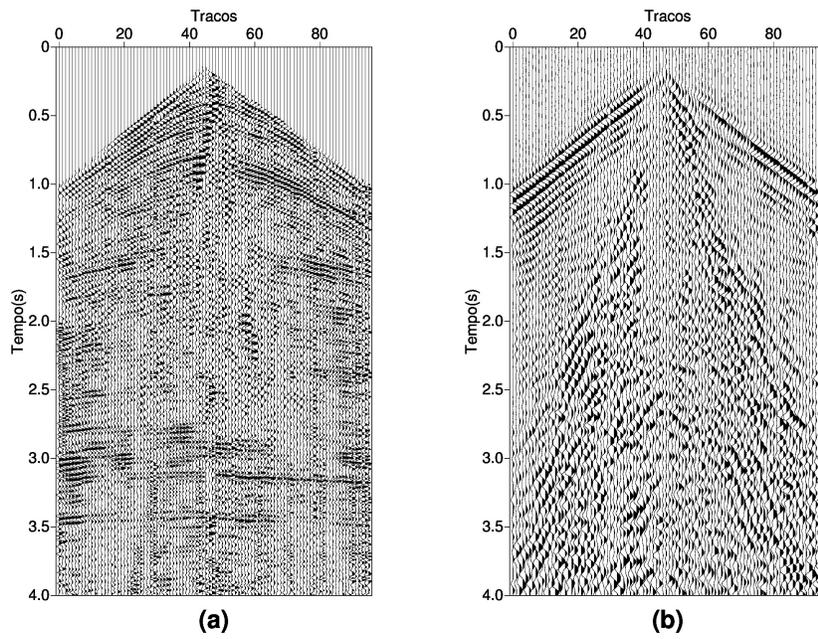


Figura 5: Sismograma indicando: (a) Tiro filtrado com  $N_{iter} = 5$  e (b) Resíduo entre tiro original e tiro filtrado.

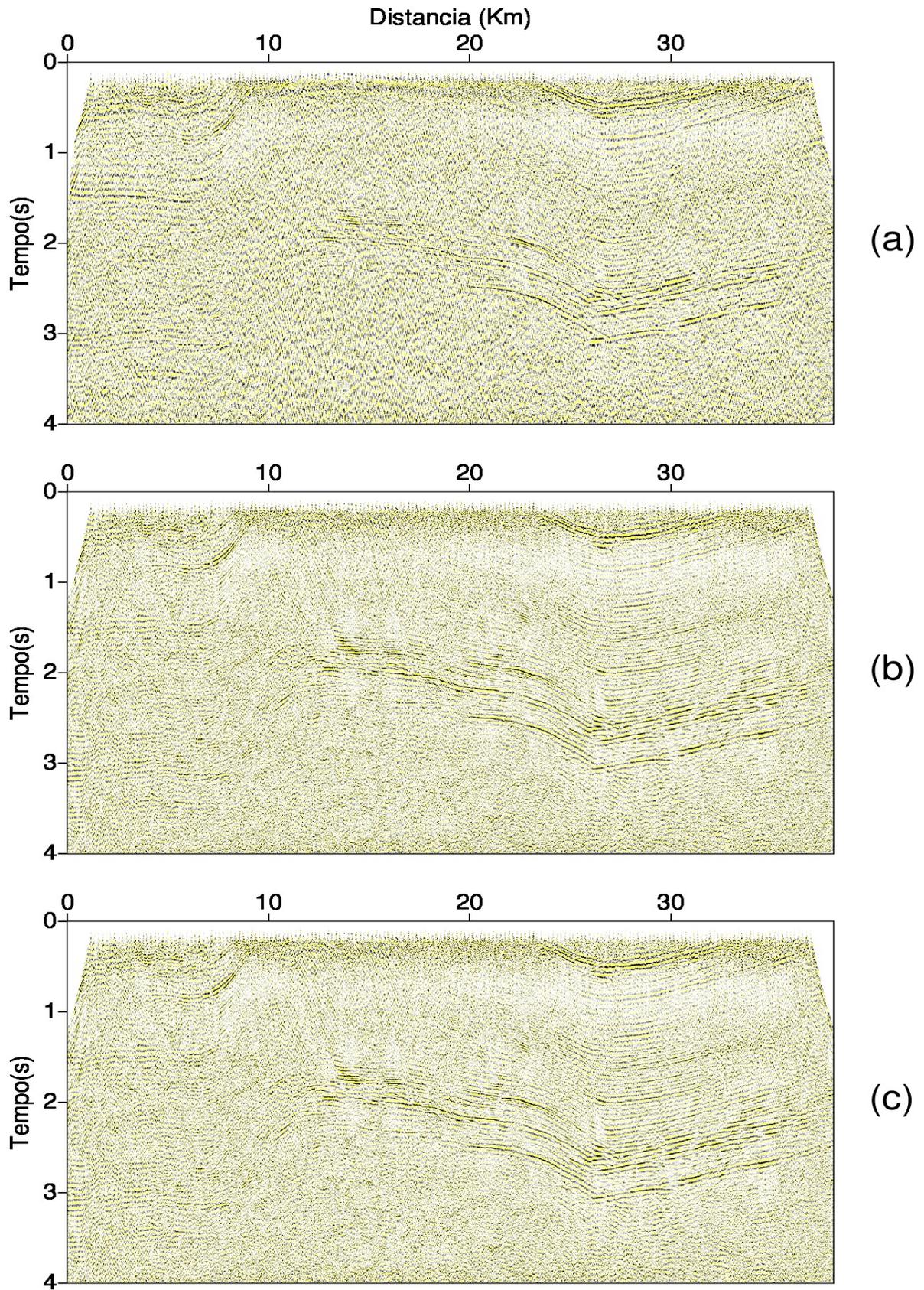


Figura 6: Seções empilhadas: (a) Original; (b) Filtrada com  $L = 25$  e (c) Filtrada com  $N_{iter} = 5$

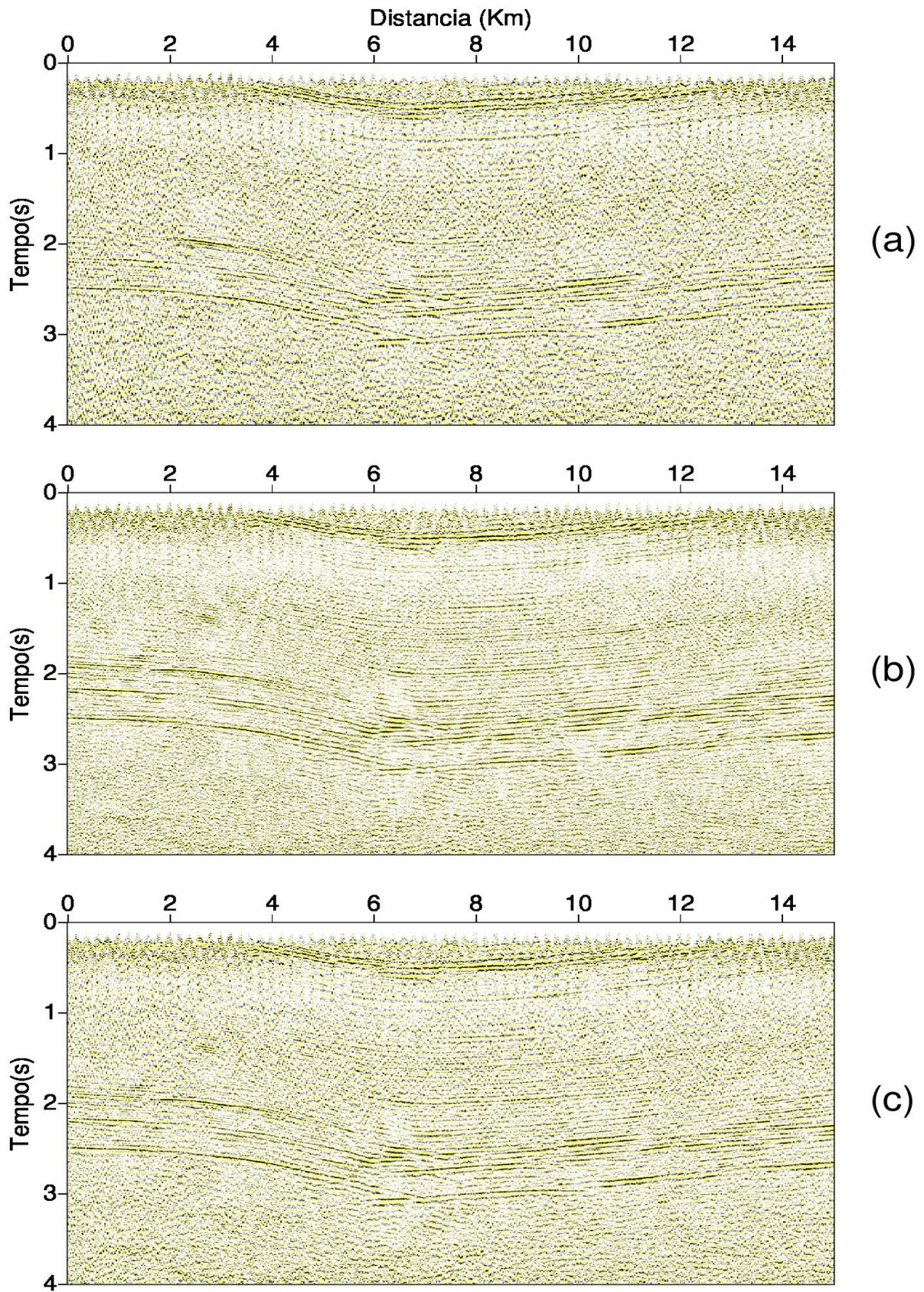


Figura 7: Detalhe das Seções empilhadas: (a) Original; (b) Filtrada com  $L = 25$  e (c) Filtrada com  $N_{iter} = 5$