

## Supressão do *ground roll* utilizando deconvolução de Wiener-Levinson no domínio $\tau$ - $p$

Fabiane S. Serpa, Michelângelo G. Silva, Milton J. Porsani - CPGG/UFBA, Brasil.

Copyright 2006, SBGf - Sociedade Brasileira de Geofisica

Este texto foi preparado para a apresentação no II Simposio de Geofisica da Sociedade Brasileira de Geofisica, Natal, 21-23 de setembro de 2006. Seu conteúdo foi revisado pela Comissão Tecnocientífica do II SR-SBGf mas não necessariamente representa a opinião da SBGf ou de seus associados. É proibida a reprodução total ou parcial deste material para propósitos comerciais sem prévia autorização da SBGf.

### Resumo

No processamento de dados sísmicos terrestres, a remoção do *ground roll* representa um sério problema. Esse evento ocorre na forma de um cone de ruído coerente, de alta amplitude e baixa velocidade de grupo, que se superpõe ao sismograma mascarando as reflexões de interesse.

Neste trabalho, a filtragem do *ground roll* foi conduzida através da deconvolução de Wiener-Levinson, aplicada a sismogramas transformados para o domínio das ondas planas ( $\tau$ - $p$ ). O método foi testado sobre dados sísmicos da Bacia do Tacutu e os resultados obtidos demonstram que a abordagem utilizada, para atenuação do *ground roll*, é mais eficaz que o método de filtragem FK convencional, permitindo gerar uma imagem sísmica final de melhor qualidade, exibindo melhor resolução temporal e melhor continuidade lateral das reflexões.

### Introdução

Em geral, os dados sísmicos de reflexão são sempre contaminados com ruídos. Nos dados sísmicos de levantamentos terrestres, um exemplo de tal ruído é o *ground roll*, associado a ondas superficiais do tipo *Rayleigh*, que mascaram as reflexões originadas nas camadas profundas. O *ground roll* propaga-se nas camadas superficiais de baixa velocidade, correspondentes ao manto de intemperismo, e demarcam os registros sísmicos (sismogramas) com eventos coerentes lineares, de baixo conteúdo de frequência, alta amplitude e forte inclinação, indicando baixa velocidade de propagação (entre 100m/s a 1000m/s). Normalmente, possui sua energia mais concentrada nas baixas frequências em torno de 10Hz. A figura (1) ilustra o *ground roll*.

Este ruído é altamente dispersivo no domínio do tempo-*offset* e apresenta caráter preditivo (coerente) traço-a-traço. Sua velocidade de fase é limitada por  $V_{min}$  e  $V_{max}$  e, conseqüentemente forma um cone, o qual é chamado de cone de ruído. Sua alta amplitude e baixa

freqüência interfere de forma destrutiva, mascarando e dificultando a identificação dos refletores de interesse. A presença desse ruído de baixa freqüência e de alta amplitude é um grande problema a se tentar contornar na geofisica de exploração. Muitos métodos de filtragens têm sido propostos para atenuar este ruído tais como, filtro *f-k*, passa-banda entre outros. Estes métodos conseguem atenuar o *ground roll* porém também interferem no conteúdo de freqüência das reflexões e atenuam também as reflexões. É pois importante o desenvolvimento de métodos de filtragem que atenuem o *ground roll* preservando as reflexões subjacentes ao cone de ruído.

Neste trabalho, utilizamos o método de deconvolução de Wiener-Levinson (WL), bastante utilizado no processamento de dados sísmicos, aplicando-o sobre sismogramas transformados para o domínio das ondas planas ( $\tau$ - $p$ ). O método de WL é bastante conhecido pela sua eficácia em aumentar o conteúdo de alta freqüência dos dados. Esse método utiliza um filtro preditivo que é obtido a partir da autocorrelação dos traços sísmicos. A deconvolução de WL é normalmente aplicada sobre os sismogramas com o objetivo de aumentar a resolução temporal das seções sísmicas, através da compressão do pulso sísmico.

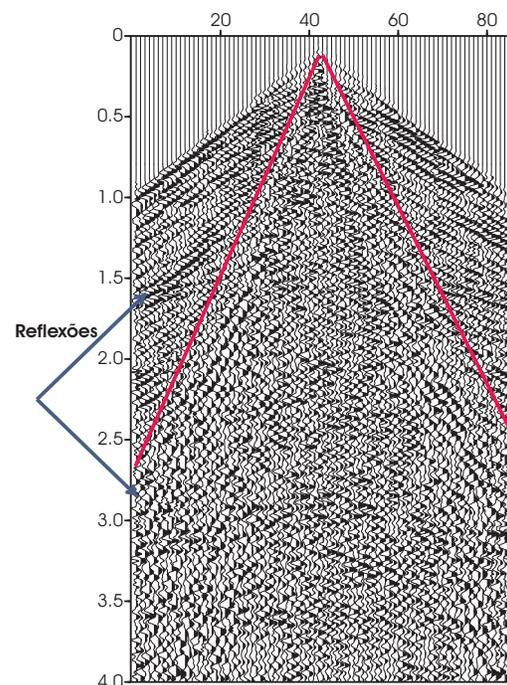


Figura 1: Sismograma de tiro comum da linha sísmica RL50-90. Em destaque o cone de ruído (*ground roll*).

## Metodologia

O seguinte procedimento foi utilizado para filtragem do *ground roll*

1. Aplicação da transformada tau-p aos sismogramas;
2. Obtenção do filtro de WL e deconvolução dos dados no domínio tau-p;
3. Aplicação da transformada inversa tau-p, e
4. Continuidade do fluxo normal de processamento para obtenção da seção empilhada final.

A seguir apresentamos um resumo do método de transformada tau-p e do método de deconvolução de WL.

## Transformada no domínio tau-p

A decomposição em ondas planas (transformada tau-p ou transformada Slant-Stack) converte uma seção sísmica registrada  $t - x$  para tempo de interseção  $\tau$  e parâmetro de raio  $p$ .

Para se transformar dados em função do tempo duplo de reflexão e do afastamento da fonte aos receptores, para o domínio  $\tau - p$ , partimos da equação:

$$F(\tau, p) = \int f(\tau + px, x) dx \quad (1)$$

onde,  $f(\tau + px, x) = f(t, x)$  representa o sismograma obtido com uma fonte pontual.

Esta equação representa uma reta que é tangente à curva do tempo de reflexão no ponto (t-x) cuja inclinação tem valor  $p$  e o tempo de interseção  $t = \tau$ .

As equações de tempo de percurso no domínio tau-p podem ser obtidas considerando-se o modelo bidimensional com uma camada de espessura  $Z_0$  e velocidade de propagação  $V = \text{constante}$ . A curva tempo de chegada do evento refletido na interface  $R$  é expressa por:

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

Esta equação descreve uma hipérbole (figura2) e representa o equacionamento dos tempos de percurso da onda sísmica no domínio  $t - x$  onde,

$$t_o = \frac{2 \cdot Z_0}{V}, \quad (3)$$

representa o tempo de percurso para a incidência normal à interface.

Para se encontrar a equação da curva que representa o tempo de chegada do evento refletido em função do parâmetro do raio  $p$  deve-se igualar as equações da reta  $t = \tau + px$  com a da hipérbole, equação 2, bem como suas derivadas de primeira ordem. Assim obtém-se,

$$\left(\frac{\tau}{t_o}\right)^2 + (pV)^2 = 1. \quad (4)$$

Essa equação corresponde a uma elipse no plano  $\tau - p$  (figura3), cuja interseção com o eixo vertical e horizontal é determinada pelo tempo duplo de percurso normal,  $t_o$ , e pelo inverso da velocidade da camada,  $1/V$ , respectivamente.

Explicitando  $\tau$  obtém-se,

$$\tau = t_o(1 - (pV)^2)^{1/2}. \quad (5)$$

Na verdade, a curva de tempo de percurso  $t(x)$  não é observada, é inferida a partir da seção  $t - x$  registrada e é esta função que é mapeada no domínio  $\tau - p$ . A parametrização de tempo de interseção ou demora vertical  $\tau$  e parâmetro de raio  $p$  oferece vantagens não apenas em termos de apresentação visual dos dados no plano  $\tau - p$ , mas também na formulação matemática exigida para obter a resposta do meio. Em contraste à fórmula aproximada usualmente empregada no domínio  $t - x$ , Diebold e Stoffa (1981) deduziram as expressões exatas para a curva de recepções de uma onda no domínio  $\tau - p$ , para as geometrias comumente empregadas no processamento dos dados, estas equações podem ser aplicadas a dados com qualquer afastamento fonte-receptor. Existe, portanto, neste domínio, a possibilidade de comparação dos dados com uma resposta teórica exata.

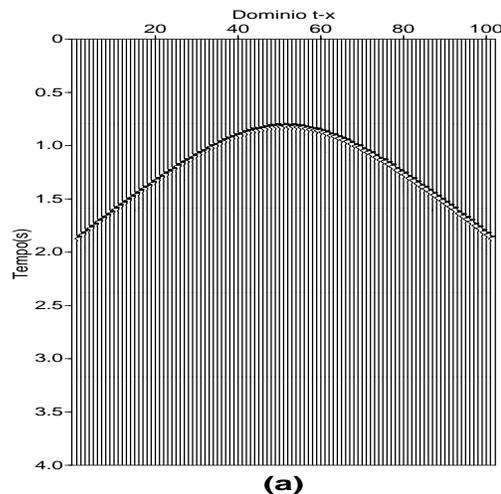


Figura 2: Curva de tempo de percurso da onda no plano  $t - x$ .

## Deconvolução de Wiener-Levinson

A deconvolução é uma ferramenta muito eficiente para compressão do pulso sísmico e conseqüente aumento na resolução temporal dos eventos presentes nas seções sísmicas.

Normalmente, a deconvolução é usada antes do empilhamento. A idéia básica da deconvolução é a estimativa de um filtro inverso que quando convolvido com o pulso o converte a um impulso. Esse filtro, idealmente, deve ser capaz de restituir a resposta impulsional da Terra quando aplicado ao traço sísmico.

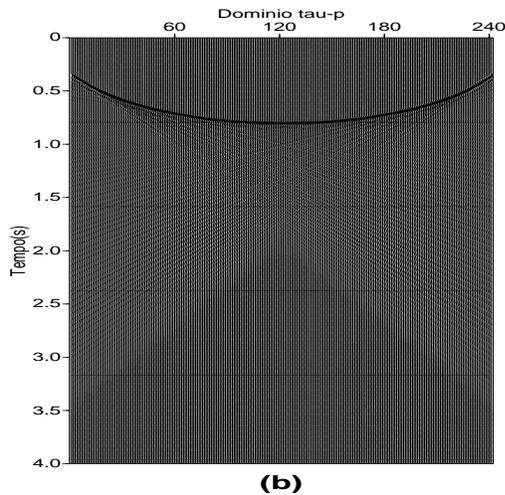


Figura 3: Curva de tempo de percurso da onda no plano  $\tau - p$ .

O modelo unidimensional comumente usado para representar o traço sísmico é referido como modelo convolucional, onde o traço é o resultado da convolução de um pulso gerado por uma fonte próxima a superfície com a resposta impulsional da terra acrescida do componente de ruído.

Matematicamente, o modelo convolucional do traço sísmico  $x(t)$  pode ser representado por:

$$x(t) = p(t) * e(t) + \eta(t), \quad (6)$$

onde,

- $x(t)$  - traço sísmico (registro do sismograma)
- $p(t)$  - pulso sísmico considerado invariante no tempo
- $e(t)$  - função refletividade ou a resposta impulsiva da Terra e contém, todas as reflexões primárias e ruídos
- $\eta(t)$  - são os ruídos aleatórios e/ou aditivos
- \* - representa a operação de convolução

Nos casos em que a forma do pulso básico da fonte é conhecida, por exemplo, a assinatura da fonte, a deconvolução é considerada um problema determinístico e o filtro calculado é denominado filtro inverso. No entanto, na aquisição sísmica de reflexão a forma do pulso que chega aos diferentes geofones ou hidrofones é desconhecida, pode-se apenas controlar a assinatura do arranjo de fonte medindo-se o campo de onda em suas imediações, como normalmente ocorre em levantamentos marítimos. Por esta razão a deconvolução é realizada com base em critérios estatísticos. A teoria de predição Wiener resulta numa deconvolução estatística e o filtro estimado é chamado de operador de erro de predição, ou simplesmente, filtro de Wiener-Levinson.

O método de Wiener-Levinson consiste basicamente: (i) da estimativa dos coeficientes da função de autocorrelação do pulso, utilizando-se para tanto os traços sísmicos, (ii) da obtenção do filtro inverso, resolvendo-se as equações normais através da Recursão de Levinson, e (iii) aplicando-se o filtro inverso de WL aos traços, mediante convolução.

O processo de filtragem digital é descrito pela equação de convolução discreta, representado na forma de

predição linear. A predição linear de um sinal  $x_t$  pode ser matematicamente representada por:

$$\tilde{x}_{t+\alpha} = \sum_{k=1}^n x_{t-k+1} \tilde{a}_k, \quad (7)$$

onde,

$\tilde{x}_{t+\alpha}$  - representa o sinal predito ao tempo  $t + \alpha$ , a partir da combinação linear dos valores de  $x_t, \dots, x_{t-n+1}$

$\alpha$  - representa a distância de predição

$\tilde{a}_t$  - é o filtro de predição

Aplicamos neste trabalho a deconvolução em sismogramas no domínio tau-p. A deconvolução empregada é a preditiva e um operador trabalha traço-a-traço, ou seja, para cada traço calculamos a função de autocorrelação e a partir desta, calculamos um filtro de deconvolução (filtro preditivo de erro) e convolvemos com os traços.

A utilização desse domínio para a atenuação do *ground roll* se deu em função do *ground roll* ser um ruído linear e normalmente aparecer em sismogramas com baixa velocidade, ou seja, alto valor de  $p$ . Logo, essa característica facilita a sua filtragem nesse domínio, pois o mesmo se encontra numa região diferente das reflexões, que possuem alta velocidade, isto é, valores de  $p$  pequenos. Outra vantagem da filtragem no domínio  $\tau - p$ , é que os eventos são vistos ainda no domínio do tempo (o que possibilita uma filtragem variável no tempo), e assim a definição da região de corte para os ruídos coerentes pode ser mais facilmente escolhida.

## Resultados

Desde que o objetivo deste trabalho é discutir a aplicação da deconvolução preditiva e, ao mesmo tempo, analisar qual o domínio mais adequado para sua utilização, trabalhamos inicialmente com os dados no domínio do tiro.

Para a deconvolução usamos o filtro de WL, para deconvolver os dados na presença do *ground roll* e luz branca de 0.1%.

A figura 4(a) mostra o resultado da deconvolução preditiva aplicado num sismograma real apresentado na Figura 1.

Convertemos os sismogramas originais para o domínio tau-p e realizamos o processo de deconvolução nestes painéis. Os resultados obtidos após a deconvolução podem ser vistos e comparados àqueles obtidos com a filtragem no domínio do tiro (figura 4).

A deconvolução dos dados sísmicos no domínio tau-p conseguiu minimizar de maneira eficiente a influência prejudicial do *ground roll*, permitindo sua eliminação e possibilitando uma maior identificação das reflexões. Apesar do ruído ser o mais importante fator degradante da efetividade da deconvolução sísmica, por introduzir distorções no espectro de fase e de amplitude do sinal, conseguimos resultados satisfatórios.

Analisando os espectros de amplitude dos dados deconvolvidos e filtrados (figura 5), observamos que o *ground roll*, que se encontrava presente nas baixas frequências, foi praticamente eliminado. Nesse espectro, as reflexões apresentam um conteúdo de frequência variando de 12 a 48Hz, enquanto que a alta amplitude do *ground roll* domina as baixas frequências (0 a 12Hz). Observa-se também a presença de alta frequência no dado devido aos efeitos da deconvolução e, em decorrência do 'aliasing' espacial causado pela transformada tau-p direta e inversa. Apesar desse problema, ainda pode-se notar uma melhora significativa da atenuação do *ground roll* com a utilização da deconvolução preditiva nesse domínio.

A filtragem do *ground roll* através de filtros de frequência pode, em alguns casos, fornecer resultados satisfatórios. Contudo, como o *ground roll* é dispersivo, a filtragem atenuou bastante o ruído apesar de não apresentar uma melhor definição das reflexões. A figura 4(b) apresenta o resultado da filtragem FK aplicada sobre o mesmo sismograma de tiro comum.

A figura 6 mostra seções empilhadas dos dados. Em (a) temos o resultado da filtragem FK. Em (b) está representada a filtragem preditiva. Apesar do ruído ser o mais importante fator degradante da efetividade da deconvolução sísmica, por introduzir distorções no espectro de fase e de amplitude do sinal, conseguimos bons resultados.

## Conclusões

Quando o ruído e o sinal possuem conteúdo de frequência muito parecidos, os filtros de frequência não são efetivos na separação dos eventos sísmicos. Contudo, o objetivo principal do método de filtragem apresentado é aumentar a resolução temporal e espacial dos dados sísmicos de maneira tal que seja possível atenuar o *ground roll* sem interferir no conteúdo de frequência do sinal original.

Os métodos utilizados para a eliminação do *ground roll* trabalharam razoavelmente bem. No caso da filtragem de frequência, esta foi eficiente quando o ruído não está mudando muito o seu conteúdo de frequência, ou quando ele é bem distinto do sinal. Contudo, o filtro de frequência pode ser muito útil nos dados em que a dispersão do *ground roll* não seja muito acentuada. Portanto, a sua utilização para eliminação do *ground roll* é justificada, apesar de não trabalhar bem em algumas situações.

Já a filtragem no domínio tau-p, possibilita uma filtragem variável no tempo, a transformação dos dados para este domínio é facilmente realizada (desde que a escolha dos parâmetros seja correta), é possível eliminar os eventos indesejáveis, sem perder informações desejáveis presentes nos dados, pois as reflexões e refrações possuem parâmetros de raio menores do que as referentes aos do *ground roll*, que são altos.

Portanto, a utilização da filtragem no domínio tau-p se deve ao fato desse domínio conseguir separar os eventos, e por essa razão a filtragem do *ground roll*

pode ser mais facilmente realizada neste domínio do que nos domínios FK e t-x, melhorando a qualidade do sinal sísmico, permitindo uma maior identificação da continuidade dos refletores.

## Agradecimentos

Os autores desejam agradecer a FINEP, FAPESB e PETROBRAS pelo suporte dado ao projeto Rede em Risco Exploratório, à Paradigm e Landmark pelas licenças dos softwares de processamento sísmico doadas ao CPGG-UFBA e ao PRH-08/ANP pelo financiamento na forma de bolsa de estudo dos quais tornaram possível a realização deste trabalho.

## Referências Bibliográficas

**Bezerra, A. C.; Porsani, M. J.** (2001) Deconvolução preditiva multicanal no domínio tau-p e interpolação de traços sísmicos na atenuação de múltiplas. In: 7th International Congress of the Brazilian Geophysical Society, v.PS6, p.1221-1224, Salvador-Bahia.

**Grant, F. S. and West, G. F.**(1965) Interpretation theory in applied geophysics.

**Lima, A. P.** (1999) Deconvolução preditiva nos domínios t-x e tau-p utilizando filtros Wiener-Levinson multicanais, Dissertação de Mestrado. Centro de Pós-graduação em Geofísica da Universidade Federal da Bahia.

**Pestana, R. C.** (1988) Deconvolução na presença de ruído coerente de alta amplitude. Tese de Doutorado. Centro de Pós-graduação em Geofísica da Universidade Federal da Bahia.

**Robinson, E. A.** (1984) Seismic inversion and deconvolution, Part A: Classical Methods, Geophysical Press.

**Silva, M. G.** (2004) Processamento de dados sísmicos da Bacia do Tacutu, Dissertação de Mestrado. Centro de Pós-graduação em Geofísica da Universidade Federal da Bahia.

**Thatam, R. H.** (1984) Multidimensional filtering of seismic data: Proceedings of the IEEE. In Slant-Stack processing, Society of Exploration Geophysicists, Geophysics reprint series No. 14, vol 72, no. 10.

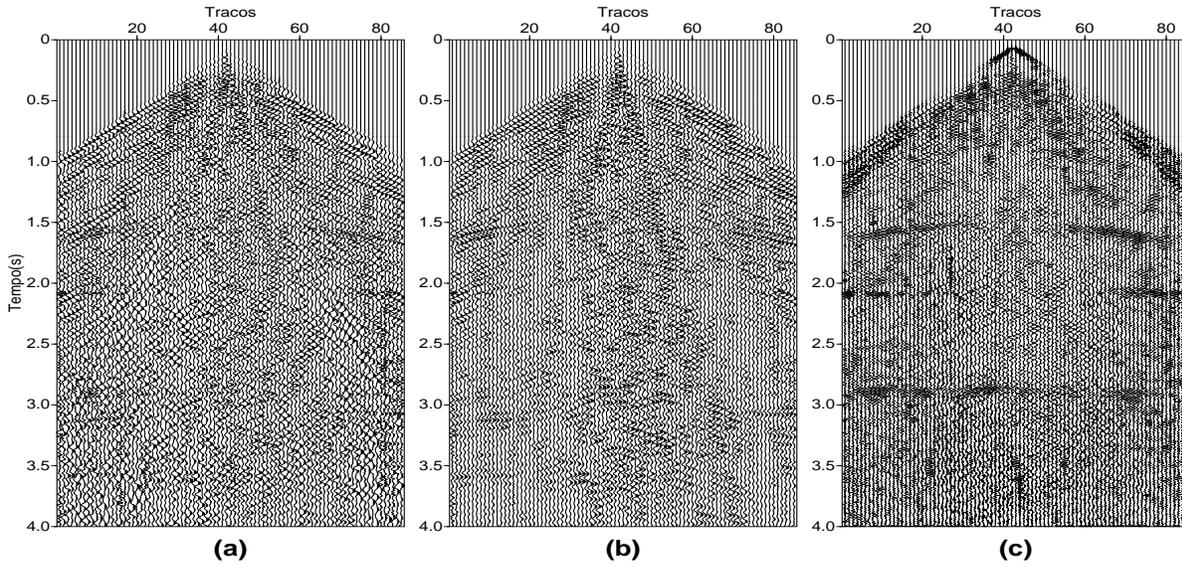


Figura 4: Resultados da atenuação do *ground roll*. Filtragem no domínio  $t - x$  em (a). Filtragem convencional  $f - k$  em (b). Filtragem no domínio  $\tau - p$  em (c).

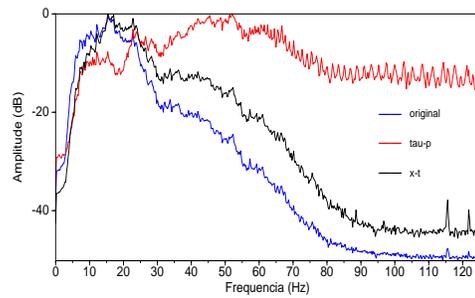


Figura 5: Espectro de amplitude. Sismograma original e após a filtragem no domínio  $\tau - p$  e  $t - x$ .

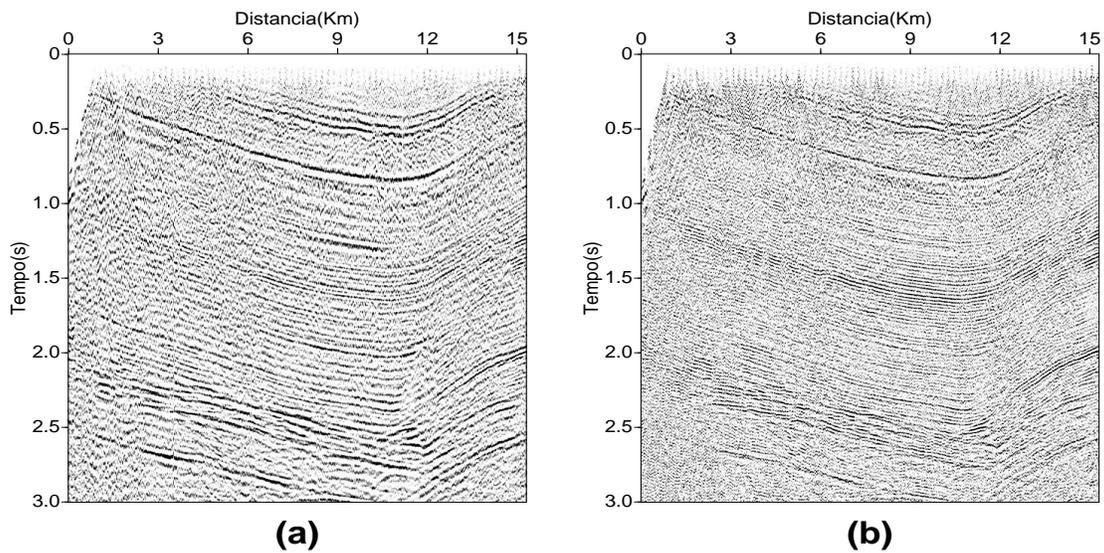


Figura 6: Seção empilhada da linha sísmica RL50-90 após filtragem do *ground roll*. Resultado obtido com a filtragem FK em (a) e resultado obtido com a deconvolução WL no domínio tau-p em (b).