

## Filtragem SVD-3D aplicada a melhora de refletores em volumes sísmicos

Oscar F. Mojica, Milton J. Porsani e Michelângelo G. da Silva, CPGG-UFBA e INCT-GP/CNPq

Copyright 2012, SBGF - Sociedade Brasileira de Geofísica Este texto foi preparado para a apresentação no V Simpósio Brasileiro de Geofísica, Salvador, 27 a 29 de novembro de 2012. Seu conteúdo foi revisado pelo Comitê Técnico do V SimBGF, 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 presente artigo apresentamos a aplicação da filtragem SVD (*Singular Value Decomposition*) em dados sísmicos 3-D com o propósito de aumentar a qualidade nas seções sísmicas finais, a fim de realçar refletores e estruturas geológicas. A filtragem SVD trabalha na forma multicanal selecionando um subconjunto de 27 amostras de 9 traços vizinhos de um volume sísmico 3D, a coleta dessas amostras pode ser representada por um operador em forma de cubo que permite a captura das amostras seguindo três direções diferentes, o mesmo é deslocado através do volume sísmico 3D, e a cada posição a amostra central do traço central do cubo é filtrada tomando-se apenas a média das três amostras centrais do plano central do cubo (perpendicular à direção da coleta) na primeira autoimagem. O método de filtragem SVD proposto foi testado sobre um dado sísmico sintético correspondente a um volume 3D marítimo. A aplicação da filtragem SVD permitiu a melhora da coerência dos eventos sísmicos no dado como a atenuação de ruídos não correlacionáveis, revelando desta forma algumas feições e estruturas geológicas de interesse para a exploração de Petróleo.

### 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,b).

(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, extraindo-se autoimagens a parte coerente do ruído.

A filtragem SVD na forma utilizada por (Porsani et al., 2009, 2010a,b) 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.

No presente trabalho mostramos uma nova forma de aplicação da filtragem para o processamento de volumes sísmicos. Neste caso a filtragem utiliza uma parte dos traços sísmicos coletados através de um cubo de dimensões  $3 \times 3 \times 3$  onde 27 amostras de 9 traços vizinhos são colecionadas em as três direções do cubo e reorganizadas numa matriz  $9 \times 9$  com os 27 elementos situados em três bandas distintas que logo é submetida à decomposição SVD. Ilustramos o método de filtragem SVD sobre um dado sísmico 3-D sintético marinho com ruído aleatório. Os resultados mostram que a filtragem SVD é capaz de aumentar a coerência dos refletores assim como a redução do ruído do volume sísmico empilhado.

### 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  $D = [d_1 \dots d_M] = [d(t, x_1), \dots, d(t, x_M), t = 1, \dots, N_t]$  pode ser decomposta através do método de decomposição em valores singulares, "*singular value decomposition*" (SVD)

conforme representado a seguir (Golub e Loan, 1996).

$$\mathbf{D} = \mathbf{U}\Sigma\mathbf{V}^T \quad (1)$$

onde  $\Sigma = \text{diag}\{\sigma_1, \dots, \sigma_M\}$  com  $\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \dots \geq \sigma_M \geq 0$ . As matrizes  $\mathbf{U}$  de dimensão  $N_t \times N_t$  e  $\mathbf{V}$  de dimensão  $M \times M$  são unitárias e ortogonais tal que  $\mathbf{U}^{-1} = \mathbf{U}^T$  e  $\mathbf{V}^{-1} = \mathbf{V}^T$ . De outra forma podemos representar

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

Para cada traço de uma seção sísmica 2D que se deseja filtrar, podemos coletar o subconjunto de  $M$  traços imediatamente vizinhos, efetuar a decomposição SVD da matriz correspondente e restituir parcialmente o traço  $\tilde{d}(t, x_j)$  através da equação,

$$\tilde{d}(t, x_j) = \sum_{k=1}^K \sigma_k u_k(t) v_k(x_j). \quad (2)$$

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, e seções de maior coerência espacial.

### CUBO ELEMENTAR

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 de um dado sísmico observa-se que outros traços de tiros vizinhos também podem ser utilizados.

Neste caso, fazemos uso de só três amostras de 9 traços imediatamente vizinhos, resultando assim um operador espacial na forma de um cubo (Fig1). Este cubo de  $3 \times 3 \times 3$  amostras opera sobre todo o volume de dados, extraindo 27 amostras que são submetidas à filtragem SVD. Após a seleção das amostras dos traços é realizada a decomposição SVD e uma nova amostra filtrada é obtida como a media das três amostras centrais da face central do cubo na posição central do mesmo.

No entanto podemos observar que estas 27 amostras podem ser coletadas seguindo as três direções  $i, j$ , e  $k$  do cubo (Fig2).

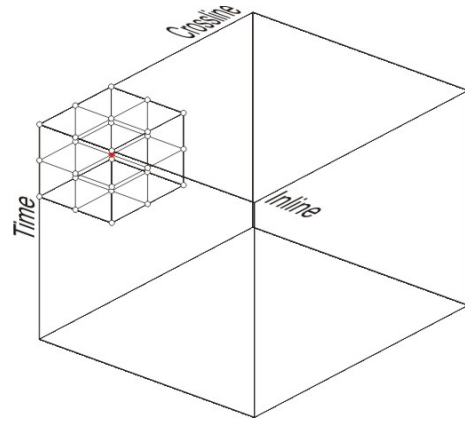


Figura 1: Representação esquemática do cubo elementar de dimensão 3, ( $3 \times 3 \times 3$ ), referenciado no volume de dados sísmicos. Para cada posição  $\{i, j, k\}$ , do centro do cubo elementar, 27 amostras do volume sísmico original são extraídas e mapeadas em uma matriz, que é submetida à decomposição SVD. Após a filtragem SVD o dado filtrado é atribuído à posição  $\{i, j, k\}$  no volume sísmico 3D filtrado.

$$k \begin{bmatrix} 1 & 4 & 7 & 10 & 13 & 16 & 19 & 22 & 25 \\ 2 & 5 & 8 & 11 & 14 & 17 & 20 & 23 & 26 \\ 3 & 6 & 9 & 12 & 15 & 18 & 21 & 24 & 27 \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$j \begin{bmatrix} 1 & 10 & 19 & 4 & 13 & 22 & 7 & 16 & 25 \\ 2 & 11 & 20 & 5 & 14 & 23 & 8 & 17 & 26 \\ 3 & 12 & 21 & 6 & 15 & 24 & 9 & 18 & 27 \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$i \begin{bmatrix} 1 & 10 & 19 & 2 & 11 & 20 & 3 & 12 & 21 \\ 4 & 13 & 22 & 5 & 14 & 23 & 6 & 15 & 24 \\ 7 & 16 & 25 & 8 & 17 & 26 & 9 & 18 & 27 \end{bmatrix} \quad (5)$$

Assim teremos as 27 amostras vistas desde três ângulos diferentes o que permite mapear o cubo em três matrizes ( $3 \times 9$ ) com as 27 amostras organizadas em três faces perpendiculares à direção de coleta. Note-se na matriz (3) a disposição das 27 amostras quando estas são coletadas seguindo a direção  $k$ , e nas matrizes (4) e (5) a disposição das mesmas quando as direções de seleção são  $j$  e  $i$  respectivamente.

### APLICAÇÃO DO MÉTODO E RESULTADOS

O método de filtragem SVD 3-D foi aplicado em um dado sintético que representa um volume 3-D marítimo contendo características estruturais interessantes e com alto grau de complexidade, tais como domos de sal, sistemas de falhas, discordâncias, dobramentos etc. E para criarmos um dado mais próximo possível de uma situação real, foi adicionado ao volume 3-D de dados o ruído aleatório com razão  $S/R$  na faixa de 0.5.

A filtragem SVD, utilizada neste trabalho, é feita sobre um subconjunto de 27 amostras de 9 traços vizinhos que formam o que denominamos como cubo elementar, a amostra que se deseja filtrar é a amostra central do traço central do cubo. O mesmo é deslocado espacialmente sobre todo o volume de dados, e a cada nova posição do cubo uma decomposição SVD é realizada e uma nova amostra central é gerada, e o resultado assim obtido representa o volume sísmico filtrado com a mesma dimensão do dado de entrada.

A Figura 2 ilustra como a coleta das 27 amostras do cubo é feita seguindo as três direções  $i$ ,  $j$  e  $k$ .

A Figura 3 é uma seção na direção *crossline*, retirada do volume 3-D filtrado quando a amostragem é feita seguindo as faces perpendiculares a esta direção. Podemos observar a resposta da aplicação da filtragem SVD realizada desta forma na delimitação do flanco e topo do corpo de sal localizado a margem direita da seção entre os *inlines* (371 e 550). Também podemos perceber na região inferior esquerda da seção, uma maior continuidade do topo da camada de sal localizado entre as *inlines* (1 e 60).

A Figura 4 ilustra uma fatia de tempo em 2,5 segundos. Os resultados obtidos mostram uma boa delimitação dos contornos da mini-bacia e em alguns casos a parede de sal que é de difícil identificação na seção original devido a presença de ruído e bem definida como indicado nos *crosslines* (XL:100-150) e (XL:250-320).

A Figura 5 mostra seções extraídas do volume filtrado na direção *inline* quando a coleta de amostras é feita seguindo as faces perpendiculares a esta direção. Bons resultados podem ser observados na porção mais a esquerda das seções onde há uma boa continuidade nos refletores entre os traços (1 e 275). Nota-se que a parede do corpo de sal apresenta uma melhor continuidade tornando-se mais visível mesmo quando esta tem uma atitude bastante íngreme como apresentado na Figura 5.

## CONCLUSÕES

A decomposição SVD de volumes sísmicos 3D na forma apresentada, forneceu bons resultados no que diz respeito a eficácia da filtragem pra suprimir ou minimizar ruídos aleatórios presente nos dados.

Os resultados apresentados nas seções tempo versus distância e seções espaciais (fatias de tempo), demonstram o aumento da razão sinal/ruído traduzido na melhoria da continuidade dos refletores (coerência espacial) e melhorias na identificação e rastreamento, dos eventos, valorizando os aspectos estratigráficos e estruturais do volume 3D estudado. O método é de fácil implementação e baixo custo computacional.

## AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a CNPq/INCT-GP pelo financiamento e apoio à pesquisa, e à PETROBRAS por ceder o dado sintético 3-D marítimo

## REFERÊNCIAS

- 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: Attenuation of coherent noise using localized-adaptive eigenimage filter:, Expanded Abstract, 78th Annual SEG Meeting, 2541–2545.
- Freire, S. L. M., e Ulrych, T. J., 1988, Application of singular value decomposition to vertical seismic profiling: *Geophysics*, **53**, 778–785.
- Freire, S. L. M., 1986, Aplicações do método de decomposição em valores singulares no processamento de dados sísmicos: Ph.D. thesis, Universidade Federal da Bahia, Salvador, Brasil.
- Golub, G. H., e Loan, C. F. V., 1996, Matrix computations: Johns Hopkins University Press.
- Kendall, R., Jin, S., e Ronen, S., 2005, An svd-polarization filter for ground roll attenuation on multicomponent data: An svd-polarization filter for ground roll attenuation on multicomponent data:, Expanded Abstract, 77th Annual SEG Meeting, 928–932.
- Porsani, M. J., Silva, M. G., Melo, P. M., e Ursin, B., 2009, Ground-roll attenuation based on svd filtering: Ground-roll attenuation based on svd filtering:, Expanded Abstract, 79th Annual SEG Meeting, 3381–3385.
- 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: An adaptive local-slope svd filtering approach to enhance events on seismic sections:, Expanded Abstract, 80th Annual SEG Meeting, 3717–3722.
- 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.
- Tyapkin, Y. K., Marmalyevskyy, N. Y., e Gornyyak, Z. V., 2003, Source-generated noise attenuation using the singular valued decomposition: Source-generated noise attenuation using the singular valued decomposition:, Expanded Abstract, 75th Annual SEG Meeting, 2044–2047.

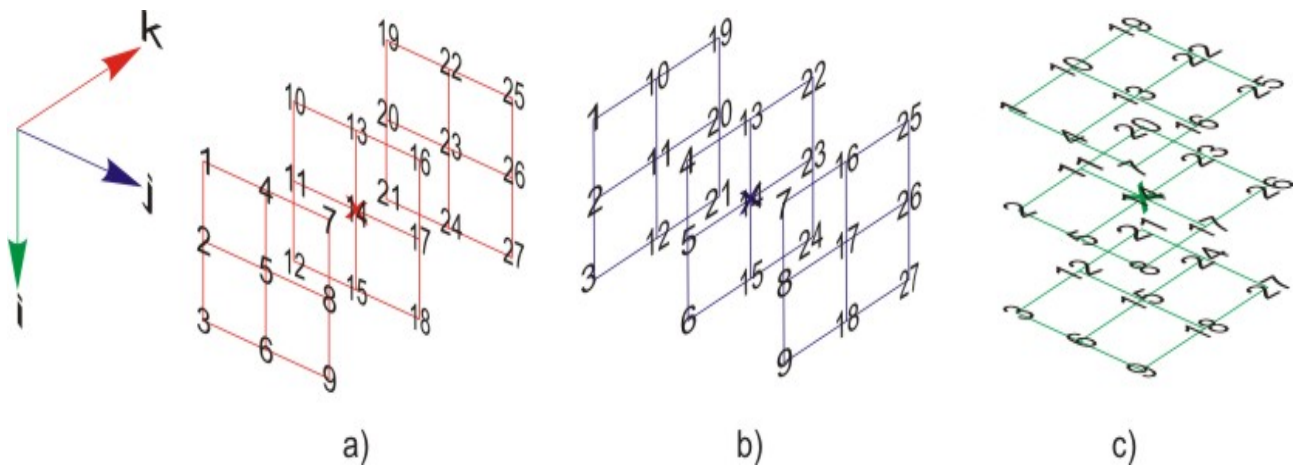


Figura 2: Representação esquemática da amostragem das faces de um cubo elementar de dimensão 3, ao longo das direções  $i, j$  e  $k$ . Amostragens definidas como: *inline* (faces  $i \times j$ ) ao longo da direção  $k$ ; *crossline* (faces  $i \times k$ ) ao longo da direção  $j$  e *temporal* (faces  $j \times k$ ) ao longo da direção  $i$ , em (a), (b) e (c), respectivamente.

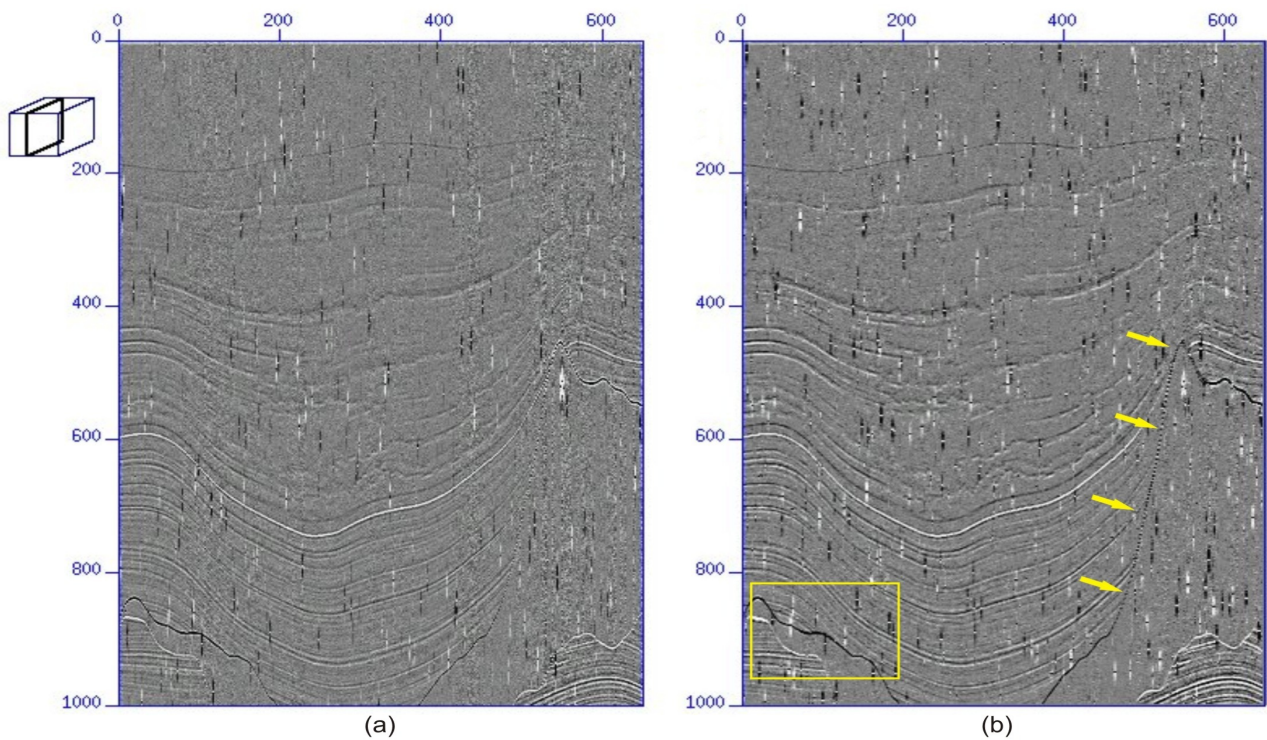


Figura 3: Resultados obtidos na aplicação da filtragem SVD. Seção sísmica original contaminada com ruído em a) dado após a aplicação da filtragem SVD em b)

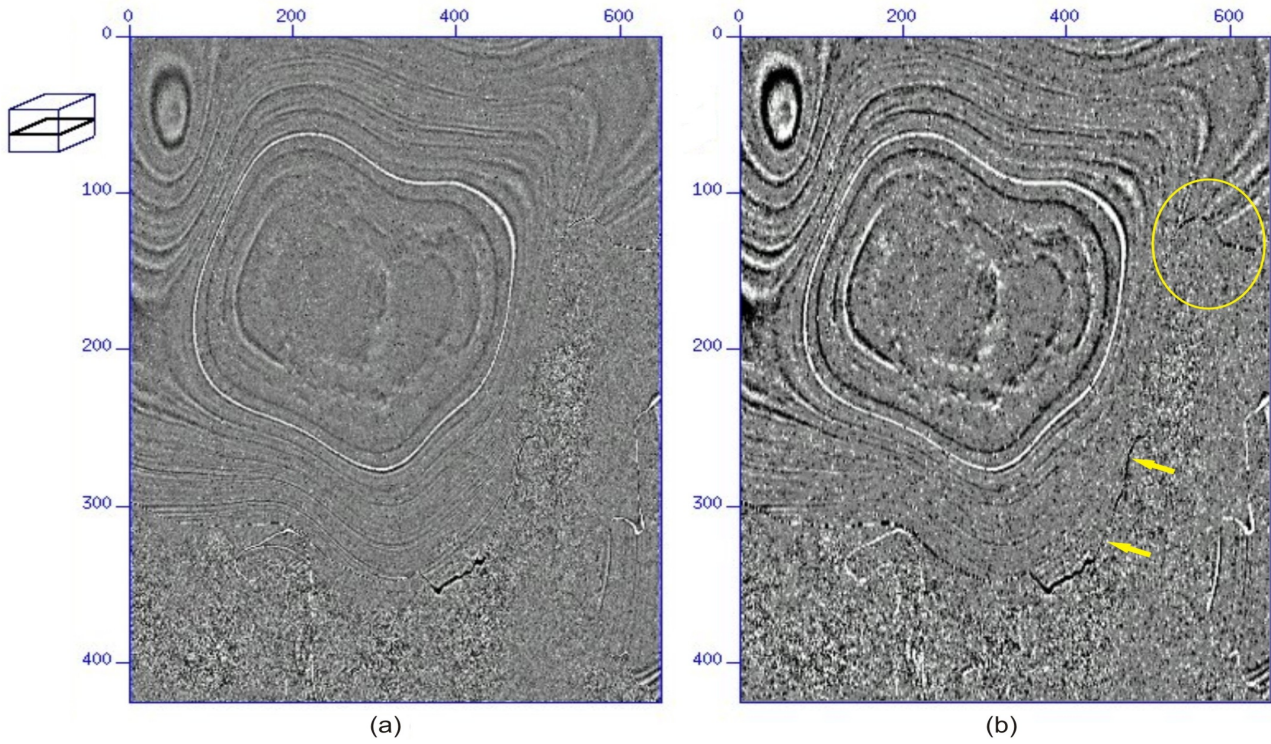


Figura 4: Resultados obtidos na aplicação da filtragem SVD (fatia de tempo em 2,5 segundos). a) Dado original contaminado com ruído, b) dado filtrado SVD

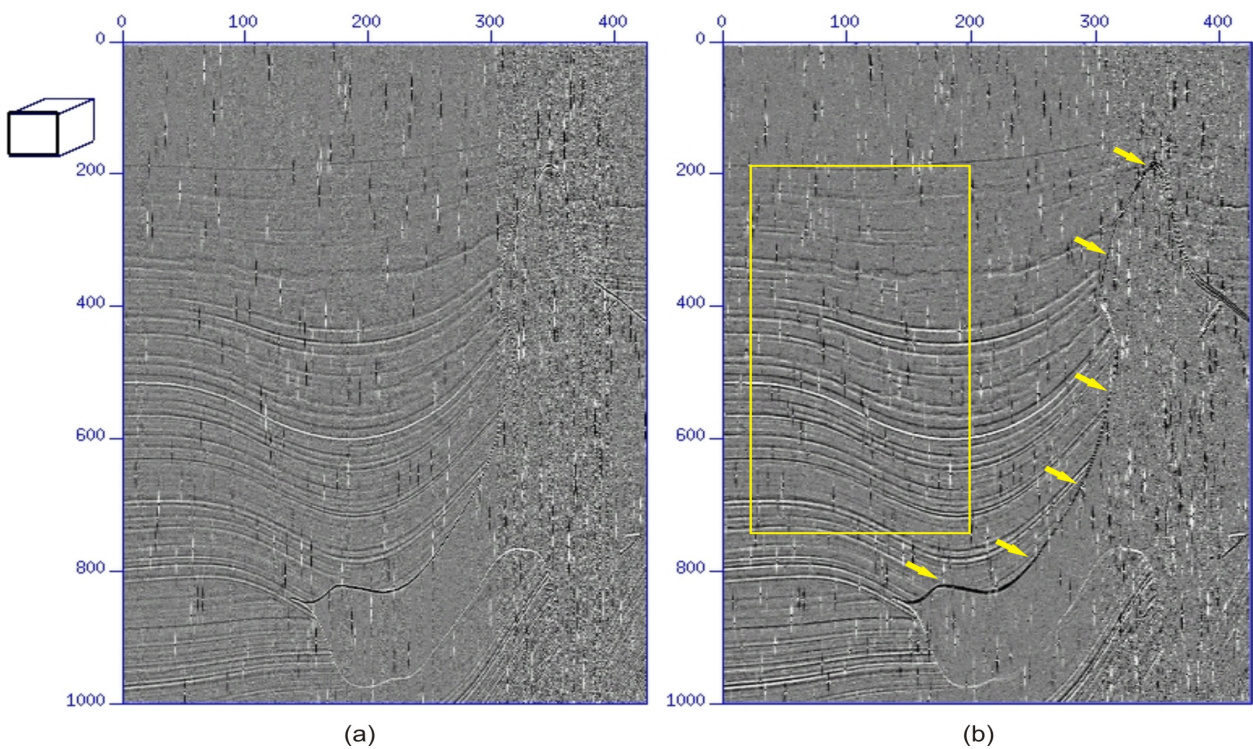


Figura 5: Resultados obtidos na aplicação da filtragem SVD. Seção sísmica original contaminada com ruído em a) dado após a aplicação da filtragem SVD em b)