



Atenuação de múltiplas em sísmica de reflexão utilizando o método Kalman-Bucy

Lourenildo W. B. Leite e Marcus P. da C. da Rocha. Universidade Federal do Pará.

Copyright 2003, SBGF - Sociedade Brasileira de Geofísica

This paper was prepared for presentation at the 8th International Congress of The Brazilian Geophysical Society held in Rio de Janeiro, Brazil, 14-18 September 2003.

Contents of this paper was reviewed by The Technical Committee of The 8th International Congress of The Brazilian Geophysical Society and does not necessarily represents 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.

Abstract

We present in this paper systematic results of the Kalman-Bucy (KB) theory adapted to deconvolution process with prediction using synthetic data. This paper has all the characteristics of an investigative numerical exercise.

We follow Crump's (1974) extension of the KB theory to applications in seismic for impulse deconvolution, starting with the solutions of the generalized Wiener-Hopf (WH) problem as presented by Kalman-Bucy (1961), for continuous and discrete forms of a nonstationary process. The predictive deconvolution operator (KBCP) has a structure similar to the Wiener-Hopf-Levinson (WHL) operator, where the coefficients of the operator are computed from the autocorrelation, and the KBCP operator is obtained from the $b_i(k)$ coefficients, from what the deconvolution operator is constructed.

Introdução

O método KB foi estendido por Crump (1974) para a deconvolução ao impulso, e por Mendel (1979) para gerar sismogramas sintéticos, e no nosso trabalho o estendemos para obter um operador de predição específico para atenuação de múltiplas.

Crump (1974) representa a variável de estado com sendo a distribuição dos coeficientes de reflexão $x(t) = r(t)$, e neste caso o processo recursivo para a geração do vetor de estado é representado por:

$$r(k) = \sum_{i=1}^L b_i^C(k)r(k-i) + w(k-1), \quad (\text{sistema}),$$

$$g(k) = s(k) * r(k) + v(k), \quad (\text{saída}),$$

onde $v(k)$ e $w(k)$ são teoricamente considerados como processos estocástico do tipo branco.

A identificação da variável de estado com o modelo não-estacionário é necessária para completar o par de equações sistema-saída. A seleção do vetor de estado \underline{x} não tem unicidade, porém aqui é definida como:

$$\underline{x}(k) = [g(k) \quad g(k-1) \quad \dots \quad g(k-L+1)]. \quad (\text{sistema})$$

Desta forma, a equação dinâmica do processo recursivo da geração do vetor de estado é completada com a seguinte equação:

$$g(k) = \sum_{i=1}^L b_i(k-1)g(k-i) + u(k-1), \quad (\text{sistema}),$$

onde $u(k)$ é considerado teoricamente como processo estocástico branco.

A equação acima representa o problema matemático a ser solucionado, onde $g(k)$ é conhecido (traço sísmico) e $b_i(k)$ é o desconhecido e para ser determinado. O modelo projeta para frente o traço sísmico através de uma média ponderada dos pontos anteriores.

O operador de predição KBPC-2D é definido de forma similar ao WHLP (Robinson, 1979), onde os coeficientes do operador WHLP são obtidos através da autocorrelação. No caso KBCP, o operador de predição é obtido a partir dos coeficientes $b_i(k)$ como mostrado na Tabela 1. O operador KBCP realiza sua deconvolução numa janela que inclui a primária e sua múltipla. A razão desta estratégia é para que distorções provenientes dos eventos fora da janela sejam evitados.

Tabela 1 – Coeficientes $b_i(k)$ e operador KBCP.

1D
$h_k(i) = [1, 0, \dots, 0, b_{T_1}(k), 0, \dots, 0, b_{T_2}(k), \dots]$
$h_k(i) = [1, 0, \dots, 0, b_{T_1}(k), b_{T_{i+1}}, \dots, b_{T_n}(k)]$
2D
$h_{jk}(i) = [1, 0, \dots, 0, b_{T_1(x)}(k), 0, \dots, 0, b_{T_2(x)}(k), \dots]$
$h_{jk}(i) = [1, 0, \dots, 0, b_{T_1(x)}(k), b_{T_{i+1}(x)}, b_{T_n(x)}(k)]$

Fluxograma

O fluxograma está organizado em 8 etapas descritas abaixo.

- 1) Informações de entrada: escolha da seção sísmica.
- 2) Identificar a variável de estado (sistema) para montar as equações 4.
- 3) Definir as condições iniciais para dar início ao processo recursivo de geração da função $b_i(k)$, sendo elas:
 - a) Fator de atenuação inicial β_0 .
 - b) Amostragem Δt .
 - c) Tempo de trânsito da primária e de sua múltipla.
- 4) Calcular o operador KBCP e a saída real, $\bar{y}_{ij}(k)$, a cada incremento Δt e para cada; $\beta_0 \leq \beta_j = \beta_{j-1} + \Delta t \leq \beta_p$, onde $j = 1, 2, \dots, p$.
- 5) Cálculo do erro entre a saída desejada, $y(k)$, e a saída real, $\bar{y}_{ij}(k)$, pela forma adotada:

$$E_{ij}(k) = |y(k) - \bar{y}_{ij}(k)|$$

onde $y(k)$ é o sismograma sem múltiplas, e $\bar{y}(k)$ é a saída do operador KBCP. O fator de atenuação, β , e o comprimento do operador (L) são incrementados, Δt , a cada iteração para obter a matriz $E_{ij}(k)$ para cada $\bar{y}_{ij}(k)$, sendo i o número de variações de β e j o número de variações do comprimento do operador. $E_{ij}(k)$ é armazenado em uma matriz, e o menor erro entre todas as medidas é obtido através de uma busca automática.

6) O fator de atenuação β e o comprimento do operador é selecionado. Desta forma, obtemos o melhor valor de $b_i(k)$ e, conseqüentemente, o operador KBCP mais adequado para cada traço da seção sísmica.

7) Convolução do operador de previsão KBCP, $h_k(i)$, com o traço correspondente da seção sísmica.

8) Os passos 3, 4 e 5 são realizados em toda seção sísmica.

Resultados

Os resultados selecionados para ilustrar o processo são seções fonte-comum com 50 receptores separados por um intervalo de 25m. O sinal-fonte é o Gabor com uma frequência dominante de 40 Hz, e os traços têm um intervalo de amostragem de 2 ms. Por meio de um algoritmo de traçamento de raio, foram geradas apenas reflexões primárias e múltiplas de superfície e período longo para a primeira interface.

Modelo 1

Composto por uma camada homogênea separada por interfaces plano-horizontais e contínuas sob um semi-espaço, velocidades de 1800m/s e 2300m/s, e espessuras 1300m e 1200m, (Figura 2). Para avaliar a estabilidade do operador KBCP, adicionamos ruído aleatório no modelo 1 como mostra as Figuras 3a e 4a. A razão sinal/ruído (S/R) é calculada pela razão da estimativa das variâncias

$$\frac{S}{N} = 1/N \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2 / 1/N \sum_{i=1}^N (v_i - \bar{v})^2,$$

onde \bar{x} e \bar{v} são as estimativas dos valores médios.

Os resultados obtidos com o Modelo 1 (sem e com ruído) estão apresentados nas Figuras 2b, Figura 3b e 4b. Podemos notar que o operador KBCP consegue atenuar a múltipla selecionada para os dois casos (sem ou com ruído). Na Figura 1 ilustramos o operador, e o resultado após a convolução com um traço sísmico.

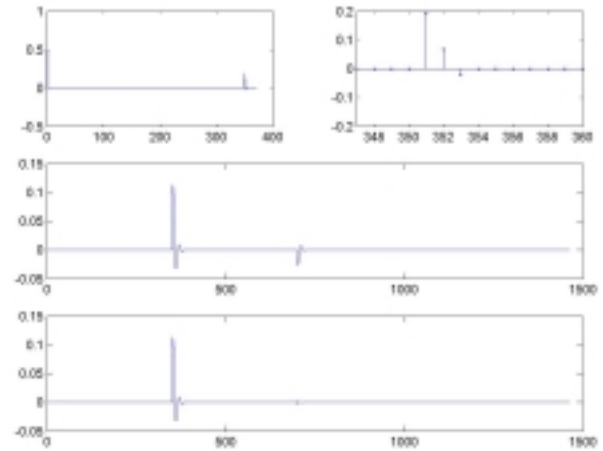


Figura 1 - (a) Operador KBCP. (b) Detalhes do operador KBCP na janela entre os pontos 344 e 360. (c) Traço de entrada. (d) Saída real onde se nota que a múltipla na Figura (c) foi atenuada.

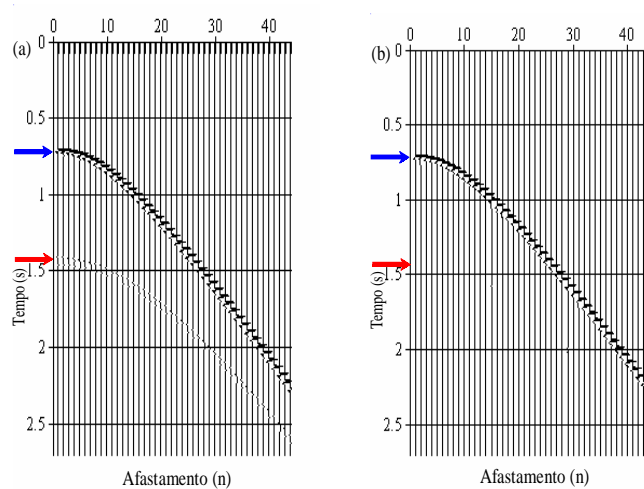


Figura 2 - (a) Seção sísmica fonte-comum sem ruído e com uma múltipla de superfície. (b) Resultado da aplicação do operador KBCP. Notamos que a múltipla é atenuada.

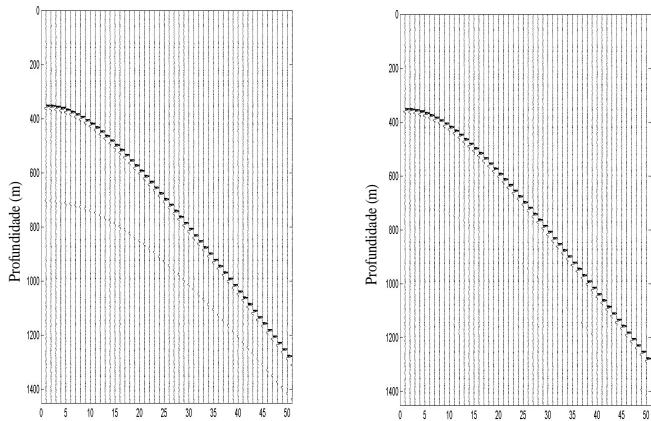


Figura 3 (a) Seção sísmica fonte-comum com ruído ($S/R=97$) e uma múltipla simétrica. (b) Resultado da seção após a aplicação do operador KBCP. Notamos que a múltipla é atenuada.

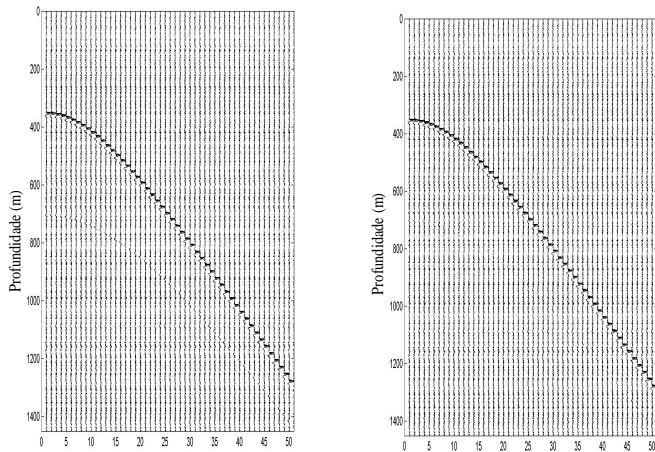
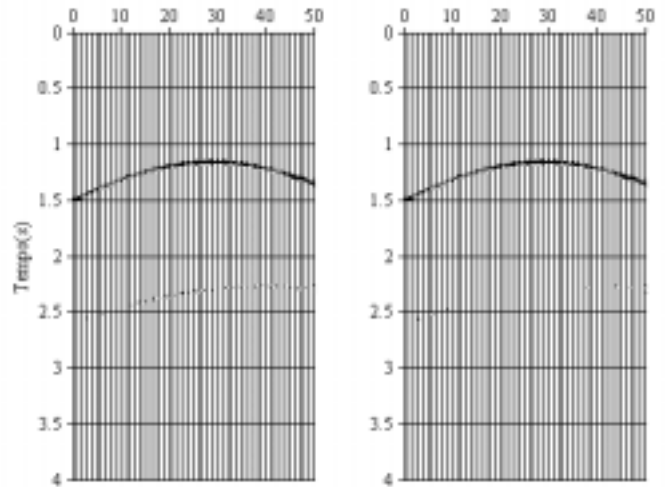


Figura 4 (a) Seção sísmica com ruído ($S/R=75$) com uma múltipla simétrica. (b) Resultado da seção após a aplicação do operador KBCP. Notamos que a múltipla é atenuada.

Modelo 2

Formado por uma camada homogênea separada por uma interface plano-inclinada 2D e contínua sob um semi-espaco, e velocidades de 3000m/s e 5500m/s. (Figura 5.a). O resultado obtido para o Modelo 2 sem ruído é a Figura 5.b, onde notamos que o operador KBCP realiza a atenuação da múltipla selecionada.



operador KBCP. Notamos que a múltipla é atenuada.

Modelo 3

Composto de duas camadas homogêneas separadas por duas interfaces plano-inclinadas e contínuas sob um semi-espaco, e velocidades de 3000m/s, 4000m/s e 5500m/s. Os resultados obtidos para a seção deste modelo sem ruído estão mostrados na Figura 6, onde notamos que o operador KBCP realiza a atenuação da múltipla selecionada.

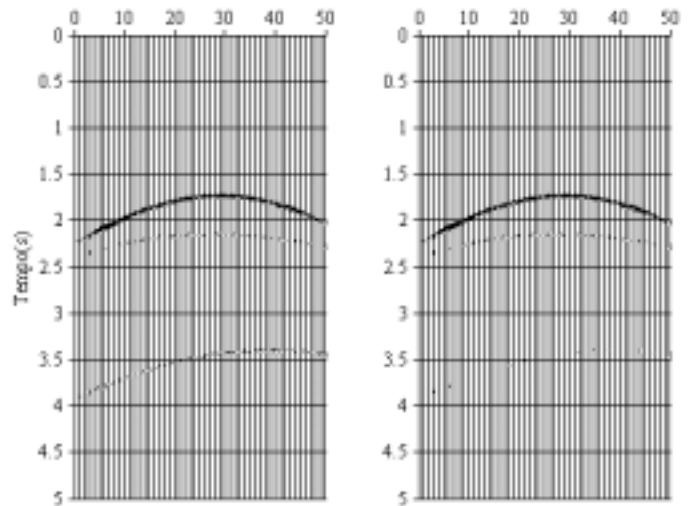


Figura 6 - (a) Seção sísmica fonte-comum obtida utilizando o programa seis88. (b) Resultado da aplicação do operador KBCP. Notamos que a múltipla é atenuada. Modelo 4

Este modelo exemplifica um trecho da seção geológica longitudinal à Bacia do Solimões (Eiras, 1996), (Figura 7), contendo sete camadas homogêneas separadas por interfaces curvas, plano-inclinadas e horizontais, sobre um semi-espaço (Figura 8). Foram geradas apenas reflexões primárias para todas as interfaces, e a múltipla gerada apenas para a segunda interface. Os resultados obtidos para este modelo estão ilustrados na Figura 9, onde notamos que o operador KBCP realizar a atenuação da múltipla selecionada, porém não com a precisão das anteriores devido ao modelo ser mais complexo.

Seção Geológica Longitudinal à Bacia do Solimões (Eiras, 1996).

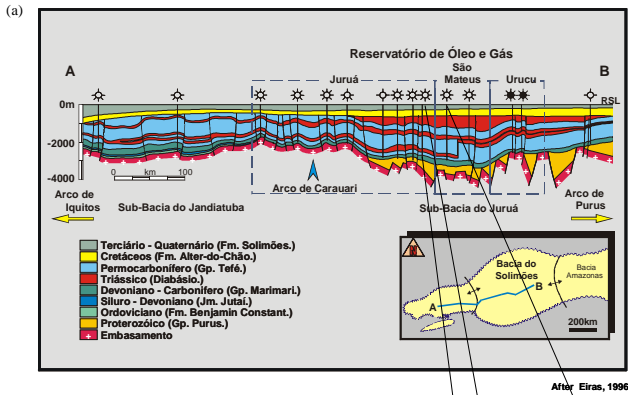


Figura 7 – (a) Seção geológica longitudinal à Bacia do Solimões. (b) Detalhes da seção geológica utilizada para simulação da seção sísmica.

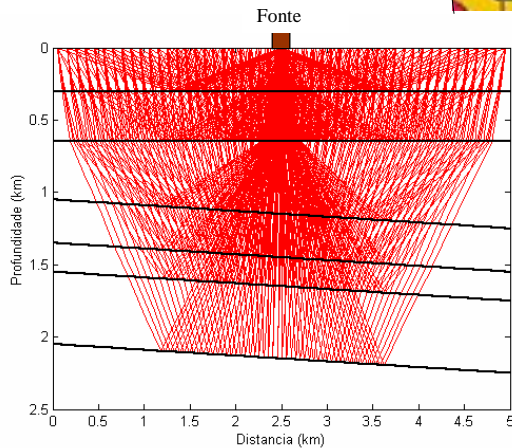


Figura 8 – Tiro-comum selecionado da seção geológica (Figura 5.18c) ilustrando a trajetória dos raios na seção. 50 receptores separados por um intervalo de 25m.

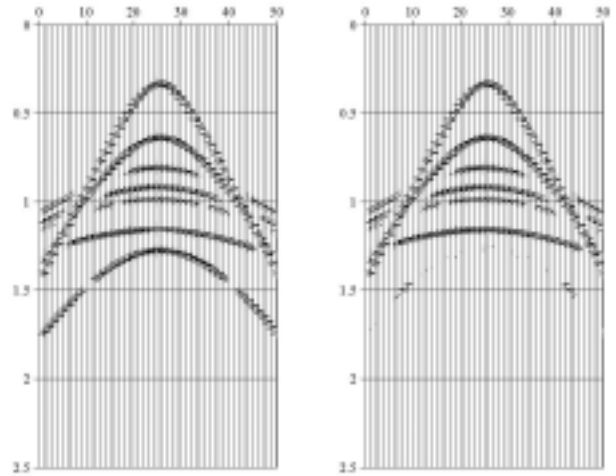


Figura 9 - (a) Seção sísmica fonte-comum para a seção geológica usando o programa seis88 com aplicação de ganho para visualizar melhor as interfaces e a múltipla presente nesta seção. (b) Seção sísmica após a aplicação do operador KBCP.

Modelo 5

Composto por uma camada de água sob um semi-espaço, velocidades de 1500m/s e 4300m/s, e espessuras 1000m e 1500m. O resultado obtido está na Figura 10, onde notamos que o operador KBCP realiza a atenuação das múltiplas de primeira, segunda e terceira ordem.

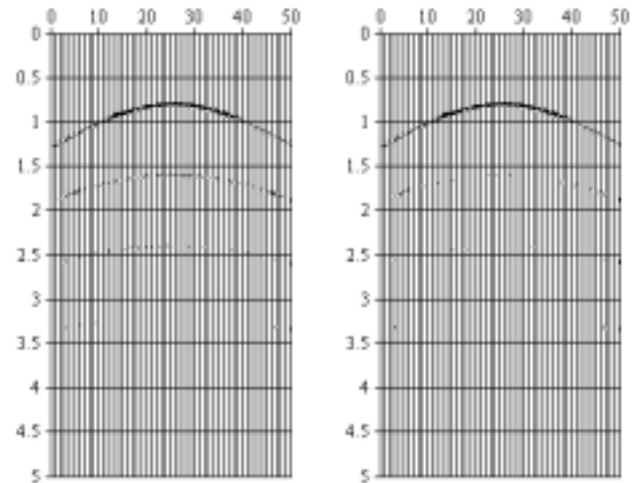


Figura 10 - (a) Seção sísmica fonte-comum obtida utilizando o programa seis88. (b) Resultado da aplicação do operador KBCP. Notamos que as múltiplas de primeira, segunda e terceira ordem são atenuadas.

Modelos 6

Este modelo é composto por cinco camadas homogêneas separadas por interfaces contínuas, sobre um semi-espço (Figura 11). Os resultados obtidos para estes modelos estão ilustrados na Figura 12, onde notamos que o operador KBCP realiza a atenuação da múltipla selecionada.

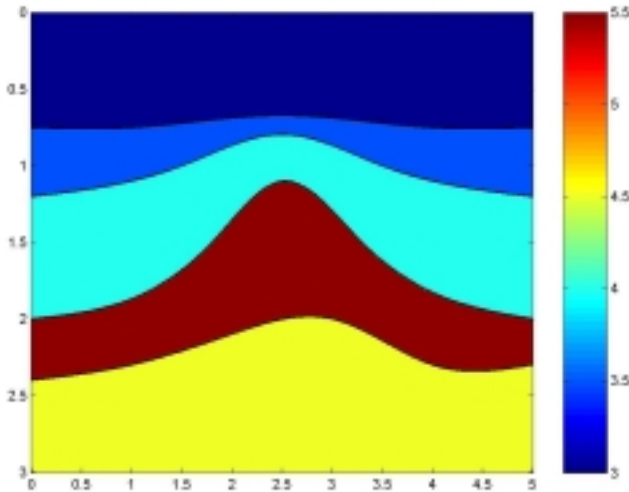


Figura 11 - Modelo geológico utilizado para simulação da seção sísmica com a distribuição de velocidades à direita.

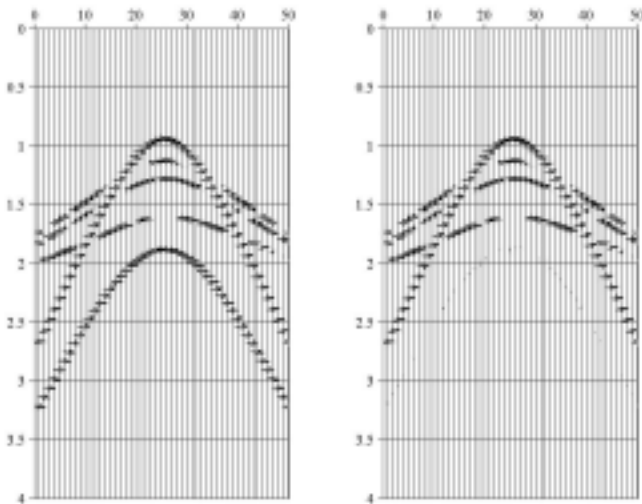


Figura 12 - (a) Seção sísmica fonte-comum para a seção geológica usando o programa seis88 com aplicação de ganho na seção para melhor visualizar os eventos primários e múltiplas. (b) Seção sísmica após a aplicação do operador KBCP.

Conclusões

A comparação com estudos paralelos mostra que a implementação do KBCP pode ser mais simples do que a do FWH convencional, e a aplicação do FKB dispensa medidas de estacionariedade. A versatilidade do FKB está diretamente relacionada à capacidade de generalização do problema WH quanto a não-estacionariedade na janela dos dados, condição natural de dados geofísicos. O operador KBCP consegue realizar uma boa atenuação das múltiplas de superfície nos modelos sintéticos aqui apresentados. O KBCP não permite a identificação das múltiplas, e para os exemplos mostrados admitimos conhecer os tempos de trânsito das múltiplas. Este operador proposto precisa até momento estar associado a outro método que tenha como característica a predição das múltiplas.

Agradecimentos

Ao Curso de Pós-graduação em Geofísica da UFPa (CPGF), a Agência Nacional do Petróleo (ANP) e a CAPES pelo apoio financeiro, e ao Departamento de Matemática da UFPa pelo apoio à pesquisa.

Referências

- Brown, R.G. e Hwang, P.Y.C. (1996). *Introduction to Random Signals and Applied Kalman Filtering*. John Wiley & Sons. New York, USA
- Crump, N. (1974). *A Kalman filter approach to the deconvolution of seismic signals*. *Geophys. Res.*, 39(1): 1-13.
- Kalman, R. E. e Bucy, R. E., (1961). *New results in linear filtering and prediction theory*. *Trans. ASME, Series D, Journal of Basic Engineering*, 83; 95-107.
- Mendel, J. M., (1983). *Optimal Seismic Deconvolution*. Academic Press. New York, USA.
- Mendel, J. M. (1990). *Maximum-Likelihood Deconvolution, A Journey into Model-Based Signal Processing*. Springer-Verlag.
- Robinson, E. A. (1999). *Seismic Inversion and Deconvolution. Part B: Dual-sensor Technology*. Pergamon Press. Amsterdam, Netherlands.
- Mendel, J. M.; Nanhi, N. E. e Chan, M. (1979). *Synthetic seismogram using the state-space approach*. *Geophysics*, v. 44, n. 5, p. 880-895.
- Rocha, M. P. C. e Leite, L. W. B. (2003). *Adaptação do Método Kalman-Bucy à deconvolução preditiva de múltiplas*. Submetido ao Eighth International Congress of The Brazilian Geophysical Society.