



Processamento aplicado à sísmica de alta resolução para atenuação de múltiplas do fundo do mar.

David Wendell Tomaz da Silva^{(1)(*)}; Rosângela Corrêa Maciel⁽¹⁾⁽²⁾.

(1) Departamento de Geofísica - Universidade Federal do Rio Grande do Norte – UFRN

(2) INCT-GP, Instituto Nacional em Ciência e Tecnologia em Geofísica do Petróleo (CNPq), Brasil.

Copyright 2015, SBGf - Sociedade Brasileira de Geofísica

This paper was prepared for presentation during the 14th International Congress of the Brazilian Geophysical Society held in Rio de Janeiro, Brazil, August 3-6, 2015.

Contents of this paper were reviewed by the Technical Committee of the 14th 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.

Abstract

This paper proposes a processing flow chart applied to seismic data of high resolution, and with main objective the attenuation of multiple reflections from the seabed, which are strongly present in this type of data. With this aim we apply a multichannel predictive deconvolution filter type Wiener-Levison implemented by researchers from LAGEP-CPGG-UFBA in Fortran90 programming language. The others processing steps were defined based on the literature on the processing of conventional seismic data, and were implemented by the free software CWP / SU of the Colorado School of Mines. The results were satisfactory showing effective in mitigating multiple of the seabed.

Keywords: high resolution seismic, multi predictival deconvolution, mitigate multiple.

Introdução

A sísmica de alta resolução é um método de prospecção geofísica que utiliza os princípios da reflexão de ondas sísmicas para estimar as propriedades da subsuperfície da terra. O sinal emitido por uma fonte sísmica é sempre refletido quando encontra um material com impedância acústica diferente do meio em que está se propagando. O contraste desta impedância irá determinar a proporcionalidade relativa de energia refletida e transmitida (Kearey et al. 2009). A razão entre as amplitudes do raio refletido e o raio incidente é chamada de coeficiente de reflexão (Sharma, 1997).

Apesar do princípio físico ser o mesmo da sísmica convencional, os dados de sísmica rasa diferenciam-se tanto na aquisição e equipamentos usados, quanto no processamento.

Atualmente o processamento de dados sísmicos de alta resolução é um tema pouco abordado, pois em geral os dados são interpretados em sua visualização direta (Brunetta, 2005; Gomes et al., 2010). Porém um evento fortemente presente nestes dados são as múltiplas do fundo do mar, as quais são geradas devido à reverberação da onda sísmica na lâmina d'água. Na sísmica convencional este tipo de evento pode ser tratado, dentre outras técnicas, através da deconvolução preditiva multicanal (DPM)(Luz, 2012; Verschuur, 2006).

Baseado neste contexto, o presente trabalho tem como proposta atenuar múltiplas do fundo do mar utilizando um algoritmo de deconvolução preditiva multicanal tipo Wiener-Levinson implementado por pesquisadores do LAGEP-CPGG-UFBA, em linguagem fortran 90.

O método da DPM se baseia na periodicidade das múltiplas, e como esta característica se preserva somente para o caso de incidência normal e afastamento nulo (*zero-offset*) a aplicação do método será mais efetiva na atenuação das múltiplas na sísmica convencional quando o mesmo é aplicado ao dado organizado no domínio do afastamento comum ou em seções de afastamento nulo de acordo com Lima (1999); Santos Jr (2002) e Maciel (2007). No caso da sísmica de alta resolução o conjunto de tiros que compõem o dado se trata de uma seção de afastamento mínimo, a qual devido ao pequeno afastamento fonte-receptor, se aproxima de uma seção afastamento nulo. Desta forma, espera-se que o método execute uma boa atenuação da múltipla do fundo do mar.

Nas demais etapas do processamento apresentado neste trabalho foi utilizado o software livre *CWP/SU* (*Center for Wave Phenomena / Seismic Unix*) da *Colorado School of Mines*.

O dado sísmico

O dado sísmico utilizado neste trabalho foi adquirido em um levantamento realizado pelo Serviço Geológico dos Estados Unidos (USGS) em julho de 1999 na costa leste da Flórida (Figura 1).



Figura 1 – Mapa de localização geográfica do levantamento sísmico de alta resolução realizado pelo Serviço Geológico dos Estados Unidos (USGS).

Aquisição do dado foi realizado pelo *Boomer system* modelo CSP 300 da *Applied Acoustics*, este equipamento possui placa Huntec ITI ST-5, 10 canais, os Hidrofonos

streamer e o *software* de aquisição *Delph Seismic* versão 1.36 auxiliado pelo GPS *Trimble Centurion 3* – 5 m de precisão (Forde, 2013).

O princípio de funcionamento do *boomer* consiste em um sistema de bobinas que recebem uma corrente elétrica de alta voltagem, ao receberem essa corrente as bobinas geram um campo magnético que impulsionam uma placa coberta por uma membrana de borracha (Ayres Neto & Batista Neto, 2004), o boomer trabalha numa faixa de frequência entre 300 Hz – 3 KHz e tem uma profundidade de penetração aproximadamente 200m.

O processamento

O fluxo do processamento adotado para linha m02 foi dividido em 9 etapas sendo apresentado na figura 2. Com base na literatura e testes realizados no laboratório, o desenvolvimento deste fluxo busca atenuar as múltiplas em dados sísmicos de alta resolução.

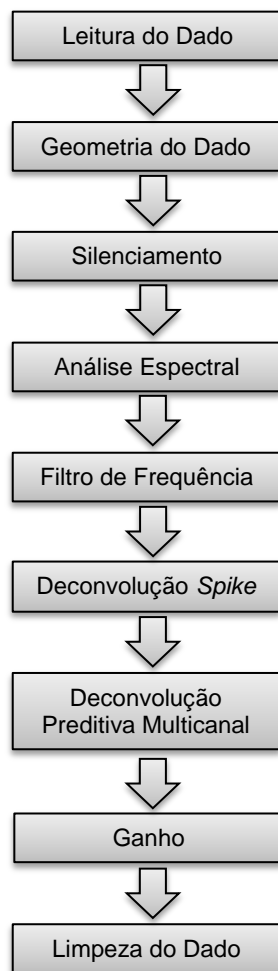


Figura 2 - Fluxograma proposto para o processamento de dados de sísmica de alta resolução.

Descrições das etapas aplicadas:

Leitura do dado – Compreende em visualizar todas as informações no dado, entretanto para realizar essa tarefa primeiramente é preciso converter o dado originalmente

gravado no formato *seg* para o formato do *software CWP/SU*;

Geometria do dado – A geometria do dado é uma etapa de suma importância no processamento pois ela é responsável pela correção topográfica, correção da distância entre fonte e receptor e do transdutor e a antena do *gps*;

Silenciamento – o silenciamento irá remover ruídos presentes no tempo referente à propagação da onda na lamina d'água;

Análise espectral – No processo de aquisição do dado existe uma quantidade de sinais captados com valores incoerentes (ruídos) que resultam de interferências ambientais, antrópicas ou eletromagnética (Gomes *et al.*, 2010). A análise espectral tem como finalidade a visualização e correlação dos espectros de amplitudes, tempo e frequência. Desta forma é possível analisar o conteúdo de frequência e identificar ruídos indesejáveis no dado. Para posterior remoção de faixa ruidosa;

Filtro de frequência – Filtros que operam em faixas de frequência são importantes para remoção de possíveis ruídos identificados na análise espectral, neste trabalho utilizaremos o filtro passa-banda tipo trapezoidal que é responsável por remover baixas e altas frequências do dado;

Deconvolução spike – Ou deconvolução ao impulso, é aplicada visando o aumento da razão sinal ruído, através da compressão do pulso ao impulso utilizando o filtro preditivo de Wiener;

Deconvolução preditiva multicanal – o filtro de Wiener-Levison é um operador que prediz e atenua as múltiplas.

$$w(t) = p(t) * e(t) * m(t) \quad 1$$

A equação 1 descreve o modelo convolucional sem ruído, onde $w(t)$ representa o traço sísmico, $p(t)$ é o pulso sísmico, $e(t)$ é a resposta impulsiva da terra e $m(t)$ representa as múltiplas (Yilmaz, 1987). A deconvolução considerando a distância de predição unitária ($L=1$) resulta na convolução da resposta impulsiva com a múltipla, já que o comprime o pulso $p(t)$ em uma função delta de Dirac. Para o caso em que a distância de predição é arbitrária ($L>1$) o operador preditivo atuará em amostras localizadas em tempo maiores. O valor de L deve ser adequadamente escolhido de forma que o filtro venha a atuar na zona onde ocorrem as múltiplas, de forma a atenuá-las.

A teoria da filtragem preditiva multicanal é generalizada a partir do caso monocanal (Porsani, 1997).

Conforme descrito por Porsani, 1997; Lima, 1999 e Santos Jr, 2012, a equação 2 apresenta um exemplo em que cada traço deconvolvido é obtido com uma janela de três canais e 3 coeficientes em cada canal:

$$\tilde{w}(t) = \sum_{k=1}^3 x_{t-k+1} \tilde{f}_k + \sum_{k=1}^3 y_{t-k+1} \tilde{g}_k + \sum_{k=1}^3 z_{t-k+1} \tilde{h}_k \quad 2$$

Onde $x(t)$, $y(t)$ e $z(t)$ são os traços de entrada, \tilde{f}_k , \tilde{g}_k , e \tilde{h}_k são operadores do filtro que atuam sobre os traços, e $\tilde{w}(t)$ o dado calculado.

Assim, a expressão do erro de predição $e(t)$ pode ser escrita como a diferença entre o dado calculado $\tilde{w}(t)$ e o dado desejado $w(t)$:

$$e(t) = w(t) - \tilde{w}(t) \quad 3$$

em notação matricial a equação 3 é representada como segue:

$$W = (X Y Z) \quad 4$$

Onde W é uma matriz toeplitz constituída pelas matrizes também toeplitz, X , Y e Z geradas pelos respectivos traços $x(t)$, $y(t)$ e $z(t)$. Assim podemos definir

$$a^T = (f^T g^T h^T) \quad 5$$

Onde os vetores f , g , e h são formados pelos respectivos operadores f_t , g_t e h_t . Para um vetor a arbitrário podemos escrever o vetor erro de predição na forma

$$e = x - Wa \quad 6$$

Minimizando a forma quadrática

$$Q(a) = e^T e \quad 7$$

Obtêm-se o sistema de equações normais, cuja a solução fornece o filtro preditivo multicanal de Wiener-Levison.

Fazendo a saída desejada $w(t)$ corresponder a um dos canais de entrada, avançado de L amostras, $w_t = x_{t+L}$. A solução do sistema de equações fornecerá os coeficientes do operador preditivo multicanal, com distância de predição L .

Ganho – A amplitude do pulso sísmico diminui à medida que o mesmo se propaga no meio, isto é devido ao espalhamento geométrico, absorção de energia e partição da energia através da reflexão e transmissão nas interfaces. Uma forma de corrigir parte destas perdas é aplicar filtros de ganhos ao dado para recuperar parte da amplitude perdida, pois os filtros de ganhos geram uma distribuição equalizada das amplitudes;

Limpeza do dado – Remover pequenos ruídos que são gerados no processamento e deixar pronto para a interpretação.

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Com base no processamento aplicado à sísmica convencional desenvolvemos um fluxo de processamento para a sísmica de alta resolução capaz de atenuar as múltiplas do fundo do mar. Portanto iremos detalhar a seguir as etapas deste processamento.

Leitura do dado, Geometria do dado e Silenciamento

O dado bruto da linha m02 está gravado no formato segy, portanto, para realizamos a leitura do dado no *software CWP/SU* foi necessária efetuar a conversão do dado de formato segy para su, desta forma foi possível visualizar o dado bruto (Figura 3) e as informações de aquisição e geometria do dado (Tabela 1).

A primeira correção geométrica realizada no dado refere-se ao *offset* (distância entre o transdutor e a antena do GPS). A linha m02 tem uma extensão de 14.916 m, foi adquirida com uma velocidade constante de 1,690773067 m/s, ou seja, 1,691348225m/tiro totalizando 8.919 tiros.

As correções referentes à geometria do dado foram efetuadas pelo programa *Delph Seismic* durante o processo de aquisição, desta forma nesta etapa do processamento apenas alteramos as coordenadas referentes ao posicionamento da fonte e do receptor, vistos na Tabela 1, observe que ambas são iguais, assim como o número de traços e número de tiros, isto é devido à fonte e o receptor terem afastamento praticamente nulo, diferentemente da sísmica convencional onde a geometria do dado está ligada ao tipo de arranjo selecionado para aquisição.

Em seguida, realizamos o silenciamento (*muting*) dos ruídos registrados durante a propagação da onda na coluna d'água.

Tabela1- Principais informações contidas no dado Linha m02.

Informações no dado	Quantidade
Hidrofone	1
Traço sísmico	8919
Tiro	8919
Numero de amostras	1600
Intervalo de amostragem (μ s)	125
Posição da fonte UTMX	589190, 604106
Posição da fonte UTM Y	3005431, 3005608
Posição do receptor UTMX	589190, 604106
Posição do receptor UTM Y	3005431, 3005608
Ano	1999

Análise Espectral e filtro passa-banda

Algumas informações sobre a aquisição são de extrema importância nesta etapa para podemos identificar o que é sinal e o que é ruído, pois quando realizamos a análise espectral no dado percebemos a presença forte de

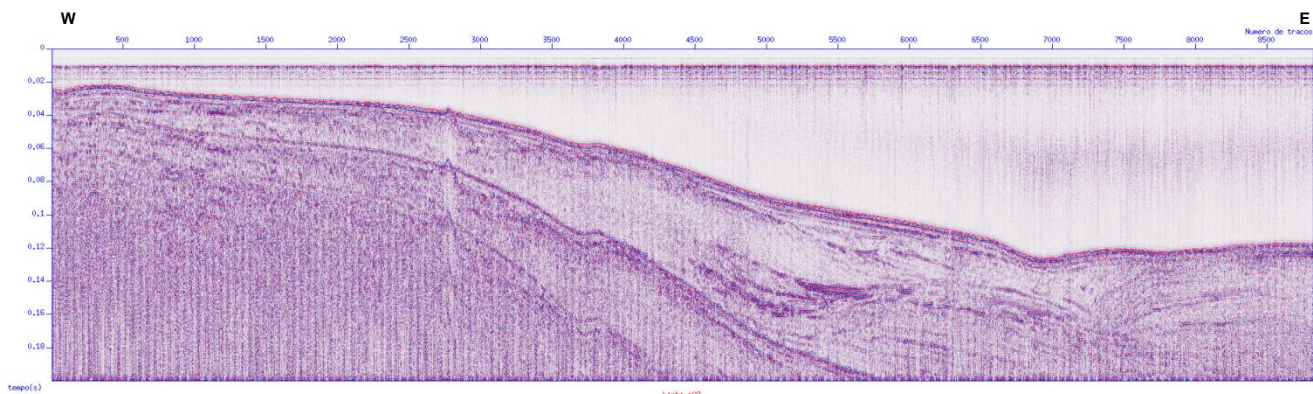


Figura 2 – Linha m02, dado bruto.

ruídos de alta frequência em todo dado, assim como também foi possível identificar um ruído de baixa frequência devido ao motor da embarcação.

Para remover os ruídos tanto de alta quanto de baixa frequência, foi utilizado o filtro passa-banda tipo trapezoidal, este filtro é feito a partir da definição de 4 frequências limitantes que nesse caso foi determinado através da análise espectral feita no dado. Na figura 4, podemos observar uma faixa de frequência predominante entre 300 Hz – 900 Hz, também é possível visualizar a presença das múltiplas e ruídos externos (embarcação e outros) no espectro de frequência .

Observando a faixa de frequência dominante apresentada no dado definimos os intervalos de frequências necessários para aplicação do filtro de frequência passa-banda trapezoidal (280 Hz - 330 Hz - 900 Hz - 1 KHz).

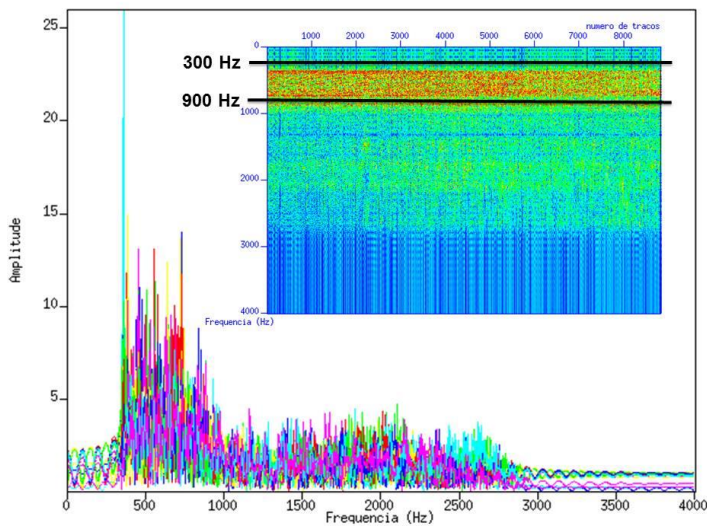


Figura 4 – Imagem do espectro de frequência no domínio FK mostrando a concentração das amplitudes significativas nas frequências 300Hz e 900 Hz

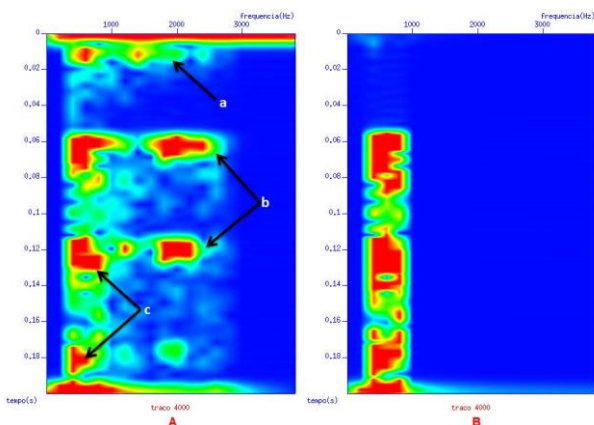


Figura 5 – Imagem do espectro de frequência no domínio do tempo do traço 4000. (A) Espectro de Frequência antes da aplicação do filtro passa-banda. A seta identificada com a letra a mostra ruídos de baixa e alta frequências referentes a embarcação e ruídos externos, a seta b indicam os ruídos de alta frequência e a seta c mostra a presença das múltiplas no dado. (B) Espectro de Frequência depois da aplicação do filtro passa-banda tipo trapezoidal.

Na figura 5(A) podemos observar a presença das múltiplas e ruídos de altas e baixas frequências, a seta a na figura indica ruídos causados pelo motor da embarcação e ruídos externos na coluna d'água, pois como podemos verificar na figura 3 o substrato oceânico no traço sísmico 4000 está no tempo de 0,06 s, por isso, é importante remover todo este ruído que está em todo o dado, a seta b mostra ruídos de alta frequência, que não alcançam grandes profundidades e estão replicando as informações que estão dentro da faixa de frequência trabalhada pelo boomer e a seta c indica a presença da múltipla.

Na figura 5(B) mostra o dado após a aplicação do filtro passa-banda, podemos verificar que os ruídos são removidos.

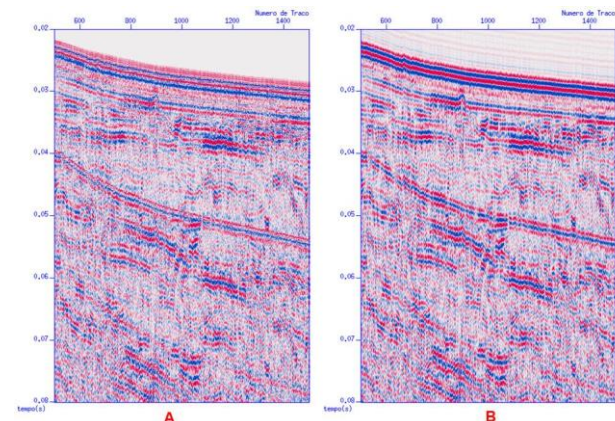


Figura 6 – Detalhe da linha m02 mostrando a eliminação de ruído de baixa e alta frequência após a aplicação do filtro passa-banda tipo trapezoidal. (A) Perfil antes da aplicação do filtro passa-banda e (B) perfil após a aplicação do filtro passa-banda.

A figura 6 mostra o detalhe da linha m02 antes e depois da aplicação do filtro passa-banda, note que no dado filtrado o traço sísmico fica mais nítido em relação ao dado bruto. É importante interpretar com cautela o que é um sinal e um ruído em seu dado, pois caso a interpretação esteja incorreta, você poderá realçar um ruído e remover um sinal no processamento.

Deconvolução Spike

Para aplicarmos a deconvolução *spike* primeiramente é necessário definirmos o espaço de predição ou *lag*. A autocorrelação da *wavelet* de entrada pode ser usada para definir o melhor valor de *lag* para suprimir múltiplas, o valor do *lag* foi calculado através da média.

$$\text{lag} = \frac{(t_{\text{max}} - t_{\text{min}})}{2}$$

A figura 7 mostra a autocorrelação da *wavelet* usada para poder visualizar o tempo máximo e mínimo que utilizamos no cálculo do *lag*.

O valor do *lag* calculado para este dado foi de 0,00045501, um valor extremamente pequeno em relação a valores de *lag* calculados na sísmica convencional, isto é, devido à escala de tempo usada na sísmica de alta resolução ser em μs (microsegundos) ao passo que na sísmica convencional a escala de tempo usada é de ms (milissegundos).

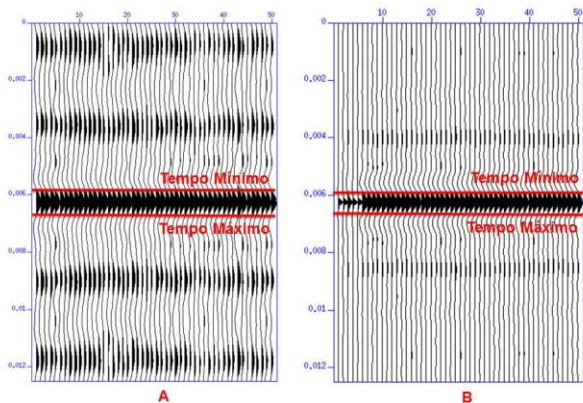


Figura 7 – Comparação do lag gerado pela autocorrelação. (A) Dado antes da aplicação da deconvolução *Spike* e (B) dado após a aplicação da deconvolução *Spike*.

Podemos verificar na figura 8(B) um pequeno deslocamento do sinal e a compressão no traço sísmico devido a deconvolução *spike*.

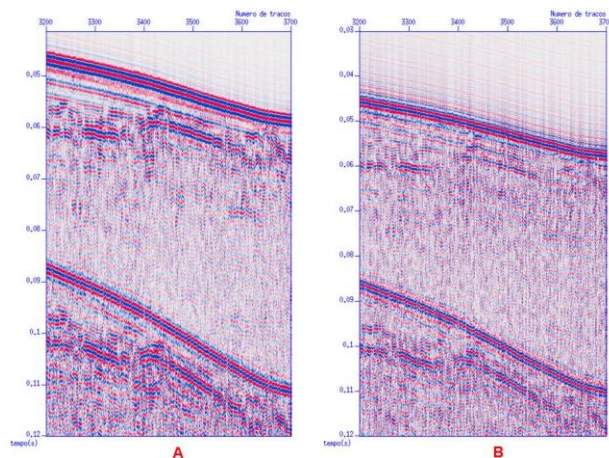


Figura 8 – (A) Perfil cortado da linha m02 antes da aplicação da deconvolução *Spike* e (B) após a aplicação da deconvolução *spike*.

Deconvolução Preditiva Multicanal

A aplicação do filtro de deconvolução preditivo multicanal requer a definição do período P , a partir do qual a distância de predição L é estimada. Normalmente, L é tomada como um percentual de P , da ordem de 90%. O número de coeficiente do filtro N também é normalmente definido como sendo um percentual de P , da ordem de 20%. Este período foi definido através de *picks* diretamente sobre o dado, selecionando o tempo da reflexão primária do fundo do mar, já que as múltiplas a serem suprimidas são as do fundo do mar. Após a definição do período utilizamos o algoritmo desenvolvido em *fortran 90* para aplicar a deconvolução preditiva multicanal.

Foram testados diferentes percentuais para o cálculo da de L e N para este dado, entretanto a melhor resposta foi obtida usando os percentuais respectivamente de 90% e 20%. Variamos também o número de canais NC entre 3, 5 e 7 e o melhor resultado encontrado foi para NC igual a 3. Visto que não houve nenhuma melhora significativa ao aumentarmos o número de canais, ao passo que observamos o aumento considerável do tempo de processamento.

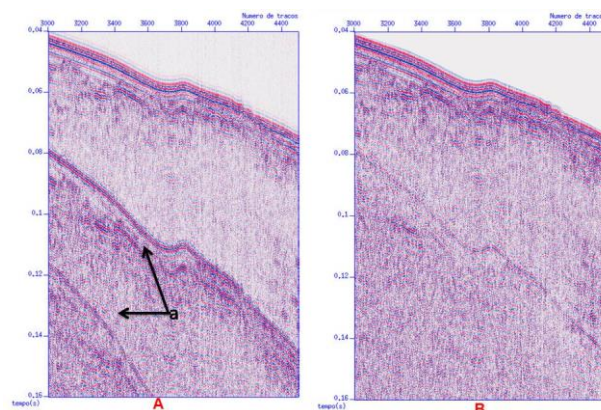


Figura 9 – (A) dado antes da aplicação da DPM, a seta *a* indica a presença da múltipla, (B) dado após aplicação da DPM.

Recuperação de Ganho e Limpeza do dado

Existem diversos tipos de ganhos que poderíamos utilizar neste dados, todavia a melhor forma de realçar o sinal e que teve melhor resultado foi o AGC (*Automatic Gain Control*) (Figura 9), o AGC cria a distribuição equalizada das amplitudes, aplicamos diferentes janelas de tempo no dado, e a melhor resposta esta na figura 9(D).

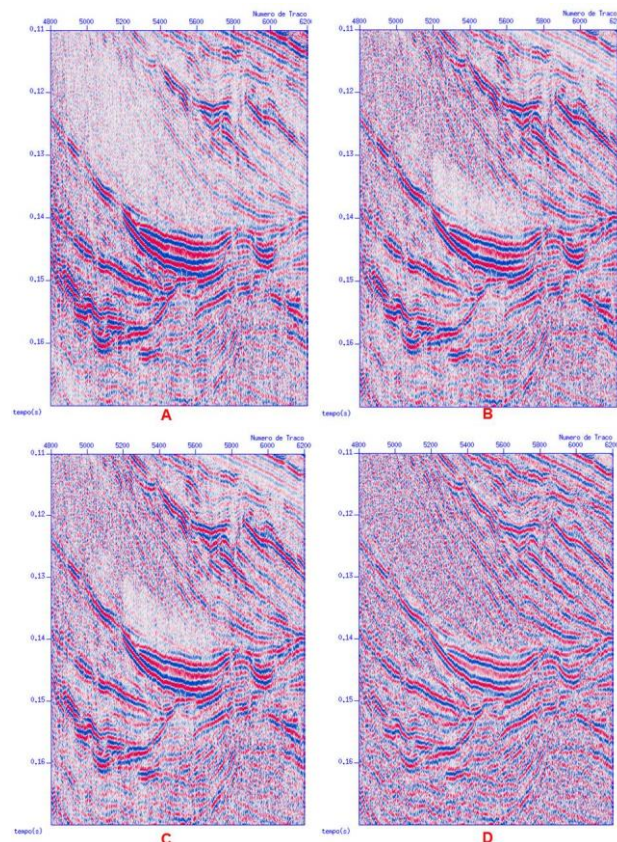


Figura 10 – Comparação entre janelas de tempo do AGC. (A) Dado sem aplicação do AGC, (B) dado com aplicação do AGC com uma janela de tempo AGC de 0,02 segundos, (C) dado com aplicação do AGC com uma janela de tempo AGC de 0,01 segundos e (D) dado com aplicação do AGC com uma janela de tempo AGC de 0,005 segundos.

Após a aplicação do ganho, aplicamos novamente no dado o silenciamento para remover ruídos que surgiram no decorrer do processamento, na figura 10 mostra que o

dado não apresenta nenhum ruído na lamina d'água. Desta forma o dado está pronto para ser interpretado.

Conclusões

O processo de atenuar as múltiplas do fundo do mar em dados de sísmica rasa utilizando a deconvolução preditiva multicanal, muitas vezes não se mostra eficaz, devido às múltiplas terem fortes amplitudes. Contudo, observa-se na figura 11 que o fluxo de processamento realizado neste trabalho obteve sucesso na atenuação da múltipla, mesmo ela tendo uma amplitude bastante forte.

Portanto, pode-se concluir que a aplicação do filtro tipo Wiener-Levison em dados de sísmica de alta resolução, tem uma resposta satisfatória. Tendo sido efetivo na atenuação das múltiplas do fundo do mar. No entanto, percebe-se que a eficiência do filtro é bastante sensível à identificação correta do período e do tamanho do filtro.

Agradecimentos

Os autores agradecem à PETROBRAS, FINEP, CNPq e INCT-GP pelo financiamento. Aos pesquisadores do LAGEP-CPGG-UFBA por disponibilizarem os algoritmos usados na DPM e ao Serviço Geológico dos Estados Unidos (USGS) por disponibilizar os dados para realizar estudos.

Referências

AYRES NETO, A. & BAPTISTA NETO, J. A., 2004. Métodos diretos e indiretos de investigação do fundo oceânico. In: BATISTA NETO, J. A., PONZI, V. R. A. & SICHEL, S. E. (Orgs). Introdução à geologia marinha. Editor Interciência, Rio de Janeiro, p. 281.

BRUNETTA, R., 2005. O processamento da sísmica de Reflexão rasa – desafios encontrados no estudo de modelos análogos a reservatórios fraturados. Dissertação (mestrado em Geologia). Universidade Federal do Paraná, Curitiba, p. 85.

FORDE, A.S., Dadisman, S.V., Wiese, D.S., and Phelps, D.C., 2013, Archive of digital boomer subbottom data collected during USGS cruises 99FGS01 and 99FGS02 offshore southeast and southwest Florida, July and November, 1999: U.S. Geological Survey Data Series 773, 1 DVD, <http://pubs.usgs.gov/ov/ds/773>.

GOMES, M. P., VITAL, H. & MACEDO, J. W. P., 2010. Fluxo de processamento aplicado a dados de sísmica de alta resolução em ambiente de plataforma continental. Exemplo: Macau-RN. *Revista Brasileira de Geofísica*, Rio de Janeiro, v. 29(1) p. 173-186.

KEAREY, P., BROOKS, M. & HILL, I., 2002. Geofísica de exploração. Tradução Maria Cristina M. Coelho, Oficina de Textos, Sao Paulo, p. 437.

LIMA, A. P., 1999. Deconvolução de Reflexões múltiplas nos domínios e com filtros multicanais. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Geofísica, Universidade Federal da Bahia.

LUZ, M. A. L., 2012. Comparação de desempenho da deconvolução preditiva multicanal e da filtragem F-K na atenuação de múltiplas do fundo do mar. Dissertação (mestrado em Geofísica). Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, p. 60.

MACIEL, R. C., 2007. Deconvolução Preditiva multicanal de reflexões múltiplas no domínio CRS. Tese de Doutorado, Programa de Pós-Graduação em Geofísica, Universidade Federal da Bahia.

PORSANI, M. J., 1997. Deconvolução de múltiplas com filtros Wiener-Levinson multicanais, in: Expanded Abstract, 5th international Congress of the Brazilian Geophysical Society. Rio de Janeiro, v. 1, p.196-199.

PORSANI, M. J. e Ursin, B. (2007) Direct multichannel predictive deconvolution, *Geophysics*, 72:H11

SANTOS JÚNIOR, A. 2002 Deconvolução multicanal utilizando um algoritmo tipo Wiener-Levinson, Dissertação de Mestrado, Universidade Federal da Bahia, Salvador, Brasil.

SHARMA, P. V., 1997. Environmental and Engineering Geophysics. Cambridge University Press. Cambridge, p. 472.

VERSCHUUR, D. J. 2006. Seismic multiple removal techniques: past, present and future. EAGE publications bv, Dordrecht, p. 191.

YILMAZ, Ö. 1987. Seismic data analysis: processing, inversion, and interpretation of seismic data. SEG, Oklahoma v. 1, p.2024.

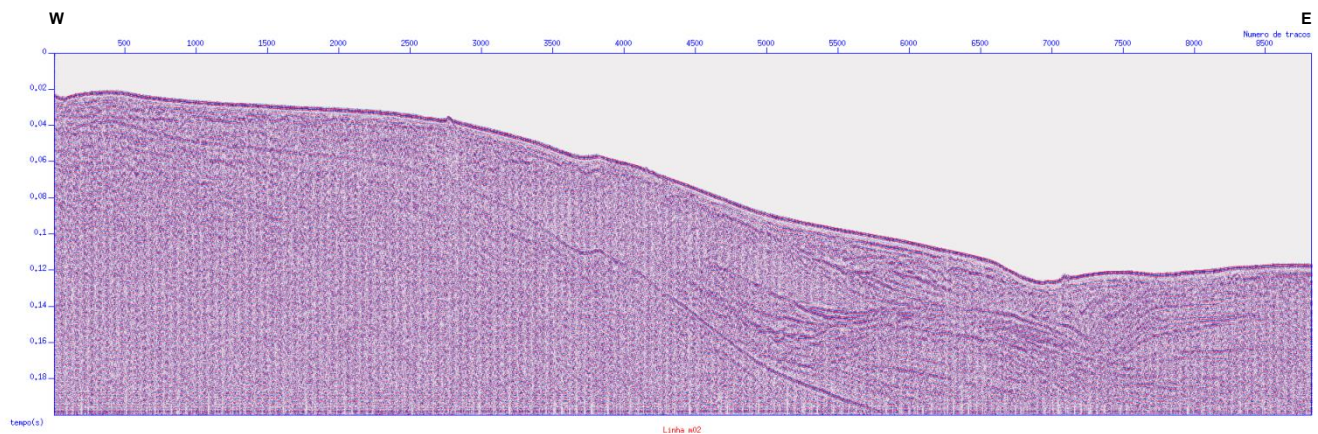


Figura 11 – Linha m02 processada.