

# Atenuação de reflexões múltiplas de superfície livre em linhas sísmicas 2D da Bacia do Jequitinhonha

\*Cristiane Costa-IG/UFPA

Copyright 2011, SBGf - Sociedade Brasileira de Geofísica.

This paper was prepared for presentation at the Twelfth International Congress of the Brazilian Geophysical Society, held in Rio de Janeiro, Brazil, August 15-18, 2011.

Contents of this paper were reviewed by the Technical Committee of the Twelfth 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

O trabalho foi desenvolvido com o objetivo da aplicação de um fluxo de processamento, para a eliminação de múltiplas de superfície livre de dados sísmicos 2D. Foram empregadas duas técnicas de atenuação: o método SRME<sup>1</sup> e a filtragem Radon. A implementação deste trabalho foi realizada no pacote ProMAX, software licenciado pela empresa *Landmark*. Os resultados foram satisfatórios de acordo com o esperado.

## Introdução

Um dos grandes desafios para a geofísica é fornecer imagens detalhadas de estruturas geológicas em subsuperfície. Para o imageamento, a sísmica de reflexão tornou-se o método mais utilizado, devido sua alta resolução aliado a um custo computacional relativamente baixo.

O imageamento é dificultado devido a presença de reflexões múltiplas. Essas múltiplas afetam diretamente a qualidade das imagens sísmicas, uma vez que, elas podem ocorrer ao mesmo tempo e com a mesma banda de frequência que as reflexões primárias, ocasionando interpretações falsas (VERSCHUUR; KABIR, 1992).

O trabalho foi desenvolvido com o objetivo de aplicação de um fluxo de processamento, para a atenuação de reflexões múltiplas de superfície livre, onde esse fluxo é aplicado á dados reais 2D de duas linhas sísmicas da Bacia do Jequitinhonha e o resultado é comparado com o processamento convencional. Neste fluxo duas técnicas de atenuação foram empregadas: a técnica baseada na periodicidade e predição das múltiplas, o SRME e a técnica baseada na diferença de comportamento espacial entre múltiplas e primárias, a Transformada Radon. (VERSCHUUR, 2006).

## Geometria de aquisição

Na aquisição dos dados utilizou-se o levantamento de arraste de cabo marinho (*Mariener Tower Streamer*), na configuração 2D, em que um navio reboca um conjunto de fontes, canhões de ar (*air-gun*), seguido de um cabo (*streamers*), contendo os hidrofones. Esse tipo de aquisição é a mais utilizada devido à simplicidade

<sup>1</sup>SRME: Eliminação de Múltiplas Relacionadas à Superfície Livre (Do inglês: *Surface-Related Multiple Elimination* - SRME).

de sua operação. O levantamento em questão foi realizado na parte submersa da bacia, pela equipe 214 da PETROBRÁS.

Os parâmetros de aquisição descritos abaixo foram coletados dos Relatórios de Campo<sup>2</sup> de cada linha. As linhas 214-2660 e 214-2970<sup>3</sup>, que são do tipo *Dip*<sup>4</sup> da Bacia do Jequitinhonha, foram divididas segundo suas respectivas direções: linha NE-SW e linha NW-SE, e mostrada na Figura 1.

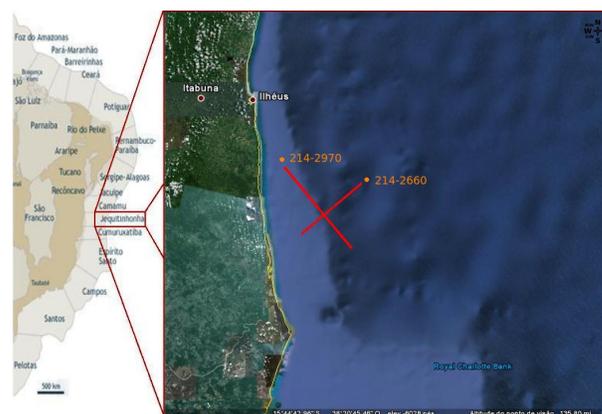


Figura 1: Esquema mostrando a localização geográfica das linhas construídas pela equipe sísmica 214 da PETROBRAS na Bacia do Jequitinhonha.

A linha 66, foi construída sob a configuração 2D de direção NE-SW, foram realizados 1577 tiros, totalizando aproximadamente 39,4 km de linha sísmica no azimute 50° N (sentido NE). A linha 97 de direção NW-SE, foi construída com a mesma configuração da 66, diferindo apenas no número de tiros realizados durante a aquisição e no sentido de movimentação da embarcação<sup>5</sup>. Esta linha foi construída sob 2169 tiros totalizando aproximadamente 53,2 km em sentido NW no azimute 320° N. Detalhes sobre a geometria estão na tabela 1.

<sup>2</sup>Relatórios de Campo: Relato diário sobre o andamento dos trabalhos nos levantamentos sísmicos, segundo (Duarte 2003).

<sup>3</sup>Neste trabalho as linhas 214-2660 e 214-2970 serão chamadas de linhas 66 e 97 respectivamente.

<sup>4</sup>Linha sísmica marinha coletada perpendicular a costa continental.

<sup>5</sup>Sentido adotado durante a aquisição sísmica em relação ao Norte Geográfico.

Tabela 1: Parâmetros de aquisição das linhas.

Linhas sísmicas	214-2660	214-2970
Número de fontes	1577	2129
Número de receptores	120	120
Intervalo entre fontes (m)	25	25
Intervalo entre receptores (m)	25	25
Afastamento mínimo (m)	150	150
Afastamento máximo (m)	3125	3125
Profundidade da fonte (m)	9	9
Profundidade média do cabo (m)	10,5	10,5
Intervalo de amostragem (ms)	4	4
Tempo de registro (s)	7	7
Tipo de fonte	canhão de ar	canhão de ar

As Figuras 2 e 3 ilustram as seções brutas das respectivas linhas, organizadas em Afastamento Comum<sup>6</sup>. Nesse tipo de dado é comum a presença de múltiplas devido a interface ar/água ou água/terra, chamada de múltiplas de superfície. Esse tipo de múltipla possui energia considerável podendo ser confundida com primárias de refletores mais profundos. As múltiplas apresentam algumas propriedades que as diferem das primárias. Entre estas propriedades podemos destacar: a velocidade, a frequência, o espalhamento geométrico, a inclinação e a periodicidade (GAMBOA, 2003). Através desta última propriedade, podemos prever o comportamento das múltiplas no tempo, e então depois de modeladas essas múltiplas podem ser subtraídas dos dados sísmicos. O método SRME utilizado neste trabalho se baseia nesta propriedade para distinguir múltiplas de primárias. Observa-se nas seções a seguir que as múltiplas de superfície livre, indicadas pela letra M, estão mais acentuada a partir da quebra do talude para a parte mais profunda das seções.

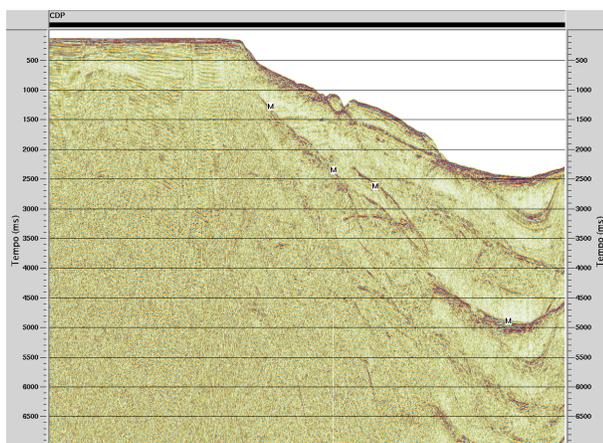


Figura 2: Visualização do dado bruto organizado em seção de Afastamento Comum de 150 m. Observe que as múltiplas são distintas apenas na parte profunda da seção, linha 214-2660.

**Fluxo de processamento**

Foi aplicado nas linhas 66 e 97 um fluxo de processamento para atenuação de múltiplas de superfície livre de acordo

<sup>6</sup>Afastamento Comum: Do inglês *Common Offset* (CO).

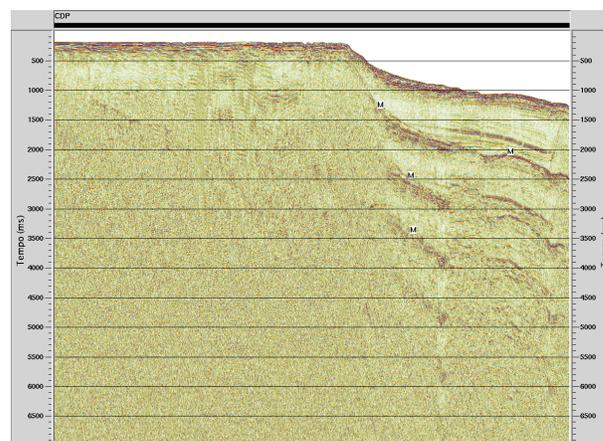


Figura 3: Visualização do dado bruto organizado em seção de Afastamento Comum de 150 m. Observe que as múltiplas são distintas apenas na parte profunda da seção, linha 214-2970.

com a Figura 4 (b). A filtragem Radon foi aplicada como uma etapa complementar com o objetivo de obter melhores resultados juntamente com o SRME, devido ao fato de que a aplicação do SRME a dados com pequenos afastamentos não apresentam bons resultados (VERSCHUUR et al. 1992).

Com objetivo de comparação, essas linhas também foram submetidas ao processamento convencional de acordo com o fluxo mostrado na Figura 4 (a), onde não há aplicação de metodologia específica para atenuação das múltiplas.

**Transformada Radon**

Basicamente a Transformada Radon transforma os dados ao domínio *time-moveout*, no qual as múltiplas e as primárias podem ser separadas. Neste domínio, pode-se zerar a energia das primárias. A energia restante que contém as reflexões múltiplas é modelada e subtraída dos dados (VERSCHUUR, 2006). A Transformada de Radon distingue as múltiplas das primárias através do sobretempo residual de pequenos e grandes afastamentos. Ela é aplicada aos dados na configuração CMP e com correção NMO usando a velocidade das reflexões primárias. Um dos benefícios desta técnica é o fato de que ela não requer nenhum conhecimento das interfaces que geraram as múltiplas, ela atenua as múltiplas em todos os afastamentos por igual.

A definição matemática da Transformada Radon é dada por:

$$T(p, \tau) = \int_{-\infty}^{\infty} d(x, t = px + \tau) dx, \quad (1)$$

Esta equação descreve um procedimento de mapeamento no qual o dado no domínio do espaço-tempo é somado ao longo de linhas oblíquas, em que *p* é o parâmetro de raio (inclinação) e *τ*, é o tempo de intercepção.

Existem três formas de Transformadas Radon aplicadas no processamento sísmico, estas são:

- Transformada Radon Linear;

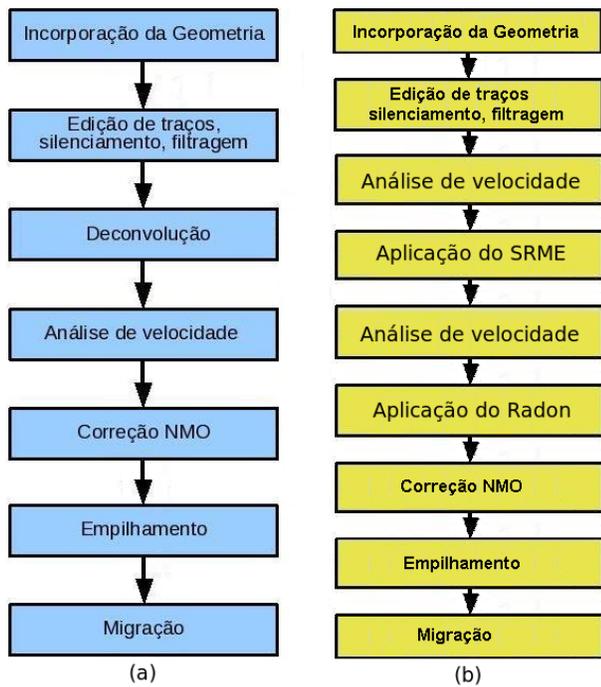


Figura 4: Fluxograma de processamento sísmico de dados 2D. a) Fluxo de um processamento convencional. b) Fluxo de processamento adicional utilizado neste trabalho (SRME seguido do Radon).

- Transformada Radon Hiperbólica;
- Transformada Radon Parabólica.

### Transformada Radon Parabólica

Neste trabalho usamos a Transformada na forma parabólica devido assumimos que as múltiplas têm forma parabólica após a correção NMO. A Transformada de Radon Parabólico mapeia um evento sísmicos com *moveout* parabólico no domínio espaço-tempo ( $t-x$ ) para um ponto enfocado no domínio tempo-parâmetro de raio ( $\tau-p$ ) como podemos ver na Figura 5.

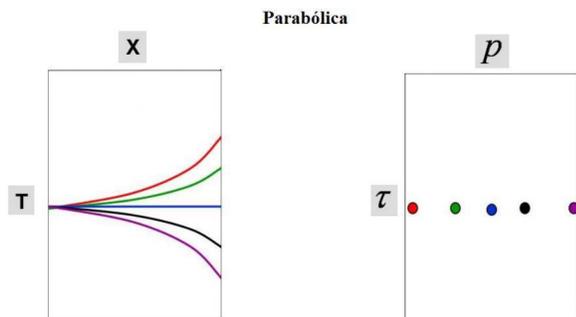


Figura 5: O Filtro Radon concentra a energia dos eventos sísmicos em regiões diferentes do domínio  $\tau-p$ .  
Fonte: Dragoset, 2000.

Segundo Vershuur (2006) a Transformada de Radon na forma parabólica pode ser construída na correção NMO

das famílias CMP somando o dado ao longo das trajetória empilhadas definida pela Equação 2.

$$T(\tau, p) = \int_{-\infty}^{\infty} d(x, t = \tau + qx^2) dx \quad (2)$$

No qual  $q$  é o parâmetro de curvatura que define a trajetória da parábola descrita na Equação 2. Para maiores informações sobre a Filtragem Radon pode-se consultar (YILMAZ, 2000).

### Método de Eliminação de Reflexões Múltiplas Relacionadas à Superfície (SRME)

O chamado SRME, é um método baseado na periodicidade das múltiplas, onde é feita a predição das múltiplas e posteriormente sua subtração dos dados. Este método apresenta melhor desempenho quando aplicado em meios geológicos complexos onde métodos simples não bastam. Em situações onde temos forte refletor abaixo da interface água/fundo oceânico este método pode ser melhor aplicado. O SRME assume que o campo de onda para a reflexão primária de superfície livre possui um *moveout* equivalente a uma viagem de ida e volta do campo de onda na camada d'água, acima desta trajetória, o campo de onda estaria relacionado as reflexões com fontes ou receptores fantasmas (*ghost*) ou à múltiplas de ordens mais altas.

Idealmente a trajetória das ondas seria uma viagem até a subsuperfície, uma interação com cada superfície refletiva (reflexões primárias), seu retorno à superfície e sua direta captação nos receptores, dado pela Equação:

$$P^-_0(z_0) = X_0(z_0)S^+(z_0) \quad (3)$$

sendo que,  $P^-_0(z_0)$  a matriz campo de pressão calculado;  $X_0(z_0)$  a matriz resposta da subsuperfície;  $S^+$  a assinatura da fonte; a referência  $z_0$  indica que o dado é em função da profundidade.

Porém, isto não acontece e o que fica registrado deve ser deconvolvido com a assinatura da fonte, para desta forma, poder-mos obter a resposta da subsuperfície.

As múltiplas são previstas a partir da equação:

$$P_0^-(z_0) = P^-(z_0) - A(\omega)[P^-(z_0)]^2 + \quad (4)$$

$$A(\omega)^2[P^-(z_0)]^3 - A(\omega)^3[P^-(z_0)]^4 + \dots$$

Onde,

$$A(\omega) = \frac{r_0}{S(\omega)} \quad (5)$$

em que:  $P^-$  é o campo de pressão medido nos receptores;  $A(\omega)$  é um parâmetro obtido pela equação 5;  $r_0$  é o coeficiente de reflexão da superfície livre;  $S(\omega)$  como a frequência dependente da assinatura da fonte.

Na Equação 4, cada termo depois do primeiro termo  $\tilde{P}^-(z_0)$  é relativo a uma reflexão múltipla de superfície livre,

onde o 2ª termo da equação corresponde a uma reflexão múltipla de 1ª ordem, o 3ª termo da equação corresponde a uma múltipla de 2ª ordem, e assim sucessivamente. O conjunto de equações que descrevem todo o processo foi proposto por (VERSCHUUR et al. 1992).

**Resultado**

No primeiro conjunto de figuras são mostradas as seções sísmicas das linhas 66 e 97 respectivamente, organizadas em afastamento comum, para o afastamento de 150 m.

Foram aplicadas nessas linhas a combinação SRME + Radon de acordo com o sugerido em Vershuur et al. (1992) e mostradas nas Figuras 6 e 7. Quando comparadas com as Figuras 2 e 3, em que as seções no estado bruto estão organizadas do mesmo modo, verifica-se que: na parte rasa da bacia, houve uma redução da energia das múltiplas complexas<sup>7</sup> e a aparição de um possível refletor entre os tempos 1200 à 1700 ms visualizado na seção 7. A partir da quebra do talude para a parte mais profunda das seções, observa-se uma atenuação das múltiplas de superfície livre, em especial as múltiplas mais profundas a partir de 1000 ms, em relação as seções 2 e 3, onde essas múltiplas são mais visíveis.

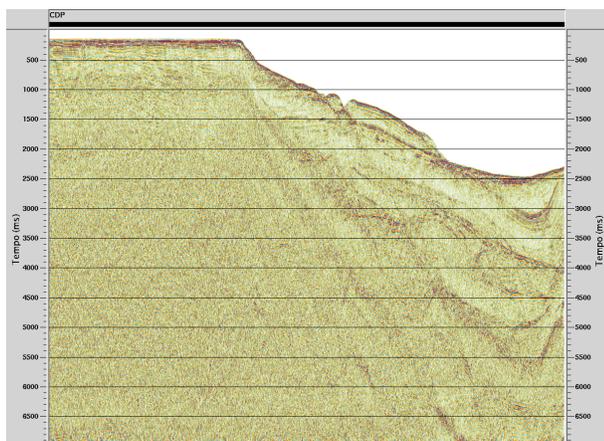


Figura 6: Visualização da seção organizada em Afastamento Comum de 150 m, aplicada o SRME seguido do filtro Radon. Esses dados não foram submetidos a correção de amplitude e a deconvolução, pois para a aplicação do SRME as amplitudes do sinal devem ser preservadas, linha 214-2660.

No próximo conjunto de figuras são apresentadas as seções empilhadas em famílias CMP's idealizando seções de afastamento nulo das respectivas linhas, as quais têm, adicionalmente, uma boa relação Sinal/Ruído<sup>8</sup>.

Nas Figuras 9 e 11 são apresentadas as seções empilhadas, após a aplicação do SRME juntamente com a filtragem Radon. Verifica-se uma atenuação de múltiplas de superfície e a acentuação de possíveis eventos refletores, quando comparadas as seções visualizadas nas Figuras 8 e 10, que estão empilhadas submetidas apenas ao processamento convencional.

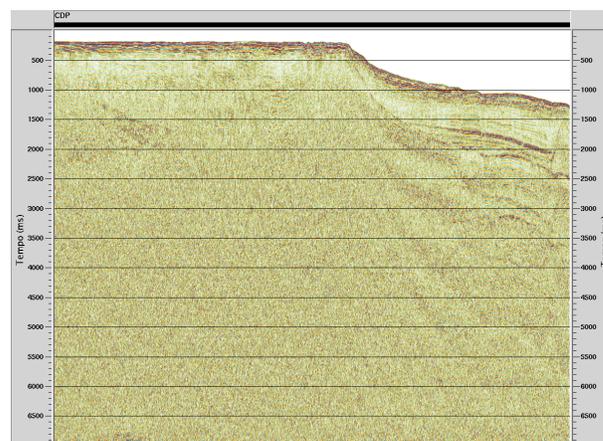


Figura 7: Visualização da seção organizada em Afastamento Comum de 150 m, aplicada o SRME seguido do filtro Radon. Da mesma forma que a figura anterior os dados não foram submetidos a correção de amplitude e deconvolução, linha 214-2970.

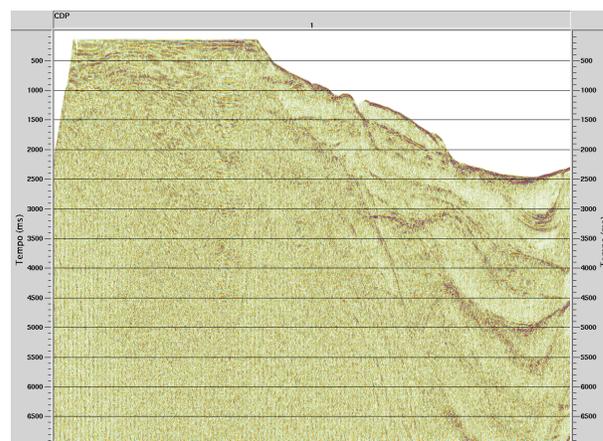


Figura 8: Visualização da seção empilhada apenas com o processamento convencional, linha 214-2660.

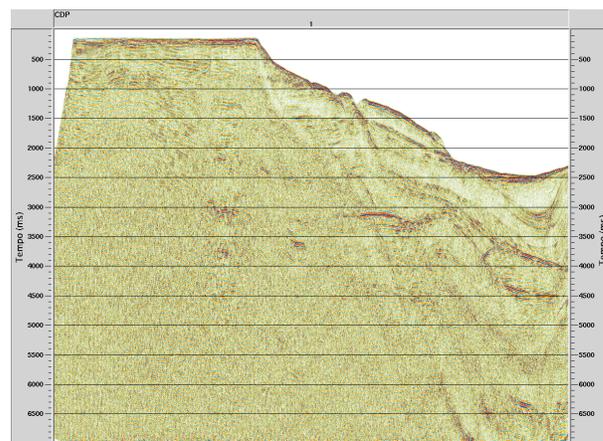


Figura 9: Visualização da seção empilhada com a aplicação do SRME seguido do filtro Radon, linha 214-2660.

<sup>7</sup>Múltiplas com o formato zebado localizadas principalmente na parte rasa da bacia.

<sup>8</sup>A relação Sinal/Ruído (S/R) representa uma quantificação da qualidade do sinal sísmico.

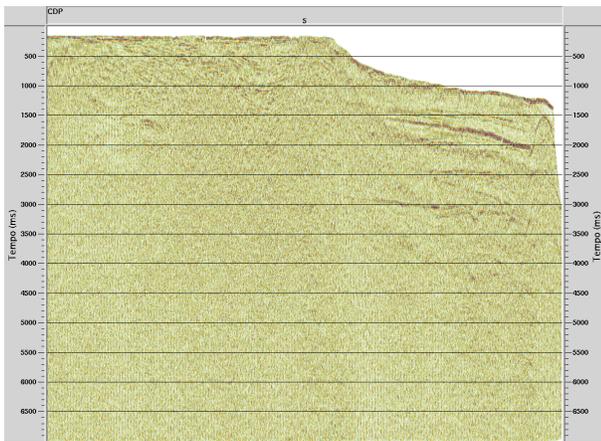


Figura 10: Visualização da seção empilhada apenas com o processamento convencional, linha 214-2970.

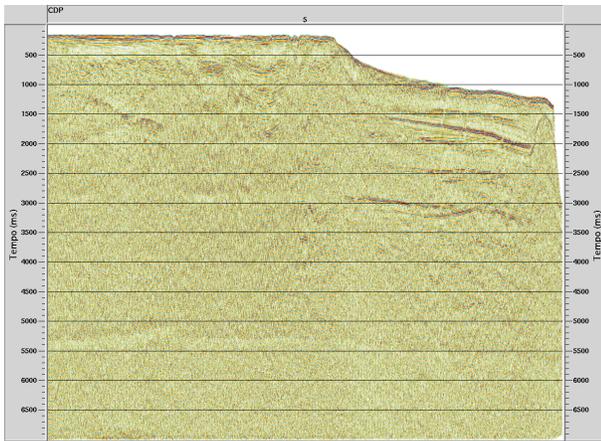


Figura 11: Visualização da seção empilhada com a aplicação do SRME seguido do filtro Radon, linha 214-2970.

Por fim, o conjunto de figuras ilustrado abaixo apresentam as seções migradas em tempo das respectivas linhas 66 e 97, onde é possível visualizar possíveis eventos em suas verdadeiras posições em subsuperfície.

Nas Figuras 12 e 14 foram aplicado apenas o processamento convencional de acordo com o fluxo 4 (a) em azul, observa-se a atenuação das múltiplas principalmente na parte profunda da bacia ao compararmos as seções anteriores. No entanto, estas imagens não forneceram uma boa nitidez dos eventos de reflexão.

Nas Figuras 13 e 15, são apresentadas as seções migradas após a submissão do SRME juntamente com a filtragem Radon sugerida por Vershuur et al. (1992), das linhas 66 e 97 respectivamente, de acordo com o fluxograma 4 (b) em amarelo. Essas seções foram as que apresentaram melhores resultados quando comparadas com as seções 12 e 14, quanto a remoção de múltiplas relacionada a superfície livre. Podemos verificar a atenuação dessas múltiplas na região profunda das seções sísmicas, onde o SRME apresenta melhor desempenho, e a acentuação de possíveis eventos

refletores, enquanto que na região rasa não observamos mudanças tão significativas. No entanto, a aplicação do filtro Radon ajudou nessa parte rasa das bacias diminuindo a energia das múltiplas complexas para que se fosse possível verificar a horizontalização dos refletores, como podemos observar na Figura 15, onde revelou possível refletor entre os tempos 1200 á 1700 ms.

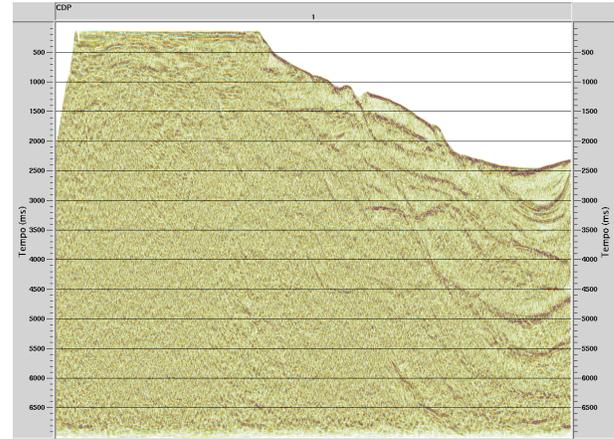


Figura 12: Seção mostrando o resultado da migração apenas com fluxo convencional, linha 214-2660.

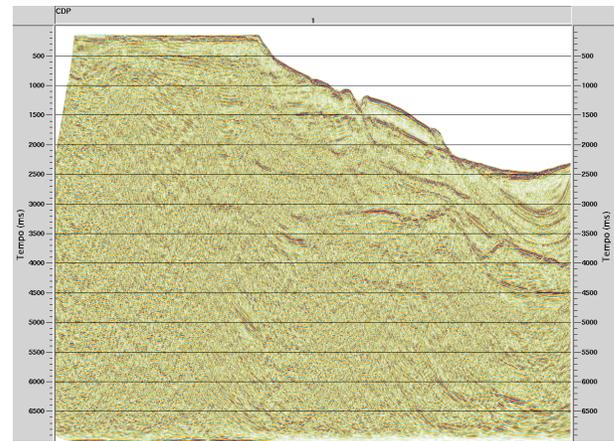


Figura 13: Seção mostrando o resultado da migração após a aplicação do SRME seguido do filtro Radon. Ressaltando que os dados não foram submetidos a correção de amplitude e deconvolução, linha 214-2660.

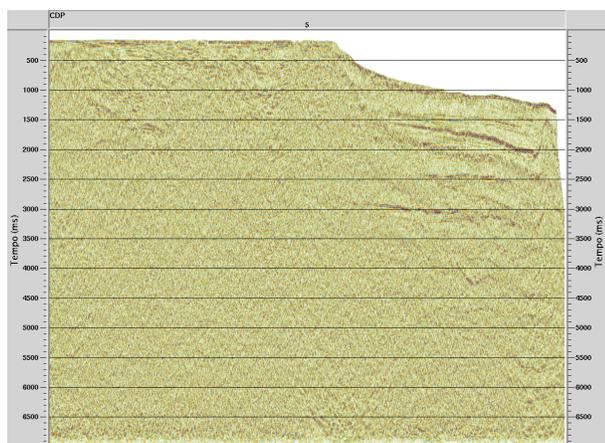


Figura 14: Seção mostrando o resultado da migração apenas com fluxo convencional, linha 214-2970.

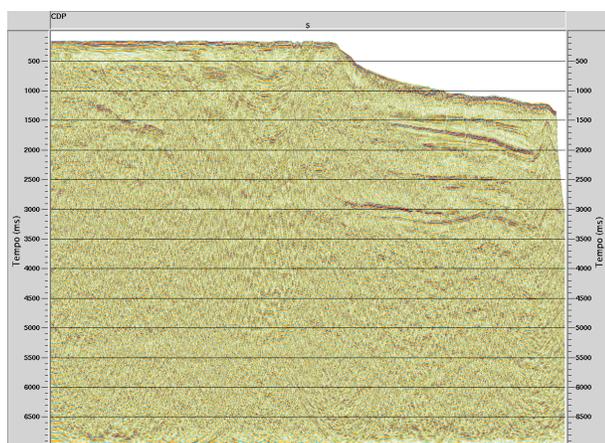


Figura 15: Seção mostrando o resultado da migração após a aplicação do SRME seguido do filtro Radon. Esses dados também não foram submetidos a correção de amplitude e deconvolução, linha 214-2970.

## Conclusões

Neste trabalho foi apresentado um fluxo de processamento para as linhas marinhas 2D da Bacia do Jequitinhonha, objetivando atenuar reflexões múltiplas de superfície livre. Foi aplicada a metodologia de remoção de reflexões múltiplas relacionada à superfície livre (SRME) juntamente com a filtragem Radon sugerida por Verschuur et al. (1992). Os resultados foram considerados satisfatórios quando comparados com o resultado do processamento convencional. De acordo com os resultados encontrados verifica-se que:

- O SRME apresentou melhor desempenho na parte mais profunda das seções, onde tem grande *offset*. Nessa região houve uma atenuação das reflexões múltiplas de superfície livre, observa-se também a acentuação de eventos refletos, especialmente onde a múltipla era mais visível;
- Na parte rasa das seções (aproximadamente 200 m de profundidade) o SRME não apresenta bons

resultados, devido à pequenos afastamentos, a aplicação do filtro Radon ajudou nessa parte rasa da bacia, tendo melhor desempenho que o SRME nessa região. Foi possível identificar possíveis refletos como podemos observar na Figura 15 entre os tempos 1200 à 1700 ms;

- A combinação do SRME com o Radon apresentou resultados satisfatórios, o SRME teve melhor desempenho na parte profunda e o Radon na parte rasa da bacia.

Apesar dos resultados das seções sísmicas serem considerados satisfatórios em duas linhas sísmicas, verifica-se que não houve uma significativa supressão de múltiplas, principalmente na parte rasa da Bacia. Para as pesquisas posteriores, sugere-se que sejam testado outras metodologias necessárias para atenuação de múltiplas nessa região, com o intuito de obter melhores resultados, podendo utilizar informações contidas neste trabalho.

## Referências

Dragoset, B., Introduction to air guns and air-gun arrays. Disponível em: <<http://www.seismologypetroleum.com>>. Acesso em: 03 out. 2009.

Gamboa, F., Caracterização e Eliminação de Múltiplas pelo Método da Superfície Comum de Reflexão (CRS), 117 f. Dissertação *Mestrado em Geofísica*, Universidade Federal da Bahia, Salvador, 2003.

Verschuur, D. J., 2006, Seismic multiple removal techniques: past, present and future: EAGE publications.

Verschuur, D. J.; Kabir, M. M. N., 1992, Comparison of surface-related multiple elimination with Radon multiple elimination. *Journal of Seismic Exploration*, Vol. 1, p. 363–377.

Verschuur, D. J.; Berkhout, A. J.; Wapenaar, C. P. A., 1992, Adaptive surface-related multiple elimination: *Journal Geophysics*, Vol. 57, No. 09, p. 1166-1177.

Yilmaz, O., 2001, *Seismic Data Analysis: Processing, Inversion, and Interpretation of Seismic Data*, seismic data analysis, v. 1, no. 02 p. 2027. Society of Exploration Geophysicists. 2001.

## Agradecimentos

Ao Projeto (2039\*01\*192) PETROBRAS/UNICAMP/FUNCAMP/UFGA pelo suporte financeiro e técnico.