

APLICAÇÃO DE BALANCEAMENTO ESPECTRAL E DMO NO PROCESSAMENTO SÍSMICO DA BACIA DO TACUTU

Michelângelo G. Silva¹ e Milton J. Porsani^{1,2}

Recebido em 24 março, 2006 / Aceito em 19 junho, 2006
Received on March 24, 2006 / Accepted on June 19, 2006

ABSTRACT. In the 80s, in sedimentary area of the Tacutu Basin a large exploratory expedition of hydrocarbons was undertaken for PETROBRAS, including a series of seismic reflection and refraction surveys, and the drilling of two pioneers wells. The seismic acquisition was performed with low coverage (12). Additionally, the seismic data was largely affected by the groundroll. The low S/N ratio was responsible for the poor quality of the subsurface imaging, generated as final result of the seismic data processing. In this work we investigate the performance of some filtering techniques to improve the quality of the seismic image. The processing was carried out using the basic steps: geometry, amplitude correction, velocity analysis, NMO and DMO correction and stacking. Aiming the groundroll attenuation, we have used a spectral balancing technique, that proves to be much effective, compared to the FK filtering approach. Results obtained with the seismic line 50-RL-90, combining different filtering techniques, allows us to suggest a processing flow, to improve the quality of the stacked seismic section associated with data of poor S/N ratio acquired with low coverage.

Keywords: Seismic processing, Tacutu Basin, Spectral balancing, DMO, groundroll.

RESUMO. Na década de 80 a PETROBRAS realizou uma campanha exploratória de hidrocarbonetos na Bacia sedimentar do Tacutu, que compreendeu a aquisição de várias linhas sísmicas além da perfuração de dois poços pioneiros. A aquisição foi conduzida com baixa multiplicidade sísmica CMP (12). Adicionalmente, a qualidade dos dados sísmicos é ruim devido a forte presença do *groundroll*. A baixa razão sinal/ruído e a baixa multiplicidade comprometem seriamente a qualidade das imagens de subsuperfície, geradas como resultado final do processamento sísmico. No presente trabalho investigamos o desempenho de várias técnicas de filtragem para melhorar a qualidade das imagens sísmicas. O fluxograma de processamento convencional utilizado seguiu os passos básicos: geometria, correção de amplitude, análise de velocidades, correção de NMO e DMO, e empilhamento. Com o objetivo de atenuar o *groundroll* utilizamos a técnica de balanceamento espectral, que se mostrou bastante eficaz, comparada com o método tradicional FK. Os resultados obtidos sobre a linha sísmica 50-RL-90, nos permitem sugerir um procedimento para melhorar a qualidade das seções sísmicas empilhadas, associadas a dados de baixa qualidade e pequena cobertura sísmica.

Palavras-chave: Processamento sísmico, Bacia do Tacutu, balanceamento espectral, DMO, *groundroll*.

¹Universidade Federal da Bahia, Rua Barão de Jeremoabo, s/n, Campus Universitário de Ondina, Instituto de Geociências, Laboratório de Exploração de Petróleo, 40170-115 Salvador, BA, Brasil. Tel/fax: (71) 3203-8551 – E-mail: mgs@cpgg.ufba.br

²E-mail: porsani@cpgg.ufba.br

INTRODUÇÃO

No presente trabalho investigamos a aplicação de métodos de filtragem para o processamento de dados sísmicos de baixa qualidade e adquiridos com baixa cobertura sísmica, representados pelos dados sísmicos da Bacia do Tacutu.

A Bacia do Tacutu está localizada na fronteira entre o Estado de Roraima, no Brasil, e o Distrito de Rupununi, na República Cooperativa da Guiana. Segundo Eiras & Kinoshita (1990), esta bacia sedimentar de idade Mesozóica se desenvolveu como um rifte intracontinental na parte central da região cratônica correspondente ao Escudo das Guianas. O arcabouço sedimentar dessa bacia compreende rochas sedimentares e vulcano-sedimentares.

Apesar da existência de um grande volume de informações geofísicas sobre a Bacia do Tacutu, não se pode afirmar que essa área tenha sido completamente avaliada. Acredita-se que, pela carência de informações diretas de subsuperfície, não foi possível localizar reservatórios convencionais nas seções conhecidas (Eiras & Kinoshita, 1990). Na parte brasileira, a PETROBRAS levantou, entre 1980 e 1986, 1.948 km de linhas sísmicas de reflexão. Entretanto, em dezembro de 1987, as atividades exploratórias foram suspensas nessa porção da bacia. Os dados sísmicos foram processados na época com o método clássico de empilhamento CMP (Ponto Médio Comum) e migração pós-empilhamento no tempo. A interpretação dos resultados desse processamento sísmico forneceu informações a respeito do gráben do Tacutu e de sua evolução tectônica, porém acreditava-se que estas informações não são suficientes para se fazer uma interpretação mais acurada. Justifica-se, portanto, a necessidade do reproprocessamento dos dados sísmicos existentes, utilizando técnicas mais sofisticadas ou não convencionais, que ofereçam imagens sísmicas com melhor resolução.

O processamento de dados sísmicos de reflexão é uma atividade de rotina da indústria do petróleo e tem por objetivo a obtenção de imagens sísmicas representativas da geologia de subsuperfície. Para tanto, a qualidade dos dados sísmicos desempenha um papel fundamental e a presença do *groundroll* nos dados sísmicos terrestres é, por conseguinte, um fator que compromete seriamente a qualidade final do processamento. Para cumprimento desse objetivo, os dados sísmicos são submetidos a uma série de filtragens e manipulações que podem ser subdivididas, basicamente em duas etapas: (i) o pré-processamento que compreende a preparação e tratamento dos dados através de técnicas simples de filtragem e (ii) o processamento avançado, que envolve a aplicação de técnicas um pouco mais sofisticadas

(deconvolução, filtragem multicanal FK, balanceamento espectral, DMO, migração). Todas as etapas realizadas durante o processamento compõem o chamado fluxograma de processamento sísmico.

O *groundroll* ocorre na forma de um cone de ruído com reflexões lineares, de baixa frequência e alta amplitude, que se superpõe mascarando as demais reflexões, prejudicando seriamente a razão sinal/ruído dos sismogramas. A remoção ou atenuação do *groundroll* é necessária para a obtenção de seções sísmicas de boa qualidade. Os métodos de filtragem monocal simples (e.g. filtro de frequência passa-banda) e multicanais (e.g. filtro FK) têm a desvantagem de também atenuarem o sinal.

A técnica DMO tem como ponto de partida a busca pela solução do problema de dependência entre as velocidades de *normal moveout* (NMO) e o mergulho dos refletores em subsuperfície. Comparativamente, as velocidades de NMO para refletores mergulhantes são superiores às velocidades observadas no caso de refletores horizontais (Levin, 1971). O objetivo básico do DMO é corrigir nos dados sísmicos pré-empilhados as distorções ocasionadas pela presença de refletores mergulhantes, transformando as seções de afastamento não nulo em seções de afastamento nulo. Os processos de DMO preservam reflexões em planos de falha e melhoram a identificação das hipérbolas de difração nas seções empilhadas. Apresentamos o método de correção DMO em famílias de tiro (Cabrera & Levy, 1989) empregado no processamento de dados sísmicos da Bacia do Tacutu com o objetivo de remover o efeito do mergulho dos refletores sobre a velocidade de empilhamento, obter um campo de velocidade mais preciso na análise de velocidade residual e a seção sísmica empilhada.

GEOLOGIA DA BACIA

A Bacia sedimentar do Tacutu, de idade Mesozóica, desenvolveu-se como um rifte intracontinental, com alongamento na direção NE-SO de aproximadamente 300 km de comprimento e largura entre 30 e 50 km (Eiras & Kinoshita, 1987). Segundo a classificação de Klemme (1980), a Bacia do Tacutu é do tipo III, definida como um rifte cratônico, que tem de pequeno a médio porte, linear e falhada, podendo ou não representar uma área de espalhamento do assoalho oceânico incipiente. O gráben do Tacutu encontra-se inserido na região central do Cráton Escudo das Guianas, na fronteira entre o estado brasileiro de Roraima e o distrito de Rupununi na Guiana, conforme ilustra a Figura 1.

Os limites do gráben são facilmente identificados: pelos afloramentos de basalto existentes a nordeste, nas Colinas de Toucan – Guiana, e a sudoeste, na Serra de Nova Olinda-Brasil;

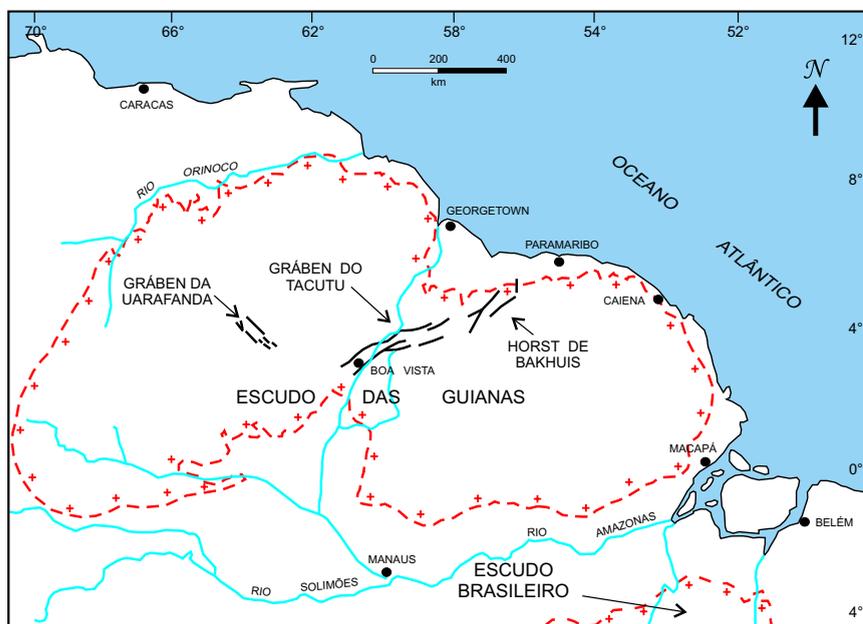


Figura 1 – Mapa do Cráton Escudo das Guianas com o gráben do Tacutu.

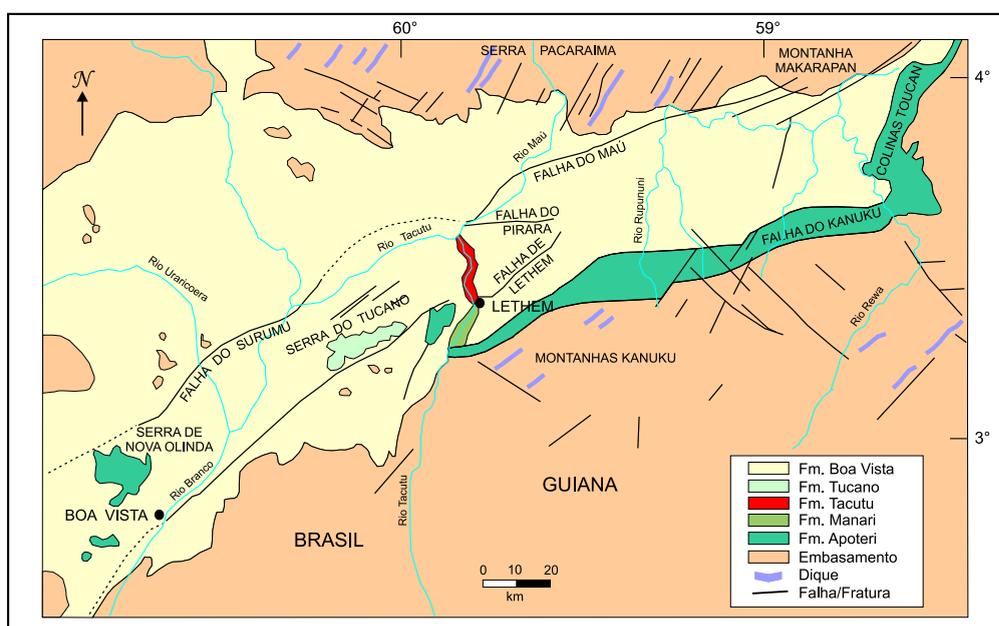


Figura 2 – Mapa geológico da Bacia do Tacutu.

pelas falhas normais Lethem e do Kanuku, que determinam o limite sudeste; a noroeste, o limite é definido pelas falhas normais do Surumu e do Mau. Esses limites estão ilustrados na Figura 2.

O arcabouço estratigráfico da bacia compreende rochas sedimentares e vulcano-sedimentares, sendo caracterizada por quatro seqüências deposicionais:

1. Seqüência basal A – fase pré-rifte, que envolve os basaltos do jurássico das Formações Apoteri e os siltitos de ambiente lacustre da Formação Manari;
2. Seqüência B – fase rifte “ativo”, ocorrendo intenso estiramento mecânico da crosta, sendo caracterizada pela

Formação Pirara e por leques de borda no sudeste da bacia;

3. Seqüência C – representa a fase rifte “passivo”, onde ocorre a diminuição gradativa do estiramento crustal, e posteriormente o assoreamento e formação do rifte. Compreende os clásticos de ambiente aluvial e deltático das Formações Tacutu e Tucano, além de possíveis leques de borda;
4. Seqüência D – fase pós-rifte, com a deposição de sedimentos clásticos após erosão do cráton no plioceno (devido a evento transcorrente ocorrido) representada pela Formação Boa Vista e Savanas do Norte na Guiana.

A Figura 3 traz a coluna estratigráfica da bacia. A formação Apoteri apresenta basalto toleítico a olivina-toleítico (Berrangé & Dearnley, 1975), às vezes, camadas de sedimentos intercalados (arenitos, conglomerados arcóscicos e folhelho) são encontradas entre os sucessivos derrames de basalto, a espessura da formação pode chegar aos 1500 m. Sobre esses derrames basálticos, assenta-se a formação Manari, com espessura máxima de 300 m, composta de folhelhos cinza-claro a escuro, siltito castanho-escuro estratificado e compacto, calcissilito creme-claro e dolomito castanho-acizentado. A formação Pirara não apresenta afloramentos na bacia, diferentemente das formações Apoteri e Manari, a espessura máxima pode chegar aos 1000 m, essa unidade caracteriza-se por halita hialina acizentada e acastanhada, folhelho acizentado a acastanhado, margoso e piritoso, juntamente com pseudomorfos de gipsita, que na maioria das vezes é substituída por anidrita. A formação Tacutu compreende uma seção de camadas vermelhas, composta por siltito castanho-escuro, calcífero, argiloso, contendo pseudomorfos de gipsita substituídos por anidrita ou calcita, de acordo com dados sísmicos essa unidade está presente em todo o gráben, apresentando um espessamento em direção às grandes falhas do sudeste, sua espessura máxima pode chegar aos 2700 m. Na superfície, a formação Tucano ocorre no conjunto de morros suaves no interior do gráben (Serra do Tucano). Essa unidade é constituída por arenito acastanhado com rasas intercalações de siltito arenoso (Carneiro et al., 1968), esse pacote sedimentar pode chegar aos 2.200 m de espessura. A formação Boa Vista plioleístocênica foi denominada por Ramos (1990). Essa unidade cenozóica recobre as seções sedimentares e vulcano-sedimentares mesozóicas, chegando a extrapolar os limites do gráben do Tacutu em território brasileiro. De acordo com dados sísmicos de reflexão e refração rasa a espessura máxima pode chegar aos 120 m, espe-

cificamente nos blocos rebaixados das grandes falhas das bordas. As litologias existentes nessa unidade são arenito, laterito, argilitos e conglomerados, pelas amostras dos poços da PETROBRAS foram identificados argilito vermelho a creme, calcífero e siltito vermelho.

INFORMAÇÕES SOBRE OS DADOS SÍSMICOS

Com o objetivo de iniciar o processo exploratório de hidrocarbonetos na área brasileira da Bacia do Tacutu, a PETROBRAS, no período de 1981 e 1986, realizou uma série de levantamentos sísmicos de reflexão e refração, além da perfuração de dois poços pioneiros (1-TU-1-RR e 1-ST-1-RR). Uma cópia de algumas linhas sísmicas desses levantamentos foi obtida da Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis – ANP e está à disposição de alunos e pesquisadores do Centro de Pesquisa em Geofísica e Geologia da UFBA. A Tabela 1 apresenta as campanhas exploratórias realizadas pela PETROBRAS, no Brasil, e pela empresa Home Oil Co. Ltd., na Guiana.

A linha sísmica de reflexão 50-RL-90 (Figura 4), utilizada no presente trabalho contém 179 tiros e foi adquirida em 1981, com arranjo *split-spread* simétrico. A partir da Figura 5 pode-se ilustrar o conceito de cobertura sísmica. Note que utilizando-se apenas seis geofones e a mesma distância entre pontos de tiro e estações receptoras, um mesmo ponto em subsuperfície é amostrado no máximo quatro vezes, sendo a cobertura igual a 4. A Tabela 2 traz os mais importantes parâmetros de aquisição. Podemos ver nessa Tabela, a baixa cobertura da linha sísmica 50-RL-90, isso é um fator preocupante, pois prejudica a identificação dos eventos de reflexões nas famílias de ponto médio comum e a estimativa das velocidades da subsuperfície, comprometendo a correção do sobretempo normal (NMO).

PROCESSAMENTO DOS DADOS

O processamento de dados sísmicos de reflexão convencional é normalmente dividido em duas fases de execução, o pré-processamento, que envolve as etapas de preparação dos dados e a utilização de técnicas simples de tratamento do sinal sísmico, e o processamento avançado, que engloba técnicas mais sofisticadas, como a deconvolução do pulso sísmico, a análise de velocidades e a migração. O fluxograma, contendo as etapas utilizadas no processamento da linha 50-RL-90 está apresentado na Figura 6.



Figura 3 – Coluna estratigráfica da Bacia do Tacutu, adaptada de Eiras & Kinoshita (1990).

Tabela 1 – Quadro sumário dos resultados das campanhas exploratórias na Bacia do Tacutu, fonte: Eiras & Kinoshita (1990).

Empresa	Linhas sísmicas (km)		Número de poços	Total Perfurado (m)
	Reflexão	Refração		
PETROBRAS	1.948	74,6	2	6.407
Home Oil Corp. Ltda	1.209	–	2	5.705

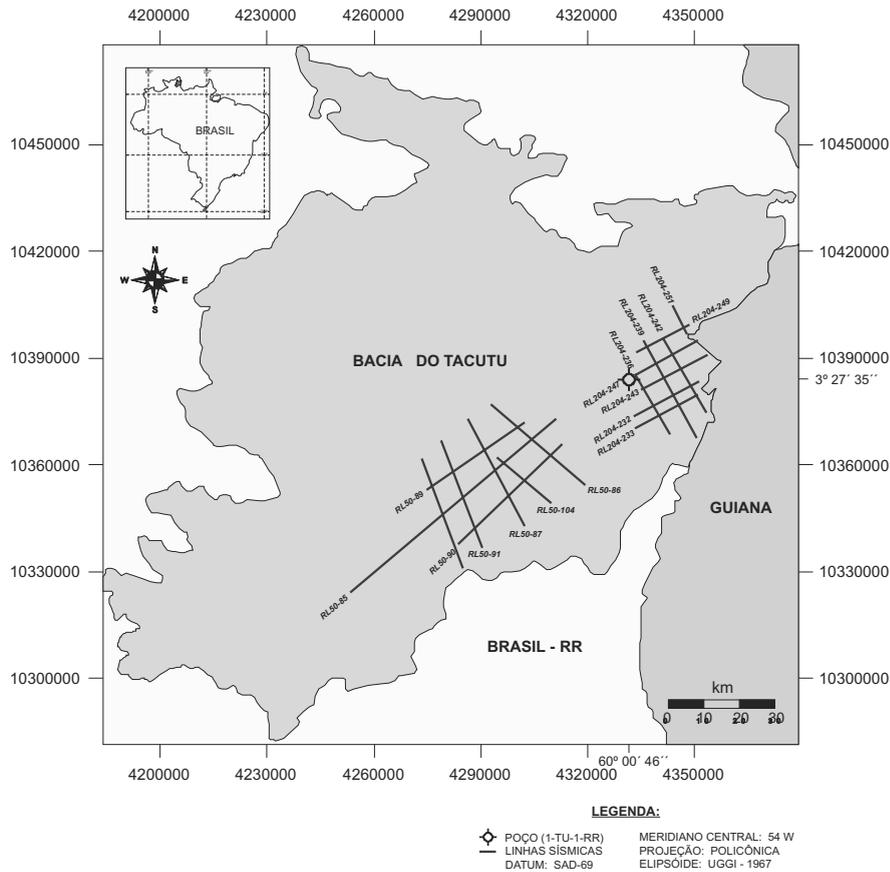


Figura 4 – Mapa de localização da linha sísmica de reflexão 50-RL-90 na porção brasileira da Bacia do Tacutu.

Etapas do pré-processamento

No pré-processamento da linha 50-RL-90, foram realizadas as seguintes tarefas:

- Leitura dos dados no formato SEG-Y;
- Montagem da geometria 2D, com a definição das coordenadas dos pontos de tiro e geofones, cálculo dos afastamentos entre fonte-receptor e determinação das famílias de ponto médio comum;
- Visualização dos sismogramas de tiro, e a eliminação total ou parcial dos traços contaminados por ruído elétrico gerado pelos equipamentos, com amplitudes anômalas e altas frequência, e ruído transiente, causados por movimentações próximas ao arranjo de geofones;
- Silenciamento da área ruidosa das famílias de tiro, entre o tempo zero e as primeiras chegadas, através da definição da função *mute*, e
- Correção das amplitudes do sinal sísmico, devido ao espalhamento geométrico ou divergência esférica e a aplicação do controle de ganho automático instantâneo – AGC, para equalizar as amplitudes do traço.

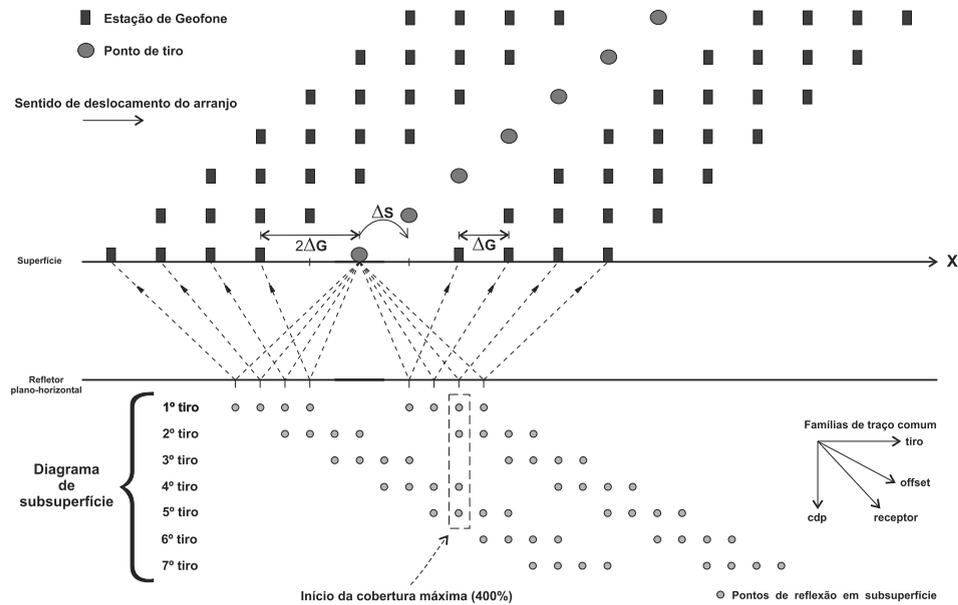


Figura 5 – Obtenção da cobertura múltipla através do levantamento contínuo, usando o arranjo *split-spread* simétrico, onde: $2\Delta G$ – offset mínimo, ΔG – distância entre geofones, ΔS – distância entre pontos de tiro.

Tabela 2 – Parâmetros de aquisição das linhas sísmicas da Figura 4, onde t – tempo de registro, Δt – intervalo de amostragem, C – cobertura, ΔS – distância entre pontos de tiros, ΔG – distância entre geofones e N_c – número de canais.

LINHA	LANÇO	t (s)	Δt (ms)	C	ΔS (m)	ΔG (m)	N_c
50-RL-85	2500-150-0-150-2500	3	4	12	200	50	96
50-RL-86	2500-150-0-150-2500	3	4	12	200	50	96
50-RL-87	2500-150-0-150-2500	3	4	12	200	50	96
50-RL-89	2500-150-0-150-2500	3	4	12	200	50	96
50-RL-90	2500-150-0-150-2500	4	4	12	200	50	96
50-RL-91	2500-150-0-150-2500	4	4	12	200	50	96
50-RL-92	2500-150-0-150-2500	4	4	12	200	50	96
50-RL-104	2700-350-0-350-2700	4	4	12	200	50	96
204-RL-232	1050-100-0-100-3850	4	4	12	50	50	96
204-RL-233	3850-100-0-100-1050	5	4	48	50	50	96
204-RL-236	2450-100-0-100-4500 3850-100-0-100-1050	4	4	48	50	50	96
204-RL-239	2450-100-0-100-4500 3850-100-0-100-1050	4	4	48	50	50	96
204-RL-242	3850-100-0-100-1050	4	4	48	50	50	96
204-RL-243	3850-100-0-100-1050	4	4	48	50	50	96
204-RL-247	3850-100-0-100-1050	4	4	48	50	50	96
204-RL-249	2450-100-0-100-2450	4	4	48	50	50	96
204-RL-251	2450-100-0-100-2450	4	4	48	50	50	96

Para evitar a perda de informação e a redução da cobertura CMP foi dada atenção especial na edição dos traços e na escolha do *mute* de cada sismograma de tiro.

A Figura 7 ilustra o silenciamento da família de tiro 104 após a definição de uma função *mute*.

A técnica do controle de ganho automático instantâneo – AGC, mencionada anteriormente, envolve a definição do comprimento de uma janela móvel de tempo, o cálculo e a aplicação de um escalar em cada amostra do traço sísmico. Apesar de sua simplicidade, o uso do AGC deve ser cuidadoso, pois janelas

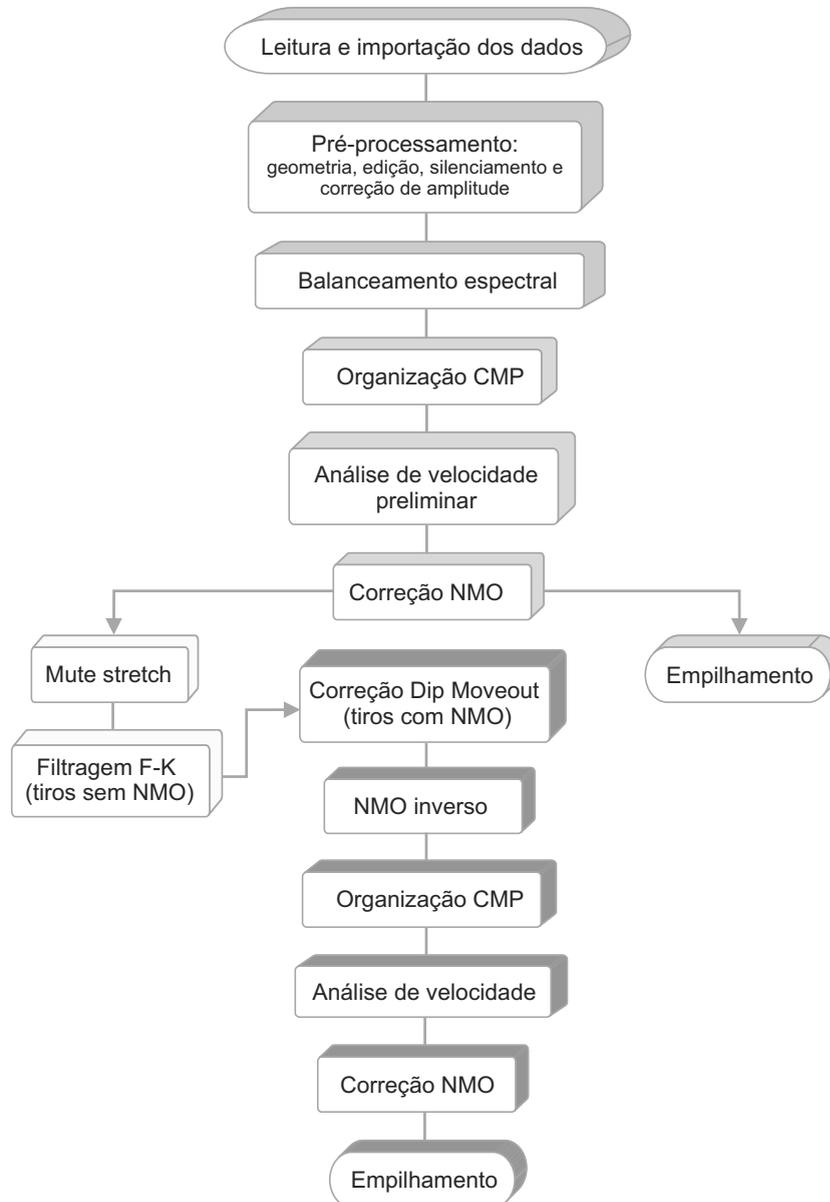


Figura 6 – Fluxograma utilizado no processamento sísmico da linha 50-RL-90.

de tempo com o comprimento muito pequeno, pode ocasionar a perda da amplitude relativa do sinal, por outro lado, se o comprimento for muito grande, o resultado apresenta alterações mínimas das amplitudes do traço. O comprimento da janela de tempo empregado normalmente encontra-se na faixa de 200 a 500 ms (Yilmaz, 1987).

A Figura 8 mostra a família de tiro 50 após a correção de divergência esférica e a aplicação do controle de ganho automático com a janela de tempo de 1000 ms, juntamente com as curvas do

envelope das amplitudes do traço 25. Observando essa Figura, vemos no sismograma original, um acentuado decréscimo da amplitude dos traços com o tempo, provavelmente causados pelos efeitos de atenuação da onda sísmica durante sua propagação em subsuperfície, e no sismograma corrigido, as amplitudes apresentam uma boa equalização. Esse equilíbrio das amplitudes, pode ser facilmente verificada, comparando a curva do envelope do traço 25 original, que apresenta queda das amplitudes, principalmente, após 2.0 s, e a curva do envelope do traço já corrigido,

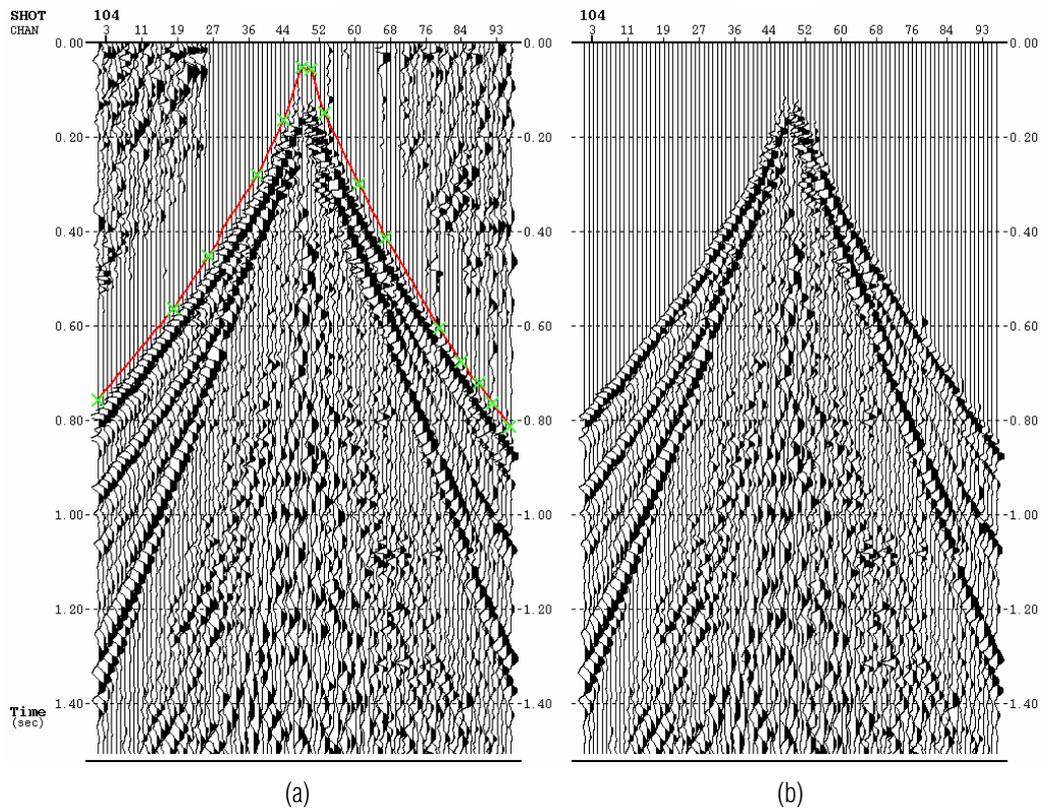


Figura 7 – Silenciamento da família de tiro 104: sismograma editado com a função *mute* definida pelos pontos “picks” da linha vermelha em (a), resultado após aplicação da função *mute* em (b).

onde as amplitudes iniciais não sofreram grandes alterações, e as amplitudes nos tempos finais foram amplificadas.

Nesse trabalho, não realizamos a correção estática, uma vez que, a influência dos erros de estática sobre os dados não prejudicaria o processamento, já que o terreno da Bacia do Tacutu é praticamente plano, existindo apenas a Serra do Tucano, localizada em seu interior, que causa mudanças significativas na topografia. Esse comportamento plano do terreno, também pode ser visto na zona de baixa velocidade (ZBV) da área onde foi levantada a linha sísmica 50-RL-90.

Etapas do processamento avançado

Os principais objetivos nessa fase do processamento, foram:

- Atenuar o *groundroll* das famílias de tiro por meio da técnica do balanceamento espectral;
- Estimar o campo de velocidade da subsuperfície e realizar a correção NMO nas famílias CMPs;
- Aplicar a correção DMO nas famílias de tiro, e
- Gerar a seção sísmica empilhada em tempo.

Filtragem do “groundroll”

O *groundroll* é uma onda de superfície *rayleigh* que ocorre na interface de superfície livre sobrepondo camadas de baixa velocidade. Aspectos teóricos sobre esta onda podem ser encontrados em Grant & West (1965), Ewing et al. (1957) e Dobrin et al. (1954).

As principais características do *groundroll* são a alta amplitude, baixa velocidade, concentração de sua energia nas baixas frequências e a dispersão. Geralmente, a velocidade de propagação das ondas *rayleigh*, encontra-se na faixa de 100 a 1000 m/s e a frequência do *groundroll* inferior a dos eventos de refração e reflexão, podendo chegar aos 15 Hz. A Figura 9 ilustra o *groundroll*, representado pelo cone de ruído de baixa frequência na porção central da família de traços sísmicos associadas a um mesmo ponto de tiro. Levando em conta as características citadas anteriormente, podemos observar que a identificação das hipérbolas de reflexão fica totalmente comprometida na região (delimitada pela linha vermelha) onde predomina o *groundroll*, também é evidente o comportamento linear desse ruído, semelhante ao dos eventos de refração e à onda direta, mas com velocidades bem mais baixas.

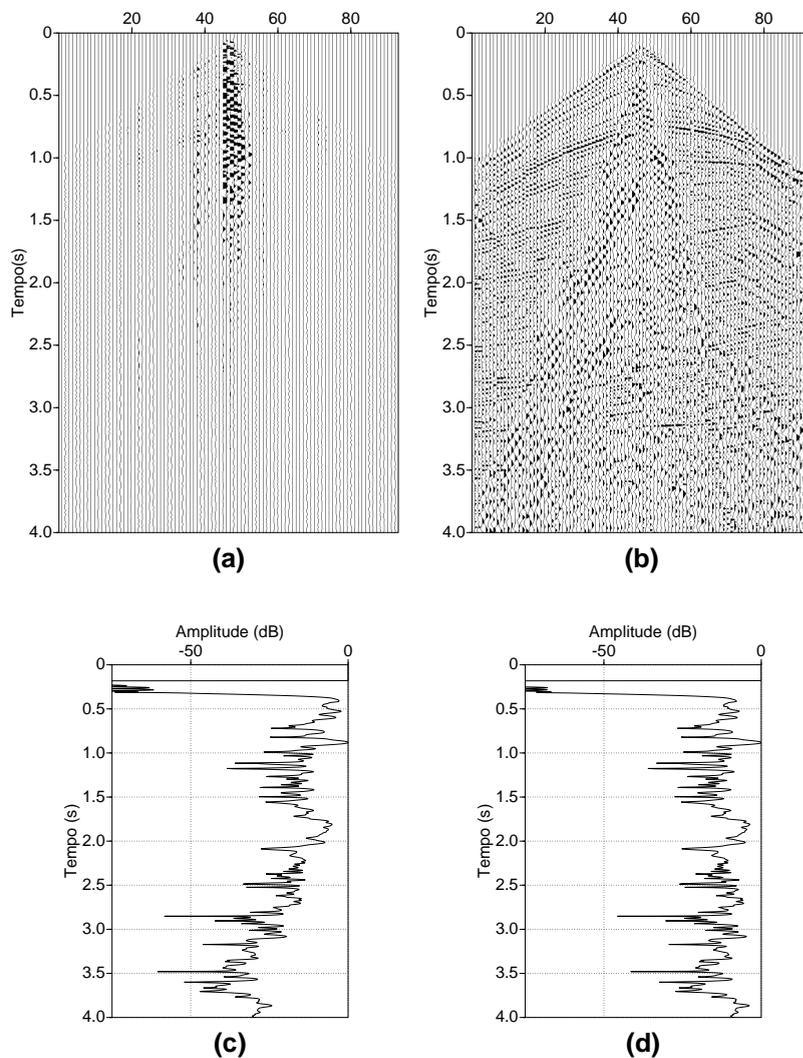


Figura 8 – Correção de amplitude da família de tiro 50: sismograma original em (a), resultado após aplicação da correção de divergência esférica e AGC em (b), curva do envelope do traço 25 original em (c) e curva do envelope do traço 25 corrigido em (d).

Os registros de tiro da linha sísmica 50-RL-90, estavam amplamente afetados pelo *groundroll*, o que comprometia fortemente as demais etapas do processamento. Com o objetivo de atenuar esse ruído, realizamos testes, utilizando o filtro de frequência passa-banda, o filtro FK e o balanceamento espectral. A seguir, descrevemos a técnica do balanceamento espectral, os procedimentos adotados na aplicação das técnicas de filtragem e mostramos os resultados obtidos.

Balanceamento Espectral

A técnica do balanceamento espectral ou *spectral balancing* é muito útil na atenuação de ruídos sísmicos de alta energia

(Yilmaz, 1987). Embora não seja um método de deconvolução, o balanceamento pode ser admitido como uma aproximação da deconvolução de fase-zero, pois sua aplicação não ocasiona modificações significativas na fase do sinal, alterando apenas, o espectro de amplitude. Portanto, a técnica é monocal canal diferindo de outras técnicas multicanais, como a filtragem FK.

A aplicação do balanceamento espectral em dados contaminados pelo *groundroll*, que é caracterizado por forte amplitude nas frequências, resulta numa melhoria do sinal, uma vez que a técnica nivela a energia do ruído com as componentes do espectro do sinal. Além disso, o balanceamento espectral pode ser aplicado com operadores variantes com o tempo, limitando a banda

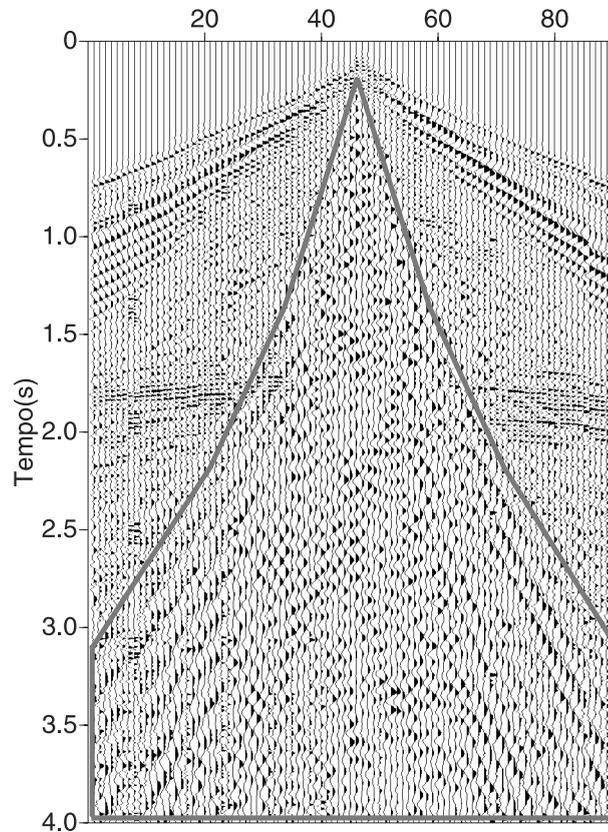


Figura 9 – Cone de ruído, de um sismograma de tiro da linha sísmica 50-RL-90, exibindo o *groundroll*.

de frequência onde ocorre o sinal.

A filtragem dos dados sísmicos através do método conhecido como balanceamento espectral segue os seguintes passos:

- Conversão do dado de entrada $x(t)$ para o domínio da frequência $X(\omega)$ via transformada de Fourier 1D;
- O dado é separado em bandas de frequência $\Delta X(\omega)$.
- As bandas de frequência são separadamente transformadas para o domínio do tempo $\Delta x(t)$ via transformada de Fourier inversa. Cada traço original fica decomposto em vários traços com um conteúdo de frequência distinto;
- Uma função de ganho do tipo AGC é calculada $\Delta g(t)$ e aplicada para cada traço decomposto, e
- Após a equalização, o dado filtrado $\tilde{x}(t)$ é obtido pela soma dos traços decompostos em cada banda de frequência. A Figura 10 traz um esquema com os passos do balanceamento espectral.

Técnicas mais sofisticadas de balanceamento espectral utilizam o envelope do traço de entrada para correção da amplitude verdadeira no traço de saída.

Resultados da filtragem

Buscando atenuar o *groundroll* no domínio do tiro, testamos a filtragem em frequência, com o filtro do tipo passa-banda, e a filtragem FK, em seguida, comparamos os resultados, com o método do balanceamento espectral. Inicialmente, fizemos uma análise do espectro de amplitude de algumas famílias de tiro e definimos para o filtro passa-banda, as frequências de corte, 15 e 55 Hz, e banda de passagem, 20 a 50 Hz. Na filtragem FK, determinamos um polígono de rejeição no plano FK (Figura 11).

A Figura 12 apresenta os resultados da filtragem do *groundroll*. Verificamos nessa Figura, que o ruído ainda está presente nos sismogramas após a filtragem em frequência e FK. Nota-se que houve uma atenuação muito exagerada do *groundroll* com o filtro passa-banda (Figura 12a), causando um corte na banda de frequência baixa do espectro de amplitude

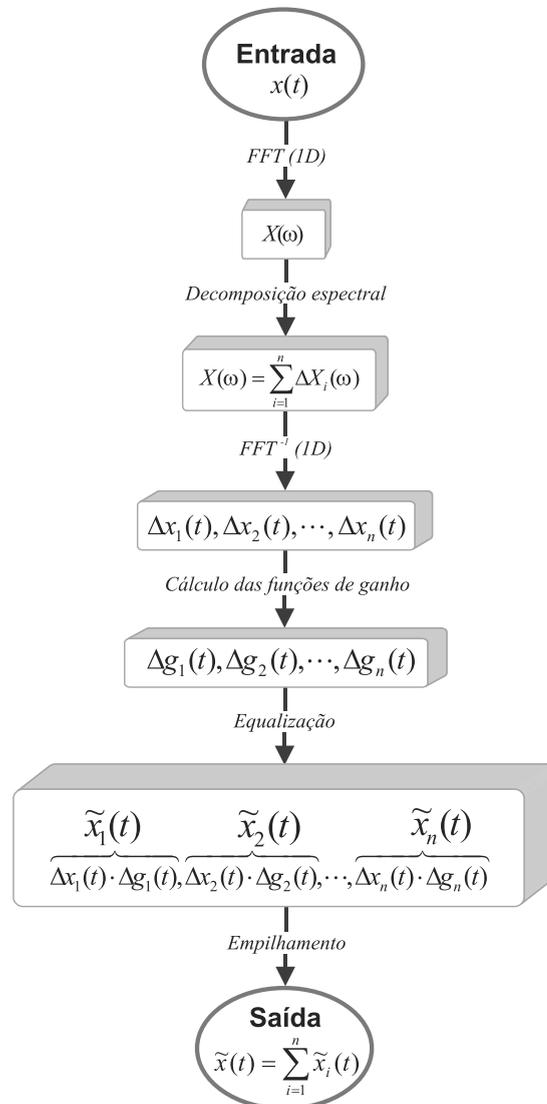


Figura 10 – Passos da técnica de balanceamento espectral. N – número de bandas de frequência, $\Delta X(\omega)$ – dados de uma banda de frequência, $\Delta x(t)$ – traços com o mesmo conteúdo de frequência, $\Delta g(t)$ – série de funções ganho calculadas dos traços com o mesmo conteúdo de frequência, $\tilde{x}(t)$ – traços de uma banda de frequência equalizados.

(Figura 13) e provocando uma redução significativa das amplitudes do sinal. No resultado com o filtro FK (Figura 12b), vemos que o *groundroll* não foi totalmente eliminado, isto deve-se à presença de *alias* espacial nas velocidades aparentes do ruído. O *alias* reflete energia do *groundroll* nas áreas do espectro FK onde ocorre o sinal.

O resultado com o balanceamento espectral (Figura 12c), mostra claramente a continuidade das reflexões no tempo de 1.8 s, além de outras reflexões que não são visíveis no sismograma com as amplitudes corrigidas, devido ao efeito do *groundroll*. É preciso ressaltar, a eficiência dessa técnica quanto ao nível das

amplitudes, uma vez que não há redução significativa das mesmas. Apesar da preservação da amplitude original não estar garantida.

Comparando os espectros de amplitude da família de tiro 88 após as três filtragens, mostradas na Figura 13, verifica-se que o espectro de amplitude associado ao resultado do balanceamento espectral mostra uma suavização na banda de frequência baixa do sinal, entre 0 e 20 Hz. Nos espectros associados às filtragens de frequência, observamos uma queda (corte) significativa, o que provoca a redução do nível de amplitude tanto do ruído (*groundroll*) quando do sinal (reflexões).

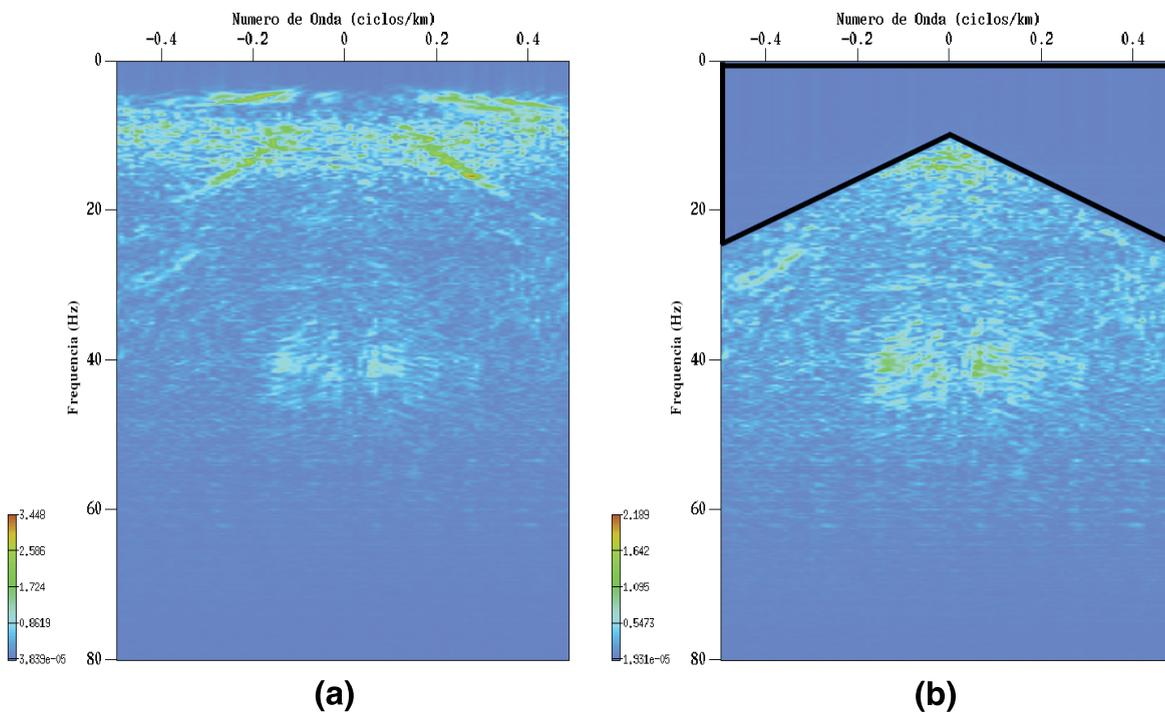


Figura 11 – Espectro FK da família de tiro 88 em (a) e após aplicação do filtro de rejeição em (b). O polígono, em preto, define a zona de rejeição.

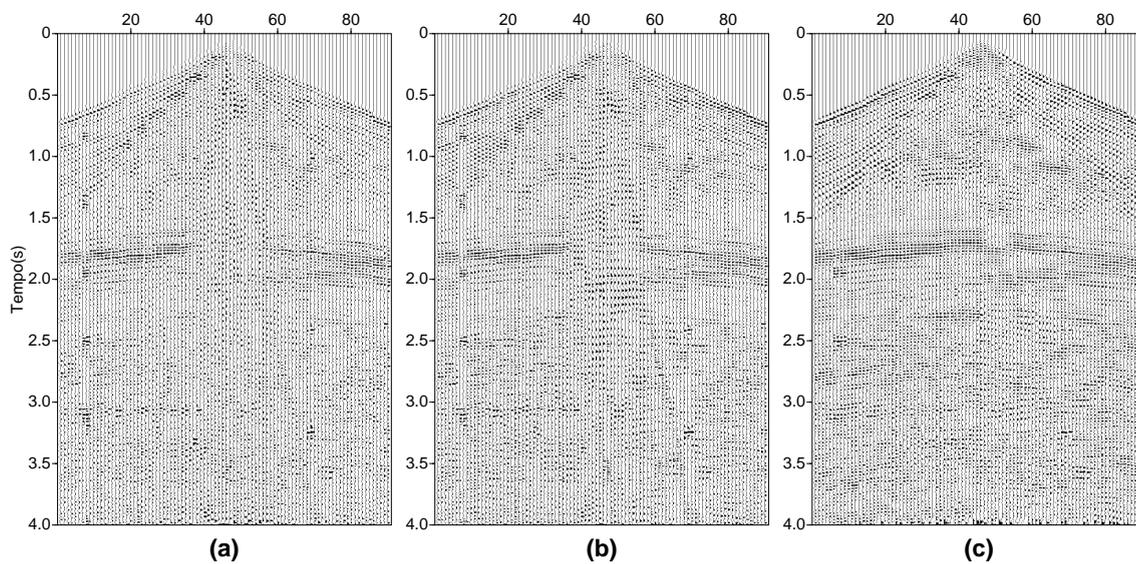


Figura 12 – Família de tiro 88, após a aplicação do filtro passa-banda de (15-20-50-55)Hz em (a), filtro FK em (b) e balanceamento espectral em (c).

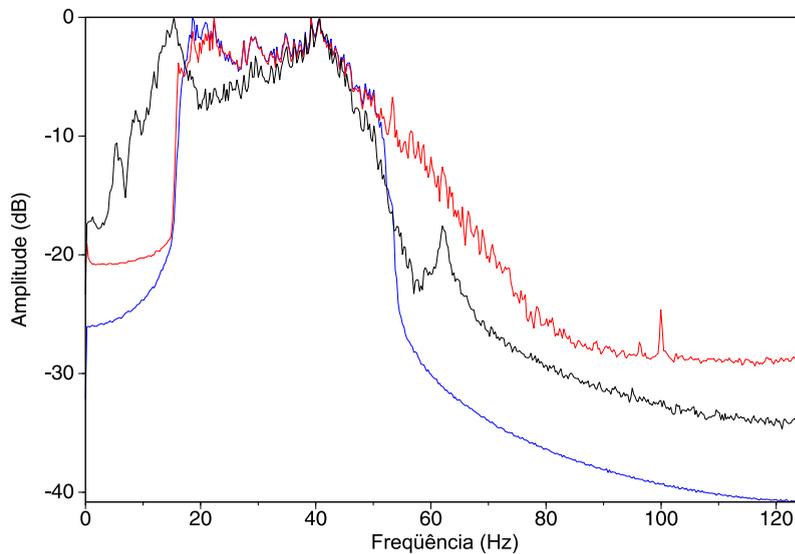


Figura 13 – Espectros de amplitude dos sismogramas da Figura 12. A linha azul corresponde à filtragem passa-banda; em vermelho à filtragem FK e em preto ao balanceamento espectral.

Atenuação do estiramento, onda direta e refratada

Com o aumento da razão sinal-ruído dos dados, após a filtragem do *groundroll*, realizamos uma análise de velocidade preliminar, no qual empregamos o método de coerência da amplitude de empilhamento, para o cálculo do espectro de velocidade e formamos *supergatherers* com 50 famílias CMPs.

O campo de velocidade obtido pela análise de velocidade preliminar, foi suavizado com os parâmetros: incremento de 10 CMPs (250m) na interpolação linear horizontal, incremento de tempo igual a 200ms na interpolação linear vertical, e um *smoothing* do tipo média com comprimento do operador igual a 5 (funções velocidades). As Figuras 14 e 15, mostram o campo de velocidade e a seção empilhada em tempo, respectivamente. Nota-se com facilidade, no intervalo de tempo 0 a 500 ms da seção empilhada, a baixa freqüência devido ao estiramento e a presença dos eventos da onda direta e das refrações.

O problema do estiramento dos traços das famílias CMPs, causado pela correção NMO, foi solucionado com a aplicação do *mute stretch*, utilizando as funções velocidade do campo de velocidade preliminar (Figura 14), e um percentual de estiramento de 70% para evitar perda de informação dos eventos de reflexão próximos à superfície.

A presença dos eventos relacionados à onda direta e refratada nos dados prejudicaram muito a estimativa da velocidade das reflexões rasas, e o aumento da razão sinal-ruído no empilhamento, pois são ruídos coerentes e possuem alta amplitude. O fato das ondas refratadas apresentarem *alias* no domínio $t-x$ somente nas

freqüências mais altas, facilitou a utilização da filtragem multicanal FK para a sua eliminação por diferença de velocidade aparente entre a refratada e o sinal. Antes disso, aplicamos a correção NMO inversa e reorganizamos os dados em famílias de tiro. A Figura 16 apresenta o resultado da filtragem FK de uma família de tiro.

Correção “Dip Moveout” (DMO)

A técnica DMO, teve como ponto de partida a busca pela solução do problema de dependência entre as velocidades de NMO e o mergulho dos refletores em subsuperfície. Comparativamente, as velocidades de NMO para refletores mergulhantes são consideravelmente superiores às velocidades observadas no caso de refletores horizontais (Levin, 1971). Portanto, o objetivo básico do DMO é corrigir nos dados sísmicos pré-empilhados as distorções ocasionadas pela presença de refletores mergulhantes, transformando as seções de afastamento não nulo em seções de afastamento nulo.

A correção DMO utilizada no processamento, empregou o algoritmo proposto por Cabrera & Levy (1989), que aplica a correção DMO no domínio do tiro com transformação logarítmica temporal e espacial.

De acordo com Cabrera & Levy (1989), a equação que representa a transformação DMO para uma família de tiro, pode ser definida por

$$S_0(t_0, h) \approx S_n \left[t_0 - \frac{h^2}{2t_0} \left(\frac{\Delta t_0}{\Delta h} \right)^2, h \right], \quad (1)$$

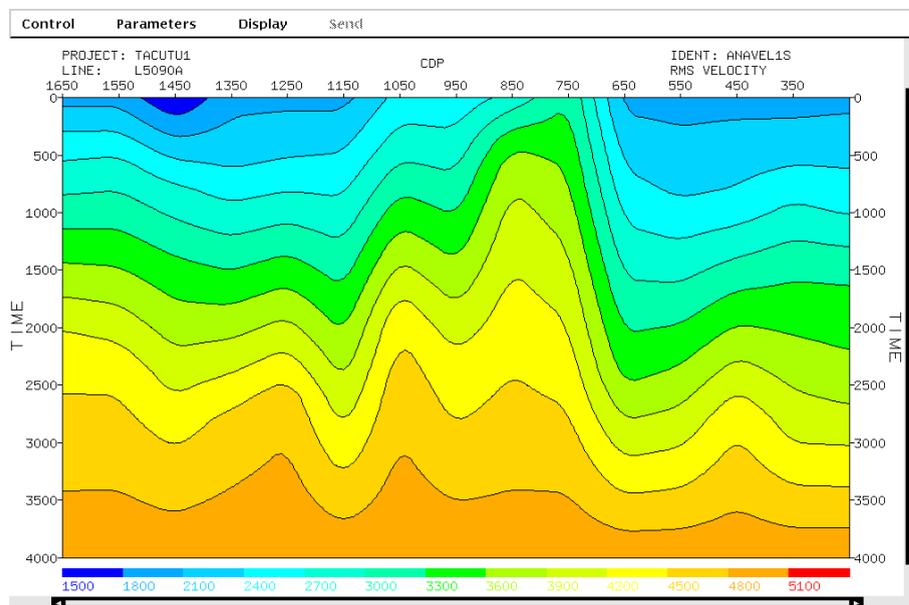


Figura 14 – Campo da velocidade preliminar RMS suavizado da linha sísmica 50-RL-90, após a atenuação do *groundroll*.

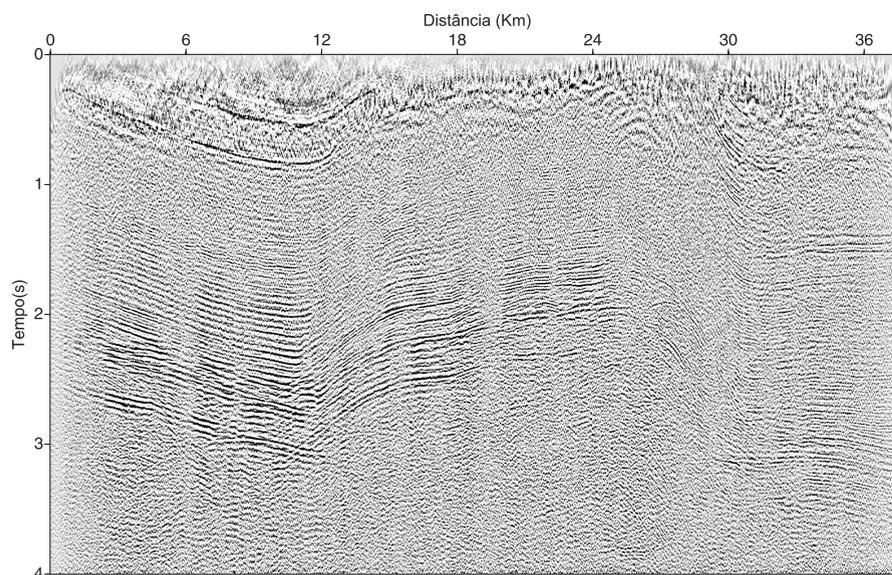


Figura 15 – Seção empilhada da linha sísmica 50-RL-90, obtido com a utilização do campo de velocidade da Figura 14.

onde: S_n – família de tiro com correção do sobretempo normal, t_0 – tempo de afastamento nulo, h – afastamento fonte-receptor e $\Delta t_0/\Delta h$ – inclinação da reflexão na seção de afastamento nulo.

Para realizar a transformação logarítmica temporal (Bolondi et al., 1982) e espacial, aplica-se na equação 1, as seguintes expressões:

$$\psi_0 = T_r \ln \left(\frac{t_0}{T_r} \right) \text{ e } \lambda = H_r \ln \left(\frac{h}{H_r} \right),$$

sendo T_r e H_r o tempo e afastamento de referência, respectivamente.

A equação que representa o dado transformado no domínio logarítmico no tempo e espaço será:

$$\bar{T}_0(\psi_0, \lambda) \approx \bar{q}_n \left(\psi_0 - \frac{H_r^2}{2T_r} \left(\frac{\Delta \psi_0}{\Delta \lambda} \right)^2, \lambda \right). \quad (2)$$

Passando a equação 2 para o domínio da frequência - número

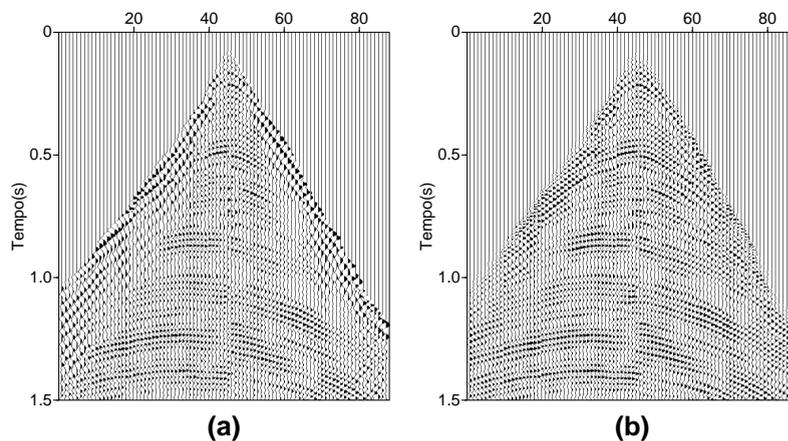


Figura 16 – Atenuação da onda direta e refratada: família de tiro 50 após atenuação do estiramento e NMO inverso em (a) e resultado da filtragem FK em (b).

de onda $(\omega - k)$, teremos:

$$\bar{T}_0(\omega, k) \approx \bar{q}_n(\omega, k) \exp\left(-i\omega \frac{H_r^2}{2T_r} \frac{k^2}{\omega^2}\right). \quad (3)$$

Depois que os sismogramas de tiro, corrigidos do sobre-tempo normal, sofrem a transformação logarítmica, é aplicada a Transformada de Fourier 2D e o termo de deslocamento de fase DMO da equação 3. Por fim, os dados retornam para o domínio $t-x$ com a Transformada de Fourier Inversa.

Para obter um campo de velocidade mais preciso da subsuperfície, aplicamos a correção DMO nas famílias de tiro da linha sísmica 50-RL-90. A Figura 17 mostra uma família de tiro e o resultado da correção DMO. Nessa Figura, além da correção das distorções nos refletores mergulhantes, destacamos a atenuação do estiramento e a melhoria, nos *offsets* mais distantes, da continuidade do evento localizado na janela de tempo entre 0.5 e 1.0s.

Análise de velocidade e empilhamento

Concluída a correção DMO, aplicou-se a correção NMO inversa e reorganizou-se os dados em famílias CMPs, após isso, realizou-se a segunda análise de velocidade, empregando novamente o método de coerência da amplitude de empilhamento, mas desta vez, formando os *supergathers* com 25 famílias CMPs. Para suavizar o campo de velocidade estimado, utilizamos os mesmos parâmetros que foram empregados na suavização do campo de velocidade preliminar. As Figuras 18 e 19 trazem o campo de velocidade e a seção empilhada em tempo da linha sísmica 50-RL-90. Observando na Figura 19, verificamos que houve um au-

mento na resolução temporal, caracterizado pela maior definição dos refletores. Da mesma forma, a qualidade da seção sísmica, nos permite identificar falhas normais e feições anticlinais e sinclinais. De acordo com Eiras & Kinoshita (1990), os sinclinais foram dobrados depois da deposição do arenito Tucano.

CONCLUSÕES

Foi possível obter uma boa imagem da seção empilhada após o processamento convencional da linha sísmica 50-RL-90, da Bacia do Tacutu, que permite ao intérprete, uma fácil visualização dos refletores e das estruturas existentes na subsuperfície.

A técnica do balanceamento espectral foi escolhida por apresentar melhor atenuação do *groundroll* e melhoria da razão sinal-ruído dos dados.

De acordo com os resultados, o uso do *mute stretch* na atenuação do estiramento foi satisfatória, não havendo perda de cobertura nos afastamentos mais distantes da fonte, nem o comprometimento dos eventos de reflexão mais rasos. A filtragem FK das famílias de tiro, aplicada nas ondas refratadas, que não estavam em *alias*, resultou na melhoria da continuidade lateral dos eventos de reflexão próximas à superfície. A técnica DMO corrigiu satisfatoriamente o efeito de distorção dos mergulhos dos refletores em subsuperfície.

Após a análise de velocidade residual, com os dados corrigidos pelo método DMO, obtemos um campo de velocidade mais realístico da subsuperfície, melhorando significativamente a imagem da seção empilhada.

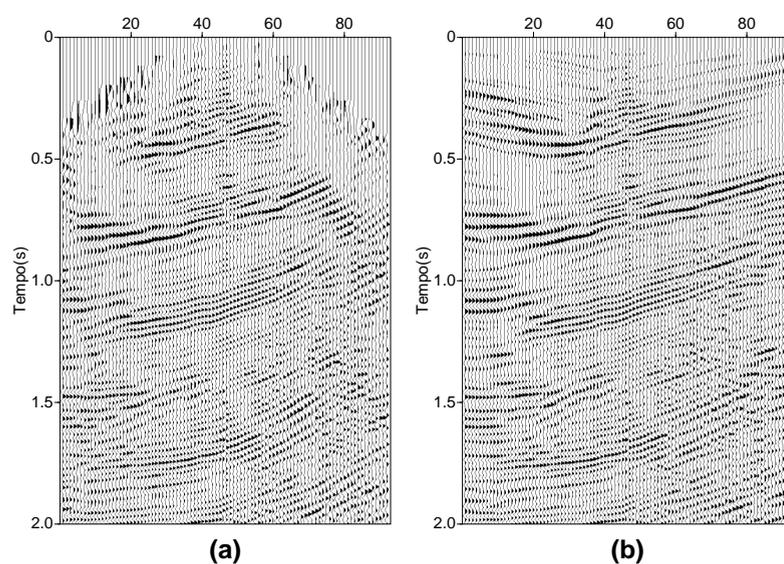


Figura 17 – Resultado da correção DMO: família de traços do tiro 50 antes (a) e após aplicação da correção DMO (b).

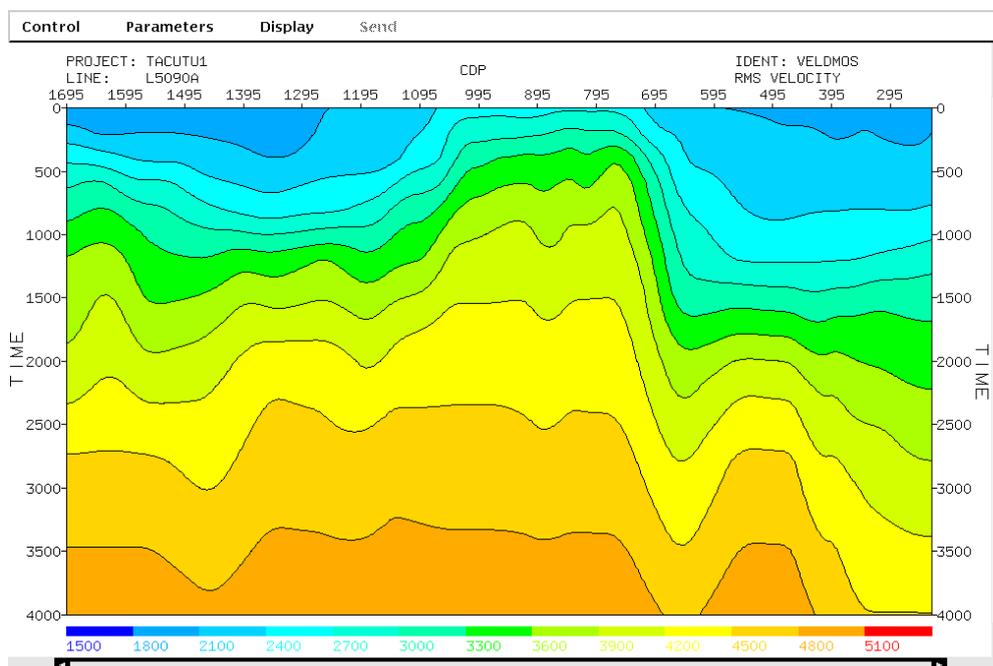


Figura 18 – Campo da velocidade RMS suavizado da linha sísmica 50-RL-90, estimado após a correção DMO.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao geólogo Jaime F. Eiras da PETROGEO e aos revisores anônimos pelas críticas e sugestões apresentadas que bastante contribuíram para melhor apresentação do texto. Também agradecem à FINEP, PETROBRAS, CNPq e FAPESB pelo

apoio financeiro ao projeto da Rede em Risco Exploratório; à ANP pelos dados sísmicos fornecidos, e à PARADIGM e LANDMARK pelas licenças dos softwares de processamento sísmicos cedidas ao CPGG-UFBA. Michelângelo G. da Silva agradece à CAPES pela bolsa de estudos.

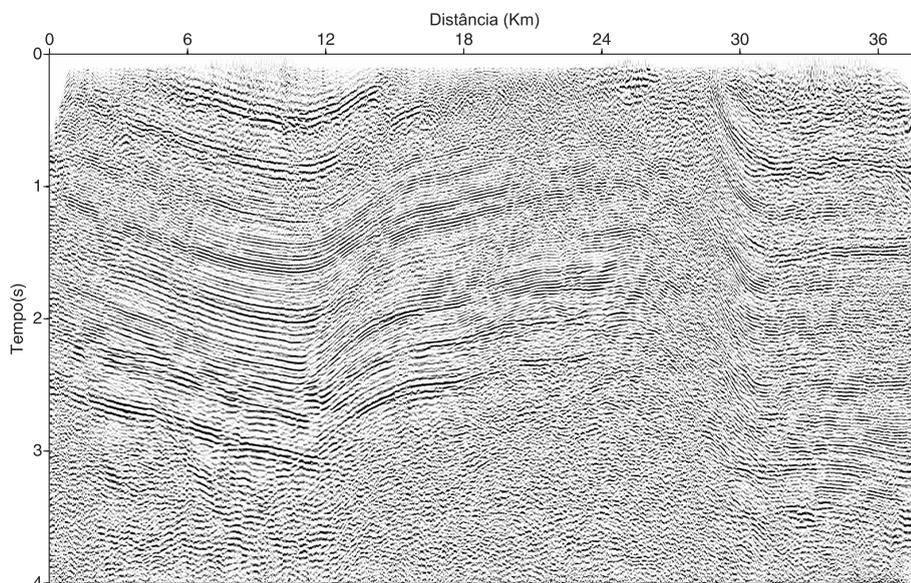


Figura 19 – Seção empilhada da linha sísmica 50-RL-90, obtido com a utilização do campo de velocidade da Figura 18.

REFERÊNCIAS

- BERRANGÉ JP & DEARNLEY R. 1975. The Apoteri volcanic formation-tholeiitic flows in the North Savannas Graben of Guyana and Brazil. *Geologische Rundschau*, 64: 883–899.
- BOLONDI G, LOINGER E & ROCCA F. 1982. Offset continuation of seismic sections. *Geophysical Prospecting*, 30: 813–828.
- CABRERA J & LEVY S. 1989. Shot dip moveout with logarithmic transformations. *Geophysics*, 54(8): 1038–1041.
- CARNEIRO RG, ANDRADE FG & SILVA GOP. 1968. Reconhecimento geológico no Território Federal de Roraima; Gráben do Tacutu. PETROBRAS/RENOR (Relatório SIEX), Belém, 130–3578.
- DOBRIN MB, LAWRENCE LP & SENGBUSH RL. 1954. Surface and near-surface waves in the Delaware Basin. *Geophysics*, 19(4): 695–715.
- EIRAS JF & KINOSHITA EM. 1987. Evidências de movimentos transcorrentes na Bacia do Tacutu. In: *Seminário sobre Riftes Intracontinentais*, 1, Rio de Janeiro, Anais... Rio de Janeiro, PETROBRAS/DEPLEX.
- EIRAS JF & KINOSHITA EM. 1990. Geologia e Perspectivas Petrolíferas da Bacia do Tacutu. In: *Origem e Evolução das Bacias Sedimentares*. PETROBRAS, Anais... Rio de Janeiro, PETROBRAS, 197–220.
- EWING WM, JARDETZKY WS & PRESS K. 1957. *Elastic waves in layered media*. McGraw-Hill. 380 pp.
- GRANT FS & WEST GF. 1965. *Interpretation theory in applied geophysics*. Society of Exploration Geophysicists. 584 pp.
- KLEMME HD. 1980. Petroleum basins – Classification and Characteristics. *J. Petr. Geol.*, 3(2): 187–207.
- LEVIN FK. 1971. Apparent velocity from dipping interface reflections. *Geophysics*, 36(3): 510–516.
- RAMOS AJR. 1990. Reconhecimento geológico no Território do Rio Branco. DNPM (Relatório Anual Dir. Div. Geol. Min.), Rio de Janeiro, 58–62.
- YILMAZ Ö. 1987. *Seismic Data Analysis*. Society of Exploration Geophysicists – SEG, Tulsa – Oklahoma. 526 pp.

NOTAS SOBRE OS AUTORES

Michelângelo G. da Silva. B.C. em Engenharia de Agrimensura pela EEA, 2001. Mestre em Geofísica de Exploração de Petróleo pela UFBA, em 2004. De 2004 a 2006 bolsista do CNPq. Atualmente pesquisador do projeto Mapeamento dos Sistemas Petrolíferos das Bacias do Recôncavo e Tucano Sul (ANP/FAPEX/CPGG-UFBA). As principais áreas de interesse são métodos de filtragem, processamento de dados sísmicos de reflexão e interpretação sísmica.

Milton J. Porsani. B.C. em Geologia pela USP, 1976. Mestre em Geofísica pela UFPA, 1981. Doutor em Geofísica pela UFBA, 1986. De 1986 até o presente é Pesquisador do CPGG-UFBA. Pós-doutorado em Geofísica, *Institute for Geophysics at University of Texas at Austin*, EUA, setembro/92 a outubro/93. Professor do Departamento de Geologia e Geofísica Aplicada do IGEO-UFBA (1990). Professor Titular na matéria Exploração de Petróleo (2000). Pesquisador IA do CNPq. Coordenador do Programa de Exploração de Petróleo do CPGG-UFBA. Áreas de interesse: desenvolvimento de métodos e algoritmos de filtragem mono e multicanais, processamento de dados sísmicos, inversão de dados geofísicos.