

**UNIVERSIDADE FEDERAL FLUMINENSE**

**GUSTAVO DOMINGUES DE VASCONCELLOS**

**PROCESSAMENTO DE DADOS SÍSMICOS SINTÉTICOS DE  
UM MODELO DE SAL UTILIZANDO O SOFTWARE SPW**

**NITERÓI  
2009**

GUSTAVO DOMINGUES DE VASCONCELLOS

PROCESSAMENTO DE DADOS SÍSMICOS SINTÉTICOS DE  
UM MODELO DE SAL UTILIZANDO O SOFTWARE SPW

Trabalho de conclusão de curso  
submetido ao Programa de  
Graduação em Geofísica da  
Universidade Federal Fluminense  
como requisito final para a obtenção  
do título de Graduado. Área de  
concentração: Geofísica de  
exploração.

Orientador:  
Marco Antonio Cetale Santos

UNIVERSIDADE FEDERAL FLUMINENSE

NITERÓI  
2009

V331

Vasconcellos, Gustavo Domingues de  
Processamento de dados sísmicos sintéticos de um  
modelo de sal utilizando o software SPW / Gustavo  
Domingues de Vasconcellos. – Niterói : [s.n.], 2009.  
71 f.

Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em  
Geofísica) – Universidade Federal Fluminense, 2009.

1.Sismologia. 2.Dados sísmicos – Interpretação.  
3.Geologia estrutural. I.Título.

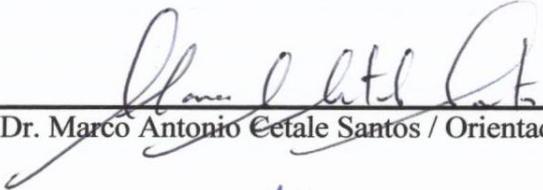
CDD 551.22

# PROCESSAMENTO DE DADOS SÍSMICOS SINTÉTICOS DE UM MODELO DE SAL UTILIZANDO O SOFTWARE SPW

GUSTAVO DOMINGUES DE VASCONCELLOS

Trabalho de conclusão de curso submetido ao Programa de Graduação em Geofísica da Universidade Federal Fluminense como requisito final para a obtenção do título de Graduado. Área de concentração: Geofísica de exploração.

Comissão Examinadora:



---

Dr. Marco Antonio Cetale Santos / Orientador



---

Msc: Rogério de Araújo Santos



---

Dr. Alexandre Motta Borges

Niterói, 10 de Julho de 2009

## DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho à:

Minha mãe Regina e meu pai Genesio, fontes do meu sucesso.

Minha avó Maria e meu avô Nelson (In Memoriam), pelo amor e carinho.

## AGRADECIMENTOS

- Agradeço primeiramente a Deus, que sempre me foi muito generoso me agraciando com uma família maravilhosa e amigos excepcionais.
- Aos meus pais Genesio e Regina que sempre me apoiaram e estiveram presentes ao meu lado nos momentos de indecisões e dificuldades, e que graças a isso me possibilitaram atingir meus objetivos e minhas conquistas.
- Ao meu orientador Prof. Dr. Marco Antonio Cetale Santos, pela sua dedicada e expressiva atenção.
- Aos Professores Alexandre Borges, Adalberto da Silva e Rogério Santos por abrirem as portas do imenso mundo da Geofísica, me aconselhando e me ensinando.
- À Professora Eliane Alves, que é a “mãezona” do curso de graduação de Geofísica da UFF, sempre se preocupando com os alunos e puxando nossas orelhas quando preciso fosse.
- À Stephanie pela paciência, amor e carinho durante a realização desse trabalho.
- Aos Geofísicos Fernando Roxo e Marcos Gallotti.
- Aos amigos de trabalho Pedro Cabrera e Victor Murillo pela ajuda e sugestões na monografia.
- Ao amigo da PUC-Rio, Bruno Longuinho pela ajuda com os dados sintéticos.
- Aos meus grandes e bons amigos da Geofísica da UFF, que sempre deixavam meus dias mais engraçados e divertidos na universidade e nos trabalhos de campo.
- À UNIVERSIDADE FEDERAL FLUMINENSE que me possibilitou conhecer a cidade de Niterói, os amigos de profissão e adquirir conhecimento com professores de alta qualidade técnica e pessoal.
- A todos que contribuíram direta ou indiretamente para a realização dessa obra.

Um abraço a todos e o meu mais sincero muito obrigado!

*“Cair é permitido, levantar é obrigatório.”*  
Provérbio Chinês

ÍNDICE	
DEDICATÓRIA.....	v
AGRADECIMENTOS.....	vi
LISTA DE FIGURAS.....	ix
LISTA DE TABELAS.....	xi
RESUMO.....	xii
ABSTRACT.....	xiii
1. INTRODUÇÃO.....	1
2. OBJETIVO.....	2
3. ASPECTOS GEOLÓGICOS DO GOLFO DO MÉXICO.....	3
3.1 Localização e Geologia.....	4
3.2 Evolução Tectono-Sedimentar.....	6
3.3 Formação de estruturas halocinéticas.....	7
3.4 Observações sísmicas do sal.....	8
4. RESUMO TEÓRICO.....	9
4.1. Processamento Sísmico.....	10
4.1.1 Geometria.....	12
4.1.2 Divergência Esférica.....	13
4.1.3 Filtragem de Frequência.....	15
4.1.4 CMP (Common-MidPoint).....	16
4.1.5 Silenciamento (Mute).....	16
4.1.6 Correção NMO (Normal MoveOut).....	17
4.1.7 Análise de Velocidade.....	19
4.1.8 Convolução.....	20
4.1.9 Deconvolução.....	21
4.1.10 Empilhamento (Stack).....	23
4.1.11 Migração Sísmica.....	24
5. METODOLOGIA.....	27
5.1. Desenvolvimento de dados sintéticos.....	27
5.2. Desenvolvimento dos fluxos de processamento.....	28
5.2.1 Fluxos de processamento.....	28
6. PROCESSAMENTO DO DADO SINTÉTICO.....	30
6.1 Descrição do Dado.....	30
6.1.1 Modelagem Sísmica.....	31
6.2 Conversão dos Dados.....	32
6.3. Geometria.....	32
6.3.1- Preenchimento dos arquivos SPS.....	33
6.4. CMP <i>Sort</i> (Ordenação em famílias CMP).....	35
6.5. Silenciamento (Mute).....	36
6.6 Deconvolução e Divergência Esférica.....	37
6.7 Análise de Velocidade.....	38
6.8 Correção de NMO e Empilhamento ou <i>Stack</i> .....	39
6.9 Espectro de Frequência e Filtragem de Frequência.....	43
6.10. Migração.....	45
7. CONCLUSÃO.....	53

## LISTA DE FIGURAS

3.1-1: Mapa de Localização do Golfo do México.....	04
3.1-2: Mapa de profundidade do embasamento e tipo de substrato pré-sal na Bacia do Golfo do México.....	06
3.4-1: Primeira ilustração conhecida de sal alóctone, identificada por Amery, 1969. O perfil sísmico original apresenta baixa resolução, não permitindo identificar as feições de sedimentos sub-horizontais abaixo da língua de sal alóctone, na Escarpa de Sigsbee, no Golfo do México. Figura A em tempo, Figura B em profundidade.....	09
3.4-2: Seção sísmica no Golfo do México mostrando o recobrimento da parte frontal de língua de sal alóctone por refletores em <i>onlap</i> , resultando em cobertura sedimentar acima do sal com reduzida espessura, principal evidência de alojamento raso da língua de sal.....	10
4.1: Fluxograma padrão de Processamento.....	12
4.1.3-1: Filtros de Frequência.....	16
4.1.4-1: CMP, ponto médio comum de reflexão de 6 canais.....	17
4.1.6-1: Modelo de uma reflexão no refletor plano a uma profundidade H.....	18
4.1.6-2: NMO, Normal moveout.....	19
4.1.9-1: Deconvolução do traço sísmico.....	22
4.1.10-1:	
a) Cinco canais antes do empilhamento e com ruído;	
b) Esses mesmos com correção no NMO;	
c) Os cinco canais já estaqueados e com atenuação de ruído de $\sqrt{N}$ . Onde N é o nº de canais. ....	24
4.1.11-1: Esquema de migração.....	26
5.1-1: Modelo sintético que simula uma estrutura geológica de sal, com forte contraste de velocidade com o meio no qual está inserido.....	29 e 50
5.2.1-1: Fluxo padrão de Geometria. Visualização da janela de fluxos do SPW.....	30
5.2.1-2: Fluxo de Processamento utilizado nesse trabalho.....	31
6.1-1: Modelo de velocidades utilizado para gerar o sismograma sintético. As velocidades presentes na barra lateral encontram-se em m/s.....	32
6.3.1-1: Disposição de fontes e receptores e suas marcações por bandeiras.....	36

6.3.1-2: SALT_GEOM.spw - Dado já com geometria. A Ferramenta do SPW utilizada para essa visualização é o <i>SeisViewer</i> .....	36
6.5-1: Silenciamento (Mute). A imagem da esquerda mostra o sismograma antes do silenciamento e a da direita mostra o sismograma depois de aplicado o silenciamento.....	38
6.7-1: Análise de velocidade.	
a) Dado em função do offset sem correção NMO;	
b) Semblance do dado em função da velocidade com picks marcados e	
c) Dado em função do offset com o NMO corrigido.....	41
6.8-1a: Empilhamento apenas com silenciamento. Esse stack foi desenvolvido com o <i>velan1</i> .....	42
6.8-1b: Empilhamento apenas com silenciamento. Esse stack foi desenvolvido com o <i>velan2</i> .....	42
6.8-2a: Seção empilhada depois da deconvolução e correção de divergência esférica. Stack gerado com <i>velan1</i> .....	43
6.8-2b: Seção empilhada depois da deconvolução e correção de divergência esférica. Stack gerado com <i>velan2</i> .....	43 e 51
6.8-2c: Deconvolução realizada depois da correção de NMO e empilhamento.....	44
6.8-2d: Deconvolução realizada depois da correção de NMO e empilhamento, contudo visualizada com um ganho de 1000ms.....	44
6.9-1: Espectro de Frequência do dado antes da deconvolução e correção de divergência esférica.....	45
6.9-2: Espectro de frequência do dado depois da deconvolução e correção de divergência esférica.....	45
6.9-3a: Empilhamento do dado deconvolvido, com correção de divergência esférica e com filtro passa-banda . Stack gerado com o <i>velan1</i> .....	46
6.9-3b: Empilhamento do dado deconvolvido, com correção de divergência esférica e com filtro passa-banda. Stack gerado com <i>velan2</i> .....	46
6.9-4: Espectro de frequência do dado com filtro passa-banda.....	47
6.10-1: Migração Phase-Shift.....	48
6.10-2: Migração Phase-Shift com ganho de 5 dB nas amplitudes dos traço.....	52
6.10-3: Migração Phase-Shift com as principais observações destacadas e numeradas de 1 a 6.....	53

## LISTA DE TABELAS

1: Tabela com os parâmetros de aquisição dado.....	32
2a: SPS R.....	35
2c: SPS X.....	35
2b: SPS S.....	35

## RESUMO

O presente trabalho tem por objetivo processar um conjunto de dados sísmicos 2D que apresenta uma estrutura geológica de sal, visando, através de fluxos de processamento sísmico, obter seções sísmicas que representem a geologia de sub-superfície e permitam observar a dificuldade de imageamento abaixo do corpo evaporítico.

Para o seu desenvolvimento foi utilizado um sismograma sintético de um modelo geológico apresenta uma estrutura de sal. O modelo foi desenvolvido pela SEG em parceria com EAGE e se baseia numa estrutura existente no Golfo do México.

Deseja-se com a utilização desse dado, obter conclusões e observações à respeito do imageamento pré-sal, como por exemplo características de iluminação, efeitos de análise de velocidade, etc.

A execução desses fluxos tem como ponto de partida um fluxo básico (*Geometria, Silenciamento, CMP, Deconvolução, Análise de velocidade, Empilhamento e Migração Pós-Stack*), presente em muitas literaturas, para que seja possível, na imagem final, observar como cada parâmetro ou propriedade contribuiu no imageamento.

Para gerar os dados sintéticos utilizou-se o pacote SEISMIC UNIX (SU) pacote livre e produzido pelo *Center of Wave Phenomena (CWP) da Colorado School of Mines*, e para o processamento utilizou-se o Seismic Processing Workshop (SPW), software produzido pela *Parallel Geoscience* e com licença de uso adquirida pelo LAGEMAR, Instituto de Geociências, Universidade Federal Fluminense.

## ABSTRACT

The aim of this work is to process a 2D seismic data with a salt geological structure, using different flowcharts and observing the results and showing the difficult of the seismic imaging below the salt body.

To the development of this work a synthetic seismogram from a geologic model with a salt body was used. The model was developed by SEG and EAGE, and it is based in a real structure in Gulf of Mexico.

The processing flow presented here was based on a basic processing sequence (Geometry, Mute, CMP, Deconvolution, Velocity Analyses, Stack and Pos-Stack Migration).

To the development of the synthetic data, the open source software SEISMIC UNIX (SU) produced by the *Center of Wave Phenomena (CWP) of Colorado School of Mines* was used, and to the development of the processing the software called Seismic Processing Workshop (SPW), was used. The software SPW is produced by the company *Parallel Geoscience*, and the license belongs to LAGEMAR, Instituto de Geociências, Universidade Federal Fluminense.

We hope that the use of these data can provide conclusions and observations about the sub-salt imaging, such as illumination characteristics, velocity effects, etc.

## 1. INTRODUÇÃO

A constante necessidade de se entender e identificar as estruturas internas da terra, gerada pela busca de recursos minerais, ou mesmo pelo conhecimento científico, estimula o estudo e o desenvolvimento de técnicas capazes de fornecer informações sobre o conteúdo geológico de sub-superfície.

Particularmente, o desenvolvimento e a popularidade dos motores à combustão, elevaram a demanda de petróleo no mundo, e essa indústria até os dias de hoje ocupa uma posição de destaque nos investimentos em pesquisa e tecnologia para caracterização das estruturas internas terrestres. O entendimento das geometrias e propriedades dessas estruturas tem por finalidade principal contribuir para a identificação de novo recursos de hidrocarbonetos e ao mesmo tempo para o conhecimento científico da subsuperfície terrestre.

No final do século 19, o estudo da propagação de ondas acústicas de vulcões permitiu a identificação de estruturas internas terrestres (Gadallah & Fisher, 2005). Esses estudos foram se aprimorando até se tornarem no que nós conhecemos hoje como método sísmico.

Ao contrário da necessidade de se perfurar para se identificar a geologia de sub-superfície, o método sísmico utiliza a propagação de ondas e se mostra muito eficaz e popular entres os métodos de exploração geofísica.

A técnica sísmica pode ser dividida em três etapas básicas: aquisição, processamento e interpretação de dados. Através dessa sequência busca-se obter informações sobre as características geológicas e estruturais de uma determinada área.

A resposta sísmica observada durante a aquisição encontra-se em seu estado bruto, dificultando qualquer tipo de interpretação nesse momento.

É preciso então trabalhar essas informações brutas para que possam representar, da melhor maneira possível, uma imagem das estruturas sub-superficiais. Esse trabalho recebe o nome de processamento de dados sísmicos.

Um processamento de dados sísmicos é desenvolvido através de fluxogramas que buscam o ajuste de parâmetros essenciais ao imageamento da estrutura que se quer conhecer.

A escolha e utilização desses parâmetros influenciam significativamente a qualidade do produto final.

Os fluxos de processamento, de modo geral, são desenvolvidos de acordo com a necessidade de cada objetivo do levantamento. A partir disso entende-se que cada linha

que se deseja processar, precisa necessariamente de um fluxo específico, desenvolvido em função da geologia local, previamente estudada.

Em busca do melhor produto possível, capaz de ser gerado através do processamento, quase sempre os dados são submetidos a mais de um fluxo, que devem conter parâmetros distintos, que contribuirão de, forma também distinta, para as características desejadas para a imagem do produto final.

Nesse sentido o presente trabalho tem por objetivo submeter e analisar um conjunto de dados sísmicos 2D contendo a presença de sal, a diferentes fluxos de processamento. Para a análise de características do processamento, foi utilizado um modelo que simula uma estrutura geológica de sal, gerado em parceria da SEG com a EAGE.

Optou-se pela utilização desse modelo devido ao grau de controle que se pode possuir sobre o dado sintético e pela peculiar característica de imageamento associado ao grande contraste de impedância acústica no topo e na base de uma camada de sal e sua encaixante.

Além disso, acrescenta-se a grande importância do sal na exploração petrolífera das bacias sedimentares brasileiras, observando-se que nos últimos anos foram realizadas importantes descobertas de hidrocarbonetos que tem os evaporitos como rocha-selante em bacias como Espírito Santo, Campos e Santos. Passa então a ter grande valia geofísica a análise e o entendimento do imageamento sísmico em um modelo com sal.

Para o processamento dos dados foi utilizado o SPW(Seismic Processing Workshop), software de processamento desenvolvido pela Parallel Geo e adquirido pelo LAGEMAR UFF.

## 2. OBJETIVO

O principal objetivo do trabalho é realizar e analisar o processamento de um dado sísmico 2D com uma estrutura geológica da sal através de diferentes fluxos de processamento.

Com isso busca-se observar como cada fluxo ao ser utilizado, influencia no imageamento, principalmente abaixo do corpo salino.

A utilização de dados sintéticos faz-se necessária, devido ao nível de controle que se possui sobre o dado. Do dado sintético conhecem-se todas as propriedades e valores, possibilitando com isso a previsão da resposta após o processamento.

Esse dado controlado permite conhecer com mais precisão, a influência de certas sequências e parâmetros ao imageamento.

Quanto à escolha de um modelo geológico com sal, atribui-se às importantes descobertas recentes de reservatórios de hidrocarbonetos abaixo da camada de sal. O desafio no imageamento é gerado pelo alto valor de impedância acústica observada em sua interface, o que dificulta a transmissão de energia para camadas abaixo do sal e o seu retorno à superfície.

### 3. ASPECTOS GEOLÓGICOS DO GOLFO DO MÉXICO

#### 3.1 Localização e Geologia

O Golfo do México localiza-se no canto sudeste da América do Norte. O Golfo é bordejado pelos Estados Unidos à norte (Flórida, Alabama, Mississippi, Louisiana e Texas), por cinco estados mexicanos à oeste (Tamaulipas, Veracruz, Tabasco, Campeche e Yucatán), e pela ilha de Cuba à sudeste. (Figura 3.1-1).

O Golfo do México mede aproximadamente 1.600 km de leste a oeste, 900 km de norte a sul e abrange uma área com aproximadamente 1.5 milhões de km<sup>2</sup>. Sua linha de costa que vai desde o cabo Sable, na Flórida até a ponta da península de Yucatán apresenta um comprimento de aproximadamente 5.700 km, com mais 380 km de costa na parte noroeste de Cuba. Caso baías e outras porções de água em terra fossem incluídas, o total da linha de costa aumentaria em mais 27.000 km só nos EUA.



Figura 3.1-1: Mapa de Localização do Golfo do México. Fonte: site [www.golfo-de-mexico.org](http://www.golfo-de-mexico.org)

A escarpa de Sigisbee, localizada no quadrante sudoeste é a região mais profunda do golfo do México. Sua profundidade exata é discutida por muitos autores, contudo acredita-se que sua profundidade máxima varie entre 3.750 e 4.384 m. Enquanto a profundidade média no Golfo seja aproximadamente 1.615 m e o seu volume de água aproxime-se de 2.434.000 km<sup>3</sup>.

A ampla bacia evaporítica se estende entre a Península da Flórida e a Península de Yucatán, principalmente na crosta continental, ao longo de uma faixa de direção NE que flexiona para E-W a sul do Delta do Mississipi, onde não ocorrem evaporitos.

Os evaporitos da margem continental sul dos Estados Unidos e os da margem norte da Península de Yucatán, no México, são separados por provável substrato de crosta oceânica (Imbert, 2005).

Mapas de contorno estrutural do embasamento (rochas subjacentes aos evaporitos do Jurássico Médio, em águas profundas) sugerem que, em escala regional, os principais compartimentos tectônicos do Golfo do México controlam a distribuição dos depocentros sedimentares sin-rifte e a ocorrência dos depósitos evaporíticos (Buffler, 1989).

A figura 3.1-2 mostra o mapa estrutural do embasamento. Nele observa-se que o horizonte mapeado é marcado por contornos sólidos, onde é calibrado por poços ou bem identificado por sísmica; os contornos em pontilhado são especulativos, e baseados em dados geofísicos indiretos, tais como métodos potenciais (gravimetria e magnetometria), sísmica de refração e reflexão, ou extrapolados de tendências regionais das áreas onde se tem melhor controle por poços exploratórios.

A análise desse mapa permite subdividir o Golfo do México em quatro diferentes tipos crustais que controlam os diferentes domínios de tectônica de sal:

- \* crosta continental, que ocorre em áreas não afetadas pela subsidência e pela formação da Bacia do Golfo do México;

- \* crosta transicional espessa, contornando a área de máxima subsidência e acumulação sedimentar do Golfo do México, localmente com grandes espessuras de sal;

- \* crosta transicional afinada, com desenvolvimento de riftes e espessas acumulações de evaporitos e rochas carbonáticas e siliciclásticas;

- \* crosta oceânica, onde não são observados riftes e onde o substrato é composto por cunhas de refletores mergulhantes para o mar e camadas de rocha vulcânica associadas ao espalhamento oceânico. Localmente, ocorre grande espessamento da cobertura sedimentar, com refletores sísmicos plano-paralelos, sendo em geral pouco movimentada, por ausência de evaporitos (Winker & Buffler, 1988 apud Mohriak, 2008).

Segundo McKenzie (1978), os modelos de formação do Golfo do México são semelhantes aos utilizados em margem continental divergente. Os processos que

envolvem a extensão da litosfera, magmatismo e reequilíbrio termal, englobam os seguintes mecanismos principais de subsidência:

-subsidência tectônica (afinamento crustal) com a formação de riftes e vulcanismo associado;

-subsidência induzida por sobrecarga dos sedimentos; subsidência termal, resultando no aumento da batimetria na direção de crosta oceânica.

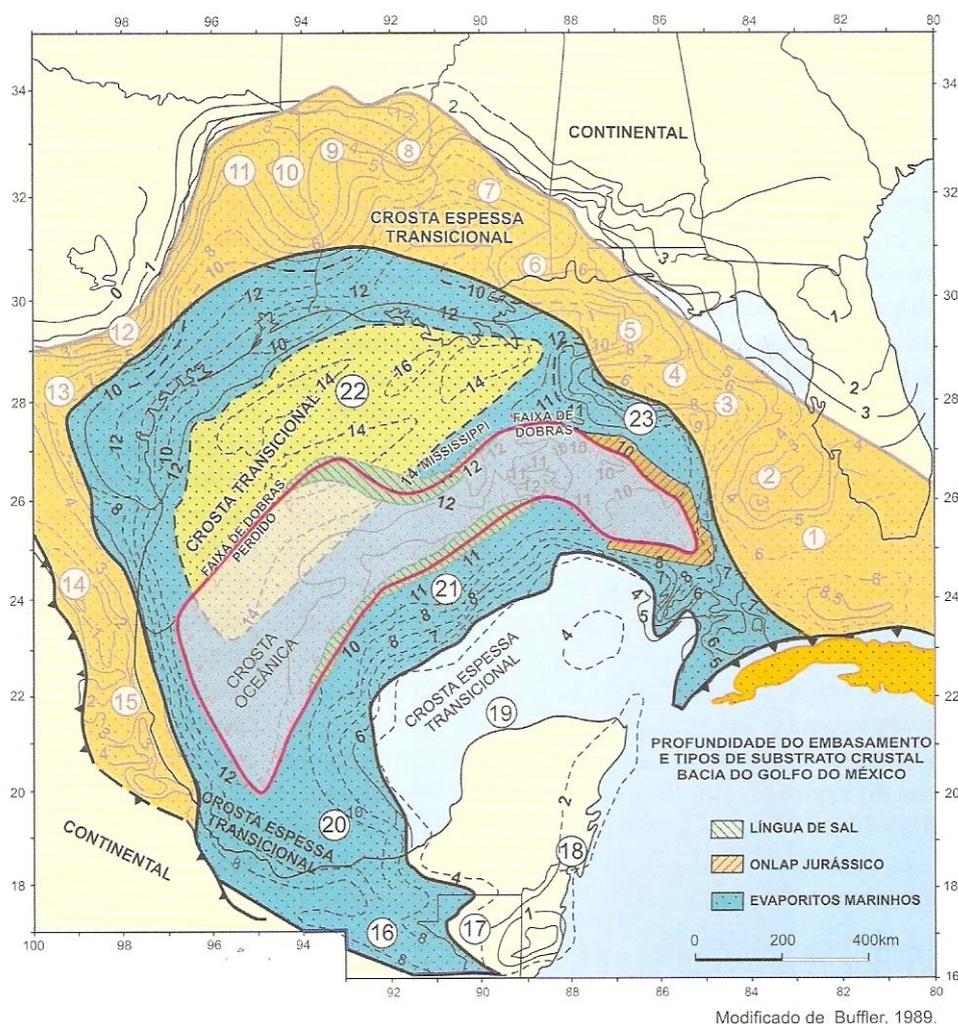


Figura 3.1-2: Mapa de profundidade do embasamento e tipo de substrato pré-sal na Bacia do Golfo do México, com a identificação de diversos locais (pontos numerados de 1 a 23) caracterizados por diferentes estruturas. Fonte: Mohriak et al., 2008.

### 3.2 Evolução Tectono-Sedimentar

A evolução do Golfo do México inicia-se com um sistema de riftes no Triássico, culminando com a formação de crosta oceânica de idade jurássica (Salvador, 1991). Entretanto, ao contrário das margens continentais do Atlântico Sul, o processo de deriva continental da região do Golfo do México foi interrompido, uma vez que o seu centro

de espalhamento foi abortado no Mesozóico. O foco de extensão da litosfera, que subsequentemente evoluiu para um centro de espalhamento ativo com a formação de crosta oceânica, foi deslocado para a margem continental leste norte americana, onde houve prosseguimento dos processos de formação de crosta oceânica e divergência litosférica, com o afastamento das placas norte-americana e noroeste africana (Mohriak, 1995).

Muito se discute e pouco se sabe a cerca da história geológica dessa bacia antes do Triássico inferior. Sendo as rochas do pré-Triássico conhecidas apenas por alguns poços e afloramentos afastados uns dos outros, muito da história geológica da bacia durante a Era Paleozóica precisa ser inferida através do estudo de áreas vizinhas.

Alguns autores tem postulado a presença de uma bacia nessa área durante a maior parte da Era Paleozóica, mas a maioria das evidências parece indicar que as rochas Paleozóicas não são muito encontradas na bacia e que essa área no final do Paleozóico era parte do grande supercontinente Pangea, resultado da colisão de várias placas continentais.

A bacia com sua configuração atual acredita-se ter tido sua origem no Triássico inferior, fruto do rifteamento da Placa da América do Norte no início do rompimento e deslocamento das placas Africanas e Sul Americanas.

O rifteamento provavelmente continuou através do Jurássico superior e médio, com a formação da crosta continental “estirada” ou “transicional” na parte central da bacia.

O avanço intermitente do mar sobre a área continental a oeste durante o Jurássico médio inferior resultou na formação de extensivos depósitos de sal, conhecidos hoje em dia na bacia do Golfo do México.

Desde o Jurássico Inferior, a bacia tem sido uma estável província geológica caracterizada pela persistente subsidência de sua parte central, provavelmente num primeiro momento devido a um esfriamento termal e posteriormente devido a um acúmulo sedimentar à medida que a bacia é preenchida com uma fina camada progradante de sedimentos clásticos durante o Cenozóico, ao longo da margem de noroeste a norte.

À leste, a estável plataforma da Flórida não foi coberta pelo mar até o Jurássico Inferior ou o início do Cretáceo. A plataforma de Yucatan emergiu até o Cretáceo médio. Depois ambas plataformas submergiram, a formação de carbonatos e evaporitos tem caracterizado a história geológica dessas duas áreas estáveis.

A maior parte da bacia foi curvada durante o Cretáceo Precoce por plataformas de carbonato, e seus flancos à oeste estavam envolvidos durante o Cretáceo Tardio e Terciário Precoce, num episódio de compressão deformacional, que criou a Serra Madre Oriental do Leste do México.

### 3.3 Formação de estruturas halocinéticas

As primeiras interpretações para a formação das estruturas halocinéticas na região do Golfo do México basearam-se nas estruturas diapíricas observadas na região emersa e na plataforma rasa, com modelos semelhantes aos observados para o Mar do Norte. Esses autores acreditavam na continuação do estilo estrutural do sal na direção de águas profundas, com características semelhantes às feições halocinéticas da plataforma continental (modelo de halocinese por flutuação). Contudo a região da Escarpa de Sigsbee quebra esse modelo, pois lá o sal apresenta-se separado de sua camada mãe.

Reconhece-se atualmente que o sal presente no Golfo pode assumir formas de gotas, línguas e lençóis, tanto autóctones como alóctones, tendo sofrido vários episódios de remobilização. Dentre essas formas, Fainstein *et al.* (2005) acreditam que a compreensão da formação de estruturas halocinéticas associadas a línguas de sal alóctone é um dos avanços mais significativos da tectônica de sal, em sua visão moderna.

Essas observações incluem a visualização sísmica e a interpretação da ocorrência de feições alóctones, como gotas, línguas, lençóis e *nappes* de sal, algumas das quais são bastantes expressivas, como por exemplo, a língua de sal associada à Escarpa de Sigsbee, no Golfo do México, ou as escarpas batimétricas no limite crustal das margens brasileira e africana.

### 3.4 Observações sísmicas do sal

A primeira interpretação que se tem registro de uma língua de sal alóctone foi proposta por Amery (1969). Neste modelo da figura 3.4-1, a camada de sal alóctone apresenta uma velocidade anômala (4,6 km/s), muito maior do que a velocidade dos sedimentos encaixantes (2.0 a 2.3 km/s).

A interpretação da formação de camadas de sal alóctone devido à progradação sedimentar (sobrecarga diferencial expelindo a camada original de evaporitos, com o sal inserindo-se em outras sequências estratigráficas) iniciou-se na Bacia do Golfo do México (Humphris, 1978 apud Mohriak, 2008), mas é também reconhecida em bacias sedimentares como as do Mar do Norte.

O desenvolvimento em técnicas de processamento, vem possibilitando uma significativa melhora na visualização de corpos como o topo e a base das feições de sal alóctone (figura 3.4-2), como é o caso do Golfo do México em regiões de água profunda e ultraprofunda.

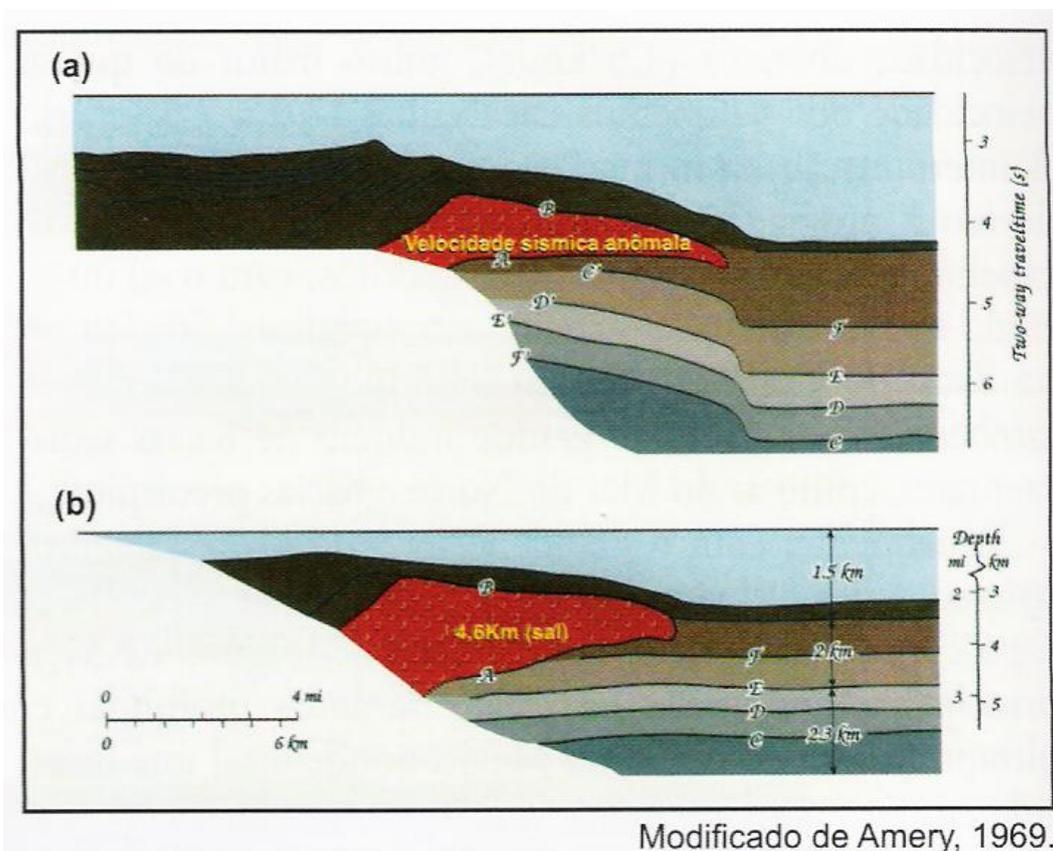


Figura 3.4-1: Primeira ilustração conhecida de sal alóctone, identificada por Amery, 1969. O perfil sísmico original apresenta baixa resolução, não permitindo identificar as feições de sedimentos sub-horizontais abaixo da língua de sal alóctone, na Escarpa de Sigsbee, no Golfo do México. Figura A em tempo, Figura B em profundidade. Fonte: Mohriak et al., 2008.

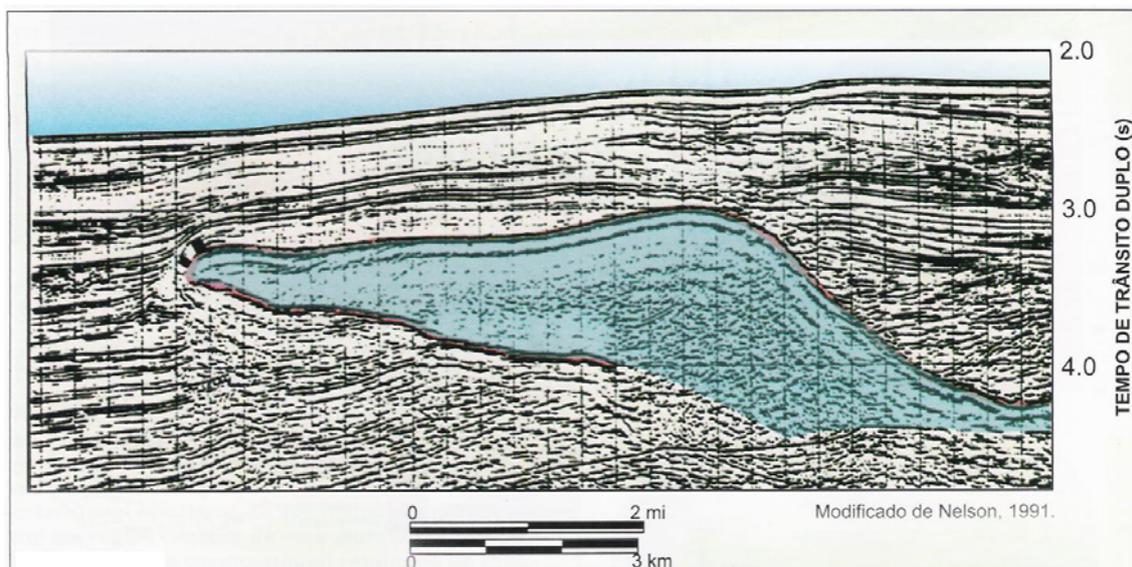


Figura 3.4-2: Seção sísmica no Golfo do México mostrando o recobrimento da parte frontal de língua de sal alóctone por refletores em *onlap*, resultando em cobertura sedimentar acima do sal com reduzida espessura, principal evidência de alojamento raso da língua de sal. Fonte: Mohriak et al., 2008.

## 4. RESUMO TEÓRICO

### 4.1. Processamento Sísmico

O processamento sísmico desempenha um papel de vital importância no método sísmico, complementando o trabalho da aquisição e “clarificando” os dados para a interpretação.

O objetivo do processamento de dados sísmicos é produzir uma imagem do alvo de sub-superfície o mais acurado possível (Gadallah & Fisher, 2005).

Entretanto observa-se que a qualidade do processamento de um dado também pode estar relacionada à qualidade da aquisição desse dado.

Mesmo com a aquisição bem planejada, nem sempre é possível se obter um resultado excelente, simplesmente pelo fato da geologia não responder bem sísmicamente. Muitas vezes este fato é negligenciado porque se acredita que o processamento possa resolver a maioria dos problemas. Entretanto, o processo computacional não faz um dado ruim transformar-se em um dado bom (Knapp, 1986 apud Brunetta, 2005).

Ainda assim, mesmo não sendo o único fator de influência na qualidade do dado que se quer analisar, o processamento é sem dúvida uma etapa de importância inegável, e sem o qual seria impossível identificar estruturas de sub-superfície.

O processamento dos dados sísmicos, na maioria dos softwares de processamento é realizado através de fluxogramas (figura 4.1). Os fluxogramas, ou fluxos, podem ser entendidos como sequências que representam etapas do processamento. Essas sequências não são fixas, permitindo ao geofísico adicionar ou excluir parâmetros dessa sequência.

Muito embora seja possível a criação generalizada de fluxos de processamento, elas seguem um escopo fundamental, uma estrutura com parâmetros básicos ao processamento, e que se encontram presentes em muitas literaturas. Esse fluxo básico é composto em sua maioria por *Geometria*, *Silenciamento (Mute)*, *CMP*, *Correção NMO*, *Deconvolução*, *Análise de Velocidade*, *Empilhamento (Stack)* e *Migração Pós-Stack*.

- (1)Pré-Processamento
  - \*Demultiplexação
  - \*Reformatação
  - \*Edição
  - \*Correção de espalhamento Geométrico
  - \*Ajuste da Geometria de Campo
  - \*Aplicação de estática de campo
- (2)Deconvolução e Balanceamento de Traço
- (3)Ordenação em família CMP
- (4)Análise de Velocidade
- (5)Correção de Estática Residual
- (6)Análise de Velocidade
- (7)Correção de NMO
- (8)Correção de DMO
- (9)Correção de NMO Inverso
- (10)Análise de Velocidade
- (11)Correção de NMO, Silenciamento e Empilhamento
- (12)Deconvolução
- (13)Branqueamento Espectral variante no Tempo
- (14)Filtro variante no Tempo
- (15)Migração
- (16)Aplicação de Ganho

Figura 4.1: Fluxograma padrão de Processamento. Modificado de: Yilmaz, 1987.

#### 4.1.1 Geometria

A etapa da geometria é a primeira que envolve a utilização de um fluxo de processamento. Nesse fluxo são introduzidos os valores de posicionamento e elevação das fontes e dos receptores aos cabeçalhos dos traços sísmicos, (Yilmaz, 1987). Essas informações apresentam-se em coordenadas geográficas e são obtidas através do *Relatório do Observador* (R.O.). Os R.O's são relatórios preenchidos em campo e que contém todas as informações da aquisição fundamentais ao processamento, é nele que se encontram informações sobre os receptores, as fontes, as cargas utilizadas, os testes de carga, as falhas de detonação das cargas, as condições de terreno, etc. Basicamente ele descreve toda a história da aquisição em campo.

No fluxo de geometria é necessário entrar com arquivos de posicionamento e elevação dos receptores e da fonte, aqui denominados de SPS R e SPS S respectivamente. Além disso, é preciso introduzir um arquivo chamado de observações de campo. Esse arquivo contém informações como o deslocamento da fonte, o número de canais ativos (*spread*) no momento da detonação, posição da fonte em relação às estacas e receptores, posição dos receptores em relação às estacas e à fonte, linha de tiro, linha do receptor, etc. (figura 6.3.1-1).

Algumas empresas de aquisição já entregam aos centros de processamento esses dados SPS's separados em fonte, receptor e observação de campo, já no padrão ANP. Contudo outras empresas apenas fornecem o relatório do observador e os arquivos de navegação, ficando à cargo dos centros de processamento a confecção desses arquivos SPS's.

#### 4.1.2 Divergência Esférica

Ao se propagar no interior da Terra, uma onda sísmica sofre alguns efeitos que contribuem para a perda de energia e atenuação do sinal (decaimento da amplitude) do sinal. Dentre esses efeitos podemos destacar a divergência esférica, a absorção e as perdas por transmissão.

A divergência esférica está relacionada ao decaimento da amplitude pelo espalhamento da frente de onda durante sua propagação pela terra. Imaginemos como fonte de onda, uma fonte pontual, que gera um campo de ondas em forma esférica num meio isotrópico e homogêneo. A lei da conservação da energia estabelece que a

intensidade ou densidade de energia é inversamente proporcional ao quadrado do raio da frente de onda, logo:

$$\rho \propto \frac{1}{r^2}$$

onde  $\rho$  é a densidade de energia por unidade de superfície,  $r$  é o raio da frente de onda.

Como a amplitude  $A$  da onda sísmica é proporcional a raiz quadrada da densidade de energia (fluxo de energia), temos:

$$A \propto \left( \frac{1}{r^2} \right)^{\frac{1}{2}}$$

ou

$$A \propto \frac{1}{r} = \frac{1}{vt}$$

Sendo  $v$  a velocidade do meio e  $t$  o tempo de percurso. Notamos que quanto maior o tempo percorrido menor será a amplitude do sinal e portanto, precisamos de uma função de correção variável no tempo, de modo que:

$$C(t) \propto vt$$

Geralmente se admite que a Terra é estratificada, e que as camadas têm velocidades constantes. Nesse meio a superfície da frente de onda sofre um aumento maior do que no meio isotrópico, devido a refração da onda. Então, para um meio estratificado as perdas são maiores do que para um meio de velocidade constante.

Utilizando a teoria do raio, uma equação é proposta para a correção de amplitude em relação ao espalhamento geométrico, para um modelo de variação vertical de velocidade.

Para o caso de um modelo de  $m$  interfaces, teríamos:

$$C_m = \frac{V_{rms}^2 t_0}{V_1}$$

onde:  $C_m$  é o fator de correção;  $t_0$  é o tempo vertical de reflexão; e  $V_1$  é a velocidade na primeira camada.

A velocidade média quadrática  $V_{rms}$  pode ser estimada através de uma análise de velocidade.

Um outro processo que causa o decaimento da intensidade da onda elástica é a absorção. Na absorção ocorre a dissipação da energia da onda no meio, transformando a energia em calor, devido às propriedades intrínsecas da rocha. A energia mecânica da onda é convertida em movimento de fricção entre os grãos, onde a conversão é irreversível devido ao comportamento inelástico das rochas. Isso causa uma perda de amplitude e alteração na fase do sinal.

Para medida deste efeito usa-se um coeficiente de absorção (ou atenuação), definido por:

$$A = A_0 \cdot e^{-\alpha x}$$

Onde:  $A_0$  é a amplitude inicial e  $x$  é a distância percorrida pela onda.

Contribuindo ainda para a atenuação da onda temos as transmissões que ocorrem quando a frente de onda atinge um refletor. Após atingir uma interface parte da energia da onda é refletida e parte é transmitida.

Como a amplitude da onda acústica na Terra decai de modo inversamente proporcional à distância da fonte geradora à medida que o sinal se propaga no interior da Terra, torna-se mais difícil a visualização das reflexões mais profundas devido a perda de energia da onda. Sugere-se então a aplicação de uma correção na amplitude dos traços ao longo do tempo.

#### 4.1.3 Filtragem de Frequência

Essa etapa está relacionada à remoção de faixas de frequência indesejadas no dado sísmico e deixar passar a banda da frequência que contém as informações úteis do dado. Em outras palavras, antes de iniciarmos a filtragem, é aconselhável limitar a banda de frequência do dado, com o intuito de remover componentes, normalmente associados a ruídos, como por exemplo, as frequências muito baixas. Causadas por eventos superficiais ou de ondas aéreas.

Esses filtros são gerados com base em estudos matemáticos e espectrais, com objetivo de remover componentes de frequência indesejados, preservando as faixas desejadas de um determinado dado sísmico.

Algumas literaturas recomendam que as frequências do dado sísmico tenham início entre 10 e 15 Hz e parem entre 70 e 80 Hz (Telford, Geldart e Sheriff, 1990).

Os filtros mais comuns no processamento são:

**Passa-Banda** - as amplitudes associadas com as frequências  $f_1$ ,  $f_2$ ,  $f_3$  e  $f_4$  são 0,1,1,0. Essas são as frequências que irão passar. Um filtro com função inversa pode ser criado para escolher as amplitudes 1,0,0,1 e essa configuração torna o filtro passa-banda em um rejeita-banda. (Figura 4.1.3-1a).

**Passa-alta / corta-baixa** - a série de amplitude para o passa alta é 0,1 onde as frequências  $f_3$  e  $f_4$  são arbitrárias. (Figura 4.1.3-1b).

**Passa-baixa / corta-alta** - a série de amplitudes para as frequências  $f_1$  e  $f_2$  é 1, 0, onde as frequências  $f_3$  e  $f_4$  são arbitrárias. O decaimento é entre as frequências  $f_1$  e  $f_2$ . (Figura 4.1.3-1c).

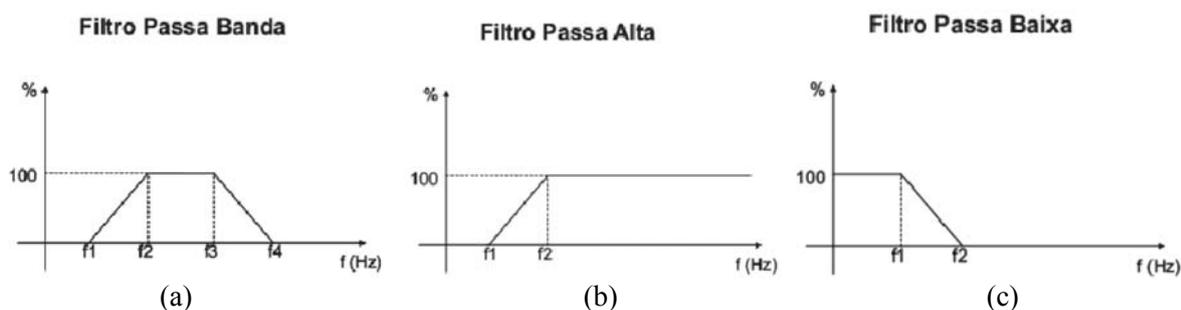


Figura 4.1.3-1: Filtros de Frequência.

#### 4.1.4 CMP (*Common-MidPoint*)

Durante aquisições de dados sísmicos 2D, receptores e fontes deslocam-se ao longo de uma linha reta. A distância entre a fonte e cada receptor recebe o nome de offset. A posição do CMP é definida como sendo o ponto médio entre uma fonte e um receptor. Pares de fonte e receptor com a mesma posição de CMP são reunidos formando uma família de CMP.

Para um meio estratificado horizontalmente e que apresenta velocidade constante, uma geometria CMP compreende todos os raios que incidem no mesmo ponto refletor. Através dessa configuração é possível observar que os pontos de sub-superfície são registrados redundantemente, isso porque diferentes offsets trazem informações de um mesmo ponto comum do refletor (figura 4.1.4-1).

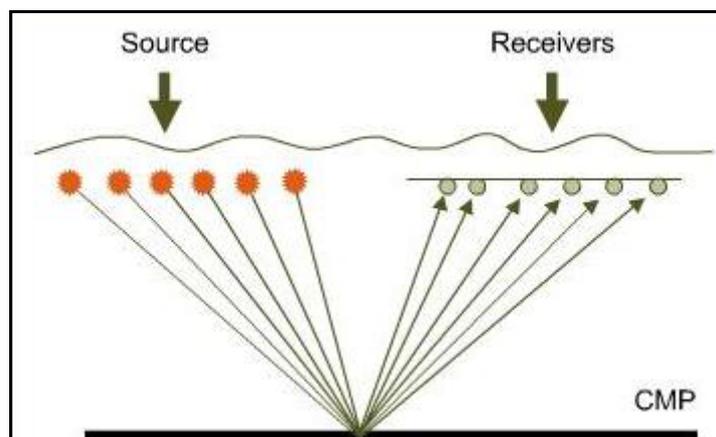


Figura 4.1.4-1: CMP, ponto médio comum de reflexão de 6 canais.

Fonte: EAGE, Learning Geoscience online.

Site: <http://www.learninggeoscience.net/>

#### 4.1.5 Silenciamento (*Mute*)

O processamento sísmico requer muitas vezes a edição do dado. Isto pode ser feito escalonando traços, silenciando traços, inteiro ou partes dele que não se deseja trabalhar. O silenciamento zera ou anula informações em uma janela específica desejada.

Em razão do utilizado nesse trabalho ser sintético, ele foi submetido ao silenciamento apenas para a remoção de onda direta.

#### 4.1.6 Correção *NMO* (*Normal MoveOut*)

Considerando o mesmo modelo de geometria mostrado anteriormente, agora de forma simplificada (figura 4.1.6-1), com um refletor plano e horizontal em subsuperfície, temos: O ponto médio  $M$  entre o offset de comprimento  $SR$  e o tempo  $t(x)$  de deslocamento ao longo do caminho  $SDR$ .

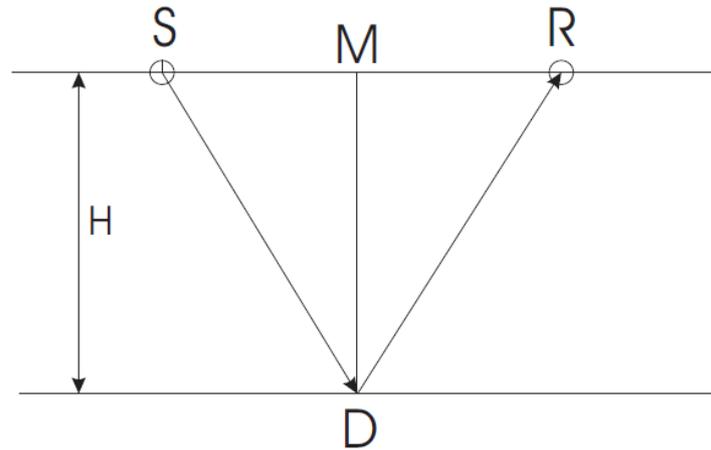


Figura 4.1.6-1: Modelo de uma reflexão no refletor plano a uma profundidade H. Fonte: Gadallah, 1994.

Definindo-se  $t(0)$  como o tempo para percorrer duas vezes o caminho MD e  $V$  como a velocidade de propagação da onda em sub-superfície, é possível determinar  $t(x)$  usando o teorema de Pitágoras:

$$t^2 = t_0^2 + x^2 / V^2 \quad (1.0)$$

Essa equação nos mostra que a curva de tempo de trânsito se assemelha a uma hipérbole. A diferença  $\Delta t$  ( $t_0 - t$ ) entre o tempo de percurso para um afastamento específico  $t(x)$  e o tempo de percurso para o afastamento nulo  $t_0$  é chamada de *normal moveout* (NMO). Ou seja, o NMO descreve o efeito do afastamento no tempo de percurso e pode ser calculada do seguinte modo:

$$\Delta t = t(x) - t_0 \quad (2.0)$$

$$\Delta t_{NMO} = t_0 \left( \sqrt{1 + \left( \frac{x}{V t_0} \right)^2} - 1 \right)$$

A correção NMO consiste na remoção desse efeito hiperbólico, através do deslocamento de eventos de tempo de percurso  $t(x)$  para tempos de percurso de afastamento zero ( $t_0$ ), ou zero offset.

Após a realização dessa correção NMO, os eventos hiperbólicos associados aos refletores em sub-superfície estarão horizontalizados (Figura 4.1.6-2).

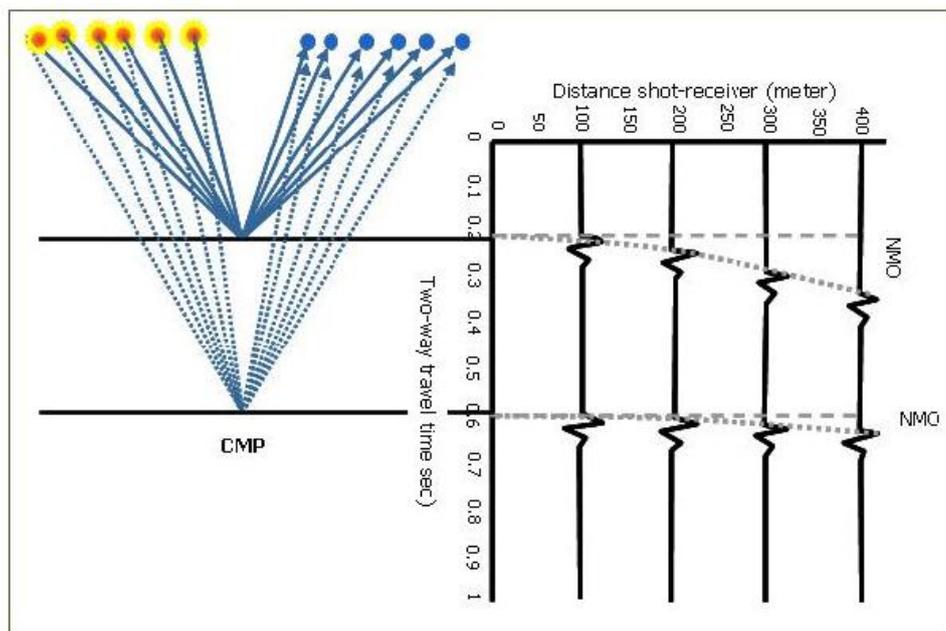


Figura 4.1.6-2: NMO, Normal moveout.  
 Fonte : EAGE, Learning Geoscience online.  
 Site: <http://www.learninggeoscience.net/>.

Em situações na qual os offsets são pequenos entre traços, quando comparados a profundidade do refletor, a expressão 1.0 pode ser escrita da seguinte forma:

$$t^2(x) = t_0^2 + \left( \frac{x}{V_{rms}} \right)^2 \quad (3.0)$$

Dessa forma conclui-se que assumindo um modelo horizontalmente estratificado, a velocidade média quadrática ( $V_{rms}$ ) será igual à velocidade NMO.

#### 4.1.7 Análise de Velocidade

Configura-se como uma das mais importantes etapas do processamento e a partir dela são obtidas as velocidades utilizadas para a seção empilhada e da seção migrada. É nessa etapa que se determinam as velocidades das camadas em sub-superfície.

Na análise de velocidade procura-se a velocidade que melhor possa horizontalizar cada uma das reflexões hiperbólicas, figura 4.1.6-2, de modo que ao empilharmos os traços com os refletores horizontalizados, estaremos otimizando o empilhamento, atingindo uma boa razão sinal-ruído.

Como mencionado anteriormente, em camadas que apresentam curtos offsets e são horizontais, as velocidades de empilhamento se assemelham as velocidades RMS, contudo para refletores inclinados, estas duas velocidades não são iguais, mas a velocidade de empilhamento é igual à velocidade que resulta na melhor horizontalização da reflexão.

Sabe-se que um CMP contém traços de uma reflexão em um mesmo ponto de sub-superfície, mas com diferentes trajetos. Estes diferentes trajetos realizados pelos traços causam diferentes tempos de trânsito. Utilizando ambas as informações, tempo e distância, é possível estimar a velocidade do meio. Apesar da distância percorrida não ser realmente conhecida e sim o offset, é possível com essas informações resolver o problema. (Yilmaz, 1987).

Essa etapa do processamento tem por objetivo a definição das funções velocidades que melhor compensem as diferenças de sobretempo normal (NMO) das reflexões. A análise de velocidade no processamento de uma seção sísmica não é realizada com apenas um CMP, e sim com alguns CMPs regularmente distribuídos no comprimento da seção dos quais são então interpoladas as velocidades para correção NMO e empilhar os CMPs restantes.

Em muitos softwares de processamento o espectro de velocidade é comumente usado de modo interativo, onde o resultado do empilhamento para intervalos de velocidades diferentes são visualizados, lado a lado, num plano de velocidade x tempo. O método mais usado para esse tipo de análise recebe o nome de *semblance*.

Considerando uma família CMP, temos que Amplitude de Empilhamento é definida como:

$$s_t = \sum_{i=1}^M w_{i,t} \quad (4.0)$$

onde  $M$  é o número de traços da CMP corrigidos do NMO; e  $w$  é o valor da amplitude no  $i$ -enésimo traço no tempo  $t$ .

Sabendo que o empilhamento promove a soma das amplitudes dos traços, e que o valor dessa amplitude é muito maior onde cada traço é similar (coerente) e menor onde não é similar (incoerentes), o *semblance* é utilizado para quantificar a coerência.

O *semblance* então, é utilizado para determinar parâmetros que irão otimizar o empilhamento, e é calculado pela combinação das mudanças no tempo em cada canal. Sua equação é:

$$semblance = \frac{1}{M} \frac{\sum_t s_t^2}{\sum_t \sum_i w_{i,t}^2} \quad (5.0)$$

na qual,  $0 \leq semblance \leq 1$

Desse modo, o *semblance* tenderá a ser alto quando um evento com boa coerência ocorrer e também será sensível quer os traços contribuam igualmente ou não.

Como consequência eventos “fortes” irão exibir *semblance* alto, e eventos “fracos” irão exibir valores moderados para o *semblance*. Informações incoerentes possuem um *semblance* muito alto.

Os valores que apresentarem as melhores coerências são escolhidos para realização do empilhamento.

#### 4.1.8 Convolução

É uma operação matemática na qual duas funções são combinadas para produzir uma terceira.

Sempre que existirem transformações lineares e invariantes de um determinado sinal, pode-se falar em convolução, ou seja, um sinal ao passar por um dispositivo qualquer, vai certamente sofrer uma transformação e é a essa transformação que recebe o nome de convolução. Esta característica justifica plenamente o interesse existente no

estudo dessa operação matemática, pois ela é essencial para se saber o sinal que está na origem ou, pelo contrário, transformar o sinal original naquele que se deseja obter no final.

Convencionalmente ela é expressa da seguinte forma:

$$x(t) = a(t) * b(t)$$

onde : \* representa a convolução

$a(t)$  e  $b(t)$  representam funções temporais distintas.

#### 4.1.9 Deconvolução

O processo de deconvolução apresenta-se como ferramenta de grande eficiência para se aumentar a resolução temporal ou vertical dos traços sísmicos. Ele desempenha ainda o papel de remoção de parte das reverberações e atenuação de reflexões múltiplas.

Basicamente a deconvolução tem por objetivo estimar um filtro inverso que quando convolvido com o pulso básico o converta em um impulso. Esse filtro deve ser capaz de fornecer a resposta impulsiva da Terra (função refletividade) quando aplicado ao traço sísmico.

A figura 4.1.9-1 representa o modelo unidimensional de representação de um traço sísmico. Observa-se que o traço sísmico é resultante da convolução da função refletividade com o pulso-fonte mais os ruídos.

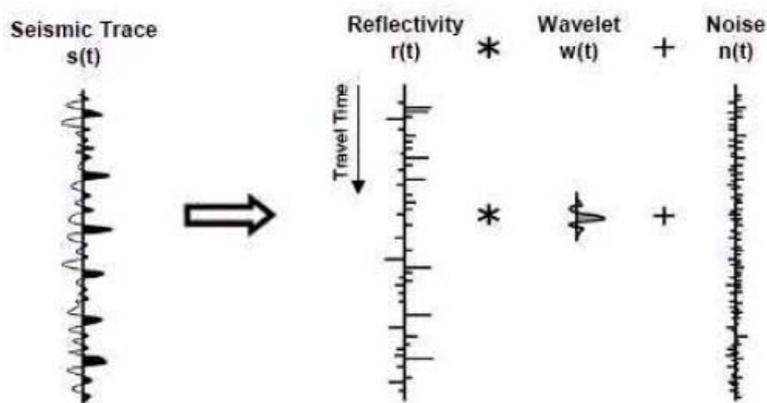


Figura 4.1.9-1: Deconvolução do traço sísmico. Fonte: Jesus, 2009.

Em outras palavras, a deconvolução é o processo que possibilita desfazer o efeito de uma convolução anterior. A operação de deconvolução envolve duas etapas: (1) determinação do filtro inverso do efeito convolutivo  $w(t)$  que se deseja eliminar e (2) aplicação desse filtro aos dados registrados.

Matematicamente o filtro inverso, por definição, é uma função  $f(t)$  tal que:

$$f(t) * w(t) = \text{delta.}$$

Assim, se os dados registrados forem representados como

$$s(t) = r(t) * w(t) + n(t),$$

onde:

$s(t)$  – Traço sísmico

$r(t)$  – Função refletividade da terra

$w(t)$  – pulso-fonte, *wavelet* que se quer eliminar

$n(t)$  – Ruído inerente

a mensagem  $r(t)$  pode ser recuperada por meio dessa operação:

$$r(t) = s(t) * f(t).$$

Fazendo

$$s(t) * f(t) = r(t) * w(t) * f(t) + f(t) * n(t)$$

desprezando-se  $n(t)$ , temos:

$$\begin{aligned} s(t) * f(t) &= r(t) * [w(t) * f(t)] \\ &= r(t) * \text{delta} \\ &= r(t) \end{aligned}$$

comprova-se que realmente a operação recupera a mensagem  $r(t)$ . (Duarte, 2003).

#### 4.1.10 Empilhamento (Stack)

O empilhamento sísmico consiste na soma de todos os traços das famílias CMP, após a correção de NMO, que gerará um traço resultante. Essa etapa é realizada após a correção de NMO para que os eventos estejam horizontalizados e possam ser somados de forma construtiva. A soma construtiva recebe o nome de *STACK* e a imagem obtida é chamada de seção empilhada.

Para que o traço empilhado não apresente uma amplitude desbalanceada, o valor da amplitude somada é dividido pelo número de traços.

Os primeiros eventos são somados em fase (construtivamente) e os outros eventos coerentes (ruídos) serão somados destrutivamente.

Através do empilhamento o ruído aleatório é atenuado em  $\sqrt{N}$ , onde  $N$  é o número de canais empilhados juntos (figura 3.1.10-1a, 3.1.10-1b e 3.1.10-1c).

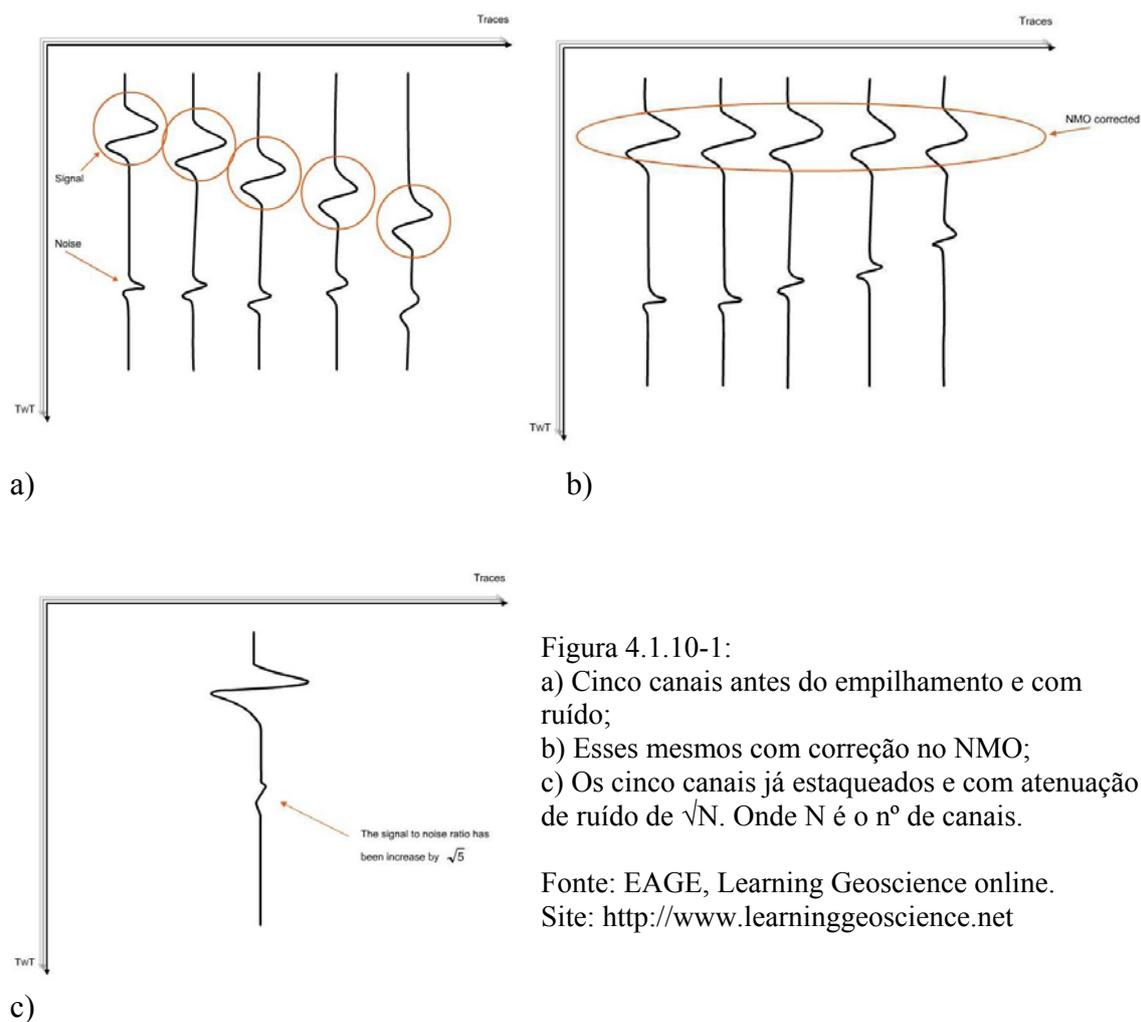


Figura 4.1.10-1:

- a) Cinco canais antes do empilhamento e com ruído;
- b) Esses mesmos com correção no NMO;
- c) Os cinco canais já estaqueados e com atenuação de ruído de  $\sqrt{N}$ . Onde  $N$  é o nº de canais.

Fonte: EAGE, Learning Geoscience online.  
 Site: <http://www.learninggeoscience.net>

Existem algumas situações clássicas que podem aparecer numa seção empilhada e que diferem do modelo real. Situações como desajuste ou posicionamento errôneo de mergulhos de refletores; a visualização de anticlinais muito largas e sinclinais muito estreitas em relação ao modelo real. Podem ocorrer ainda situações em que um pequeno objeto ou em forma de quina difrata energia e isto pode não ser imageado muito bem.

Essas situações podem ocorrer porque os pontos de reflexão não estão nos lugares corretos, e a ferramenta responsável pela correção no posicionamento desses refletores chama-se MIGRAÇÃO SÍSMICA.

#### 4.1.11 Migração Sísmica

Como mencionado anteriormente, a utilização da migração sísmica se faz necessária devido ao erro de posicionamento de refletores e mergulhos em sub-superfície gerados pelo empilhamento.

A migração sísmica é um processo que em geral tem por base a equação da onda, e possui o objetivo corrigir as distorções de registros de reflexões através do posicionamento dos eventos espacialmente e através do colapso da energia de difrações até seus pontos de espalhamento. (Gray e Whitmore, 2001 apud Torres, 2008).

As migrações aplicadas após o empilhamento recebem o nome de migração pós-empilhamento, contudo existem situações na qual as migrações são aplicadas antes do empilhamento e são chamadas de pré-empilhamento. E ambas podem ser realizadas em tempo ou em profundidade, sendo que nesse último caso busca-se a otimização da correção de mergulhos.

Energias difratadas também podem ser agrupadas ou empacotadas, e outros artefatos contidos numa seção empilhada, como curvaturas causadas por anticlinais, também podem ser removidas pela migração.

A figura 4.1.11-1 mostra uma representação de migração. Considere a posição correspondente ao ponto (0,c) como o ponto de aquisição. Acompanhando a frente de onda (“*wavefront*”), a posição correspondente ao ponto (a,b) é seu ponto de máxima convexidade.

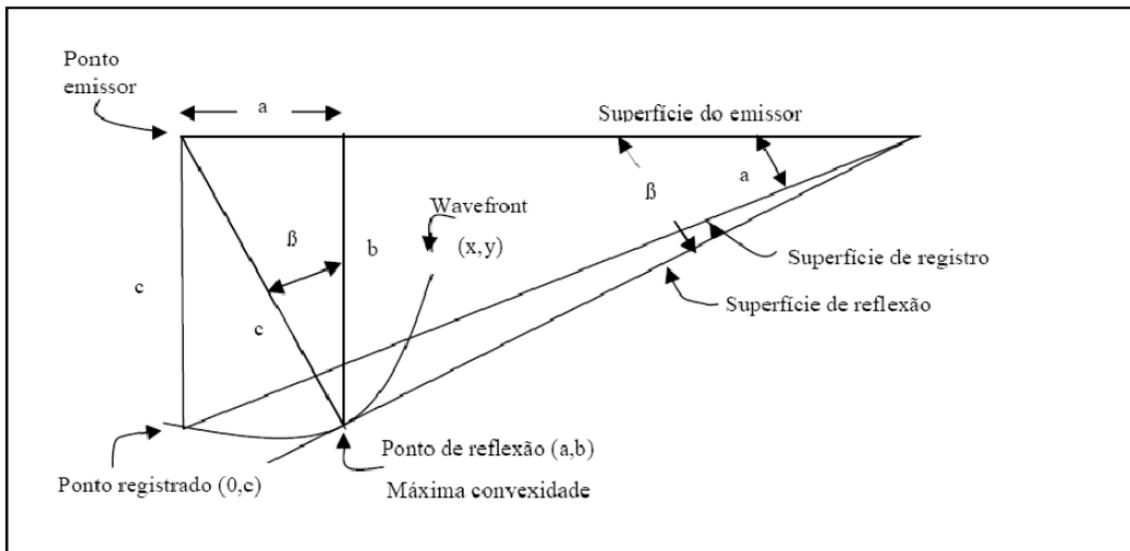


Figura 4.1.11-1: Esquema de migração. Fonte: Robinson e Treitel, 1980.

A migração então é o processo para a determinação, no caso da figura 4.1.11-1, do ponto (a,b). Conhecendo o valor do segmento c (distância entre (0, 0) e (0, c)) e o declive formado entre a superfície emissora e a superfície de registro ou aquisição ( $\text{tg}(\alpha)$ ) o problema passa a ser a determinação do ponto (a, b) e da variação de  $\text{tg} \beta$ .

No ponto (0, c) temos:

$$\text{tg}(\alpha) = dx/dy = - a/c$$

Como os valores de  $\text{tg}(\alpha)$  e c são conhecidos,

$$a = c - \text{tg}(\alpha)$$

$$c^2 = a^2 + b^2$$

$$b = c \sqrt{1 - \text{tg}(\alpha)}$$

$$\text{tg}(\beta) = dy/dx = - a/b$$

A qualidade final do dado migrado é totalmente dependente do campo de velocidades utilizado para descrever o meio no qual ocorreu a propagação.

Existem várias técnicas de migração, as mais convencionais encontradas em *softwares* de processamento são:

**Diferenças Finitas** - Continuação em profundidade. Método de migração dos dados de reflexão sísmica no qual, a cada interação, simula-se o campo de ondas que seria registrado se uma fina camada superficial do terreno fosse removida ou, o que vem a ser a mesma coisa, se o *datum* que contém a fonte e o receptor fosse deslocado para uma profundidade ligeiramente maior.

**Kirchhoff** - Usa o princípio de Huygens e soma de difrações. Designação dada aos métodos de migração dos dados de reflexão sísmica baseados na solução integral da equação da onda.

**FX** - Migração por diferenças finitas no domínio da frequência. Variação do método de diferenças finitas para a migração dos dados de reflexão sísmica realizado no domínio *Frequência – espaço*.

**Phase-Shift** – Essa migração se baseia no algoritmo da migração *f-K*. Segundo Gazdag (1978), o método de migração *phase-shift* só consegue lidar com variações verticais de velocidade. Um modo de acomodar variações laterais aceitas em migrações em tempo, seria aplicar um *stretch* (“estiramento”) na direção do tempo, na seção CMP empilhada para que esse correspondesse ao campo de velocidades  $v(z)$ , que só varia verticalmente. Esse campo de velocidade poderia ser obtido tirando a média da velocidade original associado com a seção não esticada (*unstretched*) CMP empilhada na direção  $x$ . Feita a migração *phase-shift*, o dado volta a ser “não-estirado” (*unstretched*).

**Phase-Shift-Plus-Interpolation**- Esse método surge como uma solução para a migração de dados que envolvam variação lateral de velocidade. Basicamente o campo de velocidade é extrapolado pelo método *phase-shift*, utilizando um número múltiplo das funções de velocidade constantes laterais e uma série de campos de onda de referência é criada. A partir disso o campo de onda é computado por interpolação através do campo de onda de referência.

Seguindo essa premissa de utilização do fluxo básico de processamento, desenvolveu-se um novo fluxo com etapas que foram reordenadas, ou até refeitas (figura 5.2.1-2), seguindo parâmetros que se acredita atender as necessidades de imageamento e qualidade do produto final.

## 5. METODOLOGIA

As atividades desenvolvidas e aqui descritas contaram com o desenvolvimento de dados sintéticos, criação de fluxos de processamento e processamento dos dados.

### 5.1. Desenvolvimento de dados sintéticos

A utilização de dados sintéticos fez-se necessária devido ao controle que se obtém sobre o resultado, uma vez que se conhece o valor das variáveis que se quer obter.

Para o desenvolvimento dos dados sintéticos, foi utilizado um modelo geológico desenvolvido pela SEG em parceria com a EAGE. Esse modelo simula uma estrutura geológica de sal com forte contraste de velocidade com o meio no qual está inserido, com vários refletores e falhas, tanto acima como abaixo do corpo de sal, (figura 5.1-1).

Tal modelo foi baseado numa estrutura existente no Golfo do México.

Esses dados foram desenvolvidos utilizando-se o SU (SEISMIC UNIX) pelo aluno Bruno Lonn da Engenharia Elétrica da PUC-Rio e que foram gentilmente cedidos ao desenvolvimento desse trabalho.

Os dados sintéticos foram gerados em SEG-Y.

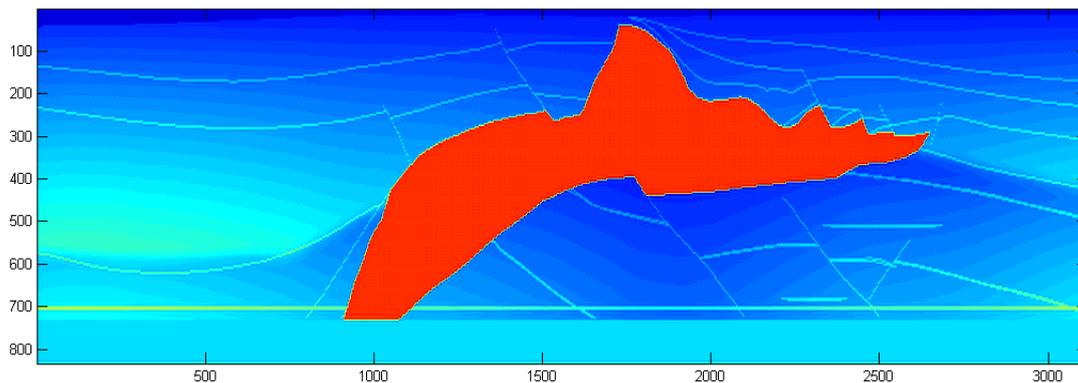


Figura 5.1-1: Modelo sintético que simula uma estrutura geológica de sal, com forte contraste de velocidade com o meio no qual está inserido. Fonte: SEG-EAGE.

## 5.2. Desenvolvimento dos fluxos de processamento

Os fluxos de processamento foram gerados através do software SPW. Esses fluxos seguiram um fluxograma de processamento básico (figura 3.1), presente em muitas literaturas, como *SEISMIC DATA PROCESSING* (YILMAZ, 1987), *APPLIED SEISMOLOGY* (Gadallah & Fisher, 2005), etc.

### 5.2.1 Fluxos de processamento

Para a realização do processamento dos dados sintéticos o software utilizado foi o SPW (*Seismic Processing Workshop*).

O SPW não diferente de muitos outros softwares de processamento utiliza para o processamento fluxos ou sequências. Esses fluxos são montados em janelas e são formados por pequenos ícones, (figura 5.2.1-1). Os ícones estão presentes dentro de outra janela chamada PROCESSING LIST, eles são adicionados ao fluxo com o arrastar do mouse e seus parâmetros podem ser ajustados com um duplo clique do botão esquerdo do mouse sobre o ícone.

Uma das praticidades encontrada no SPW é sua interface, que não necessita da utilização do terminal ou janelas de comando no modo DOS.

O *software* foi todo executado utilizando o sistema operacional Windows Vista.

Visando um controle dos resultados obtidos em cada passo do processamento, o desenvolvimento do processamento ocorre não somente em um único fluxo, mas sim

numa série de pequenos fluxos. Dessa maneira cada pequeno fluxo exerce um papel específico e caso o resultado obtido não seja satisfatório, os parâmetros que possam melhorar o resultado podem ser mais facilmente encontrados e alterados.

Essa abordagem se mostrou eficiente no desenvolvimento do trabalho sendo já utilizada por muitas empresas de processamento de dados sísmicos.

Desse modo para o processamento, do início ao fim, utilizam-se vários pequenos fluxos, esses fluxos constituirão um grupo.

Para a realização do trabalho foi confeccionado um fluxo (figura 5.2.1-2), baseado num fluxo básico presente em muitas literaturas, com o objetivo de se observar as características de imageamento dos sismogramas gerados. O fluxograma criado apresenta etapas que foram adicionadas, reordenadas e ou até refeitas, sempre buscando o melhor resultado possível. Dessa forma se considerarmos cada uma das etapas que se deslocam de acordo com a necessidade como pertencente a um fluxo, estaremos então trabalhando com vários fluxos diferentes.

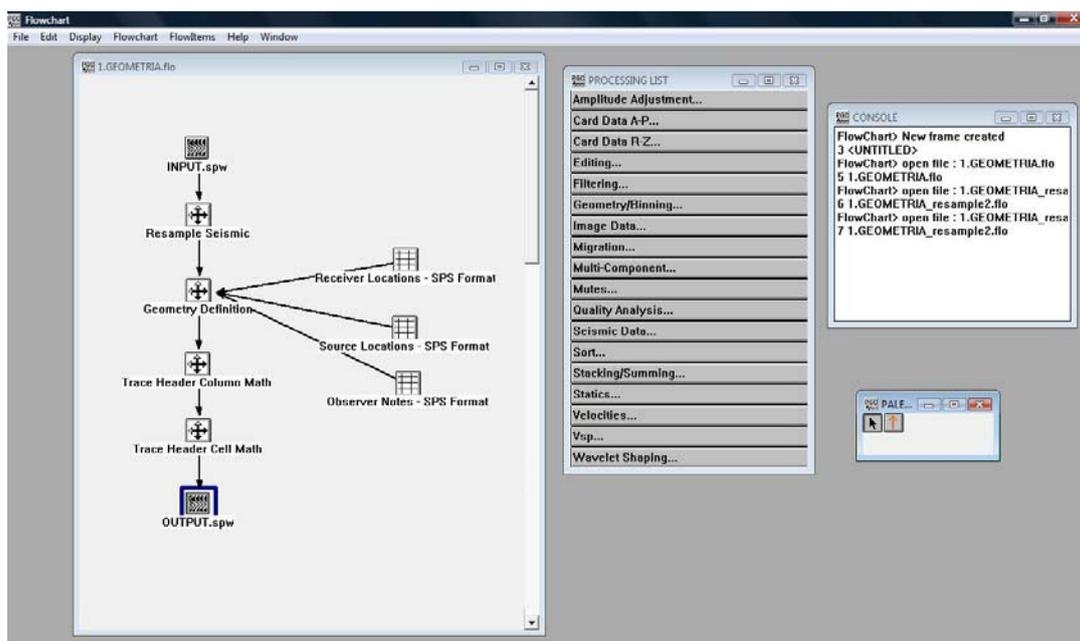


Figura 5.2.1-1: Fluxo padrão de Geometria. Os ícones são obtidos através da janela PROCESSING LIST e são adicionados arrastando-se com o mouse. Visualização da janela de fluxos do SPW.

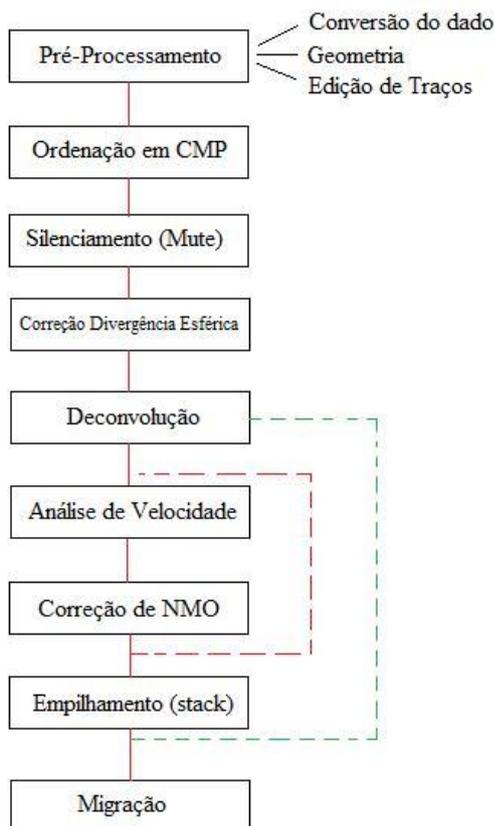


Figura 5.2.1-2: Fluxo de Processamento utilizado nesse trabalho. A etapa de Deconvolução foi utilizada em posição diferente, e a etapa de Análise de Velocidade foi feita mais de uma vez, buscando-se o melhor resultado.

Na figura 5.2.1-2 observa-se que duas etapas do processamento apresentam além de suas posições originais, linhas pontilhadas. Essas linhas pontilhadas têm significados diferentes. Na primeira (verde) ligada à deconvolução, indica que essa etapa também foi realizada após o empilhamento. Já a segunda (linha vermelha) ligada à análise de velocidade, indica que essa etapa foi refeita.

## 6. PROCESSAMENTO DO DADO SINTÉTICO

Nesse capítulo serão descritas todas as etapas do processamento à que foi submetido o dado sintético, desde o pré-processamento com a conversão dos dados até a migração. É importante esclarecer que em todas as figuras mencionadas durante esse capítulo, com exceção do dado inicial, do exemplo de silenciamento e da análise de velocidade, os dados encontram-se empilhados.

## 6.1 Descrição do Dado

O dado utilizado é um dado sintético 2D baseado numa estrutura real do Golfo do México, que simula uma aquisição que se inicia como *end-on*, passa para *split-spread* e termina como *end-on* e possui 15,6 km de extensão. O dado possui um corpo de sal relativamente grande entre 0,2 e 3,0 segundos nas seções em tempo. A geologia abaixo desse corpo de sal é muito difícil de ser imageada, isso devido ao alto valor de impedância acústica desse meio, que dificulta a passagem da energia gerada pela fonte. Ainda assim é possível obter alguma informação abaixo das bordas do sal, pois energias emitidas por fontes próximas chegam até essa região.

O modelo de velocidades gerado para esse dado pode ser visto na figura 6.1-1, a barra lateral apresenta as velocidades em m/s.

Nitidamente observa-se o alto valor da velocidade no corpo de sal, aproximadamente 4500 m/s.

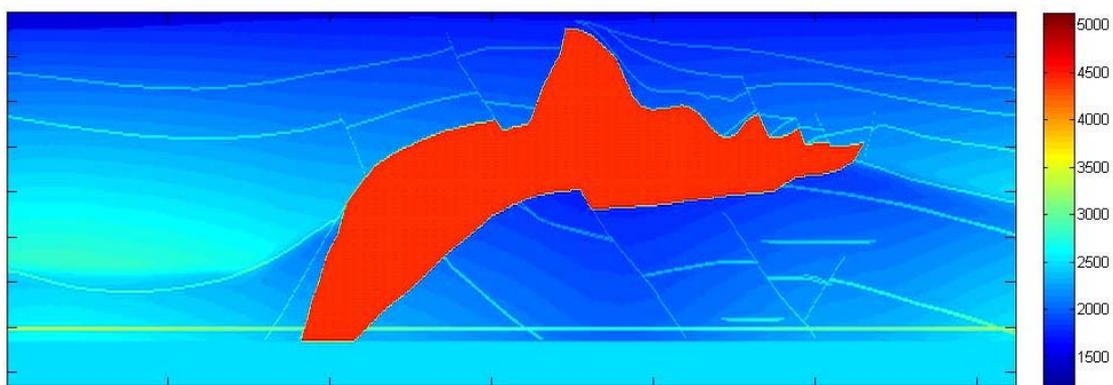


Figura 6.1-1: Modelo de velocidades utilizado para gerar o sismograma sintético. As velocidades presentes na barra lateral encontram-se em m/s.

Número de Tiros	780
Número de Receptores	780
Intervalo de amostras	2ms
Intervalo de Tiro	20 metros
Intervalo de Receptor	20 metros
Intervalo de CMP	10 metros
Cobertura	390
Amostras por traço	2498

Tabela 1: Tabela com os parâmetros de aquisição dado.

### 6.1.1 Modelagem Sísmica

A modelagem sísmica desse dado foi realizada utilizando a propagação da onda acústica 2D com a técnica de diferenças finitas. Esta implementação levou em consideração todos os efeitos da reflexão da onda, incluindo múltiplas e difrações.

O programa utilizado foi o SUFDMOD2 do pacote SEISMIC UNIX.

O modelo apresenta 15585 m de comprimento e 4165 m de profundidade.

Para que a modelagem por diferenças finitas pudesse satisfazer as condições de estabilidade numérica, o modelo precisou ser gerado com intervalos entre estacas de 5 m, muito embora o intervalo usado na aquisição seja de 20 m.

Ainda para satisfazer as condições de estabilidade, o intervalo de simulação foi aproximadamente 10 vezes menor que o intervalo de amostragem sísmica.

O sismograma gerado então apresenta intervalo de aquisição de 5 m e intervalo de amostragem de 0,2 ms.

Após isso, o dado foi submetido aos parâmetros de aquisição presentes na tabela 1.

### 6.2 Conversão dos Dados

Antes de dar início ao processamento utilizando os fluxos que foram criados, é preciso converter os dados que vem do campo ou mesmo os dados sintéticos. A conversão se faz necessária, pois geralmente os dados que vem do campo chegam com a extensão SEG Y, D, C, etc., contudo o software SPW não permite que os dados sejam processados com essa formatação, sendo obrigatória a conversão para a extensão *.spw*, que recebe o mesmo nome do software.

Para a realização dessa conversão o software possui uma ferramenta, fora da janela de fluxos, que é designada entre outras coisas para essa função. Essa ferramenta é chamada I/O.

O dado sintético bruto encontrava-se no formato SEG Y, por isso foi convertido para o formato SPW para que pudesse ser utilizado. Durante o processo de conversão é preciso escolher um nome ao arquivo de saída e o nome escolhido para esse dado sintético foi *SALT.spw*.

Feita a conversão dos dados para o formato SPW o dado é inserido no primeiro fluxo, o fluxo de Geometria.

### 6.3. Geometria

Como mencionado anteriormente, a etapa de geometria é responsável por introduzir os valores de posicionamento e elevação das fontes e receptores aos cabeçalhos dos traços sísmicos.

Nesse fluxo, os valores de posicionamento são introduzidos através de *cards* e que recebem o nome de *cards* SPS, e dividem-se em SPS R, SPS S e SPS X. Os *cards* nada mais são do que tabelas.

Devido a natureza do dado *SALT.spw*, esses *cards* de posicionamento da fonte, receptor e do observador também tiveram que ser criados.

#### 6.3.1- Preenchimento dos arquivos SPS

Os arquivos SPS R apresentam os valores das coordenadas UTM dos receptores, que são organizados em colunas, *Easting* e *Northing*. E apresentam valores de elevação que são organizados na coluna *Elevation*.(tabela 2a).

Os arquivos SPS S apresentam os valores das coordenadas UTM da fonte e de elevação, também organizados em colunas como no SPS R e, além disso, apresentam os valores de profundidade de detonação da carga, organizado na coluna *Depth*, (tabela 2b).

Os arquivos SPS X apresentam os valores que correlacionam os arquivos anteriores dentro do *spread* do levantamento. Ou seja, ele indica a quantidade de canais ativos e a posição deles em relação à fonte a ser detonada. (tabela 2c).

O número de registro crescente e seqüencial de todo levantamento, é organizado na coluna *Field File*:

- A linha de tiro, organizado na coluna Src. Line;
- A localização do tiro, organizado na coluna Src. Loc;
- A quantidade de canais ativos no spread, organizado nas colunas First Channel e Last Channel, organiza-se ainda o incremento de canais no Channel Incr;
- A linha da fonte, organizado na coluna Recv. Line;

- O número da estação do primeiro receptor ativo e do último, organizados no First Recv. E no Last Recv, organiza-se ainda o incremento de receptores no Recv. Incr.

A figura 6.3.1-1 mostra os geofones já espalhados numa determinada geometria e uma fonte (dinamite) emitindo um sinal.

	Recv. Line	Recv. Loc	Easting	Northing	Elevation
1	1	1001	0.000000	0.000000	0.000000
2	1	1003	20.000000	0.000000	0.000000
3	1	1004	40.000000	0.000000	0.000000
4	1	1005	60.000000	0.000000	0.000000
5	1	1006	80.000000	0.000000	0.000000
6	1	1007	100.000000	0.000000	0.000000

Tabela 2a: SPS R.

	Source Line	Source Loc	Easting	Northing	Elevation
1	1	1002	0.000000	0.000000	0.000000
2	1	1004	20.000000	0.000000	0.000000
3	1	1006	40.000000	0.000000	0.000000
4	1	1008	60.000000	0.000000	0.000000
5	1	1010	80.000000	0.000000	0.000000
6	1	1012	100.000000	0.000000	0.000000

Tabela 2b: SPS S.

	Field File	Src. Line	Src. Loc	First Channel	Last Channel	Channel Incr.	Recv. Line	First Recv.	Last Recv.
1	1	1	1002	1	780	1	1	1001	1789
2	2	1	1004	1	780	1	1	1001	1789
3	3	1	1006	1	780	1	1	1001	1789
4	4	1	1008	1	780	1	1	1001	1789
5	5	1	1010	1	780	1	1	1001	1789
6	6	1	1012	1	780	1	1	1001	1789

Tabela 2c: SPS X.

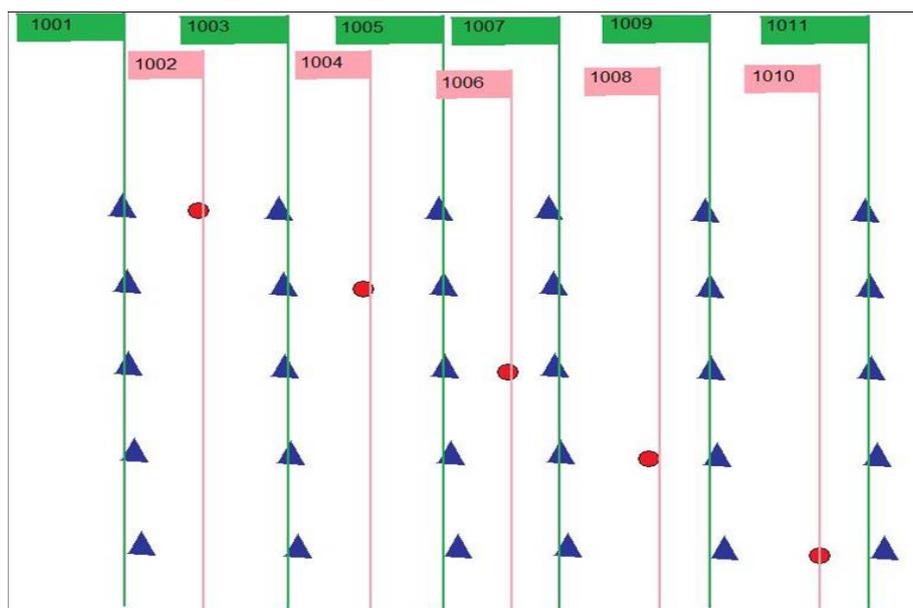


Figura 6.3.1-1: Disposição de fontes e receptores e suas marcações por bandeiras.

Obtido o arquivo desse fluxo, foi preciso conferir sua geometria e verificar se existe algum problema de visualização desse dado. Para tal tarefa utilizou-se outro recurso do SPW, a ferramenta de visualização de dados sísmicos *SeisViewer*. Através dessa ferramenta é possível visualizar o dado como também editar traços, fazer *picks*, aplicar *mutes*, conferir a geometria, etc.

O arquivo agora com geometria passou a se chamar *SALT\_GEOM.spw*, (figura 6.3.1-2).

Conferida a geometria passa-se para a etapa do *CMP Sort*.

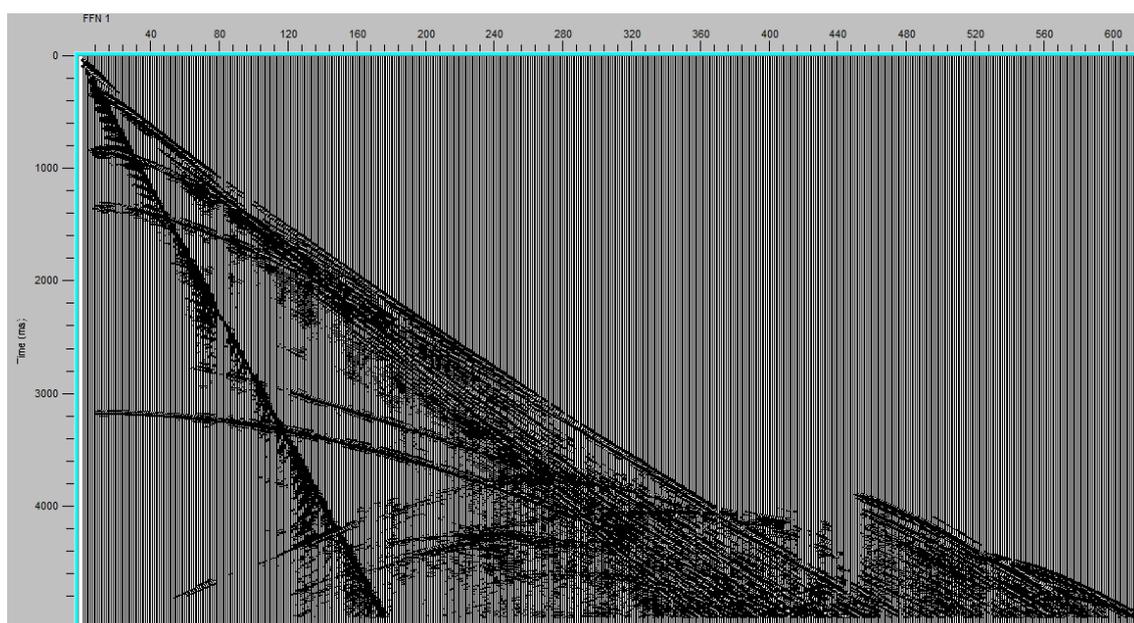


Figura 6.3.1-2: *SALT\_GEOM.spw* - Dado já com geometria. A Ferramenta do SPW utilizada para essa visualização é o *SeisViewer*.

#### 6.4. CMP *Sort* (Ordenação em famílias CMP)

A aquisição de dados sísmicos feita com multi-cobertura é feita em coordenadas fonte-receptor. O processamento desses dados sísmicos, porém são feitos em coordenadas ponto médio-receptor. A transformação de coordenadas necessária ao processamento é obtida ordenando-se os dados no domínio de CMP, (Yilmaz, 1987).

Para que fosse possível passar para as próximas etapas do processamento como, análise de velocidade, empilhamento (*stack*) e migração, foi necessário passar o dado que se encontrava no domínio da fonte, para o domínio CMP (Ponto Médio Comum). Como se sabe nesse domínio os refletores são registrados redundantemente, otimizando assim as informações no sismograma.

O arquivo agora recebe o nome de *SALT\_GEOM\_CMP.spw*

#### 6.5. Silenciamento (Mute)

Como mencionado anteriormente, o Mute é utilizado para remover as informações indesejadas do sismograma, seja na forma de eliminação de um traço por completo, ou na remoção de apenas parte dele.

Essa etapa é muito lenta e trabalhosa, com o dado já no domínio CMP utiliza-se a ferramenta *SeisViewer* para marcar as partes do traço que se deseja remover. Nesse arquivo já no domínio CMP o silenciamento foi aplicado apenas para a remoção da onda direta. O processo é lento pois a marcação dos pontos (picks) do mute é realizada painel por painel e foram cerca 1550 painéis.

Após essa etapa de marcação do arquivo de picks do mute, foi preciso aplicar esse silenciamento ao dado, para isso construiu-se um fluxo e gerou-se o arquivo *SALT\_GEOM\_CMP\_MUTE.spw*

A figura 6.5-1 mostra o dado antes e depois do silenciamento. É possível observar que o *SeisViewer* gera suas escalas por traço e não por sismograma. Isso pode

ser comprovado observando que as ondas diretas da imagem da esquerda possuem uma amplitude tão alta que acabam suprimindo as amplitudes mais baixas de alguns traços, deixando esses buracos. Ao se aplicar o silenciamento, remove-se as ondas diretas e as informações antes atenuadas, passam a ser visíveis no sismograma da direita.

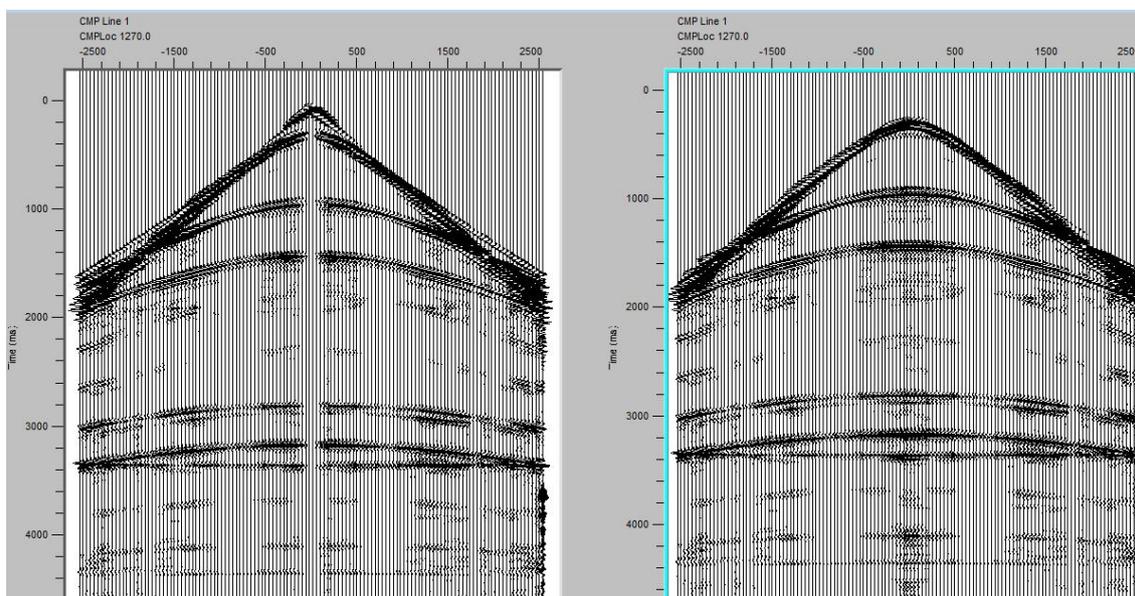


Figura 6.5-1: Silenciamento (Mute). A imagem da esquerda mostra o sismograma antes do silenciamento e a da direita mostra o sismograma depois de aplicado o silenciamento. Observa-se a remoção da onda direta.

## 6.6 Deconvolução e Divergência Esférica

O fluxo de deconvolução tem por objetivo diminuir as reflexões das *wavelets* e atenuar fantasmas, efeitos de instrumentos, reverberações e reflexões múltiplas. Com isso espera-se aumentar a resolução vertical e recuperar o máximo possível do impulso resposta da terra ou refletividade, (Gadallah & Fisher, 2005).

Nesse mesmo fluxo realizou-se uma correção de divergência esférica. Essa correção é feita para atenuar a amplitude do sinal que está relacionada à expansão da frente de onda.

As figuras 6.8-1(a e b) mostram o sismograma já com NMO corrigido e empilhado sem deconvolução e sem correção de divergência esférica, e as figuras 6.8-2(a e b) mostram o sismograma empilhado com deconvolução e correção de divergência esférica.

Comparando-se as figuras 6.8-1 e 6.8-2, observa-se que a deconvolução e a divergência esférica realçam de modo geral todos os refletores do sismograma. Por um lado esse fato é positivo pois facilita a visualização de refletores pouco perceptíveis, por outro lado efeitos negativos como múltiplas também são realçados, prejudicando a interpretação do sismograma.

Comparando-se as figuras 6.8-2a e 6.8-2b, pouca diferença observa-se causada pelo uso de *velans* (análise de velocidade, explicado a diante) diferentes.

Nesse trabalho o processo deconvolucional também foi realizado depois do empilhamento, entretanto como pode ser visto na figura 6.8-2c, o resultado não é muito bom. Isso porque, para esse dado a deconvolução após o empilhamento deixou os refletores mais atenuados, pouco visíveis.

Como mencionado na seção 3.1.2, ocorre uma atenuação natural das amplitudes das ondas acústicas, com o aumento da profundidade de propagação. Por esse motivo, para melhorar a visualização, fez-se necessário a aplicação de uma correção de amplitude nos traços ao longo do tempo. O método utilizado é chamado de Controle Automático de Ganho (AGC) e consiste, resumidamente, em aplicar um tipo de média móvel quadrática em torno do ponto que se deseja corrigir (Yilmaz, 1987).

Em função disso, aplicou-se à figura 6.8-2c um AGC dentro do *SeisViewer*, com uma janela de 1000ms, gerando a figura 6.8-2d.

Observa-se agora que os eventos indesejados também são realçados deixando o sismograma com refletores confusos, se assemelhando a ruídos aleatórios, difíceis de serem interpretados. Para essa prática de deconvolução após o *stack*, apenas uma análise de velocidade foi utilizada, o *velan1*.

## 6.7 Análise de Velocidade

Essa etapa juntamente com a etapa de silenciamento, são as etapas mais trabalhosas enfrentadas nesse processamento.

A análise de velocidade é a etapa na qual os valores de velocidade que corrigem os *Normal Moveout* são escolhidos. Para esse processo inicialmente utiliza-se o *SeisViewer* com duas janelas, uma com o sismograma no domínio CMP e outra com um gride do mesmo sismograma no domínio CMP, mas agora visto num plano velocidade x tempo (*semblance*), para se comparar a correção do NMO coloca-se ainda outra janela

com o sismograma original como pode ser observado nas figuras 6.7-1c, 6.7-1b e 6.7-1a, respectivamente.

À medida que são escolhidas as velocidades na janela do *semblance*, os NMOs da janela ao lado são corrigidos simultaneamente. O processo se torna exaustivo pois esses *picks* (pontos) de velocidade também são realizados de painel em painel, um por um.

Cada um desses pontos marcados representa um valor de velocidade RMS, que o software acumula na forma de tabela.

Como mencionado no capítulo 4, o *semblance* é um espectro que apresenta o sismograma no plano velocidade x tempo. Esse plano é visualizado como uma janela cromática, cuja coloração varia de acordo com a coerência das amplitudes.

Eventos com forte coerência aparecem nesse software como fortes manchas na cor roxa ou lilás. Essas manchas recebem o nome de “*bull eyes*”, olhos de touro, pois as vezes se encontram na forma arredondada.

Esses “*bull eyes*” servem de guia para a marcação dos pontos na velocidade RMS, já que nesses pontos os eventos estão mais coerentes.

Um problema que ocorre com as múltiplas, é que essas também aparecem como “*bull eyes*” em velocidades mais baixas do que as reflexões primárias, e por isso podem representar certa confusão na marcação das velocidades.

Duas análises de velocidade foram realizadas, a primeira seguindo os principais “*bull eyes*”, e a segunda análise de velocidade seguindo quase todos os “*bull eyes*” presentes na secção.

Para facilitar o entendimento chamaremos a primeira de *velan1* e a segunda de *velan2*.

Para possibilitar a observação do efeito causado apenas pelos *velans* (*velocity analysis*, análise de velocidades em inglês), cada *stack* nesse trabalho foi realizado duas vezes, uma com cada *velan*.

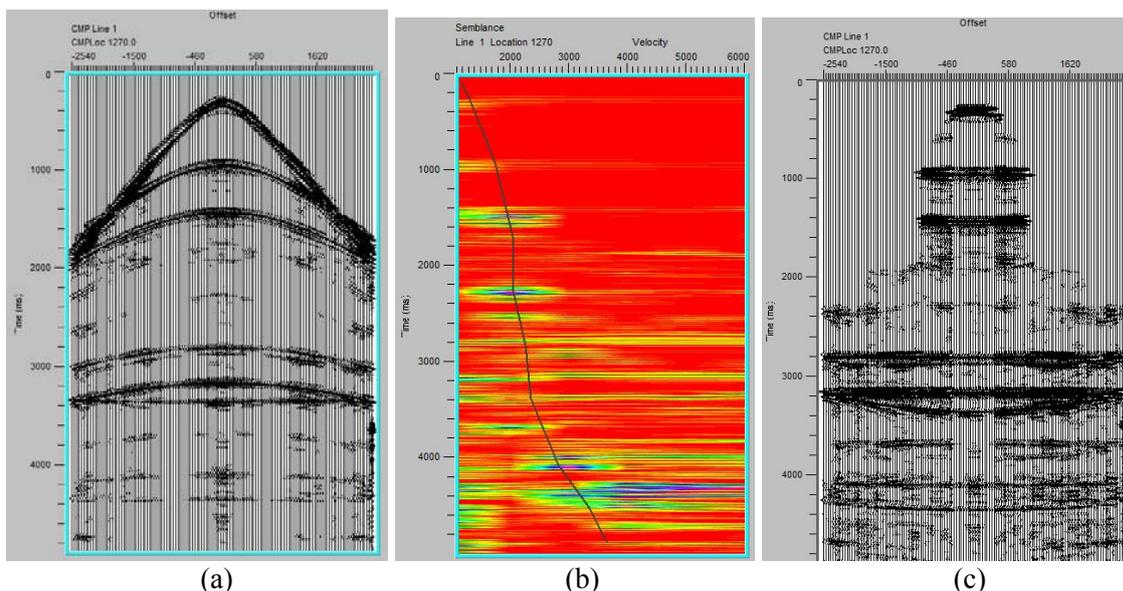


Figura 6.7-1: Análise de velocidade.

- Dado em função do offset sem correção NMO;
- Semblance* do dado em função da velocidade com picks marcados;
- Dado em função do offset com o NMO corrigido.

## 6.8 Correção de NMO e Empilhamento ou *Stack*

Nesse item optou-se por desenvolver um fluxo que englobasse tanto a correção de *Normal MoveOut* quanto o empilhamento. Nessa etapa é preciso utilizar o arquivo gerado durante a análise de velocidade, os valores de velocidade *RMS* obtidos anteriormente.

Para isso construiu-se um fluxo que aplica ao dado as velocidades escolhidas e ainda gera o empilhamento do dado corrigido.

Essa prática de unir os processos no mesmo fluxo não é obrigatória, apenas poupa tempo de construir um fluxo só para o empilhamento.

Como foi mencionado anteriormente, duas análises de velocidades foram feitas, por isso cada empilhamento desse trabalho foi realizado duas vezes.

Com o objetivo de explicitar os efeitos causados pelas etapas do processamento no dado processado, muitos empilhamentos foram realizados. O primeiro desenvolvido foi o empilhamento com o dado sintético apenas com efeito de silenciamento, praticamente puro, sem deconvolução ou qualquer outro processo (Figura 6.8-1a e 6.8-1b). É possível notar que pouco se mudou em relação ao *stack* com a utilização do *velan1* ou do *velan2*. Percebe-se que alguns refletores em 2,8 s e abaixo de 4,0 s foram realçados na figura 6.8-1b com o uso do *velan 2*.

Como primeiro resultado é importante observar a ausência de informação abaixo do corpo de sal.

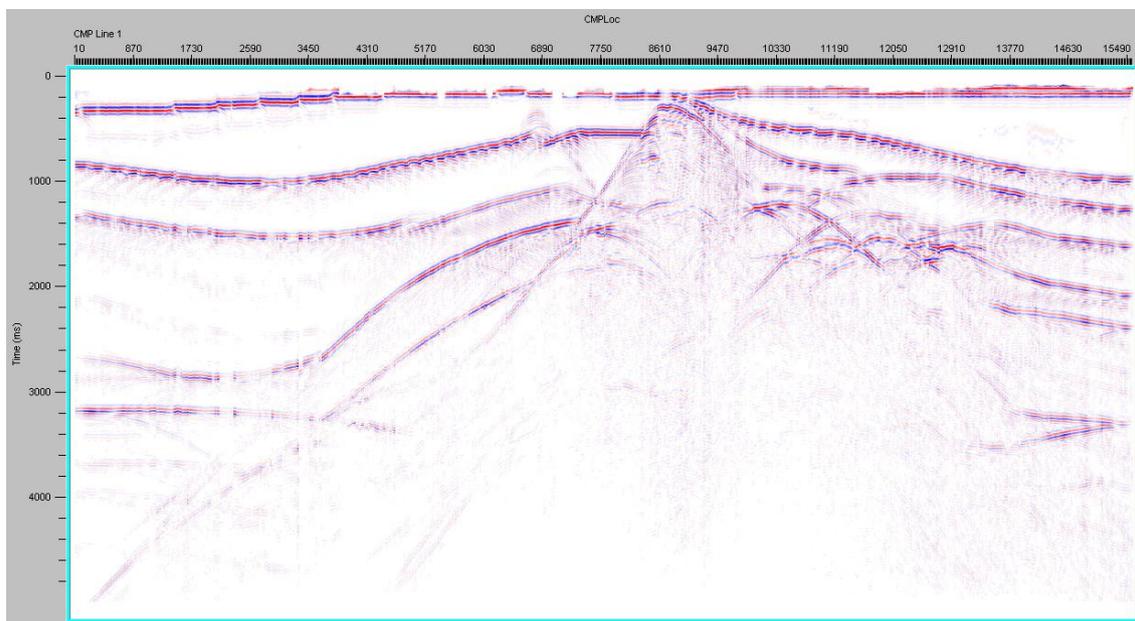


Figura 6.8-1a: Empilhamento apenas com silenciamento. Esse *stack* foi desenvolvido com o *velan1*.

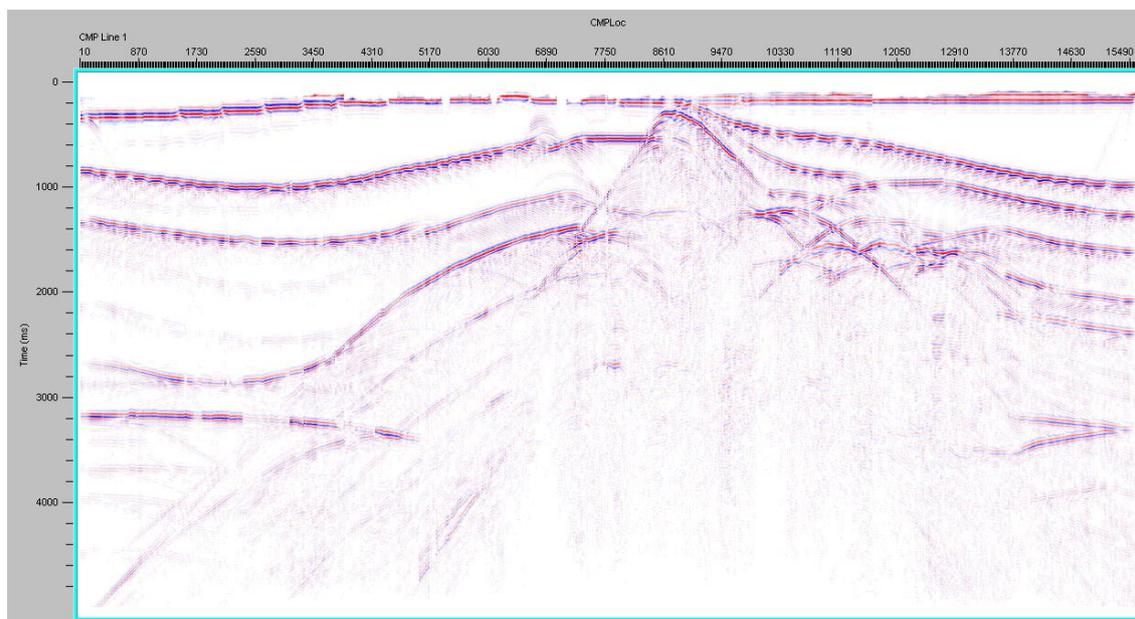


Figura 6.8-1b: Empilhamento apenas com silenciamento. Esse *stack* foi desenvolvido com o *velan2*.

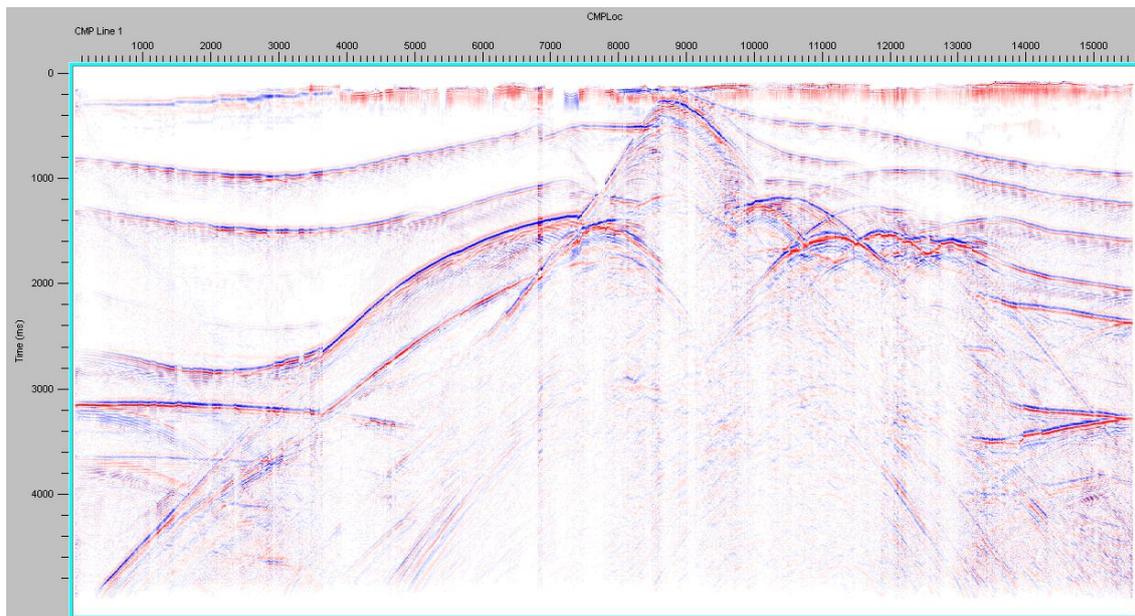


Figura 6.8-2a: Seção empilhada depois da deconvolução e correção de divergência esférica. *Stack* gerado com *velan1*.

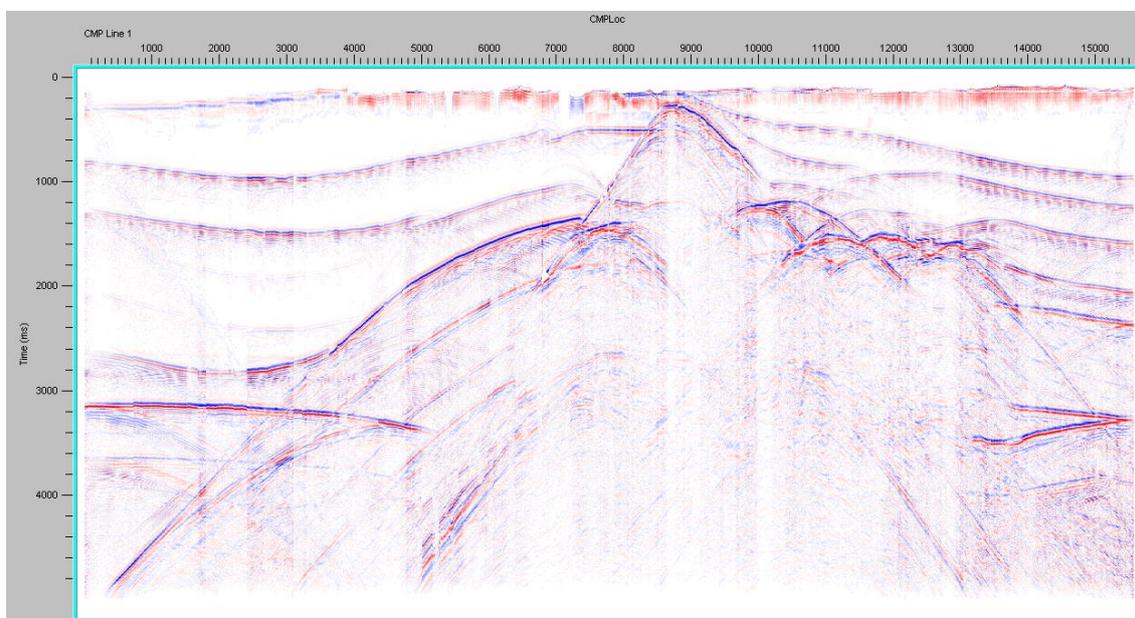


Figura 6.8-2b: Seção empilhada depois da deconvolução e correção de divergência esférica. *Stack* gerado com *velan2*.

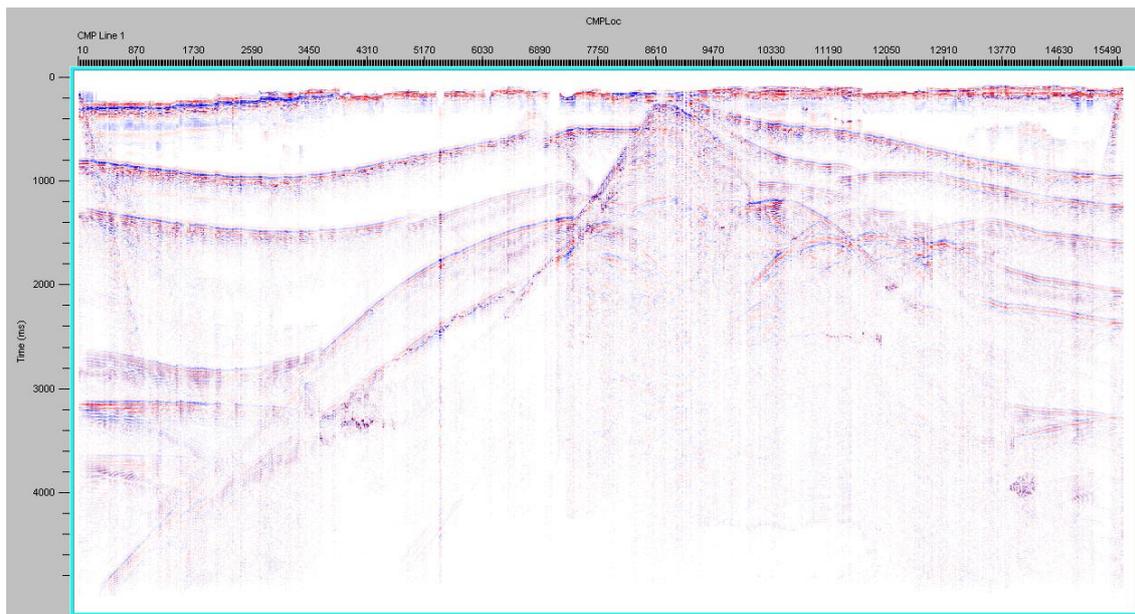


Figura 6.8-2c: Deconvolução realizada depois da correção de NMO e empilhamento.

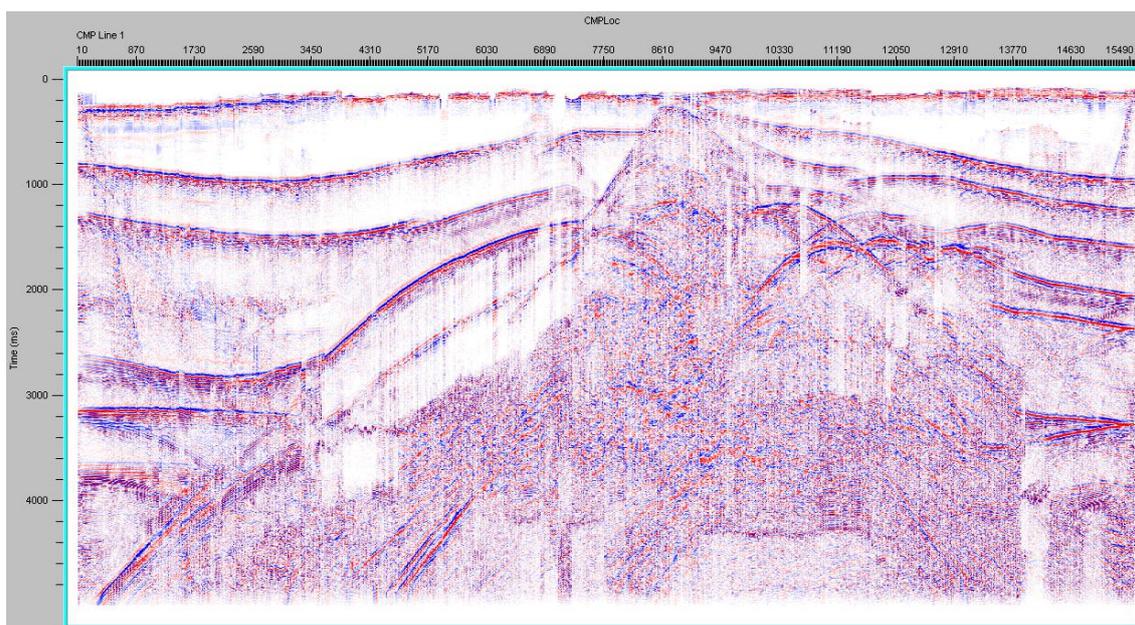


Figura 6.8-2d: Deconvolução realizada depois da correção de NMO e empilhamento, contudo visualizada com um ganho de 1000ms.

## 6.9 Espectro de Frequência e Filtragem de Frequência

Podemos ver na figura 6.9-1 o espectro de frequência do dado (figura 6.8-1a e 6.8-1b) antes da deconvolução ou correção de divergência esférica. O dado apresenta uma predominância na faixa que vai de 5 a 65 Hz. Aplicando-se a deconvolução e a

correção de divergência esférica a frequência do dado (6.8-2a e 6.8-2b) ficou predominante na faixa que vai de 0 a 120 Hz (figura 6.9-2).

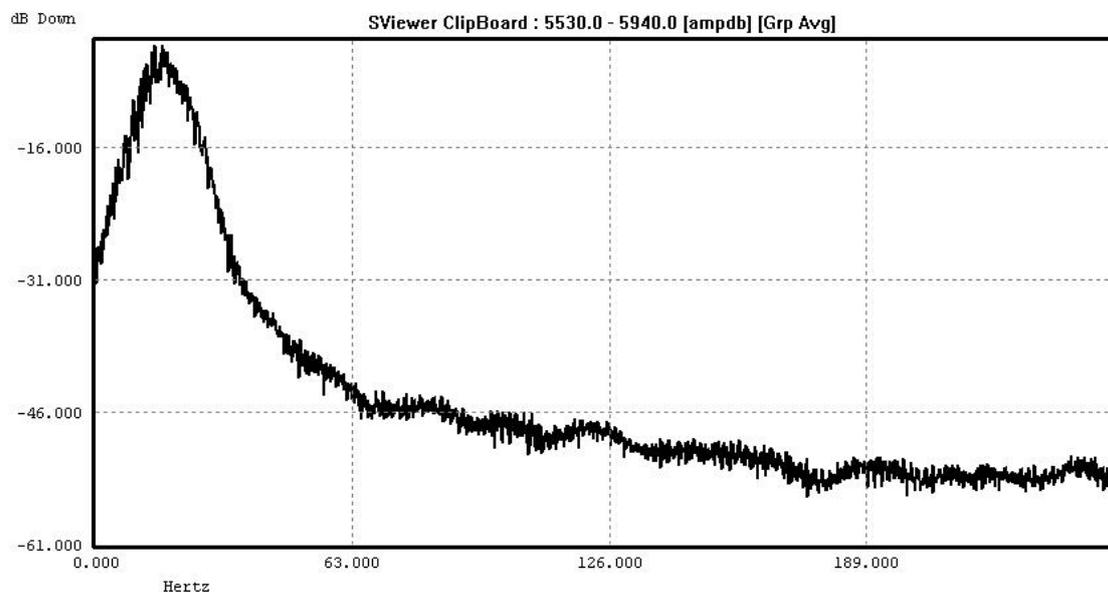


Figura 6.9-1: Espectro de Frequência do dado antes da deconvolução e correção de divergência esférica.

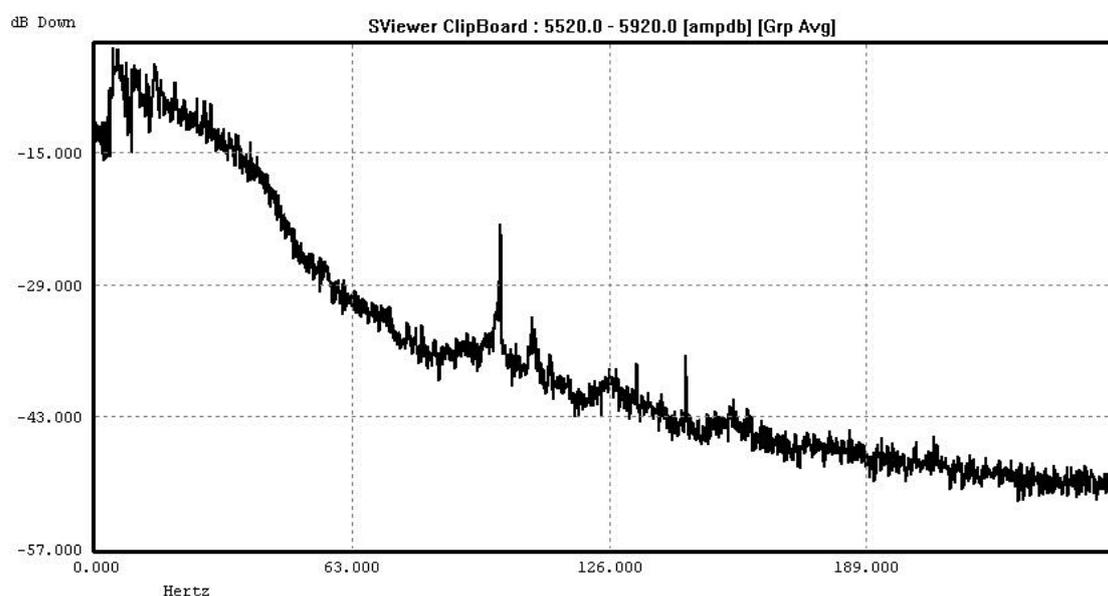


Figura 6.9-2: Espectro de frequência do dado depois da deconvolução e correção de divergência esférica.

Observando a figura 6.8-2(a e b), vemos que muitas múltiplas foram realçadas. Para atenuar essas múltiplas e outros ruídos indesejados, aplicou-se um filtro passa banda na faixa original do dado de entrada.

O produto dessa filtragem pode ser visto na figura 6.9-3(a e b).

O espectro de frequência desse dado filtrado pode ser visto na figura 6.9-4, a frequência se mantém na faixa de 05 a 65 Hz.

O dado mostra que o filtro ajudou bastante na remoção de algumas múltiplas.

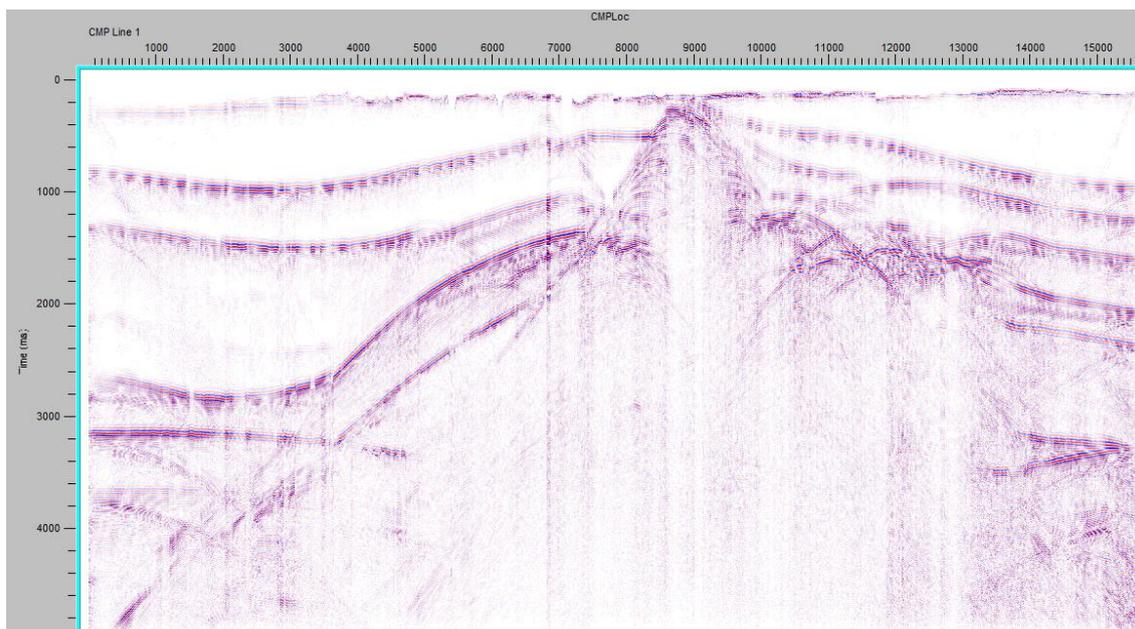


Figura 6.9-3a: Empilhamento do dado deconvolvido, com correção de divergência esférica e com filtro passa-banda. Stack gerado com o *velan1*.

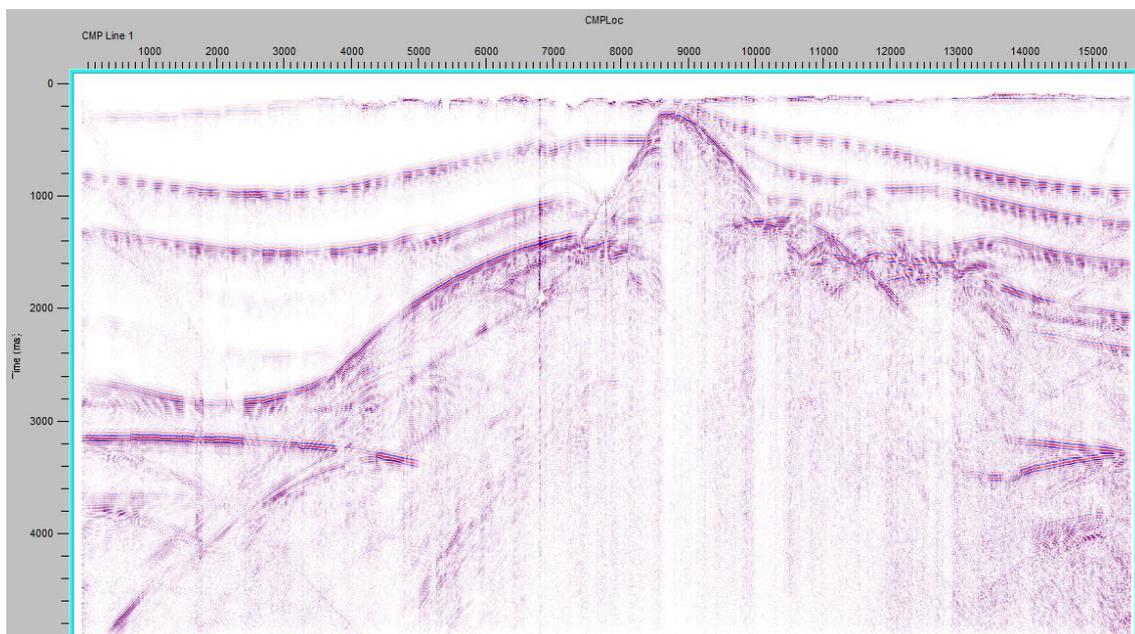


Figura 6.9-3b: Empilhamento do dado deconvolvido, com correção de divergência esférica e com filtro passa-banda. Stack gerado com o *velan2*.

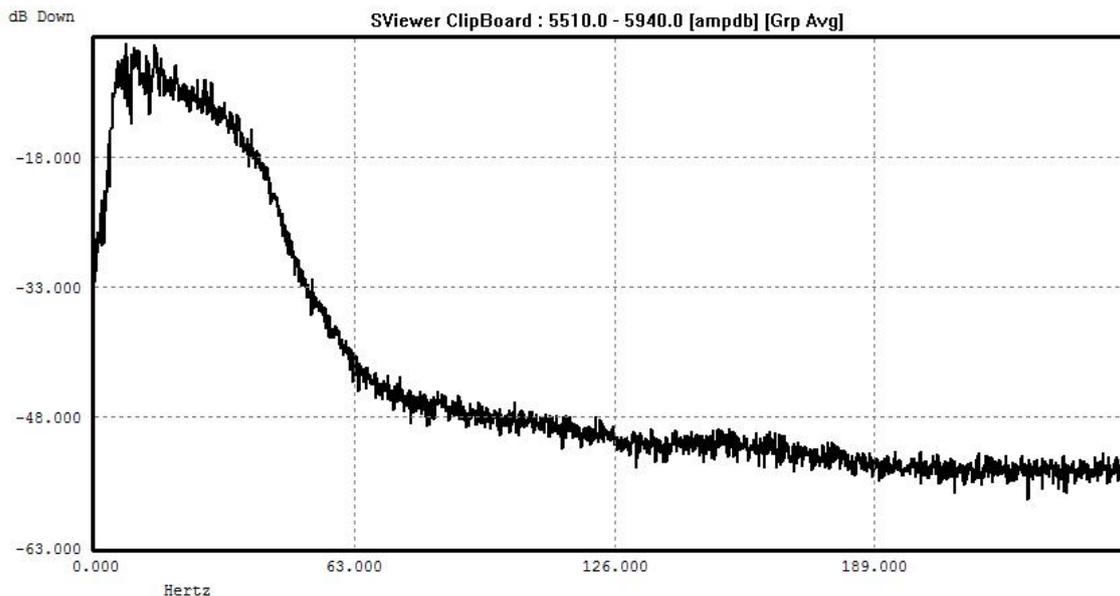


Figura 6.9-4: Espectro de frequência do dado com filtro passa-banda.

## 6.10. Migração

Como mencionado no capítulo 3, a migração é o procedimento que procura reposicionar as reflexões as suas corretas localizações, buscando ainda o reposicionamento do *Dip* (mergulho geológico aparente) e do seu comprimento. A migração se torna grandemente importante a medida que o *dip* geológico aumenta. A migração ainda colapsa difrações para os locais onde elas são geradas (Young, 2004).

Nessa etapa o processo de Migração pós-stack foi realizado, utilizando o algoritmo de migração *Phase-Shift* em tempo. A escolha dessa migração deveu-se ao tempo e custo computacional exigidos.

Como mencionado anteriormente, a migração *phase-shift* lida apenas com variações verticais de velocidade, sendo então ideal para esse trabalho a utilização do método de migração *Phase-Shift-Plus-Interpolation*. Esse método, contudo, não foi desenvolvido, por falta de experiência e tempo utilizando o software.

Essa migração possui uma boa relação custo de processamento (máquina) em virtude da qualidade do dado que é produzido. O algoritmo do *Phase-Shift* presente no software SPW, se baseia no mesmo método de migração utilizado no *Seismic Unix*.

Esse algoritmo fez uso das mesmas velocidades *RMS* obtidas durante a análise de velocidade.

Ainda dentro do ícone de migração, foi necessário ajustar o valor de entrada das velocidades, se baseando no intervalo de velocidades derivados da equação de Dix. A equação de Dix (1995) calcula os tempos de trânsito a partir da velocidade *RMS*, considerando que as camadas são horizontais e que o número de camadas é conhecido.

O ícone de migração utiliza esse valor de velocidade intervalar para multiplicar ao valor de velocidade de entrada no dado.

Durante a realização dessa migração, há demanda de grande quantidade de memória da máquina, e por isso dado precisou ser dividido em 4 partes. Essas partes foram migradas individualmente e posteriormente unidas novamente (figura 6.10-1).

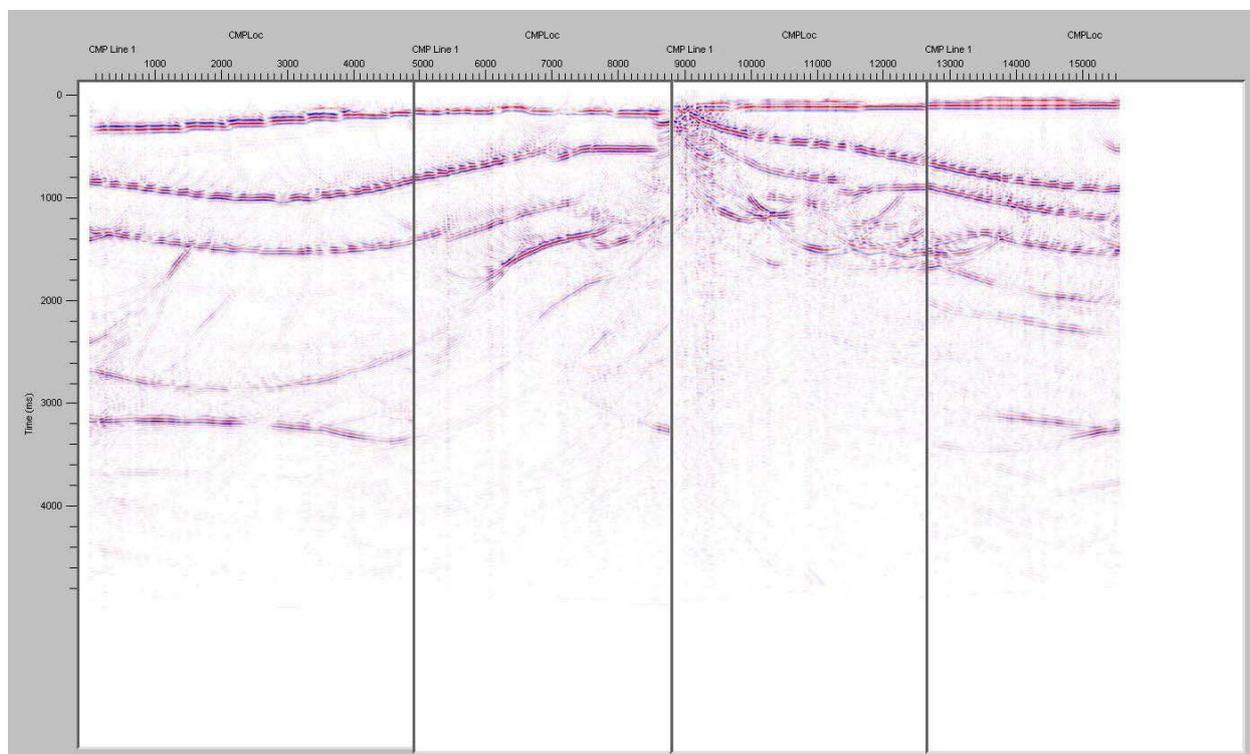


Figura 6.10-1: Migração *Phase-Shift* utilizando o multiplicador da velocidade de entrada igual à 0.9. Observa-se a ausência do topo do corpo salino e a presença de smiles (sorrisos).

Esse primeiro resultado se mostrou insatisfatório, como pode ser observado o topo do corpo de sal não pôde nem ser identificado. Observa-se também a presença de *smiles* (sorrisos), que são efeitos de sub e super migração, entretanto nessa figura o efeito de super migração é realçado. Esse efeito possivelmente ocorreu em função do valor de entrada do intervalo de velocidades, ajustado no ícone de migração *Phase-Shift* e ou ocorreu devido a análise de velocidade. Durante essa primeira migração o valor utilizado no ícone de migração foi 0.9.

Em busca de um melhor resultado, uma nova migração *Phase-Shift* foi realizada, contudo alterando-se o valor do intervalo de velocidades no ícone de migração de 0.9 para 0.5. Como resultado obteve-se a figura 6.9-2, na qual foi aplicada um ganho de 5 dB na amplitude dos sinais.

Agora nessa figura é possível observar o topo do sal com clareza, mostrando um resultado muito superior ao resultado obtido anteriormente.

Para facilitar a visualização, a figura 6.9-3 mostra as principais observações destacadas e numeradas de 1 a 7, que representam:

1- Efeito de borda. Trata-se de um efeito indesejável decorrente do truncamento das informações, nas vizinhanças dos limites de um volume de dados. (Duarte, 2003).

2- Efeito de *pull-down* (pseudodepressão). Em reflexão sísmica, o aumento localizado do tempo de reflexão ocasionado pela presença de um corpo sobrejacente de baixa velocidade, fez com que esse refletor fosse puxado para baixo, curvando-o. (Duarte, 2003).

3- Reposicionamento do refletor. Essa região destacada mostra com clareza o efeito da migração, na qual esse refletor foi deslocado para sua posição correta.

4- Falhas. Observação de algumas falhas acima do corpo de sal em acordo com o modelo geológico.

5- Atenuação da Informação. Nessa área destacada, observa-se que parte do refletor encontra-se atenuado, esse efeito é possivelmente fruto da dispersão de energia ao entrar em contato com a camada de sal.

6- Múltiplas. As setas vermelhas destacam alguns refletores que muito provavelmente representam múltiplas.

O resultado dessa migração, mesmo contendo efeitos de sorrisos e a ausência de informação abaixo do corpo salino, se mostrou satisfatório e atendeu bem aos objetivos propostos desde o início do projeto, que foi efetuar o processamento de um dado sísmico 2D e explicitar a dificuldade de se imagear abaixo de estruturas de sal.

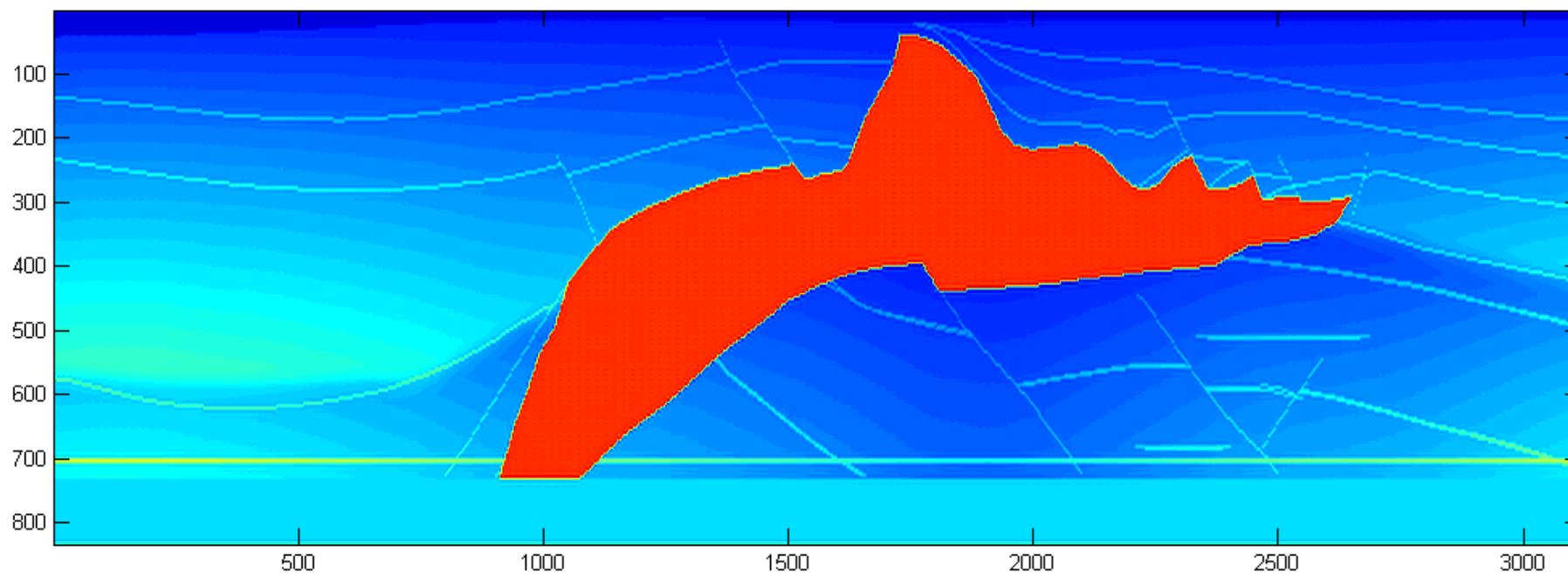


Figura 5.1-1: Modelo sintético que simula uma estrutura geológica de sal, com forte contraste de velocidade com o meio no qual está inserido.

Fonte: SEG-EAGE.

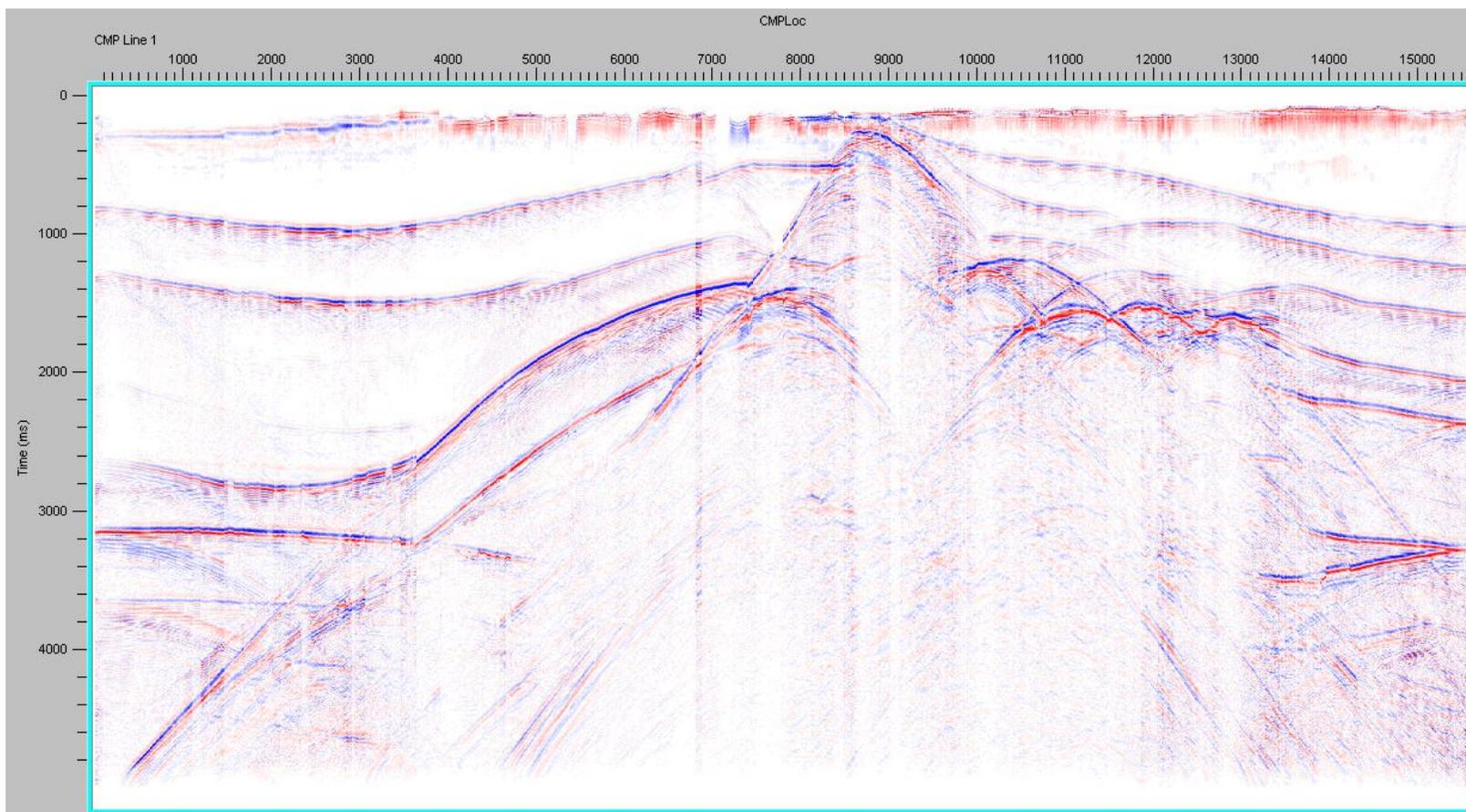


Figura 6.8-2b: Seção empilhada depois da deconvolução e correção de divergência esférica. *Stack* gerado com *velan2*.

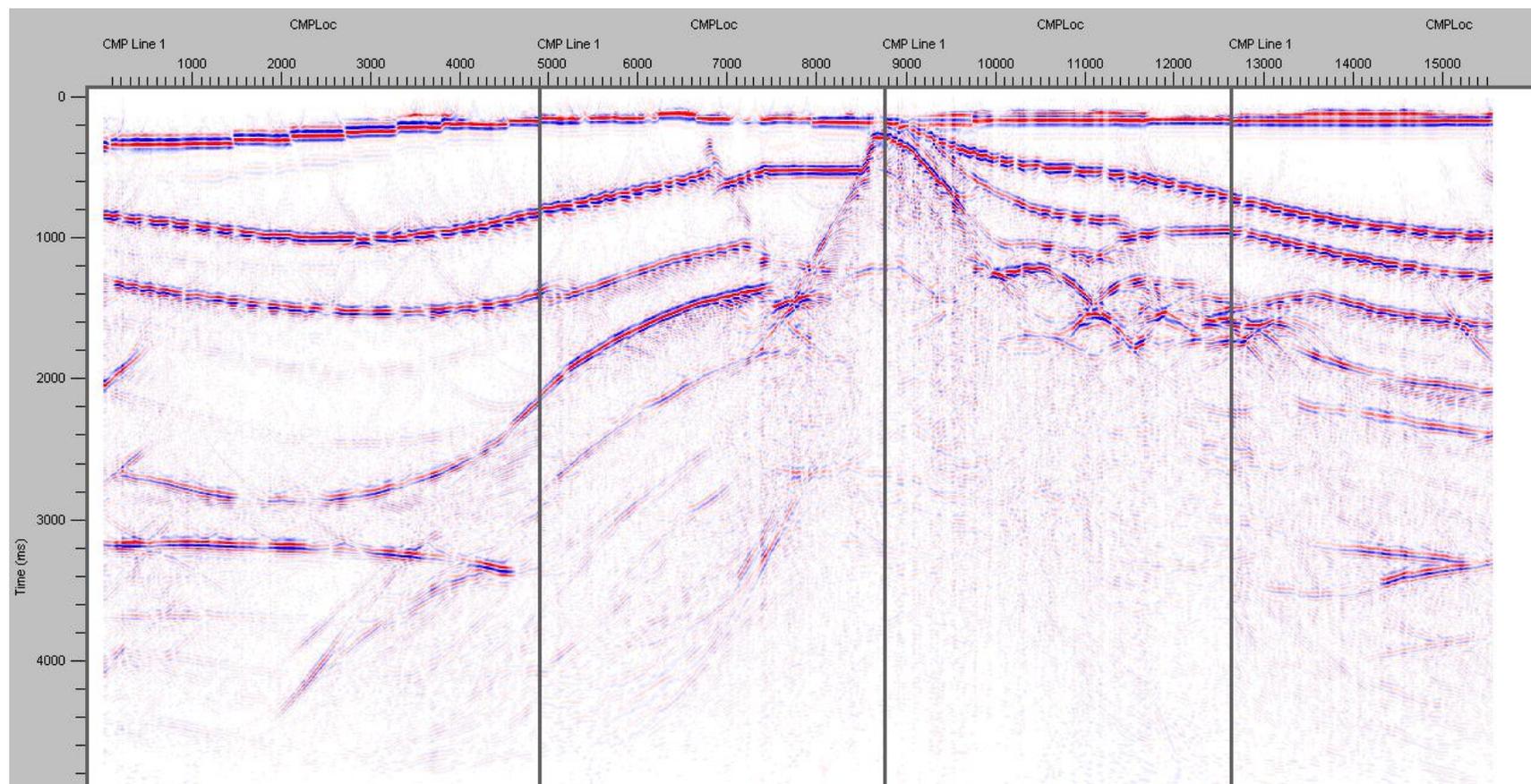


Figura 6.10-2: Migração *Phase-Shift* utilizando o multiplicador da velocidade de entrada igual à 0.5, com ganho na visualização de 5 dB nas amplitudes dos traços.

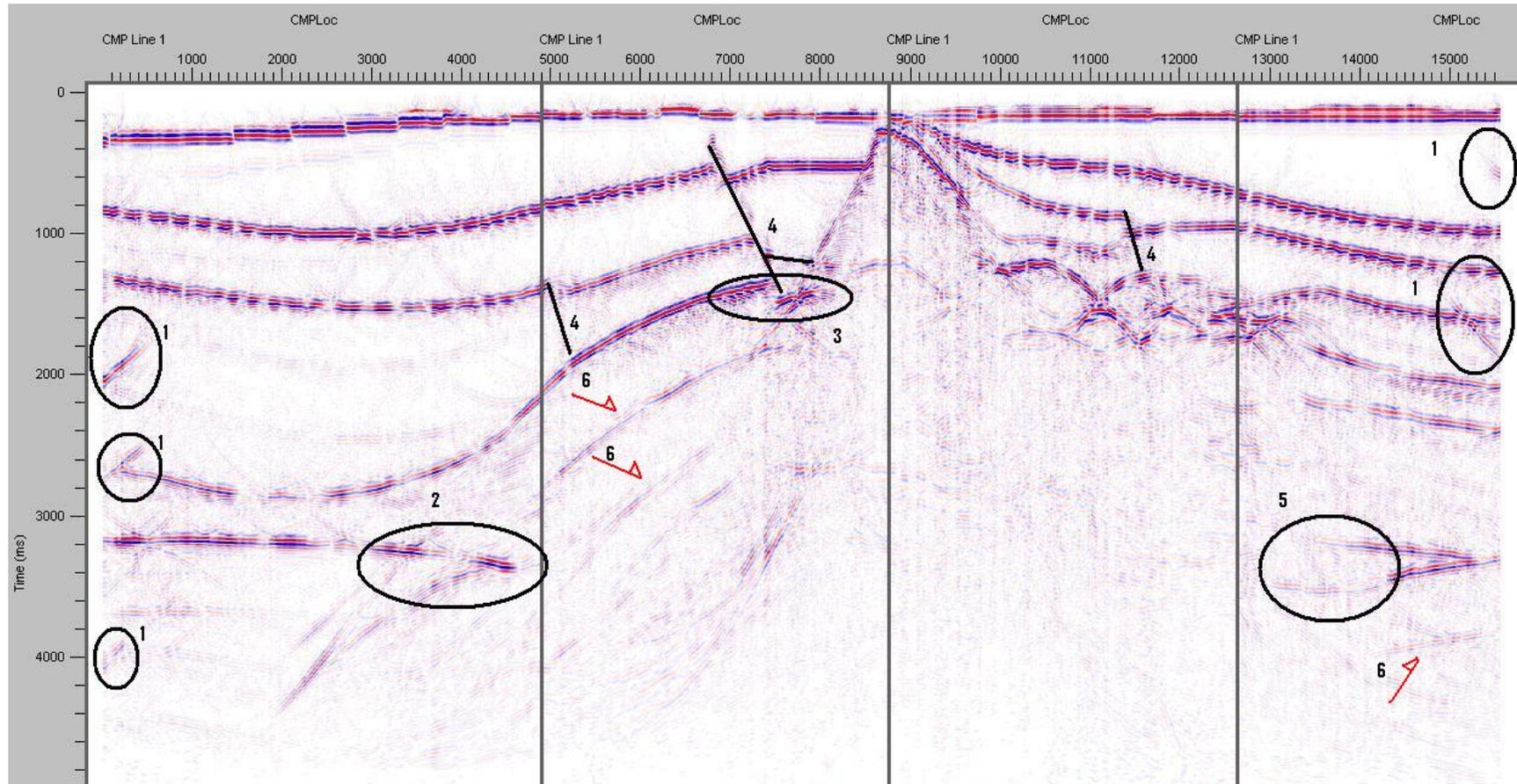


Figura 6.10-3: Migração *Phase-Shift* com as principais observações destacadas e numeradas de 1 a 6 que representam: 1- Efeito de borda; 2- Efeito de *pull-down*; 3- Deslocamento do refletor; 4- Falhas; 5- Atenuação de parte do refletor; 6- Múltiplas.

## 7. CONCLUSÃO

O desenvolvimento desse trabalho envolveu o processamento de dados sísmicos sintéticos e a utilização do software, o SPW (Seismic Processing Workshop).

Desse trabalho duas conclusões básicas puderam ser obtidas. A primeira é didática e a segunda é técnica.

A didática desenvolveu-se com a utilização do *software* SPW. Esse software, apresenta uma interface muito simples e prática e todo o processamento é realizado em janelas e com ícones que desempenham determinada função. Desse modo não é requerido por parte do geofísico um prévio conhecimento em programação, já que o trabalho não é realizado em linhas de comando.

Essa característica do *software* aumentou a velocidade no desenvolvimento e aplicação nos fluxos de processamento.

Outra vantagem na utilização desse software ocorreu durante a análise de velocidade. A ferramenta de visualização de sismogramas permitiu observar em tempo real, o modo como as escolhas de velocidade RMS influenciavam as correções de NMO.

Ainda na conclusão didática, destaca-se o processamento com um dado sintético. Sua utilização aumentou muito o conhecimento dos efeitos de cada etapa do processamento, isso porque a resposta que se desejava obter já era previamente conhecida, possibilitando assim o desenvolvimento de vários testes e observações até que o resultado conhecido fosse alcançado.

Da conclusão técnica destaca-se a utilização do dado com a presença de um corpo de sal. O processamento de um dado com uma estrutura de sal apresenta características específicas, como o grande aumento na velocidade de viagem das energias, e conseqüentemente problemas no imageamento abaixo desse corpo. Tais características dificultam o processamento e a resposta de sub-superfície que se quer obter.

Isto foi comprovado na análise de velocidade, quando os valores de velocidades RMS selecionados em alguns pontos aumentavam e diminuía bruscamente, formando picos. Situação essa que não ocorreu em outros pontos desse dado que não apresentavam o sal.

Outra comprovação da dificuldade mostrou-se desde o primeiro empilhamento gerado. Nas regiões onde o corpo de sal não está presente, as camadas são bem

definidas, mesmo com a presença de múltiplas, é possível observar refletores abaixo de 3,0 s, entretanto na região onde o corpo de sal está presente muito pouco ou nada se enxerga abaixo do evaporito, sendo possível apenas observar refletores até 2,0 segundos aproximadamente.

Mesmo com aplicação de ganhos e processos com fluxos diferentes, não foi possível imagear abaixo do evaporito, sendo possível apenas observar alguns refletores abaixo das bordas do sal.

Ainda assim, a utilização tanto do dado quanto do *software*, mostraram-se de grande valia didática e estimulante ao uso e conhecimento de novos *softwares* de processamento.

Espera-se que esse trabalho sirva de estímulo para novos trabalhos que utilizem a o SPW e desenvolvam o imageamento abaixo do sal.

## 9. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABREU, A. S. 2005. Processamento de dados sísmicos do Golfo do México usando o Seismic Unix. Trabalho de Graduação. Universidade Federal da Bahia. Salvador, Bahia. Brasil.
- AMERY, G. B. 1969. Structure of the Sigsbee Scarp, Gulf of Mexico. American Association of Petroleum Geologists Bulletin, Tulsa, Okla., v. 53, p. 1176-1191.
- BIZZI, L. A. et al 2003. Geologia, Tectônica e Recursos Minerais do Brasil
- BRUNETTA, R. 2005. O Processamento da Sísmica de Reflexão Rasa: Desafios Encontrados no Estudo de Modelos Análogos a Reservatórios Fraturados. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Paraná. Curitiba, Paraná, Brasil.
- BUFFLER, R. T. 1989. Distribution of crust, distribution of salt, and the early evolution of the Gulf of Mexico Basin. In: SOCIETY OF ECONOMIC PALEONTOLOGISTS AND MINERALOGISTS. GULF COAST SECTION. ANNUAL RESEARCH CONFERENCE, 10., 1989, Houston, Tex. [ Program and abstracts...] Austin, Tex.: Society of Economic Paleontologists and Mineralogists. Gulf Coast Section. 165p. p. 25-27.
- COEHN, J. e JR., J. S. 2002. The New SU User's Manual, Colorado School of Mines.
- DUARTE, O. O. 2003. Dicionário Enciclopédico Inglês-Português de Geofísica e Geologia. Brasil: Rio de Janeiro, Petrobrás. 2ª edição. 352p.
- EIRAS, J. F. e KINOSHITA, E. M. 1990. Geologia e perspectivas petrolíferas da Bacia do Tacutu, In: Origem e Evolução das Bacias Sedimentares, Rio de Janeiro, PETROBRÁS, Anais, pp. 197-220.
- FAINSTEIN, R.; SOUZA FILHO, R. G. Offshore Brazil 2005. Regional update and future exploration. In: SOCIETY OF EXPLORATION GEOPHYSICISTS. INTERNATIONAL EXPOSITION & ANNUAL MEETING, 2005, Houston. Abstract...Rio de Janeiro: PETROBRAS, 2005. 1 CD-ROM, 4p.

- GADALLAH, M. R. & FISHER, R. L. 2005 Applied Seismology: A comprehensive Guide to Seismic Theory and Application. 473p.
- GAZDAG, J., 1978, Wave-equation migration by phase shift: Geophysics, 43, 1342-1351.
- GAZDAG, J. e SQUAZZERO, P., 1984, Migration of seismic data by phase shift plus interpolation: Geophysics, 49, 124-131.
- GE, H.; JACKSON, M. P. A. Physical modeling of structures caused by salt withdrawal. American Association of Petroleum Geologists Bulletin, Tulsa, Okla., v. 82, p. 228-250. 1998.
- HAYS, J. D.; PITTMAN III, W. C. 1973. Lithospheric plate motion, sea-level changes and climatic and ecological consequences. Nature, London, v. 246, p. 18-22.
- HUBBERT, M. K. 1951. Mechanical basis for certain familiar geologic structures. Geological Society of America Bulletin, Boulder, v. 62, p. 355-372.
- HUMPHRIS, C. C. 1979. Salt movement on continental slope, northern Gulf of Mexico. American Association of Petroleum Geologists Bulletin, Tulsa, Okla., v. 63, p. 782-798.
- IMBERT, P. 2005. The Mesozoic Opening of the Gulf of Mexico: part 1, evidence for oceanic accretion during and after salt deposition. In: POS, P. J.; ROSEN, N. C.; OLSON, D. L.; PALMES, S. L.; LYONS, K. T.; NEWTON, G. B. (Ed). Petroleum systems of divergent continental margin basins. Houston: Society of Economic Paleontologists and Mineralogists. p. 1119-1150.
- JENYON, M. K. 1985. Salt Tectonics. London: Elsevier Applied Science, 191 p.
- JESUS, C. A. C. 2008. Análise de Velocidade e Interpretação Sísmica na Bacia de Tacutu. Trabalho de Graduação. Universidade Federal Fluminense. Niterói, Rio de Janeiro. Brasil.

- KNAPP, R.W. & STEEPLES, D. W. 1986. High-resolution-depth-point reflection profiling: field acquisition parameter design. *Geophysics*, vol. 51, n.2, p. 283-294
- MANN, P.; GAHAGAN, L. & GORDON, M. B. 2003. Tectonics setting of the world's giant oil and gas fields. In HALBOUTY, M. T. (Ed.). p. 15-105.
- MCKENZIE, D. Some remarks on the development of sedimentary basins. *Earth and Planetary Science Letters*, Amsterdam, v. 40, n. 1/3, p. 25-32, 1978.
- MOHRIAK, W.U. 2005. Tectônica de sal autóctone e alóctone na Bacia do Espírito Santo. In *Encontro Técnico da Perfuração de Sal*, 1, Salvador, Trabalhos apresentados.
- MOHRIAK, W.U; SZATMARI, P.& ANJOS, S. M. C. 2008. Sal: Geologia e Tectônica. Exemplos nas bacias Brasileiras
- NOVAES, F. C. 2007. Processamento de Dados Sísmicos da Bacia de Campos Utilizando Deconvolução Multicanal para a Supressão de Múltiplas. Salvador, Bahia. Brasil.
- PITTMAN III, W.C. 1978. Relationship between eustacy and stratigraphic sequences of passive margins. *Geological Society of America Bulletin*, Boulder, v. 89, n.9, p. 1389-1403, sept.
- ROBINSON, E. A., TREITEL, S. 1980. "Geophysical Signal Analysis", Prentice-Hall, Englewood Cliffs,.
- SALVADOR, A. 1991. Origin and development of the Gulf of Mexico basin. In: SALVADOR, A. (Ed.). *The Gulf of México Basin*. Boulder, Colo.: Geological Society of America, v. J, p. 389-444. Chap. 14. (The Geology of North America).
- SZATMARI, P. 1982. Evaporitos e a geração de hidrocarbonetos. *Ciências da Terra*, Salvador, n. 4, p. 21.

TELFORD, W.; GELDART, L. e SHERIFF, R. 1990. Applied Geophysics, Cambridge University Press.

TORRES, T. C. 2008. Processamento e Interpretação de Dados sísmicos 2-D da Bacia de Camamu. Trabalho de Graduação. Universidade Federal da Bahia. Salvador, Bahia. Brasil.

WEIJERMARS, R.; JACKSON, M.P. A; VENDEVILLE, B. C. 1993 Rheological and tectonic modeling of salt provinces. Tectonophysics, Amsterdam, v. 217, p. 143-174.

WINKER, C. D.; BUFFLER, R. T. 1988. Paleogeographic evolution of early deep water Gulf of Mexico and margins, Jurassic of Middle Cretaceous (Comanchean). American Association of Petroleum Geologists Bulletin, Tulsa, Okla., v. 72, p. 318-346.

YILMAZ, O. 1987. Seismic Data Processing, Society of Exploration Geophysicists-SEG, Tulsa.

YOUNG, R. A. 2004. A lab manual of seismic reflection processing. School of Geology and Geophysics, University of Oklahoma. EAGE Publications. 126p.

SITES: <http://www.learninggeoscience.net/>. Acessado em: 03/03/09

:<http://www.golfo-de-mexico.org/>. Acessado em: 09/05/09