

UNIVERSIDADE FEDERAL FLUMINENSE
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE GEOLOGIA E GEOFÍSICA



LUCAS LIMA NAVARRO DE ANDRADE

**UMA ADAPTAÇÃO DO MÉTODO *LAYER CAKE* APLICADO EM
DADOS SÍSMICOS SINTÉTICOS BASEADOS NO CAMPO DE
BÚZIOS**

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO
DINÂMICA DOS OCEANOS E DA TERRA (DOT)

Niterói, RJ
2020

LUCAS LIMA NAVARRO DE ANDRADE

**UMA ADAPTAÇÃO DO MÉTODO *LAYER CAKE* APLICADO EM
DADOS SÍSMICOS SINTÉTICOS BASEADOS NO CAMPO DE
BÚZIOS**

Dissertação apresentada à Universidade Federal Fluminense como requisito parcial do Programa de Pós-Graduação em Dinâmica dos Oceanos e da Terra para a obtenção do título de Mestre em Ciências.

Área de concentração: Geologia e Geofísica.

Orientador

Prof. Marco Antônio Cetale Santos

**Niterói, RJ
2020**

LUCAS LIMA NAVARRO DE ANDRADE

**UMA ADAPTAÇÃO DO MÉTODO *LAYER CAKE* APLICADO EM
DADOS SÍSMICOS SINTÉTICOS BASEADOS NO CAMPO DE
BÚZIOS**

Dissertação apresentada à Universidade Federal Fluminense como requisito parcial do Programa de Pós-Graduação em Dinâmica dos Oceanos e da Terra para a obtenção do título de Mestre em Ciências.

Área de concentração: Geologia e Geofísica.

Aprovada em 29/12/2020 pela banca examinadora abaixo:



Prof. Marco Antonio Cetale Santos, DSc. (Orientador)
UFF / DOT / GISIS



Prof. Joelson da Conceição Batista, DSc.
UFBa / IGEO



Prof. Wagner Moreira Lupinacci, DSc.
UFF / LAGEMAR / GIECAR



Felipe Timóteo da Costa, DSc
UFF / DOT / GISIS

**Niterói, RJ
2020**

*Suba o primeiro degrau com fé.
Não é necessário que
você veja toda a escada.
Apenas dê o primeiro passo.*

Martin Luther King Jr.

Agradecimentos

Primeiramente a Deus, por tudo que Ele é.

À minha esposa, Regina, minha maior incentivadora e apoiadora em todo o processo.

Aos meus filhos, por entenderem a não disponibilidade do Pai em diversos momentos ao longo dos últimos anos.

À minha mãe, Lúcia, que sempre me incentivou a continuar estudando.

Ao meu orientador, professor Marco Cetale, que me aceitou como aluno e me guiou em todo o processo.

À CGG, principalmente nas pessoas do Anderson Cavalcante e Olivier Brachet, por me incentivar e viabilizar o acesso ao mestrado além de liberar as imagens sobre o processamento sísmico apresentados neste trabalho e por ceder licenças do Geoview ao grupo do GISIS.

À todo o grupo do GISIS, que em muito contribuiu para o meu trabalho.

Ao colega e amigo Ammir Karsou, pelos incansáveis esforços com os algoritmos utilizados neste trabalho além de ideias e ajudas.

Ao colega e amigo Diego Rodrigues, por me ajudar no processo e me apresentar o grupo do GISIS.

À Daniele Tostes, pelas incansáveis correções e sugestões, sem as quais eu não concluiria este trabalho no prazo.

Ao colega Guilherme Welter, por toda a ajuda com as dificuldades relacionadas à linguagem de programação.

Aos colegas Frank Pereira, Rafaela Reis e ao meu tio Sérgio Navarro, por me incentivarem a continuar a caminhada.

À todos os membros da banca examinadora, pela disponibilidade.

Lista de ilustrações

- Figura 1 – Exemplo de *overhang*. 20
- Figura 2 – Filtro corta baixa de 2,5 Hz aplicado ao dado de entrada - Família de Tiro Comum. O lado esquerdo representa o dado entregue pelo navio à equipe de processamento, contendo todas as faixas de frequências registradas. Do lado direito o mesmo dado após a aplicação do filtro. No canto superior direito está o espectro de amplitudes com diversas frequências escolhidas para o filtro corta baixa. Imagem cedida pela CGG. 22
- Figura 3 – Atenuação da influência do tiro subsequente - Família de Tiro Comum. O grupo mais a esquerda mostra 3 tiros contendo informação do tiro subsequente, as setas azuis indicam esta informação. Note que a inclinação do evento não é condizente com a posição em tempo que se encontra. No meio, temos os mesmos 3 tiros após a supressão desse “ruído”. No grupo da direita temos a diferença entre os tiros antes e após a atenuação. Imagem cedida pela CGG. 24
- Figura 4 – Atenuação de ruídos ambientais ou aleatórios - Família de Tiro Comum. Note no grupo mais a esquerda a presença de ruídos de baixa frequência, com amplitude elevada, que se mantém praticamente constantes em todo o tempo para um mesmo traço, indicados pelas setas azuis. No grupo do centro os ruídos já foram atenuados e a diferença entre antes e após a supressão está no grupo mais a direita. Imagem cedida pela CGG. 25
- Figura 5 – Atenuação de ruídos lineares - Família de Tiro Comum. No grupo de 3 tiros mais a esquerda temos uma forte presença de um ruído linear, normalmente com tempo inferior nos traços de menor *offset*, aumentando o tempo de registro para os de maior *offset*. O grupo do meio apresenta o dado após a atenuação e o da direita a diferença entre os dois. Imagem cedida pela CGG. 25
- Figura 6 – Atenuação de ruídos oriundos de outra aquisição sísmica próxima - Família de Tiro Comum. Perceba no grupo a esquerda a presença de eventos que tem mergulho oposto ao esperado, além de ruídos mais lineares. No grupo do centro esse ruído foi atenuado e a diferença entre antes e depois do ruído encontra-se no grupo a direita. Imagem cedida pela CGG. 26

Figura 7 – O grupo da esquerda contém ainda todos os ruídos, sendo nossa entrada no processo. O grupo do meio, chamado de <i>designature</i> , contém o dado após a supressão da assinatura da fonte e do ruído de bolha. O grupo da direita contém o dado após a atenuação adicional dos fantasmas de fonte e receptor - Família de Tiro Comum. Imagem cedida pela CGG.	27
Figura 8 – Apresenta a mesma imagem da Figura7, porém com um <i>zoom</i> (foco na primeira reflexão). Note que a supressão da assinatura e do ruído de bolha elimina uma baixa frequência do dado, além de tornar mais nítido o primeiro evento, composto pela reflexão e pelos 3 fantasmas. A Figurada direita apresenta como a primeira reflexão se torna mais nítida e sem a presença dos fantasmas. Isso deixa o dado mais limpo e fácil de ser interpretado, após o empilhamento. - Família de Tiro Comum. Imagem cedida pela CGG.	28
Figura 9 – Atenuação de múltiplas relacionadas a superfície da água - Família de receptor Comum. Note no grupo a esquerda uma imagem muito semelhante à reflexão do fundo do mar, com aproximadamente o dobro do tempo do evento, seguido de diversos eventos logo abaixo, também muito similares aos eventos acima. Esses eventos, tratados como ruído nesse processo, são atenuados no grupo central, e a diferença entre os dois é apresentada no grupo a direita. Imagem cedida pela CGG.	29
Figura 10 – Regularização do dado - Família de receptor Comum. Note no grupo da esquerda que existem traços cinzas (sem nenhuma informação), que atrapalham a visualização do dado. No grupo da direita esses traços vazios foram preenchidos pelo processo da regularização. Imagem cedida pela CGG.	30
Figura 11 – Regularização do dado - <i>Time Slice</i> . Semelhantemente ao que ocorre na Figura10, os traços antes vazios do grupo da esquerda foram preenchidos no grupo da direita. Imagem cedida pela CGG.	31
Figura 12 – Tabela mostrando o fluxo aplicado para a construção do modelo de velocidades nas bacias de Santos e do golfo do México - traduzido de Huang et al. (2009)	36
Figura 13 – Gráfico mostrando a relação entre espessura real e aparente (ROSA, 2010). Note que abaixo da resolução sísmica, qualquer evento que tenha um bom contraste de impedância será visualizado com a espessura da resolução mínima.	37

Figura 14 – O esquema mostra uma família CMP corrigida com 4 velocidades de NMOs diferentes: em (a) 1480 m/s; em (b) 1490 m/s; em (c) 1495 m/s; e em (d) 1500 m/s que foi capaz de corrigir melhor a velocidade dos refletores do fundo do mar, tornado-os <i>flat</i> (modificado de Silva, Souza e Lemos (2014)).	40
Figura 15 – Mapa de localização da Bacia de Santos com os principais elementos de seu arcabouço regional (ANP, 2017).	42
Figura 16 – Carta litoestratigráfica da Bacia de Santos (MOREIRA et al., 2007) . .	44
Figura 17 – Localização do campo de Búzios em três escalas (ANP, 2016).	46
Figura 18 – Esquema ilustrando o fluxo aplicado a este trabalho.	48
Figura 19 – Os primeiros 40 tiros modelados.	49
Figura 20 – Modelo de velocidades preliminar, baseado no campo de Búzios da Bacia de Santos, apresentado no <i>16th International Congress of the Brazilian Geophysical Society & Expogef</i> (KARSOU et al., 2019). . . .	50
Figura 21 – Linha sísmica migrada (Kirchhoff) escolhida para o nosso modelo (KARSOU et al., 2019). Os horizontes representam: Em lilás o fundo do mar; em rosa e amarelo dois eventos erosivos dentro da formação Marambaia; em azul o topo do sal; em ciano a base do sal; e em vermelho o topo do embasamento.	51
Figura 22 – Os horizontes azuis foram desenhados para auxiliar as seguintes modificações: em “A” escolhemos o local onde seria preservada a estratificação do sal, e somente ali; “B” é um horizonte auxiliar, criado pouco abaixo do topo do sal, onde a estratificação seria mantida, porém transformada em uma fina camada de anidrita com velocidade ligeiramente superior a da halita logo abaixo; “C” apresenta a protuberância que foi preenchida de sal, criando o <i>overhang</i> ; “D” mostra onde a velocidade de sedimento seria preservada durante a modificação do sal; e “E” apresenta uma elevação da base do sal, criando o reservatório objetivo.	53
Figura 23 – Modelo de velocidades construído e utilizado neste trabalho para a modelagem. “A” apresenta uma porção do sal estratificado, com pequenas variações de velocidade inferiores a velocidade padrão de 4500 m/s. “B” aponta a camada de anidrita. “C” aponta para o <i>overhang</i> adicionado, que coloca velocidade de sal sobre uma camada de sedimentos com velocidade inferior. “D” apresenta o alto adicionado na base do sal, com baixa impedância, representando um reservatório de pré-sal e “E” aponta a anomalia semelhante a um turbidito no pós-sal.	54
Figura 24 – Gráfico esquemático da iteração aplicada neste trabalho.	56
Figura 25 – Velocidade inicial, representando a velocidade média da água e igual a 1500 m/s para toda o modelo - <i>Water flood</i>	57

Figura 26 – Modelo de velocidade apresentado na Figura 25 com transparência sobre o dado sísmico migrado com esta velocidade.	58
Figura 27 – Horizonte do fundo do mar (em amarelo) interpretado sobre a sísmica gerada na etapa <i>water flood</i>	59
Figura 28 – Modelo de velocidades atualizado com a inclusão do gradiente de sedimentos abaixo do horizonte interpretado na Figura 27 - (<i>Sediment flood</i>).	59
Figura 29 – Modelo de velocidade apresentado na Figura 28 com transparência sobre o dado sísmico migrado com esta velocidade.	60
Figura 30 – Horizonte do topo do sal (em vermelho) interpretado sobre a sísmica gerada na etapa <i>sediment flood</i> e o horizonte do fundo do mar (amarelo) gerado na etapa anterior.	61
Figura 31 – Modelo de velocidades atualizado com a velocidade do sal (4500 m/s) do horizonte interpretado (Figura 30) até o final do modelo - <i>Salt flood</i>	61
Figura 32 – Modelo de velocidade apresentado na Figura 31 com transparência sobre o dado sísmico migrado com esta velocidade.	62
Figura 33 – Pontos de atenção na migração mais recente. A seta branca aponta para um flanco e parte do topo de sal mal imageado. O círculo vermelho apresenta a base do sal e o pré-sal sem definição.	62
Figura 34 – Horizonte da base do sal (em azul) interpretado sobre a sísmica gerada na etapa <i>salt flood</i> , e em vermelho e amarelo os horizontes do topo do sal e fundo do mar, respectivamente, gerados em etapas anteriores.	64
Figura 35 – Modelo de velocidades atualizado com a velocidade do pré-sal do horizonte da base do sal interpretado (Figura 34) até o final do modelo - Modelo de velocidades final.	64
Figura 36 – Modelo de velocidade apresentado na Figura 35 com transparência sobre o dado sísmico migrado com esta velocidade. Esta é a melhor migração que conseguimos com um único ciclo para o método <i>layer cake</i> utilizando o <i>top-down approach</i>	65
Figura 37 – Sísmica migrada com modelo de velocidades final (Figura 35). As linhas pontilhadas são guias para melhor observar as diferenças de profundidade entre esta Figura e a Figura 38, causadas pelos erros no nosso modelo final.	66
Figura 38 – Sísmica migrada com a velocidade correta (Figura 23).	66
Figura 39 – Modelo de velocidades correto até o topo do sal, não diferenciando halita da anidrita.	67
Figura 40 – Sísmica migrada com modelo de velocidades da etapa <i>salt flood</i> (Figura 32)	68

Figura 41 – Sísmica migrada com modelo de velocidades correto até o topo do sal (Figura 39).	68
Figura 42 – Modelo de velocidades correto até o topo da halita, com a diferenciação da anidrita e com a correta interpretação do <i>overhang</i>	69
Figura 43 – Sísmica migrada com o modelo de velocidades apresentado na Figura 42.	69
Figura 44 – Área do modelo onde aplicamos o <i>zoom</i> para melhor avaliarmos o <i>overhang</i> (ver Figura 45).	70
Figura 45 – A Figura apresenta a evolução da imagem (parte inferior) conforme o modelo de velocidades (parte superior) vai sendo aprimorado: “A” apresenta o modelo de velocidades do <i>water flood</i> ; “B” traz o modelo de velocidades do <i>sedimental flood</i> ; “C” o modelo de velocidades do <i>salt flood</i> ; e “D” o resultado de um modelo de velocidades que considera o <i>overhang</i> e as complexidades do sal.	70

Lista de abreviaturas e siglas

FWI	<i>Full Waveform Inversion</i>
RTM	<i>Reverse Time Migration</i>
SI	<i>Seismic Interference</i>
CMP	<i>Common Mid Point</i>
SRM	<i>Surface Related Multiple</i>
CDP	<i>Common Depth Point</i>
NMO	<i>Normal Moveout</i>
ANP	Agência Nacional de Petróleo
GISIS	Grupo e Imageamento Sísmico e Inversão Sísmica
REM	<i>Rapid Expansion Method</i>
VSP	<i>Vertical Seismic Profile</i>

Sumário

	Página
1 Introdução	16
2 Revisão de Processamento Sísmico	19
2.1 Importação dos dados	21
2.2 Filtro corta baixa	21
2.3 Atenuação de ruídos diversos	22
2.3.1 Atenuação da influência do segundo tiro	23
2.3.2 <i>Swell noise</i> e ruídos aleatórios	23
2.3.3 Ruídos lineares	23
2.3.4 <i>Seismic Interference</i> - <i>SI</i>	24
2.4 Atenuação de assinatura da fonte e supressão do ruído de bolha	26
2.5 Atenuação dos fantasmas de fonte e receptor	26
2.6 Atenuação de múltiplas	28
2.7 Correção das amplitudes de tiros e receptores	28
2.8 Regularização do dado	29
2.9 Migração sísmica	30
2.9.1 Equação da onda	32
2.9.2 Migração pré-empilhamento	34
2.9.3 Migração Reversa no Tempo (RTM)	34
2.10 Construção do modelo de velocidades	35
2.10.1 Interpretação sísmica	36
2.10.2 Tomografia e FWI	38
2.10.3 Método <i>layer cake</i> (ou <i>flood</i>)	39
3 Contexto Geológico	42
3.1 Bacia de Santos	42
3.1.1 Localização e histórico petrolífero	42
3.1.2 Evolução Tectono-sedimentar	43
3.2 Campo de Búzios	46
4 Metodologia	47
4.1 Etapas da construção do modelo	47
4.2 O modelo	49
4.2.1 Modelo preliminar	50
4.2.2 Modelo finalizado - O modelo de Búzios	52
4.3 Aplicando o método <i>layer cake</i>	53
5 Estudo de Caso	56
5.1 Aquisição dos dados	57

5.2	<i>Water Flood</i>	57
5.3	<i>Sediment flood</i>	58
5.4	<i>Salt flood</i>	60
5.5	Inclusão do gradiente do pré-sal	63
5.6	Comparação entre o resultado obtido e o resultado esperado	65
5.7	Analisando os impactos dos erros da velocidade e de interpretação na região do <i>overhang</i>	67
6	Conclusões e recomendações de trabalhos futuros	72
6.1	Recomendações para trabalhos futuros	73
	Referências	74

Resumo

O método sísmico ainda é o método mais indicado para o entendimento das estruturas em subsuperfície, associadas a produção de hidrocarbonetos. Como os dados sísmicos são adquiridos no domínio do tempo, procedimentos de migração e conversão em profundidade são necessários para uma interpretação adequada destes dados. O método de migração necessita de um modelo de velocidades coerente com o substrato e capaz de realizar tal feito. A busca pelo modelo de velocidades mais preciso tem guiado a maioria dos esforços tanto da indústria, como na academia. Padrões para a construção do modelo tem sido desenvolvidos na indústria, para num intervalo curto de tempo, construir um modelo capaz de colapsar corretamente as energias, principalmente na porção do dado onde encontra-se o reservatório. Apresentamos neste trabalho uma maneira simples de construção de modelo de velocidades, sem o uso de técnicas de inversão, que constrói o modelo por camadas, da mais rasa a mais profunda. Defendemos o método *layer cake* adaptado ao pré-sal brasileiro como uma alternativa simples para a construção da imagem em subsuperfície. Para comprovar a eficácia da metodologia aplicada, optamos por estudar a Bacia de Santos e criar um modelo que apresente as principais características dessa bacia e, ao mesmo tempo, alguns desafios de imageamento. Nosso modelo partiu de dados cedidos pela ANP ao GISIS e foi modificado para melhor atender ao objetivo deste estudo. Realizamos uma aquisição sísmica sintética neste modelo e aplicamos o método proposto para a construção da imagem. Os resultados positivos comprovam a eficácia do estudo. Discutimos também sobre as limitações e os pontos de maior atenção na aplicação do método.

Abstract

The seismic method is still the most suitable method for understanding subsurface structures, associated with the production of hydrocarbons. As the seismic data are acquired in the time domain, migration and depth conversion procedures are necessary for an adequate interpretation of these data. The migration method requires a velocity model that is coherent with the substrate and capable of accomplishing this objective. The search for the most accurate speed model has guided major efforts both in industry and academy. Paths for the construction of the model have been developed in the industry, for in a short period of time, to build a model capable of correctly collapsing the energies, mainly in the portion of the data where the reservoir is located. No wonder, techniques such as FWI, has stamped most of the works presented in geophysics congresses around the globe in the last decade. The main objective of this technique is to improve imaging by improving the speed model. In this work we present a simple way of building a velocity model, without the use of inversion techniques, which builds the model by layers, from the shallowest to the deepest. We defend the layer cake method adapted to the Brazilian pre-salt as a simple alternative for the construction of the image subsurface. To prove the effectiveness of the applied methodology, we chose to study the Santos Basin and create a model that presents the main characteristics of this basin and, at the same time, adding some imaging challenges. Our model started from data provided by ANP to GISIS and was modified to better meet the objective of this study. We performed a synthetic seismic acquisition on this model and applied the proposed method for the construction of the image. The positive results prove the effectiveness of the study. We also discussed the limitations and points of greatest attention when applying the method.

1 Introdução

A sísmica ainda é o método mais importante da geofísica para a produção de hidrocarbonetos. A resposta sísmica registrada nos vários tipos de receptores (hidrofonos, geofones e *nodes*) pode ser descrita como uma função da velocidade de propagação e caminhos de reflexão, que revelam uma rica informação sobre a geologia do subsolo (KEAREY, 2002). Apesar de ser um setor pequeno na indústria de óleo e gás, a sísmica tem sido em grande parte responsável pela exploração de hidrocarbonetos em todo o mundo sendo fundamental para aumentar, reconhecer e provar as reservas de petróleo.

Dentro do processamento dos dados sísmicos, a etapa de reconstrução da imagem de subsuperfície é chamada migração sísmica. Existem diversos algoritmos para realizar tal etapa. Com o avanço computacional, algoritmos de migração que utilizam a equação completa da onda tem sido largamente utilizados, inclusive muitos destes algoritmos foram desenvolvidos anos antes da existência de máquinas suficientemente robustas para executá-los (YILMAZ, 2001). Porém, o método de migração necessita de um modelo de velocidades que possa colocar tempo em função de espaço. Um método de migração só é capaz de gerar uma imagem de qualidade, com refletores bem colapsados, com um modelo de velocidades que represente de maneira satisfatória os contrastes de impedâncias encontrados pelo pulso sísmico ao interagir com as camadas da subsuperfície.

Os modelos de velocidade podem ser construídos a partir de uma combinação de *checkshots*, VSP (*Vertical Seismic Profile*), perfis sônicos, velocidades de empilhamento sísmico, ou ainda se utilizando de informações teóricas e análogas da bacia de estudo, dependendo das informações disponíveis. Segundo Eichkitz e Amtmann (2010) o modelo pode utilizar velocidades: médias; intervalares; por camadas; entre outras formas.

Este trabalho se propõe a construir um modelo de velocidades representativo do pré-sal brasileiro, a partir de dados do campo de Búzios cedidos pela Agência Nacional de Petróleo (ANP) ao Grupo de imageamento sísmico e inversão sísmica (GISIS) e, a partir deste modelo, estudar os impactos do método *layer cake* (MARSDEN, 1989) adaptado aplicado na construção do modelo de velocidades para obtenção da imagem final, com foco principal na inversão de velocidades de sedimentos causada pela presença de um pequeno *overhang*. O objetivo principal é demonstrar os impactos dessa estrutura no imageamento dos sedimentos pré-sal, utilizando-se este método.

A definição de pré-sal, fornecida pela Petrobras é:

“O pré-sal é uma sequência de rochas sedimentares formadas por mais de 100 milhões de anos no espaço geográfico criado pela separação do antigo

continente Gondwana. Mais especificamente, a separação dos atuais continentes americano e africano, que começou há cerca de 150 milhões de anos. Entre os dois continentes formaram-se, inicialmente, grandes depressões, que deram origem a grandes lagos. Lá foram depositadas, ao longo de milhões de anos, as rochas produtoras de petróleo do pré-sal. Com todos os rios dos continentes separados fluindo, um grande volume de matéria orgânica foi depositada. À medida que os continentes se distanciavam, os materiais orgânicos acumulados neste novo espaço foram sendo recobertos pelas águas do Oceano Atlântico, que formaram uma camada de sal que hoje chega a 2 quilômetros de espessura. Essa camada de sal foi depositada sobre a matéria orgânica acumulada, retendo-a por milhões de anos, até que os processos termoquímicos transformam a camada orgânica em hidrocarbonetos (petróleo e gás natural).” (PETROBRAS, 2019)

Ter um modelo que represente esta complexidade geológica é extremamente importante para dar suporte às novas técnicas de imageamento. Nossos esforços apontaram nessa direção e o modelo construído visa ajudar tanto a academia quanto a indústria nesse sentido. Desenvolvemos um modelo atual e complexo que exigirá migrações que consigam trabalhar bem com fortes contrastes laterais de velocidades. Além de representar desafios a técnica FWI (*Full waveform inversion*), pois contém camadas importantes, com alto contraste de velocidade e pouca espessura, exigindo uma inversão com altas frequências.

O trabalho possui duas partes: A criação do modelo representativo, doravante chamado modelo de Búzios e a reconstrução da imagem, utilizando migração RTM (*Reverse Time Migration*); e uma adaptação da técnica *layer cake* (MARSDEN, 1989) para a construção do modelo de velocidades. Está técnica foi apresentada há mais de 30 anos como uma maneira rápida e simples de se construir um modelo capaz de migrar rapidamente os dados adquiridos baseados em conhecimentos geológicos prévios, ou tratando a velocidade como uma função da profundidade. O método possui diversos limitadores, porém o autor contornava as limitações utilizando-se de informações de poços em áreas complexas. Com o avanço da sísmica de exploração para áreas com lâmina d’água cada vez mais profundas, escassez de poços, e estruturas de sal complexas, adaptações foram feitas para que o método tivesse relevância ainda hoje.

Hoje temos um melhor conhecimento das bacias do pré-sal brasileiro, então podemos, através de pequenas suposições, construir um modelo de velocidades capaz de satisfazer a condição de imagem da RTM, colapsar as energias, e converter o dado a profundidades muito próximas das reais, mesmo sem nenhum poço para resolver as estruturas mais complexas.

No capítulo 2, iremos tratar dos aspectos que envolvem o processamento sísmico, apresentando um fluxo básico para dados reais, marítimos, na bacia de Santos, desde o recebimento dos dados até sua imagem final. Nosso trabalho não utilizou de dados abertos

(pré-empilhamento), logo as etapas da seção 2.1 até a seção 2.8 não foram aplicadas neste estudo. Porém é importante frisar que sem o conhecimento sobre tais processos existe um risco, muito grande, na execução das etapas seguintes. O processamento de sinais sísmicos pré-migração, também chamado de processamento em tempo (pois o dado ainda não representa a profundidade do evento, apenas o tempo de registro), é parte fundamental na construção da imagem final.

No capítulo 3, apresentamos o contexto geológico no qual o modelo foi baseado, focando principalmente nas estruturas que compõem o sistema petrolífero.

No capítulo 4, vamos discorrer sobre a criação do modelo: em que geologia foi baseado; qual o fundamento para a existência de cada elemento; e como ele foi concebido, quais softwares utilizamos para atingir o objetivo e quais os pontos mais importantes do modelo para o teste do método. Trazemos também mais elementos sobre a técnica *layer cake* e como ela foi adaptada e aplicada a nossa necessidade.

No capítulo 5, apresentamos o estudo do caso. Discorreremos sobre a modelagem, sobre cada etapa do método, apresentamos os resultados, os pontos onde obtivemos sucesso e onde precisa-se de refinamento. Explicamos melhor os conceitos e, após o estudo, fazemos uma comparação entre os resultados atingidos e os esperados, apresentando inclusive o caminho necessário para minimizar os erros de aplicação.

No capítulo 6, as conclusões e recomendações de trabalhos futuros.

2 Revisão de Processamento Sísmico

Pode-se definir o processamento de dados sísmicos como o conjunto de processos empregados na obtenção das propriedades elásticas responsáveis pelos dados registrados (ROSA, 2010). Neste capítulo focaremos em apresentar as principais etapas do processamento sísmico aplicadas à um dado real de aquisição marinha.

A aquisição, consiste em coletar informações de subsuperfície através de uma emissão de ondas elásticas artificiais, que são transmitidas e refletidas nas camadas de subsuperfície, sendo registradas na superfície. O processamento sísmico engloba todas as etapas de tratamento do sinal adquirido, até que ele se torne útil ao trabalho de interpretação sísmica, que consiste em identificar os contrastes de impedância, bem marcados no sinal sísmico, e apresentar um modelo geológico de subsuperfície coerente com o dado sísmico e com a geologia esperada.

Grande parte do tempo dedicado ao processamento sísmico consiste em preparar o dado, retirando dele todas as informações que não provêm da reflexão da onda em superfície, e que serão prejudiciais na construção da imagem final (imagem migrada). A segunda etapa representa a construção do modelo de velocidades onde pequenos erros podem acarretar a não focalização de diversos refletores do dado.

Esta etapa se torna ainda mais importante considerando que o dado será migrado usando a técnica RTM ou outro método baseado na forma da onda, já que modelos “errados” não satisfarão a condição de imagem, portanto a imagem ficará turva, fraca, ou ausente. Nos projetos de pré-sal existem diversas estruturas que dificultam a construção do modelo e, não raro, acontecem em áreas de interesse. Essas estruturas podem ser:

- Complexidade estrutural do sal;
- Estratificação do sal;
- Presença de rochas vulcânicas ou plutônicas;
- *Overhangs*.

Muitas vezes um sal com fortes mergulhos ou grandes pacotes de soltos, dificulta o imageamento correto da subsuperfície, pois durante a aquisição muitas reflexões não conseguem ser captadas pelos receptores. A estratificação também gera um problema na construção do modelo de velocidades, pois, pela predominância de Halita (velocidade de onda P aproximada de 4500 m/s), considera-se normalmente uma velocidade constante para toda a camada de sal. Porém a presença de outros tipos de sal, com velocidades

bem variadas, deve ser considerada na construção, principalmente quando o alvo do levantamento está embaixo, ou muito próxima, desses corpos estratificados.

A presença de rochas vulcânicas ou plutônicas também representa um grande problema a ser resolvido na construção do modelo. Por possuírem uma velocidade mais alta que o sedimento que as envolve, vão gerar inúmeras reflexões que podem tanto mascarar o topo do sal, quanto a base. Outro problema relacionado a presença de vulcânicas está na sua espessura, muitas vezes menor que a resolução do método sísmico. Isso faz com que a imagem gerada pela rocha seja mais espessa que a real. Ao tentar modelar essa velocidade pela imagem pode-se colocar uma alta velocidade em uma espessura maior que a real, acarretando problemas de posicionamento.

Os *overhangs* são estruturas que combinam diversos desses problemas, e demandam particular atenção durante a etapa da construção do modelo. A Figura 1 exemplifica um *overhang*, onde parte do corpo de sal cobre um sedimento mais novo e com velocidade, normalmente, menor. Isso faz com que ocorra uma inversão de velocidades após a base do *overhang*, gerando uma base de sal sobre o sedimento do pós-sal. Nessa região, o sal só poderá ser modelado com ao menos dois topos e duas bases para um mesmo ponto em superfície (para uma mesma coordenada XY).

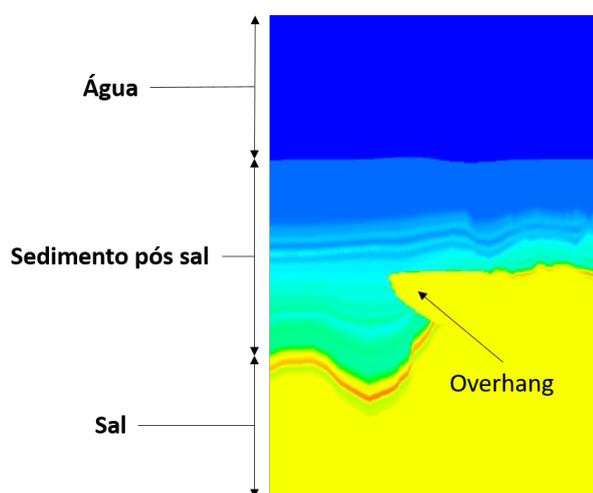


Figura 1 – Exemplo de *overhang*.

Colocar corretamente as velocidades de sal e sedimento em seus devidos lugares é de fundamental importância para o imageamento do pré-sal que está logo abaixo.

Uma parte que demanda bastante tempo de processamento é o pré-empilhamento, também chamado “em tempo”, e se refere a todo o processamento que o dado recebe antes da migração. Ele visa filtrar e organizar o dado da melhor maneira para que a migração forneça a melhor imagem da subsuperfície. Vamos abordar apenas algumas das principais etapas que contribuem para um bom dado *input* para a migração, sendo elas:

- Importação dos dados

- *Filtro corta baixa*
- Atenuação de ruídos diversos
 - Influência do segundo tiro
 - *Swell noise* e ruídos aleatórios
 - Ruídos lineares
 - *Seismic Interference - SI*
- Atenuação de assinatura da fonte e supressão do ruído de bolha
- Atenuação dos fantasmas de fonte e receptor
- Atenuação de múltiplas
- Correção das amplitudes de tiros e receptores
- Regularização do dado.

2.1 Importação dos dados

Os dados recebidos pela equipe de processamento estão, normalmente, em formato SEG-Y. Os dados são lidos e convertidos para um formato de trabalho interno, normalmente com maior capacidade de manipulação do cabeçalho do dado. Além disso é comum realizar rotações e translações nos dados, de maneira que os dados fiquem todos organizados em relação a um ponto original escolhido. Chama-se esse processo de conversão de coordenadas reais para locais. Todo o trabalho será realizado nessas coordenadas e convertido novamente para SEG-Y no final do projeto.

2.2 Filtro corta baixa

A aquisição do dado é realizada em uma determinada faixa de frequência, associada ao método e ao equipamento. Normalmente na aquisição de dados sísmicos tem-se uma frequência de aquisição de 0 a 250 Hz. Porém nas frequências extremamente baixas não se aproveita nenhuma informação, pois a razão sinal-ruído é muito baixa. A maioria dos equipamentos de gravação, seja geofone, hidrofone ou *node*, tem opções de frequência de corte associadas. Em uma aquisição terrestre, por exemplo, não se espera informação de qualidade abaixo de 5 ou 6 Hz. Na aquisição marinha pode-se esperar uma frequência de corte menor e, por conta da importância das baixas frequências na técnica da FWI, esforços tem sido realizados para se aproveitar ainda mais essas frequências. Dificilmente, na década de 90, se encontrariam dados processados com um corte de frequência menor que 4 Hz. Hoje já se encontram dados com aproveitamento a partir de 2 Hz. De todo

modo, se faz necessário a supressão de parte das baixas frequências. A Figura 2 mostra o resultado da atenuação de 2,5 Hz aplicada ao dado recebido do navio de aquisição. Nota-se uma grande energia suprimida entre a entrada e saída, porém observando o espectro de amplitude no canto superior direito nota-se que apenas frequências bem baixas foram removidas.

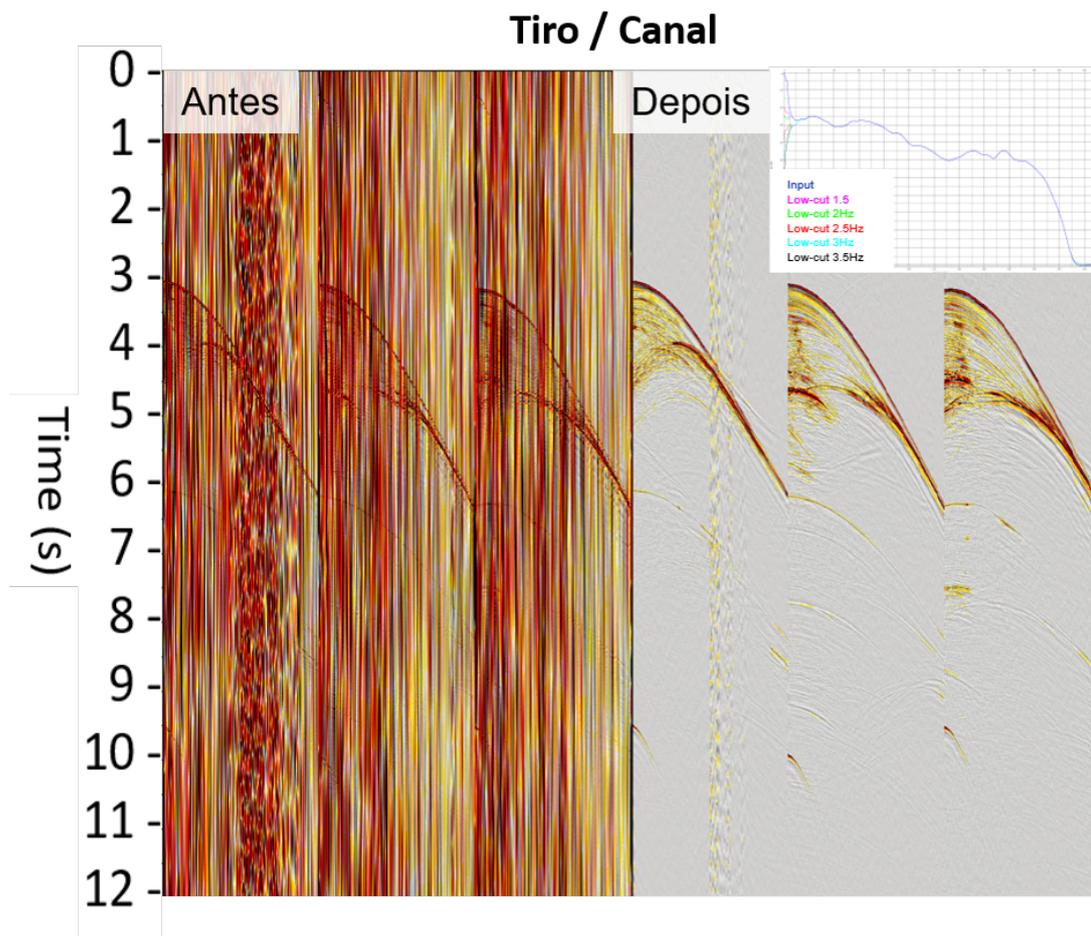


Figura 2 – Filtro corta baixa de 2,5 Hz aplicado ao dado de entrada - Família de Tiro Comum. O lado esquerdo representa o dado entregue pelo navio à equipe de processamento, contendo todas as faixas de frequências registradas. Do lado direito o mesmo dado após a aplicação do filtro. No canto superior direito está o espectro de amplitudes com diversas frequências escolhidas para o filtro corta baixa. Imagem cedida pela CGG.

2.3 Atenuação de ruídos diversos

Esta etapa visa atenuar no dado sísmico aquilo que foi adquirido sem ser fruto da interação do pulso sísmico da fonte com a subsuperfície, para o par tiro-receptor programado. A imensa maioria desses ruídos ocorrem na superfície d'água e podem ser gerados naturalmente, como as ondas do mar, ou gotas de chuvas, mas podem também ter

origem em equipamentos da própria aquisição, embarcações próximas, ou até de grandes equipamentos operantes na região, como por exemplo, sondas de perfuração.

2.3.1 Atenuação da influência do segundo tiro

As técnicas de aquisição passaram por mudanças desde a crise do setor em 2014. Particularmente este setor foi bastante afetado, por representar a parte mais custosa na cadeia do dado sísmico. Muitas maneiras foram pensadas para, juntamente com a qualidade, otimizar o custo, tornando os projetos mais viáveis. Uma técnica que tem sido aplicada pelas empresas de aquisição de dados marinhos tradicionais, com uso de *streamers*, é a redução do tempo que o barco navega durante a aquisição. Uma das maneiras é a aquisição com velocidade constante, porém superior ao necessário para que o barco possa atingir o próximo ponto de tiro antes que o registro anterior tenha sido concluído. Isso leva a uma presença de informação do tiro subsequente no registro atual.

Obviamente que não desejamos ter reflexões que não são oriundas do tiro atual, então, se calcula a velocidade da embarcação para que apenas parte da onda direta possa aparecer no dado. Como a equipe de processamento tem controle do tempo de tiro e da velocidade do barco de aquisição, sabe-se exatamente quando e em quais registros encontrarão esse tipo de “ruído”, e o trabalho de atenuação será facilitado como mostra a Figura3.

2.3.2 *Swell noise* e ruídos aleatórios

O *Swell noise* pode ser definido como um ruído marinho devido a mudanças de longo período na superfície do oceano, que alteram a pressão hidrostática no *streamer*. Os ruídos aleatórios são energias não correlacionadas entre os receptores. Em aquisições com *streamers flats*, ou seja, com a mesma profundidade em toda a sua extensão, esses ruídos podem apresentar ainda maior influência. A Figura4 mostra a atenuação deste tipo de ruído. O dado de entrada não apresentava grande presença desse ruído, mas a sua atenuação é importante pois as etapas seguintes podem dar uma amplificada nesse tipo de ruído. Durante a aquisição varia bastante a incidência de *swell noise* uma vez que a maré e o vento tem bastante influência nas ondas.

2.3.3 Ruídos lineares

Por serem energias que viajam na superfície da água, onde a velocidade pode ser considerada constante, esses ruídos se apresentam no dado de forma linear e pode-se facilmente calcular a sua velocidade. Diversas são as maneiras de se remover tais ruídos, normalmente usa-se o domínio F-K, ou τ - p , onde consegue-se separar eventos pela sua

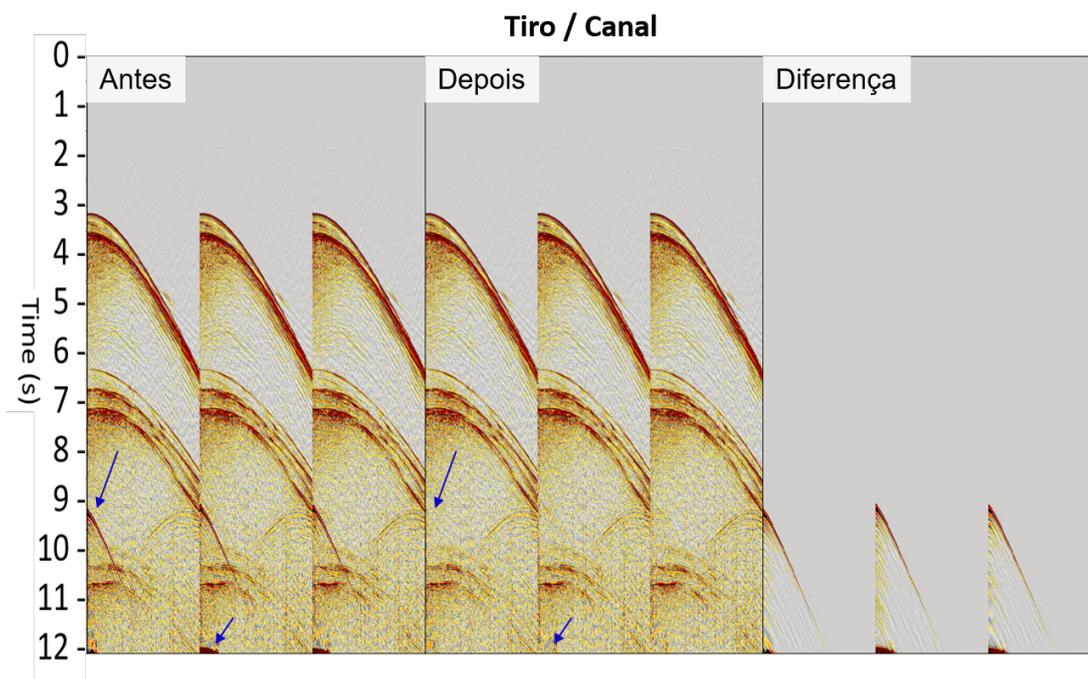


Figura 3 – Atenuação da influência do tiro subsequente - Família de Tiro Comum. O grupo mais a esquerda mostra 3 tiros contendo informação do tiro subsequente, as setas azuis indicam esta informação. Note que a inclinação do evento não é condizente com a posição em tempo que se encontra. No meio, temos os mesmos 3 tiros após a supressão desse “ruído”. No grupo da direita temos a diferença entre os tiros antes e após a atenuação. Imagem cedida pela CGG.

variação de tempo entre os receptores, para um tiro ordenado como tiro-receptor, ou no domínio CMP (*common mid point*).

As fontes dos ruídos podem ser várias, porém na maioria das vezes são geradas pelo próprio equipamento de aquisição. Boias acopladas aos *streamers*, a frente do barco cortando a água, entre outros. A Figura 5 apresenta o resultado da atenuação deste tipo de ruído.

2.3.4 *Seismic Interference - SI*

A *Seismic Interference*, ou Interferência Sísmica, ou simplesmente “*SI*”, trata-se de um ruído causado por uma outra aquisição sísmica ocorrendo simultaneamente. Isso é bastante comum em bacias com intensa campanha sísmica, como a Bacia de Santos. São extremamente complicados de serem atenuados. Podem atingir os receptores por diversas direções. Demandam bastante cuidado e, por vezes, precisam ser tratados como uma combinação de todos os ruídos mencionados anteriormente como mostra a Figura 6.

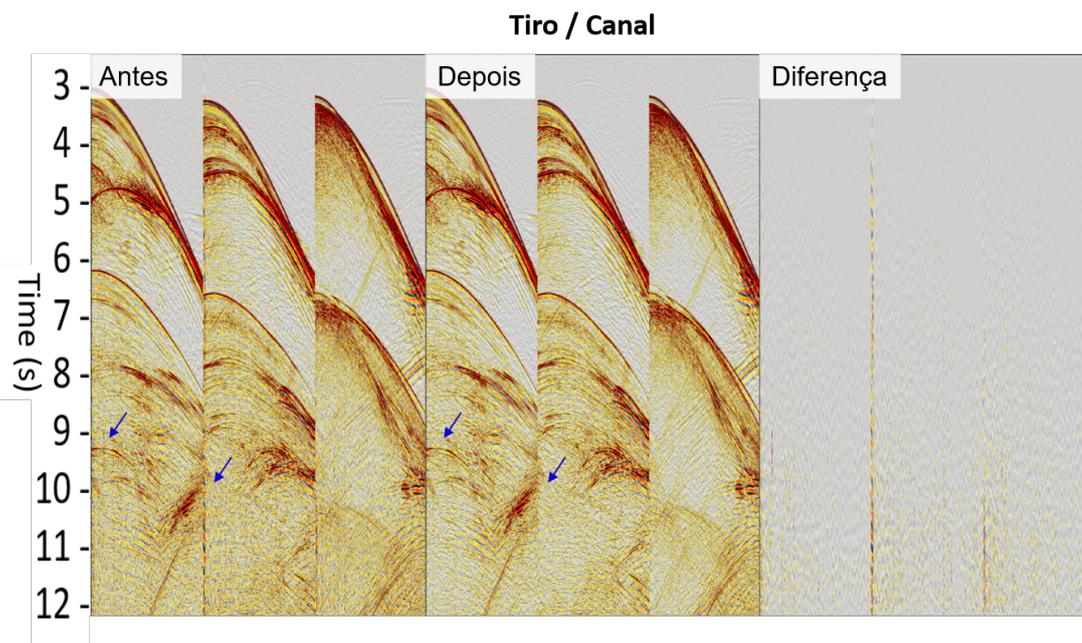


Figura 4 – Atenuação de ruídos ambientais ou aleatórios - Família de Tiro Comum. Note no grupo mais a esquerda a presença de ruídos de baixa frequência, com amplitude elevada, que se mantém praticamente constantes em todo o tempo para um mesmo traço, indicados pelas setas azuis. No grupo do centro os ruídos já foram atenuados e a diferença entre antes e após a supressão está no grupo mais a direita. Imagem cedida pela CGG.

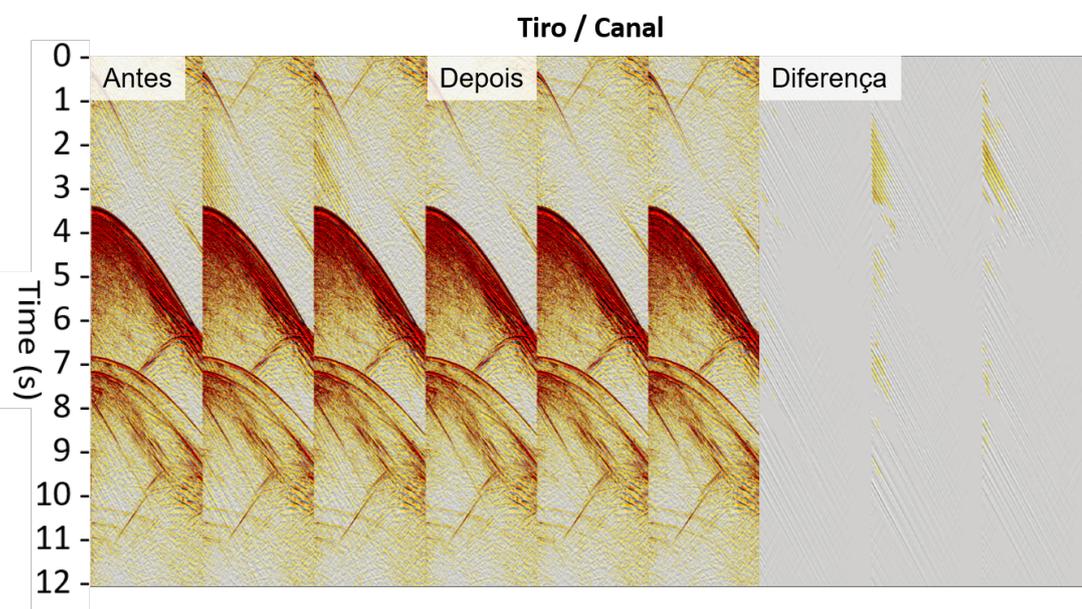


Figura 5 – Atenuação de ruídos lineares - Família de Tiro Comum. No grupo de 3 tiros mais a esquerda temos uma forte presença de um ruído linear, normalmente com tempo inferior nos traços de menor *offset*, aumentando o tempo de registro para os de maior *offset*. O grupo do meio apresenta o dado após a atenuação e o da direita a diferença entre os dois. Imagem cedida pela CGG.

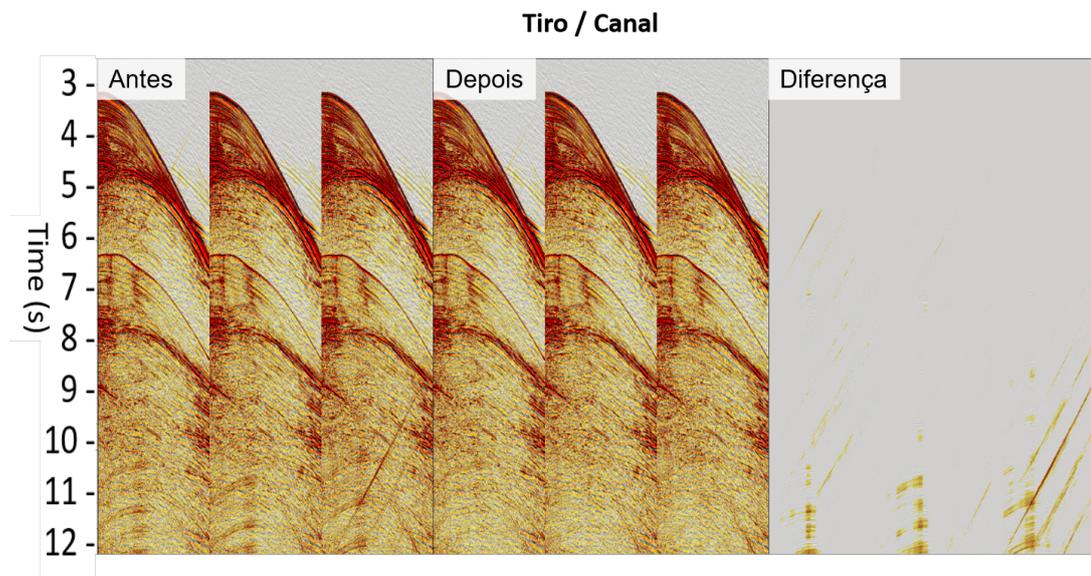


Figura 6 – Atenuação de ruídos oriundos de outra aquisição sísmica próxima - Família de Tiro Comum. Perceba no grupo a esquerda a presença de eventos que tem mergulho oposto ao esperado, além de ruídos mais lineares. No grupo do centro esse ruído foi atenuado e a diferença entre antes e depois do ruído encontra-se no grupo a direita. Imagem cedida pela CGG.

2.4 Atenuação de assinatura da fonte e supressão do ruído de bolha

O objetivo da aquisição é gerar um *spike*, uma energia máxima em um tempo infinitesimal. O que, obviamente, não ocorre. A fonte, explosiva em terra ou por expansão do ar na água, gera uma grande energia em um pequeno intervalo de tempo. Isso requerer uma correção da energia da fonte, para que possamos, através de uma deconvolução, aumentar a resolução do nosso dado, tornando a energia gerada mais semelhante ao objetivo inicial.

No entanto, ainda existe outro agravante. A área ao redor da fonte, ao ser expandida repentinamente, gera uma contração no intuito de retornar ao seu estágio original e equilibrar novamente a energia, porém, durante essa contração, ocorre uma nova expansão para controlar essa contração, o que gera o que chamamos nas aquisições marinhas de efeito de bolha. Isso faz com que novas frentes de energia sejam geradas, reduzindo ainda mais nossa resolução do dado. É necessário gerar um filtro que transforme a nossa fonte o mais próximo possível de um *spike* e aplicar ao dado, para atenuar esses efeitos e, assim, aumentar a resolução do dado sísmico.

2.5 Atenuação dos fantasmas de fonte e receptor

Outro problema são os fantasmas de fonte e receptor. A energia gerada deveria ser enviada exclusivamente para baixo, encontrar os contrastes de impedância na subsuperfície

e ser registrada pelos receptores. O que ocorre porém é que a energia também viaja pra cima, encontra uma superfície de impedância quase máxima, e reflete, gerando o primeiro fantasma, o da fonte. Essa energia tem praticamente o mesmo valor que a energia da fonte, porém com polaridade invertida. O mesmo ocorre nos receptores, além da energia lida diretamente, uma reflexão, novamente na lâmina d'água, é registrada no receptor, novamente com polaridade invertida e energia similar. Um outro tipo de fantasma ocorre quando a energia reflete 2 vezes na lâmina d'água e é registrada. Essa com a mesma polaridade.

Ocorre, então, que para cada evento teremos 4 registros: o que queremos, o fantasma da fonte, o fantasma do receptor e o fantasma fonte-receptor. Felizmente temos controle das profundidades, tanto da fonte quanto dos receptores, o que nos permite calcular a diferença de tempo esperado da chegada de cada uma dessas energias, e atenuá-las com deconvolução preditiva, ou alguma outra técnica. As figuras 7 e 8 mostram o controle de qualidade mais comum desta etapa, onde a observação da primeira reflexão e da autocorrelação são extremamente importantes.

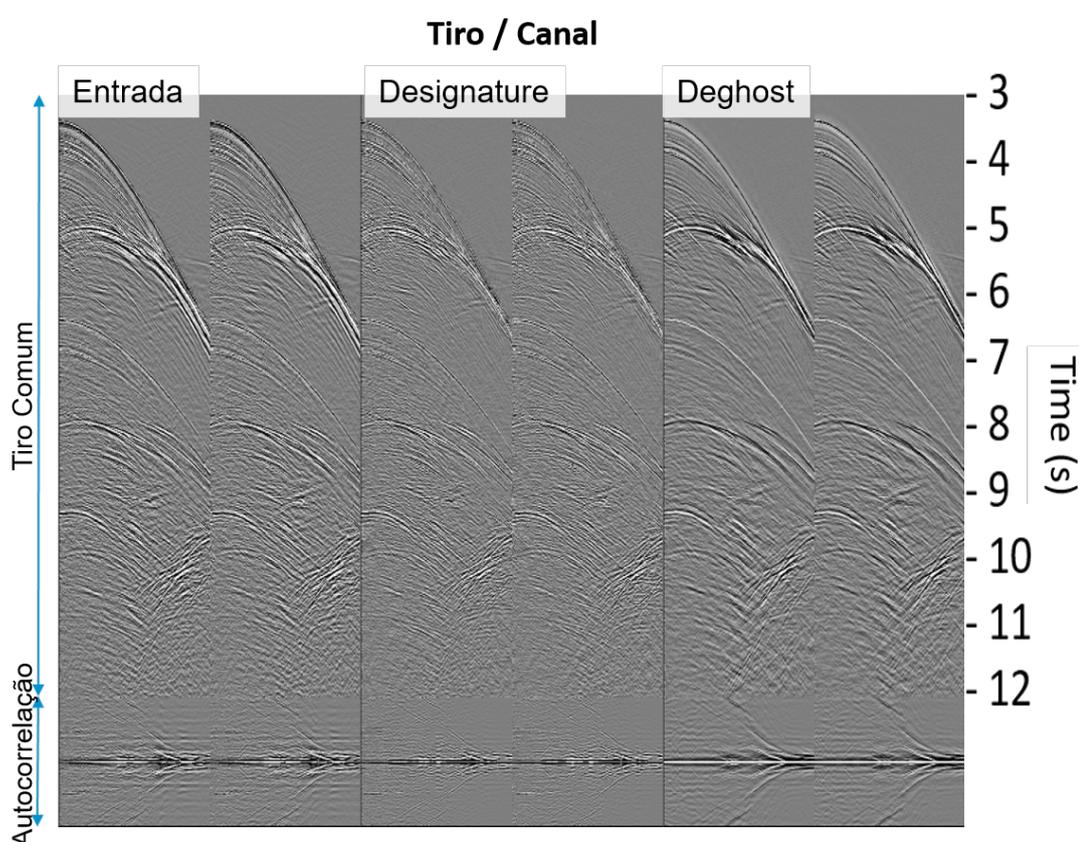


Figura 7 – O grupo da esquerda contém ainda todos os ruídos, sendo nossa entrada no processo. O grupo do meio, chamado de *designature*, contém o dado após a supressão da assinatura da fonte e do ruído de bolha. O grupo da direita contém o dado após a atenuação adicional dos fantasmas de fonte e receptor - Família de Tiro Comum. Imagem cedida pela CGG.

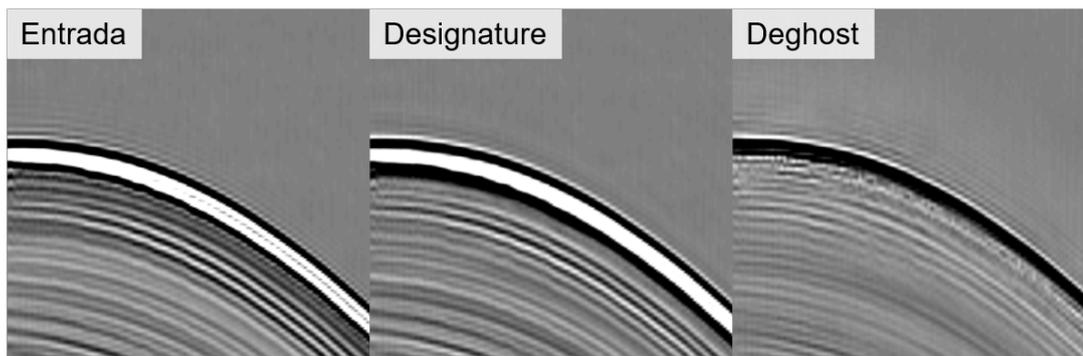


Figura 8 – Apresenta a mesma imagem da Figura7, porém com um *zoom* (foco na primeira reflexão). Note que a supressão da assinatura e do ruído de bolha elimina uma baixa frequência do dado, além de tornar mais nítido o primeiro evento, composto pela reflexão e pelos 3 fantasmas. A Figurada direita apresenta como a primeira reflexão se torna mais nítida e sem a presença dos fantasmas. Isso deixa o dado mais limpo e fácil de ser interpretado, após o empilhamento. - Família de Tiro Comum. Imagem cedida pela CGG.

2.6 Atenuação de múltiplas

As múltiplas são energias geradas pela reflexão no sentido cima-baixo. Durante a aquisição esperamos registrar energias que viajam no sentido descendente, e após refletir viajam no sentido ascendente, sendo assim registradas em superfície. Porém ocorrem também reflexões dessa energia que viajava no sentido ascendente, gerando uma nova energia, no mesmo sentido da fonte, que novamente será refletida e registrada na superfície. Chama-se essa energia de múltipla.

As múltiplas podem ser geradas pela reflexão na superfície da água, o que chama-se de múltiplas de superfície (ou *Surface Related Multiple - SRM*), ou ocorrerem dentro das camadas inferiores, que chama-se de múltiplas internas (*Internal Bed Multiples*) ou, por vezes, reverberações.

A Figura9 apresenta uma supressão das múltiplas relacionadas a superfície, para uma família de receptor comum. Essa etapa é muito delicada, pois muitas vezes o tempo da múltipla coincide com reflexões importantes para o objetivo da aquisição sísmica. Esta etapa demanda um tempo muito longo durante o processamento dos dados, sendo exigido um controle de qualidade rigoroso, comparando a diferença com o dado modelado esperado para as múltiplas.

2.7 Correção das amplitudes de tiros e receptores

Os tiros são programados para gerar a mesma energia sempre, realizando assim um levantamento onde a única diferença de energia registrada seja causada pela geologia de subsuperfície. O mesmo ocorre com os receptores, que são todos iguais, com as mesmas

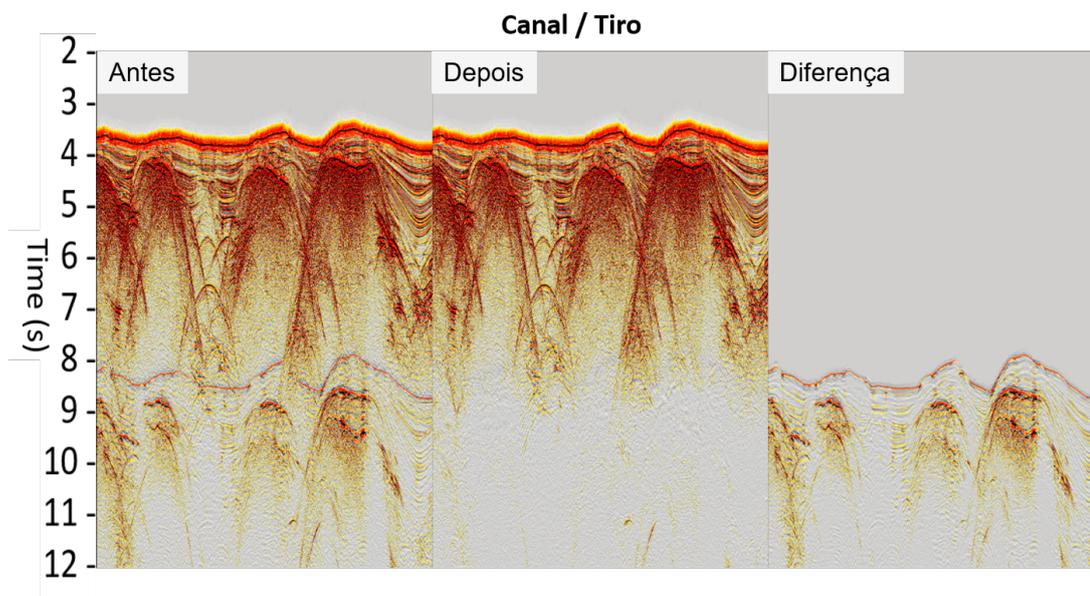


Figura 9 – Atenuação de múltiplas relacionadas a superfície da água - Família de receptor Comum. Note no grupo a esquerda uma imagem muito semelhante à reflexão do fundo do mar, com aproximadamente o dobro do tempo do evento, seguido de diversos eventos logo abaixo, também muito similares aos eventos acima. Esses eventos, tratados como ruído nesse processo, são atenuados no grupo central, e a diferença entre os dois é apresentada no grupo a direita. Imagem cedida pela CGG.

especificações.

No entanto, na prática, pequenas variações ocorrem o tempo todo, tanto entre os tiros quanto em receptores. Isso se dá devido a inúmeros fatores, desde condições do equipamento, do ambiente, a pequenas variações elétricas. Para compensar essa diferença de energia e colocar todo o levantamento no mesmo nível de amplitude base, realiza-se a correção de amplitude, tanto tiro a tiro, quanto entre os receptores.

Uma maneira simples de realizar essa correção é calcular pequenos escalares para cada linha de tiro e para cada linha de receptores, aplicando pequenas correções e levando todos a um valor base, atenuando assim variações na amplitude que não tem sua origem na subsuperfície.

2.8 Regularização do dado

Antes da aquisição sísmica, durante o planejamento, estimam-se todos os pontos onde espera-se o registro. Cria-se uma malha regular que atende às necessidades do estudo da formação de interesse. Porém durante o processo de aquisição os registros, por vezes, não se encontram exatamente no ponto programado. Ao analisar o dado durante todo o processamento em tempo, anterior a essa etapa, escolhe-se arranjos de dados onde

esta irregularidade espacial não traz nenhuma implicação séria, como Tiro comum, CDP (*Common Depth Point*), receptor comum, entre outras. Contudo aproximando-se da etapa de migração, os dados passam a ser visualizados em uma organização geográfica, como coordenadas locais. Nesse ponto as irregularidades do dado começam a ser notadas. A falta de informação para um ponto (ou cela) geográfico gera um espaço em branco, vazio, no dado como mostram as figuras 10 e 11.

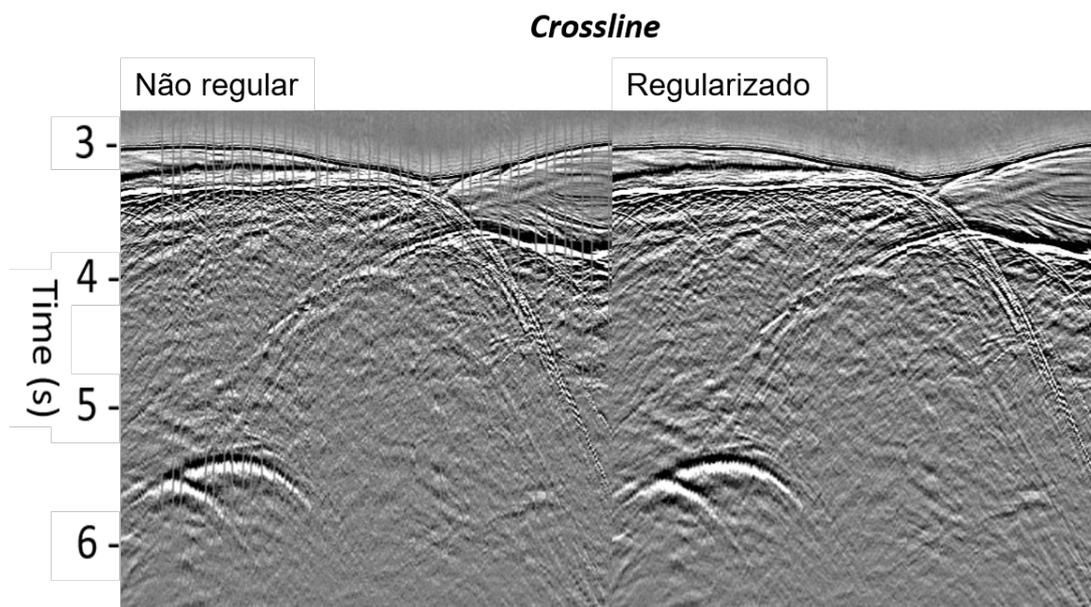


Figura 10 – Regularização do dado - Família de receptor Comum. Note no grupo da esquerda que existem traços cinzas (sem nenhuma informação), que atrapalham a visualização do dado. No grupo da direita esses traços vazios foram preenchidos pelo processo da regularização. Imagem cedida pela CGG.

A depender do algoritmo de migração que será utilizado, o dado precisará ser completamente regularizado, ou seja, deverá haver informação em todos os pontos, pré estabelecidos. As aquisições modernas tem trabalhado para que haja uma grande redundância de informações por cela em subsuperfície. O trabalho da regularização é tomar essas informações redundantes e escolher (ou empilhar) a melhor delas para cada cela, além disso, caso necessário, deslocar essa informação ao centro exato da cela, gerando uma malha de informações regular, onde cada ponto agora tem apenas um traço, perfeitamente centralizado, e que representa melhor a subsuperfície.

2.9 Migração sísmica

A migração é um processo inverso aplicado aos dados sísmicos antes ou após o empilhamento. O objetivo é transformar a imagem adquirida em tempo, composta por inúmeras difrações, em uma imagem compatível com a geologia de subsuperfície, respeitando toda sua complexidade. Durante muito tempo os métodos de migração tinham

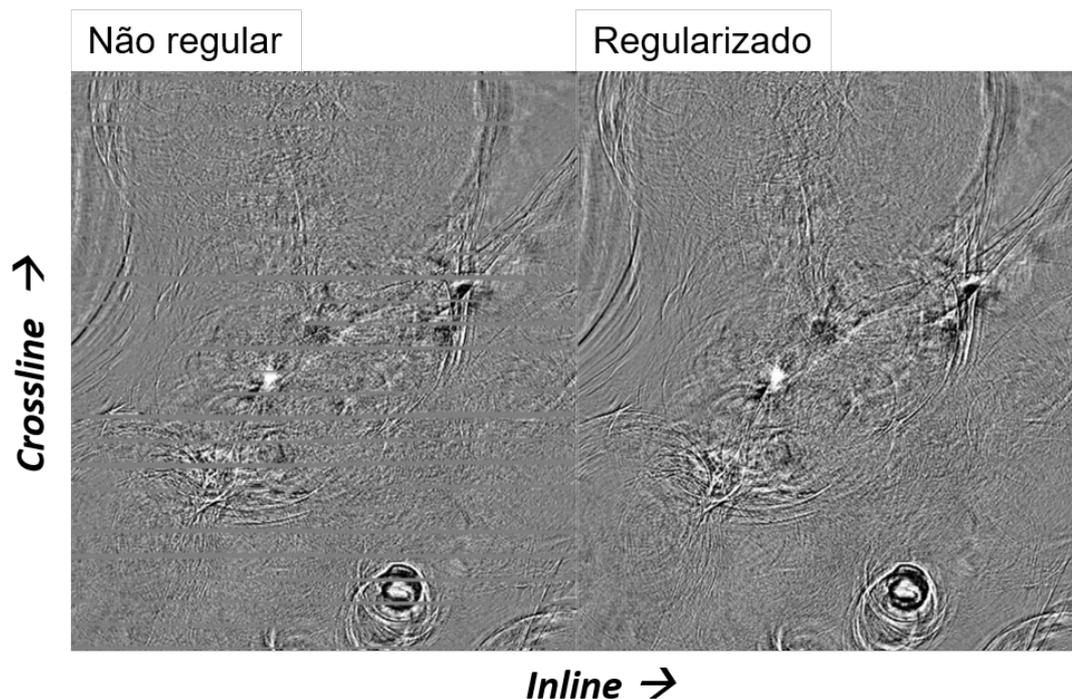


Figura 11 – Regularização do dado - *Time Slice*. Semelhantemente ao que ocorre na Figura 10, os traços antes vazios do grupo da esquerda foram preenchidos no grupo da direita. Imagem cedida pela CGG.

por objetivo apenas colapsar as difrações, tornando a imagem interpretável. Para tanto se faz necessário um modelo de velocidades, para se calcular a abertura da difração. Modelos simples e suaves, muitas vezes sem nenhuma variação lateral de velocidades, foram utilizados. Com o tempo passou-se a considerar os mergulhos das camadas, as variações laterais de velocidade, e melhor posicionar as energias, tornando a técnica mais eficaz no tratamento de dados adquiridos onde a geologia é mais complexa do que camadas plano paralelas, ou com mergulho suave.

A migração está baseada em duas etapas: a primeira consiste em obter um operador de modelagem para fazer a extrapolação do campo de ondas, permitindo propagá-lo ou depropagá-lo através do tempo ou espaço; e a segunda etapa é a aplicação de uma condição de imagem que permite ao campo extrapolado, identificar onde existem refletores e resultar na focalização e formação da imagem sísmica. Um dos métodos de migração que melhor sucedem nessa tarefa é a Migração Reversa no Tempo (RTM) (LIMA, 2017).

Há mais de setenta anos, a migração sísmica se tornou o foco de importantes pesquisas científicas. Em 1954, Hagerdoorn introduziu o uso das curvas padrões de frentes de onda e de difrações, que possibilitou a realização da migração manual dos dados sísmicos já interpretados. Anos depois, Jon Claerbout e seus colaboradores da Universidade de Stanford desenvolveram um método utilizando operadores de diferenças finitas (ALVES, 2015).

“Diversos outros métodos surgiram, entre os quais podemos citar a migração utilizando a integral de Kirchhoff (French, 1975 e Schneider, 1978), a migração no domínio frequência-comprimento de ondas, domínio F-K (Stolt, 1978) e a migração reversa no tempo (RTM) (Loewenthal and Mufti, 1983 e Baysal et al, 1983).” (ALVES, 2015)

A migração reversa no tempo irá construir a imagem para cada tiro registrado depropagando toda a energia registrada nos receptores que, de acordo com a modelagem, registraram a energia a partir daquele ponto de tiro. A condição de imagem do método está na correlação cruzada entre o campo da fonte, calculado, e o campo dos receptores, registrado e depropagado. Para tanto é necessário resolver a equação completa da onda acústica, algo que algoritmos anteriores evitavam, pelo alto custo computacional.

2.9.1 Equação da onda

Para migrar o dado pelo método reverso no tempo, se faz necessário resolver a equação da onda. Existem técnicas que calculam o campo propagado através de ondas planas e de ondas esféricas, podendo ser a equação completa da onda ou a equação bidimensional que ignora variações do campo de pressão na direção y .

A equação da onda acústica com densidade constante é uma equação diferencial parcial linear de segunda ordem que possui dois campos contínuos no espaço e no tempo: os campos de pressão e da velocidade da partícula. O campo de pressão é representado por um campo escalar, ao passo que o campo da velocidade da partícula é representado por um campo vetorial. Para obtermos a equação da onda, recorreremos às leis de Newton e de Hooke, as quais relacionam a pressão e a velocidade.

Sendo assim, pela Lei de Newton, temos que:

$$\rho \frac{\partial \vec{w}}{\partial t} = -\nabla P, \quad (2.1)$$

onde ρ é a densidade do meio, \vec{w} é velocidade da partícula e P a pressão.

A derivada da pressão em relação ao tempo, segundo a Lei de Hooke, é dada por:

$$\frac{\partial P}{\partial t} = -K \nabla \cdot \vec{w}, \quad (2.2)$$

onde K é módulo de Bulk.

Supondo a densidade constante podemos aplicar a divergência na equação 2.1. Deste modo, obtemos:

$$\nabla \cdot \frac{\partial \vec{w}}{\partial t} = -\frac{1}{\rho} \nabla^2 P. \quad (2.3)$$

Aplicando a derivada em relação ao tempo na equação 2.2 e considerando agora o módulo de Bulk constante, temos:

$$\frac{\partial^2 P}{\partial t^2} = -K \nabla \cdot \frac{\partial \vec{w}}{\partial t}. \quad (2.4)$$

Substituindo agora a equação 2.3 na 2.4, obtemos a equação da onda para o campo de pressão:

$$\nabla^2 P = \frac{\rho}{K} \frac{\partial^2 P}{\partial t^2}. \quad (2.5)$$

Colocando a velocidade da onda acústica, considerando o cisalhamento igual a zero, como $c^2 = K/\rho$, reescrevemos a equação 2.5:

$$\nabla^2 P = \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 P}{\partial t^2}. \quad (2.6)$$

Fazendo as mesmas operações, porém derivando em função do tempo a lei de Newton (Equação 2.1) e calculando o gradiente da Lei de Hooke (Equação 2.2), chegamos a:

$$\rho \frac{\partial^2 \vec{w}}{\partial t^2} = -\nabla \frac{\partial P}{\partial t} \quad (2.7)$$

e

$$\nabla \frac{\partial P}{\partial t} = -K \nabla^2 \cdot \vec{w}, \quad (2.8)$$

logo:

$$\rho \frac{\partial^2 \vec{w}}{\partial t^2} = K \nabla^2 \cdot \vec{w}. \quad (2.9)$$

Escrevendo em função da velocidade da onda, temos então a equação da onda para o campo de velocidade da partícula:

$$\frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 \vec{w}}{\partial t^2} = \nabla^2 \cdot \vec{w}. \quad (2.10)$$

Tomando a equação 2.6 e colocando P como $P(x, y, z)$ obtemos:

$$\frac{\partial^2 P}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 P}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 P}{\partial z^2} = \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 P}{\partial t^2}, \quad (2.11)$$

que é a equação completa da onda para o campo de pressão.

2.9.2 Migração pré-empilhamento

No passado, com menos capacidade computacional, a migração era feita, preferencialmente, pós-empilhamento. Entre as vantagens estão principalmente a redução do nível de ruído em relação ao sinal e a diminuição do tamanho do dado, em termos de espaço em disco. Porém essa técnica não apresenta uma melhor resolução sísmica, além de não ser adequada para a RTM, pois uma vez empilhado o dado, perde-se a noção de campo depropagado, pois não há mais relação entre energia e receptores individualmente.

Para migrações Kirchhoff os dados pré-empilhados são organizados em CMPs, ou *common mid point*, que seguem a mesma ideia dos antigos CDPs, mas são conceitualmente mais adequados, uma vez que as camadas não são necessariamente plano paralelas. Para a migração RTM normalmente os dados são organizados em famílias de tiro comum.

2.9.3 Migração Reversa no Tempo (RTM)

Os problemas envolvidos na seleção de um algoritmo incluem principalmente: preservação da amplitude, variação da velocidade lateral, resposta ao mergulho, ruído de algoritmo, fidelidade ao campo de velocidade, *multipathing*; e propagação bidirecional (JONES, 2011).

Por considerar a equação completa da onda, a RTM é uma ferramenta precisa de imageamento sísmico em profundidade, a sua condição de imagem não encontra limitações laterais de velocidades nem limitações relacionadas a mergulhos de camadas (BAYSAL; KOSLOFF; SHERWOOD, 1983). Caso o modelo de velocidades esteja correto, a condição de imagem será satisfeita e a subsuperfície corretamente imageada.

A RTM realiza a migração por meio da depropagação no tempo do campo de ondas registrado. A condição de imagem é satisfeita quando o campo propagado pela fonte é coincidente em tempo e espaço com o campo depropagado (tempo reverso) a partir dos receptores. Os dados registrados nos receptores são injetados como fonte na retropropagação a partir do tempo máximo de registro até o tempo zero, enquanto a energia calculada a partir da fonte, resolvendo-se a equação completa da onda, em um modelo de velocidades representativo do dado, corre do tempo inicial ao tempo máximo de registro. O encontro dessas frentes de onda satisfazem a condição e constroem a imagem.

A utilização da solução completa da equação da onda é uma das principais vantagens do método RTM em relação aos demais, nos quais esta equação é de alguma maneira desacoplada para os termos de campo ascendente e descendente, e apenas um deles é utilizado. Na RTM, o campo de onda da fonte pode ser extrapolado resolvendo-se a equação da onda pelos métodos de diferenças finitas (DF), pseudo-espectral (PS) ou por expansão rápida (*Rapid Expansion Method* - REM) (PESTANA; STOFFA, 2010).

A acurácia do modelo de velocidades em questão será o ponto mais importante

para que a imagem reconstruída represente melhor a geologia que gerou as reflexões e refrações registradas nos receptores. Outro ponto que deve ser tratado com cuidado é a abertura da migração.

O método em questão é conhecido desde os anos 80, mas somente muitos anos depois os computadores foram capazes de processar os algoritmos. Um ponto que ainda é considerado muito custoso está ligado às frequências desta migração. Enquanto a migração Kirchhoff pode, a um custo baixo, migrar todas as frequências contidas no dado sísmico, a RTM tem, comumente, se limitado a 45 Hz devido ao alto custo computacional. Isto para o pré-sal é adequado, tendo em vista que a absorção da energia durante os quilômetros de geologia acima, não tem permitido o registro de frequências superiores a estas, oriundas de reflexão em tais camadas (OLIVEIRA, 2014).

Para resolver a equação da onda que modela o campo propagado, temos a equação já apresentada:

$$c^2 \nabla^2 P = \frac{\partial^2 P}{\partial t^2}, \quad (2.12)$$

normalmente resolvida pelo método das diferenças finitas.

A migração reversa no tempo, por se tratar de um algoritmo pesado, normalmente não é aplicada a todas as frequências, sendo comumente aplicada em três bandas, 25 Hz, 35 Hz, ou 40 Hz. Em comparação com a migração Kirchhoff que migra toda a faixa de frequência do *input*, representa uma perda de resolução significativa, principalmente em áreas menos profundas do dado, porém para áreas do pré-sal, isso não representa um grande problema, pois não espera-se informação real acima de 30 Hz no dado adquirido.

2.10 Construção do modelo de velocidades

Esta é uma etapa considerada crucial para o processamento sísmico. A quantidade de trabalhos sendo publicados sobre FWI demonstra o tamanho do interesse, tanto acadêmico quanto profissional, nessa área. O objetivo dessa técnica é melhorar a qualidade da imagem final através da correção do modelo de velocidades. Associada a estas técnicas, existe um esforço conjunto de geocientistas para representar, através da interpretação sísmica, o modelo geológico deposicional.

A construção do modelo de velocidades começa pela escolha do método que será aplicado. Como pontuado por Eichkitz e Amtmann (2010) existem diversos métodos. Nesta etapa deve se escolher o mais adequado à: quantidade de informações à priori sobre a área de estudo, tempo disponível e o custo associado. Normalmente num projeto em uma área conhecida, um reprocessamento, ou uma sísmica nova em um campo maduro, temos diversas informações de poços para auxiliar esta construção. Nenhuma informação é

mais precisa que a do poço (quando corretamente adquirida). Pode-se ter um modelo de velocidades pré-existente, formado pela extrapolação da informação de poços utilizando a sísmica como direção de deriva, por exemplo.

Esse modelo pré-existente será capaz de migrar o dado com alguma acurácia, e pode-se fazer uso de técnicas desenvolvidas após a criação deste modelo, para melhor ajustar aos novos dados. Utiliza-se uma FWI ou uma nova interpretação, por exemplo. Soma-se informações de poços perfurados recentemente, caso disponível.

Porém podemos estar diante de um projeto em uma área nova, afastada de poços, com pouca, ou nenhuma informação prévia. Neste caso o método escolhido para este projeto será bastante adequado, após algumas adaptações. A ideia inicial apresentada por Marsden (1989) considerava a ideia de várias camadas com velocidades constantes, que seriam corrigidas por informações de poços em áreas complexas. Como estamos em novas fronteiras, com pouco, ou nenhum poço, precisamos de uma nova forma de atualizar essas velocidades. O que tem se feito ultimamente é uma técnica conhecida como *flood*, que nada mais é que uma adaptação à geologia do golfo do México (SIDDQUI et al., 2005) e também da costa atlântica brasileira (HUANG et al., 2009).

Golfo do México	Bacia de Santos
Interpretação do fundo do mar	Interpretação do fundo do mar
Tomografia no sedimento	Tomografia no sedimento
Interpretação do topo do sal	Interpretação do topo do sal
<i>Salt flood</i>	<i>Salt flood</i>
	Tomografia intra-sal
Interpretação na base do sal	Interpretação na base do sal
Inclusão da velocidade do sub-sal	Inclusão da velocidade do pré-sal

Figura 12 – Tabela mostrando o fluxo aplicado para a construção do modelo de velocidades nas bacias de Santos e do golfo do México - traduzido de Huang et al. (2009).

A Figura12 apresenta o fluxo aplicado pela indústria no ano de 2009. Com o avanço da técnica, hoje pode-se acrescentar a FWI após a tomografia.

2.10.1 Interpretação sísmica

Não é possível realizar uma boa construção do modelo de velocidades sem uma boa interpretação sísmica. Os mergulhos das camadas, o topo do sal, estruturas intrusivas, falhas, eventos erosivos, entre outros são de extrema importância para que o modelo de velocidades não se afaste da geologia de subsuperfície. A interpretação nada mais faz do que colocar no dado sísmico todo o modelo geológico que já se encontra na mente do

intérprete. Ela é a interface entre o conhecimento geológico da área estudada e a ciência por trás do método sísmico. Sem conhecimento geológico prévio será muito difícil para um profissional interpretar uma linha sísmica, provavelmente ele seguirá um padrão de uma extremidade a outra e conectará eventos com diferenças de milhões de anos de deposição entre si, como se fossem o mesmo.

Assim também sem o conhecimento do método sísmico, de suas limitações e de suas resoluções (Figura 13), o intérprete inferirá sobre o modelo elementos que não são capazes de serem resolvidos com sísmica de superfície, apresentando imagens “coloridas”, porém distantes da realidade. É necessário que o intérprete tenha, além da habilidade de identificar os contrastes, a capacidade de encaixar o modelo geológico no dado sísmico. Essa tarefa é facilitada caso haja presença de dados de perfis de poços na área, onde por vezes, a interpretação passa a ser um guia em três dimensões para a correlação entre os poços. E, após a correlação, uma extrapolação coerente com o dado apresentado.

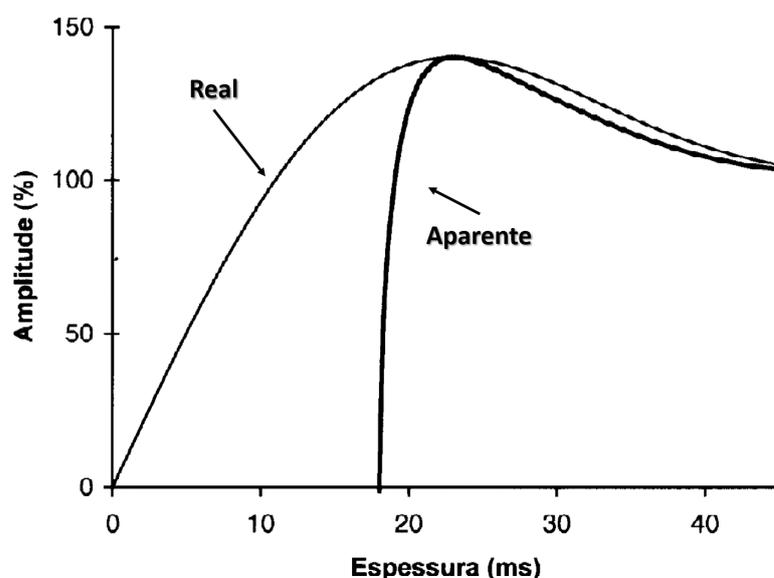


Figura 13 – Gráfico mostrando a relação entre espessura real e aparente (ROSA, 2010). Note que abaixo da resolução sísmica, qualquer evento que tenha um bom contraste de impedância será visualizado com a espessura da resolução mínima.

Interpretação sísmica é um termo abrangente que envolve desde a interpretação propriamente dita até os conceitos que permitem relacionar atributos sísmicos às propriedades das rochas e dos fluidos, passando por uma análise crítica da capacidade de resolução do método (ROSA, 2010).

O dado sísmico acústico, como é o caso da modelagem do presente trabalho, registra em superfície as reflexões da energia provenientes da variação da impedância da onda compressional entre duas camadas. Essa energia, quando o contraste é considerável, é facilmente rastreável. A primeira ideia de interpretação consiste em ligar lateralmente os valores de contraste semelhantes marcando no dado a separação entre duas camadas.

Numa ideia mais abrangente, a interpretação sísmica vai utilizar de diversos contrastes entre camadas para apresentar um modelo geológico de subsuperfície que seja condizente com o esperado na bacia e, ao mesmo tempo, coerente com a resposta impulsiva registrada nos dados.

2.10.2 Tomografia e FWI

As imagens do pré-sal são muito sensíveis à qualidade e precisão do modelo de velocidades. Pequenos erros na parte rasa podem levar a grandes erros temporais em partes profundas, além de desvios no caminho da onda. Modelos de velocidades tem sido construídos com auxílio de tomografia e FWI buscando o melhor modelo possível de sedimentos do pós-sal (WANG et al., 2019).

Espera-se que um evento sísmico numa família CMP corrigido de NMO (*Normal Moveout*) seja plano horizontal. A tomografia vai avaliar as diferenças de tempos de trânsito entre os traços da mesma família. Com um conjunto de vários tempos de trânsito registrados por diferentes receptores para um mesmo ponto comum, aplica-se um método de inversão, compara-se o resultado modelado com o observado e ajusta-se a velocidade onde necessário.

Após a tomografia, o dado pode ser migrado para dar início a próxima etapa, como sugere a Figura 12, ou encaminhado para uma técnica mais refinada, que utiliza todas as informações da onda para realizar a inversão, a FWI.

A FWI é um método de inversão completa da onda que compara os dados observados com os modelados para derivar a minimização da diferença entre as duas. Ela vai além da tomografia, pois não considera somente o tempo de trânsito, mas também a amplitude do evento.

Segundo Tarantola (1984), o gradiente da função objetivo que minimiza o erro e , aponta para a direção necessária de atualização do modelo, pode ser obtido através da correlação da modelagem direta com a depropagação do resíduo, o que torna a técnica muito semelhante a uma RTM.

Por ser um método matemático de minimização de erro a FWI pode ficar presa em mínimos locais, não atualizando o modelo. Uma maneira muito utilizada para evitar os mínimos locais foi proposta por Bunks et al. (1995) e consiste em dividir a FWI em faixas de frequências, começar das mais baixas e ir aumentando gradativamente. Para se aprimorar os resultados da FWI precisamos fornecer ao algoritmo um bom modelo a priori que será útil para o método convergir para uma solução com significado geológico (TARANTOLA, 1984), e melhorar o resultado final. Este bom modelo inicial virá de uma boa interpretação sísmica, que no caso da bacia de Santos, precisará sempre separar bem os corpos de sal dos sedimentos.

2.10.3 Método *layer cake* (ou *flood*)

Um dos métodos mais simples de construção de modelo de velocidades é o *layer cake* que trata cada unidade litológica separadamente. Como se o substrato fosse um bolo de muitas camadas, onde a velocidade de cada unidade é tratada separadamente. Esta técnica tem algumas falhas em áreas de estruturas complexas (MARS DEN, 1989).

Uma adaptação ao longo do tempo se fez necessária para que o método continuasse a ser aplicado. Consiste em aplicar o método *layer cake* em uma camada (ou grupo) por vez, de cima pra baixo (também conhecido como *top-down approach*), fazendo uso de técnicas de inversão para corrigir os erros associados ao método. O método visa criar um modelo de velocidades, apenas com conhecimento prévio da estrutura geológica de subsuperfície. A ideia é criar, de cima para baixo, um modelo de velocidades que seja capaz de migrar o nosso dado de maneira razoável, mesmo que não haja nenhum poço, ou nenhuma velocidade prévia na área.

Basicamente o que se faz é um primeiro *flood* para a velocidade da água, com o objetivo de interpretar o fundo do mar. Esta etapa é chamada *water flood*. A velocidade da água pode ser fornecida: por perfis adquiridos pelo barco de aquisição; por velocidade de correção NMO para a primeira reflexão (ver Figura 14); ou utilizar a velocidade teórica. A sísmica migrada com esse modelo de velocidades, normalmente constante, será útil apenas para esse propósito. Uma vez obtido um horizonte do fundo de mar, “corta-se” o modelo, mantendo a velocidade da água do início até o horizonte e é introduzida uma nova velocidade.

Como mostra a Figura 12, a etapa seguinte é preencher o modelo com velocidade de sedimento. Esta etapa é denominada *sediment flood*. Caso não se tenham poços na área, pode se preencher com um gradiente de velocidades de sedimento análogo, ou teórico, para que refletores surjam na imagem e seja possível realizar a tomografia da etapa dos sedimentos. Uma vez obtida a velocidade de sedimentos, mesmo que não finalizada, pode-se partir para a terceira etapa, a interpretação do topo do sal.

Durante esta etapa duas frentes se abrem. Uma vai aplicar FWI nos sedimentos do pós-sal, enquanto outra vai interpretar o sal. Como apresentado por Marpeau e Belz (2019), é exigido um processo recursivo nesta etapa, pois as complexidades do sal serão capazes de confundir a sua interpretação. São diversas as estruturas que dificultam o processo: *overhangs*, sedimentos encapsulados, almofadas de sal, línguas de sal; entre outras. Ajustes serão feitos tanto com a interpretação, quanto com a FWI, para que o modelo de velocidades se aprimore e resolva os problemas de imageamento do sal.

Parte-se, então, para a etapa *salt flood*. Nesta etapa, o modelo está caminhando para o final. O que se espera é a visualização da base do sal e sua interpretação. Porém, algumas estruturas podem ainda não estar bem contempladas pelo modelo. Podem ser

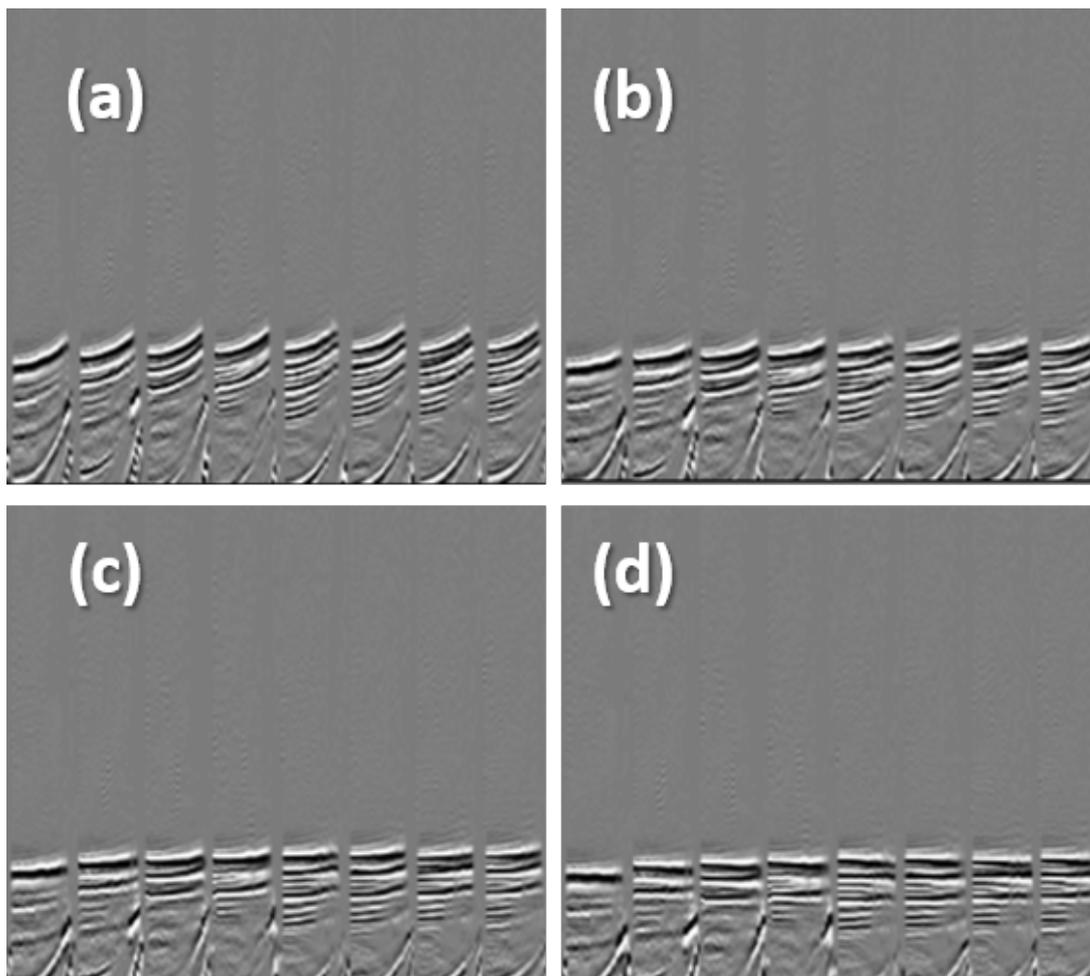


Figura 14 – O esquema mostra uma família CMP corrigida com 4 velocidades de NMOs diferentes: em (a) 1480 m/s; em (b) 1490 m/s; em (c) 1495 m/s; e em (d) 1500 m/s que foi capaz de corrigir melhor a velocidade dos refletores do fundo do mar, tornado-os *flat* (modificado de [Silva, Souza e Lemos \(2014\)](#)).

corpos intra-sal, estruturas do pós-sal não atualizadas corretamente, ou estratificação, por exemplo. Um indicador de que algo não está bem com o modelo é a ausência de energia colapsada na base do corpo salino. Por isso a Figura 12 aponta para uma tomografia intra-sal na bacia de Santos. Além da tomografia, uma FWI pode ser aplicada para atualizar velocidades no corpo de sal. O objetivo maior é encontrar sedimentos antes considerados como sal.

A próxima etapa é a interpretação da base do sal que, como explicado, pode ser prejudicada pela ausência de imageamento deste horizonte. O que se pode fazer é interpretar seguindo a tendência entre dois pontos, ou tentar corrigir o modelo e migrar novamente. Este processo, igualmente ao *salt flood* pode ser executado várias vezes, até se encontrar um modelo satisfatório.

A última etapa, normalmente, é o preenchimento com o gradiente de velocidades do pré-sal. Algumas vezes será necessária a aplicação de técnicas de tomografia e FWI

nesta etapa, porém a sua eficiência está intimamente ligada com o *offset* máximo de aquisição. Tendo este modelo finalizado pode-se partir pra migração final. Este método tem suas limitações, que serão melhor explicadas no capítulo estudo, estruturas extremamente complexas de sal também irão atrapalhar o resultado final.

Uma solução utilizada foi apresentada por [Marpeau e Belz \(2019\)](#), onde corrige-se esses problemas obtendo um primeiro modelo de velocidade por meio da abordagem *top-down* e, em seguida, o mesmo processo é repetido com o modelo atualizado quantas vezes forem necessárias. Esse processo iterativo pode ser muito intensivo em interpretação, já que os horizontes de sal também devem ser atualizados toda vez que a velocidade acima é atualizada.

3 Contexto Geológico

3.1 Bacia de Santos

3.1.1 Localização e histórico petrolífero

Localizada entre a Serra do Mar e o Platô de São Paulo, entre o Alto de Florianópolis e o Alto de Cabo Frio, a Bacia de Santos (Figura 15) é a maior bacia *offshore* do Brasil e atualmente é a maior bacia produtora de óleo no país. Ela é uma bacia de margem passiva distensiva que possui uma área em torno de 350.000 km². A exploração petrolífera na Bacia de Santos teve início nos anos 70 em depósitos turbidíticos do que hoje chamamos de pós-sal. Entretanto, esta bacia ganhou destaque somente após os anos 2006 com as descobertas dos campos do pré-sal (FREITAS, 2006). Todos os olhos estão voltados ao pré-sal brasileiro. Segundo o ministro Bento Albuquerque, 40% de tudo que se gasta no mundo com leilões de petróleo foram gastos no Brasil no ano de 2019 (MENDONÇA et al., 2019).

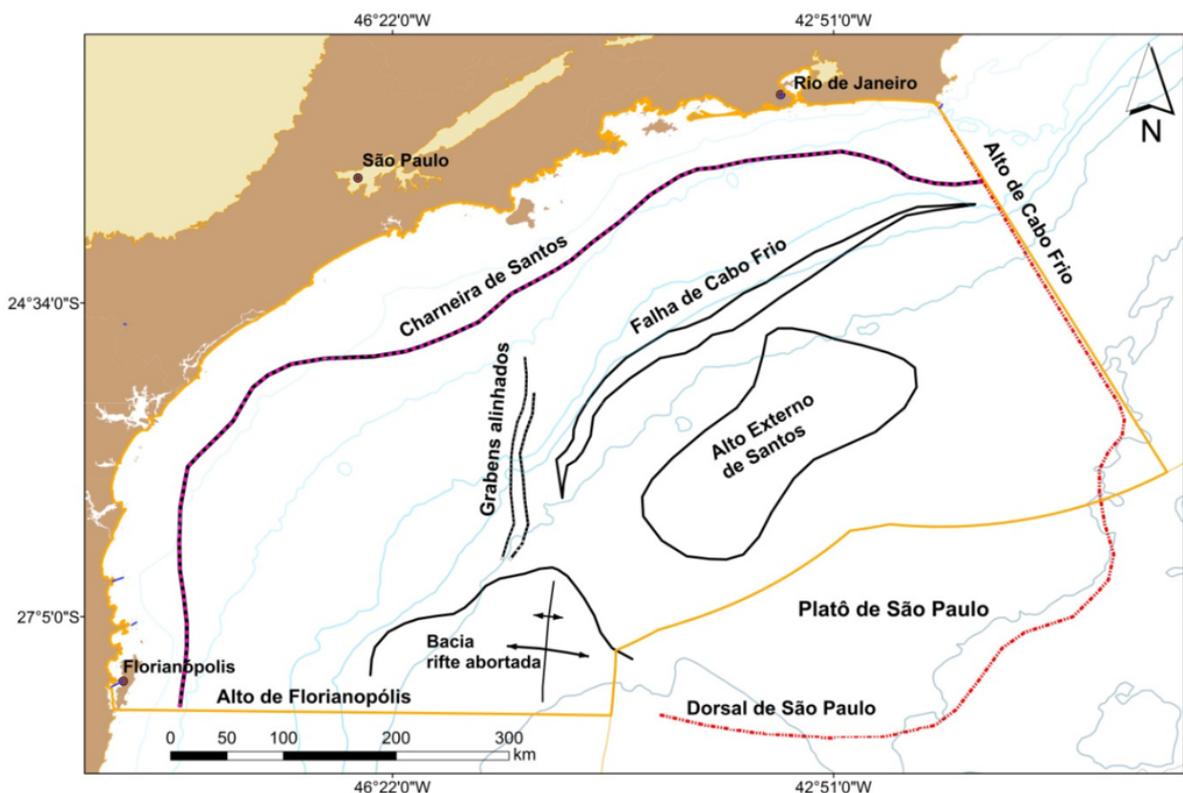


Figura 15 – Mapa de localização da Bacia de Santos com os principais elementos de seu arcabouço regional (ANP, 2017).

Na década de 70, iniciou-se a exploração de petróleo na Bacia de Santos porém sem

sucesso (CHANG et al., 1992). O sucesso ocorreu em 1980, em arenitos turbidíticos, assim como na Bacia de Campos, sendo o campo batizado de Merluza. (PEREIRA; MACEDO, 1990).

Após a abertura do mercado brasileiro, com a criação da Lei do Petróleo, em 1997, a Bacia de Santos recebeu novos investimentos exploratórios e com isso houve a descoberta de novos campos (ANP, 2017). O mesmo sumário da ANP (2017) informa que, em 2006, o primeiro poço exploratório, denominado 1-BRSA-329D-RJS, foi perfurado na seção pré-sal da Bacia de Santos com o objetivo de testar o prospecto Parati, localizado no bloco BM-S-10. Este poço comprovou a existência de um sistema petrolífero atuante naquela porção da bacia iniciando o *play* do pré-sal.

3.1.2 Evolução Tectono-sedimentar

A Bacia de Santos corresponde a uma bacia de margem passiva gerada durante o Neocomiano, relacionado à ruptura do Gondwana e a abertura do Oceano Atlântico. A espessura da seção sedimentar pode chegar a até 15 km (MIO; CHANG; CORREA, 2005). A Figura 16 mostra a carta estratigráfica da Bacia de Santos.

O arcabouço estratigráfico compreende três grandes sequências diferenciadas, que são denominadas de forma genérica pelas fases: Rifte, Transicional (Pós-Rifte) e Drifte (MOREIRA et al., 2007). É possível notar analisando a carta estratigráfica esses três momentos. Temos a fase Rifte que depositou sedimentos finos, lacustres, e que compreende as formações Piçarras e Itapema. Uma fase pós-Rifte representada pela formação Barra Velha, onde um ambiente lacustre restrito permitiu o acúmulo de corpos carbonáticos e salinos e evoluindo para uma margem passiva (Drifte), que se desenvolve ainda hoje.

O embasamento, composto por granitos, gnaisses e metassedimentos neoproterozóicos da Província Mantiqueira, aflora no continente na região de São Paulo (GARCIA et al., 2012). O relevo herdado do embasamento controlou a deposição do sal, que, atualmente, tem estruturas maiores e mais espessas no baixo estrutural (GARCIA et al., 2012). Cicatrizes do processo de rifteamento refletem feições importantes no arcabouço estrutural da bacia, que influenciaram diretamente na estruturação e disposição atual da seção sedimentar (ANP, 2017). Já o embasamento econômico da bacia é formado por derrames basálticos eocretáceos que constituem a Formação Camboriú (MOREIRA et al., 2007).

A seção rifte é composta predominantemente por falhas normais sintéticas de direção NE-SW, com sistemas secundários antitéticos, formando uma série de hemi-grabens, com direção similar àquelas impressas nos terrenos pré-cambrianos pertencentes à Faixa Ribeira, evidenciando a reativação destas falhas durante a separação dos continentes (CHANG et al., 1992).

A fase rifte gerou o espaço de acomodação para a sedimentação e se estende do Hauteriviano, Barremiano e início do Aptiano, como mostra a carta litoestratigráfica da Figura 16. Sendo dividida em três sequências deposicionais, as formações Camboriú, Piçarras e Itapema. Limitada na base pela formação Camburiú e no topo pela Barra Velha. A parte proximal é composta por conglomerados e arenitos de leques aluviais e na porção distal por arenitos, siltitos e folhelhos de origem lacustre. Conforme explica [Moreira et al. \(2007\)](#), estes folhelhos são lacustres e ricos em matéria orgânica, formando o sistema gerador do pré-sal na Bacia de Santos.

A discordância Pré-Alagoas separa a fase Rifte da pós-Rifte representada pelas formações Barra Velha e Arari. A Fm. Barra Velha é dividida em duas: inferior e superior, sendo estas separadas pela discordância Intra-Alagoas que marca o início da fase Sag ([WRIGHT; BARNETT, 2015](#)). Esta porção superior foi depositada durante o andar Alagoas superior, em um ambiente restrito-lagunar, sendo constituída por calcários microbiais, localmente dolomitizados ([MOREIRA et al., 2007](#)). A fase Sag demonstra um momento de menos influência tectônica, sendo vista em seções sísmicas como acumulações planas, discordantes com o sedimento das formações anteriores das fases Rifte e pós-Rifte. Este momento de deposição se deu até o início da deposição do sal (Formação Ariri). Os reservatórios do pré-sal são compostos por esta fase da Fm. Barra Velha e coquinas barremianas da Fm. Itapema.

O sal da Bacia de Santos corresponde aos evaporitos da Formação Ariri, que teriam se depositado durante a separação definitiva entre os dois continentes, que associada a uma maior subsidência, permitiu um acesso gradual de água marinha para dentro do ambiente, antes isolado. Os evaporitos da Formação Ariri, de idade Aptiana, acumularam mais de 2000 m de espessura de sal em um curto período ([CHANG et al., 1992](#)). Encontra-se nesta sequência de evaporitos: halita em maior quantidade, anidrita, taquidrita, carnalita e silvinita ([MOREIRA et al., 2007](#)). Esta formação representa o selo no sistema petrolífero do pré-sal.

Com o aumento da separação dos continentes e instalação da crosta oceânica, inicia-se a fase Drifte de margem passiva com a deposição de siliciclásticos dos grupos Camburi, Frade e Itamanbuca. Esses depósitos passam a ser controlados pelas flutuações do nível do mar ([MOHRIAK; NEMCOK; ENCISO, 2008](#)). Seu início se dá no Albiano e continua até o presente. A sedimentação inicia-se com carbonatos do Albiano, evoluindo para siliciclásticos com o estabelecimento de condições marinhas. O ambiente, já estabelecido, é alimentado por leques e deltas com aporte de folhelhos e arenitos na plataforma rasa, e fluxos gravitacionais e sedimentos pelágicos no talude ([MOREIRA et al., 2007](#)). Durante muito tempo o *play* exploratório da bacia eram os turbiditos depositados nesta fase, inclusive nas regiões de talude.

3.2 Campo de Búzios

O Campo de Búzios está localizado na porção central da Bacia de Santos, aproximadamente 180 km da costa do Rio de Janeiro, e com média de 1900 m de profundidade. A Figura 17 mostra a localização do Campo de Búzios. A geologia do Campo de Búzios engloba grande parte das unidades descritas na carta estratigráfica da bacia. Neste trabalho, o destaque são as Formações Camboriú (embasamento), Barra Velha e Ariri (Carbonatos do pré-sal e sal, respectivamente) do Grupo Guaratiba e da Formação Marambaia do Grupo Itamambuca (pós-sal) (FREITAS, 2006).

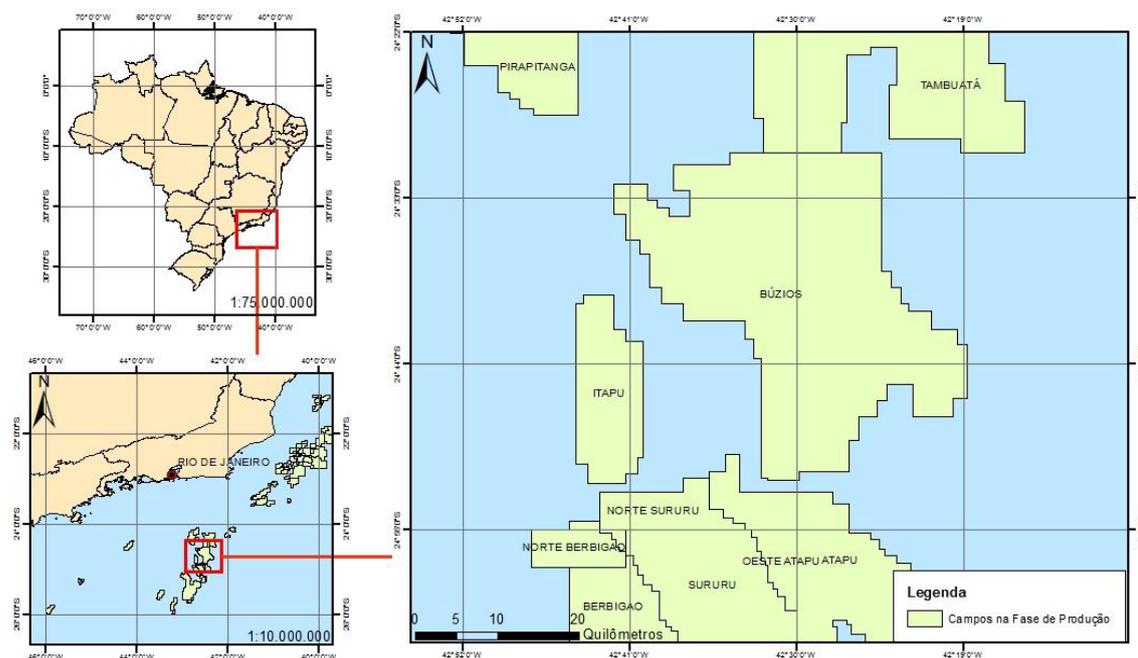


Figura 17 – Localização do campo de Búzios em três escalas (ANP, 2016).

4 Metodologia

O método conhecido como *layer cake* que, como explicado no capítulo de processamento sísmico foi utilizado para a construção do modelo de velocidades. O que fizemos é uma adaptação deste método, que pode ser chamado de *top-down approach*, onde construímos o nosso modelo uma camada por vez, da mais rasa para a mais profunda. Faremos o uso desse método de forma adaptada, comum no imageamento sísmico, para a construção de um modelo de velocidades capaz de migrar o dado sísmico rápido e, com eficiência.

Sendo assim conseguimos aplicar o método *layer cake* para a Bacia de Santos apenas com poucas informações sobre a geologia e velocidades sísmicas teóricas. Outra adaptação que fizemos foi a inclusão de gradientes de velocidades em algumas camadas e velocidades fixas em outras, diferenciando um pouco da ideia inicial proposta por [Marsden \(1989\)](#). Outro ponto a ressaltar é que não utilizamos informações de poços para o ajuste do modelo.

Como não tínhamos a intenção de aplicar tal técnica em um modelo que não representasse bem os desafios da Bacia de Santos, optamos pela construção de um modelo totalmente novo, que chamamos modelo de Búzios. A Figura 18 apresenta um esquema sobre o passo à passo para obtenção do resultado esperado.

4.1 Etapas da construção do modelo

Em primeiro lugar recebemos no grupo do GISIS os dados do campo de Búzios cedidos pela ANP. Utilizamos o cubo sísmico migrado (via método Kirchhoff), alguns poços que continham perfis sônico e de densidade e, horizontes interpretados, para criar uma linha 2D de impedância sísmica. Esse modelo seguia o *trend* da sísmica para extrapolar as informações dos poços por toda a linha 2D criando assim o modelo preliminar.

Interpretamos novos horizontes, que seriam necessários para a transformação do modelo preliminar no modelo de Búzios. Desenvolvemos os algoritmos necessários para as modificações e aplicamos. Deste ponto do estudo em diante utilizamos apenas o modelo de Búzios.

Fizemos então uma aquisição sísmica sintética simulada neste modelo, utilizando-se de parâmetros comuns em uma campanha sísmica, conforme apresenta a Tabela 1. De posse dos tiros modelados (ver Figura 19) parte-se, então, para a etapa da construção de um modelo de velocidades capaz de migrar o dado modelado. Começa então a parte do nosso fluxo de trabalho iterativa, onde a técnica *layer cake* adaptada foi aplicada.

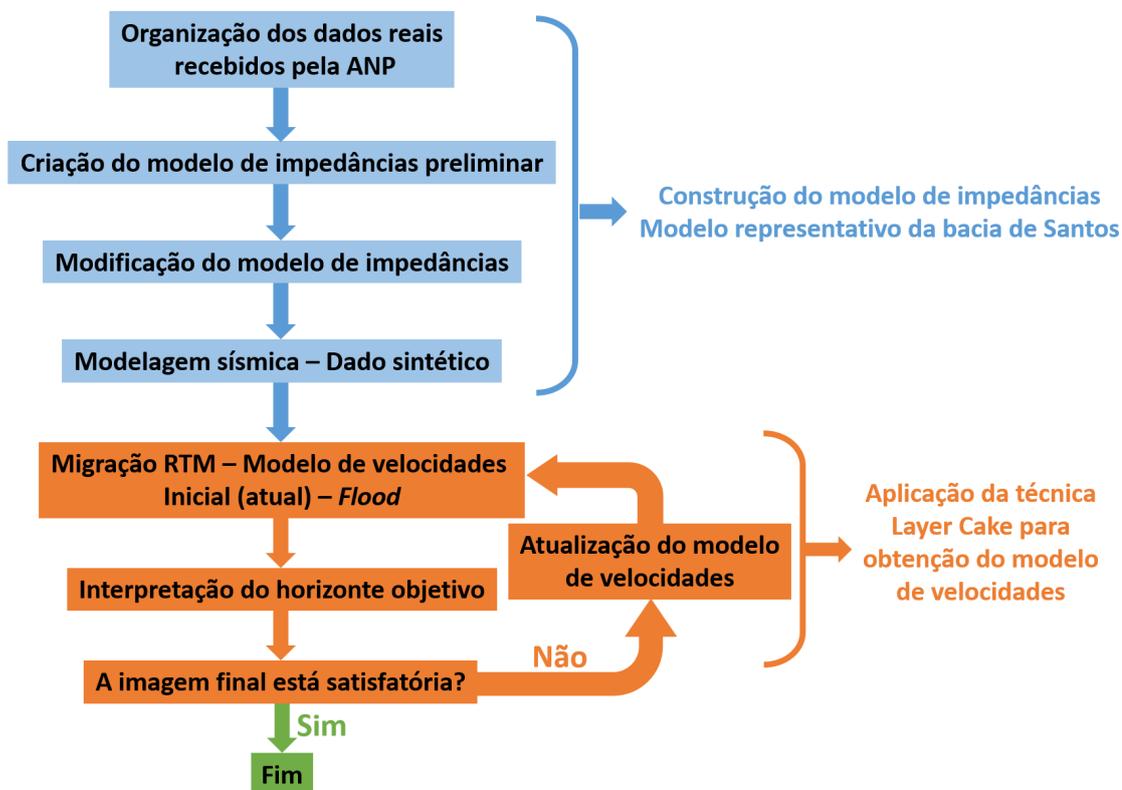


Figura 18 – Esquema ilustrando o fluxo aplicado a este trabalho.

Tabela 1 – Informações da aquisição feita para o modelo inicial.

Dimensões de Aquisição		
Descrição	Posição na malha	Posição (m)
Posição do primeiro tiro	11	12,5 m
Posição do último tiro	1451	18137,5 m
Espaçamento entre tiros	4	50,0 m
Profundidade da fonte	6	30,0 m
<i>Near offset</i>	10	125 m
<i>Far offset</i>	até 240	até 3000,0 m
Espaçamento entre receptores	1	12,5 m
Profundidade dos receptores	6	30,0 m

Para migrarmos esse dado vamos precisar basicamente de três itens: O dado sísmico aberto (não empilhado), regular ou não, um algoritmo de migração (no nosso caso, RTM desenvolvido no grupo do GISIS) e um modelo de velocidades. Os dois primeiros itens já temos, agora precisamos construir um modelo de velocidades capaz de colapsar as energias e satisfazer a condição de imagem da migração. Caso o modelo de velocidades não esteja correto, o campo descendente não será coincidente com o ascendente, a condição de

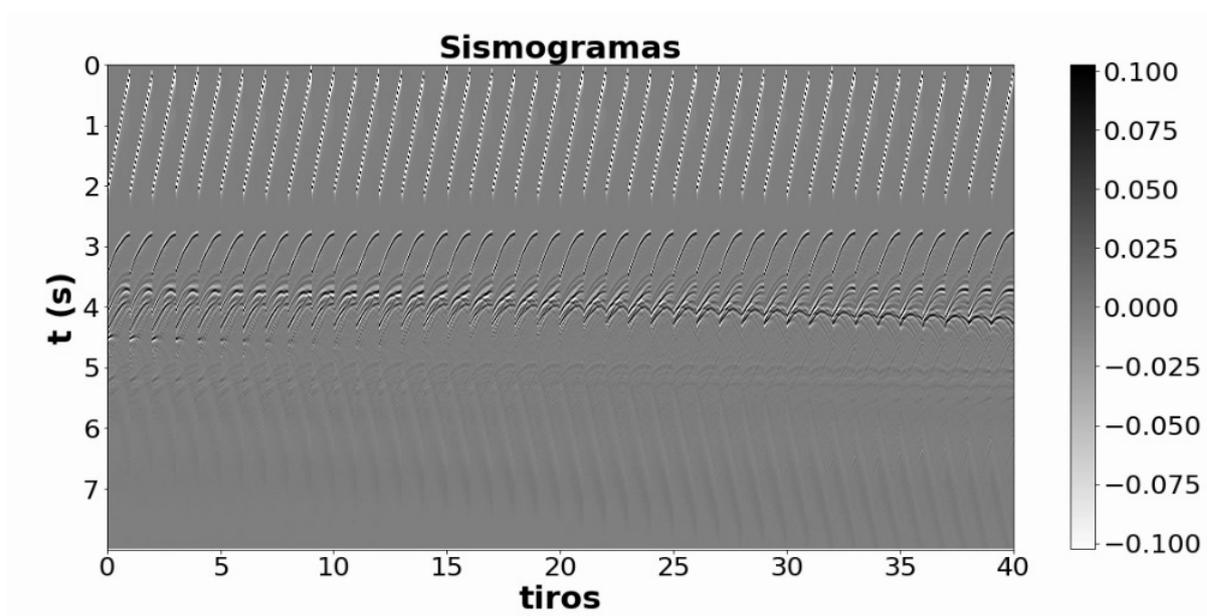


Figura 19 – Os primeiros 40 tiros modelados.

imagem não será satisfeita e a imagem não aparecerá.

4.2 O modelo

O modelo foi criado com o intuito de representar uma porção da Bacia de Santos, que contenha: uma camada de sal espesso, forte variação lateral de velocidade, variações de velocidades intra-sal, um *overhang* (porção de sal mais antiga sobreposta a uma porção de sedimento mais nova, porém não sendo um sal solto, mas ainda ligado a sua fonte, conforme Figura 1) expressivo, e uma base do sal não plana. Que seja realista e, que contenha características encontradas nas aquisições sísmicas mais recentes.

Ter um modelo que represente a complexidade geológica é extremamente importante para apoiar as novas técnicas. Um modelo muito utilizado para o teste de novas técnicas é o Marmousi que foi projetado com base em uma bacia real (Bacia do Cuanza). Porém com o surgimento do pré-sal brasileiro e seu crescente interesse tanto por empresas de exploração como pela comunidade acadêmica, modelos mais representativos se fazem necessários. Novos desafios foram adicionados às equipes de imageamento que não podem ser testadas utilizando um modelo de sal simples, como o Marmousi.

A halocinese presente nas bacias brasileiras, particularmente nas Bacias de Santos, Espírito Santo e Campos, são bem mais complexas do que a indústria enfrentava na época da criação do modelo Marmousi (VERSTEEG, 1994). O nosso modelo vêm, justamente, acrescentar de forma clara e simples os desafios de imageamento particulares das nossas bacias do sudeste brasileiro, a fim de que, novas técnicas de imageamento e inversão possam ser efetivamente testadas.

Com a crescente complexidade geológica associada a exploração de hidrocarbonetos cada vez mais profundos, como as camadas do pré-sal brasileiro, a necessidade de boas imagens que representem as camadas internas da Terra aumentaram dramaticamente. Portanto, a sísmica ainda é o método mais importante em um levantamento geofísico associado a indústria do petróleo. Com a introdução de registros digitais, foi possível melhorar o processamento de dados e a produção de modelos cada vez mais confiáveis (REDDY, 2019).

4.2.1 Modelo preliminar

A criação do modelo foi feita utilizando softwares licenciados para uso acadêmico no GISIS: *Geoview* que pertence a CGG (da suíte Hampson-Russell) e o software *Petrel* da Schlumberger. Os resultados preliminares da criação do modelo foram apresentados no *16th International Congress of the Brazilian Geophysical Society & Expogef* com o título *Construction of a velocity model of the brazilian pre salt based on Búzios Field - Preliminary results* (KARSOU et al., 2019) e podem ser vistos na Figura 20.

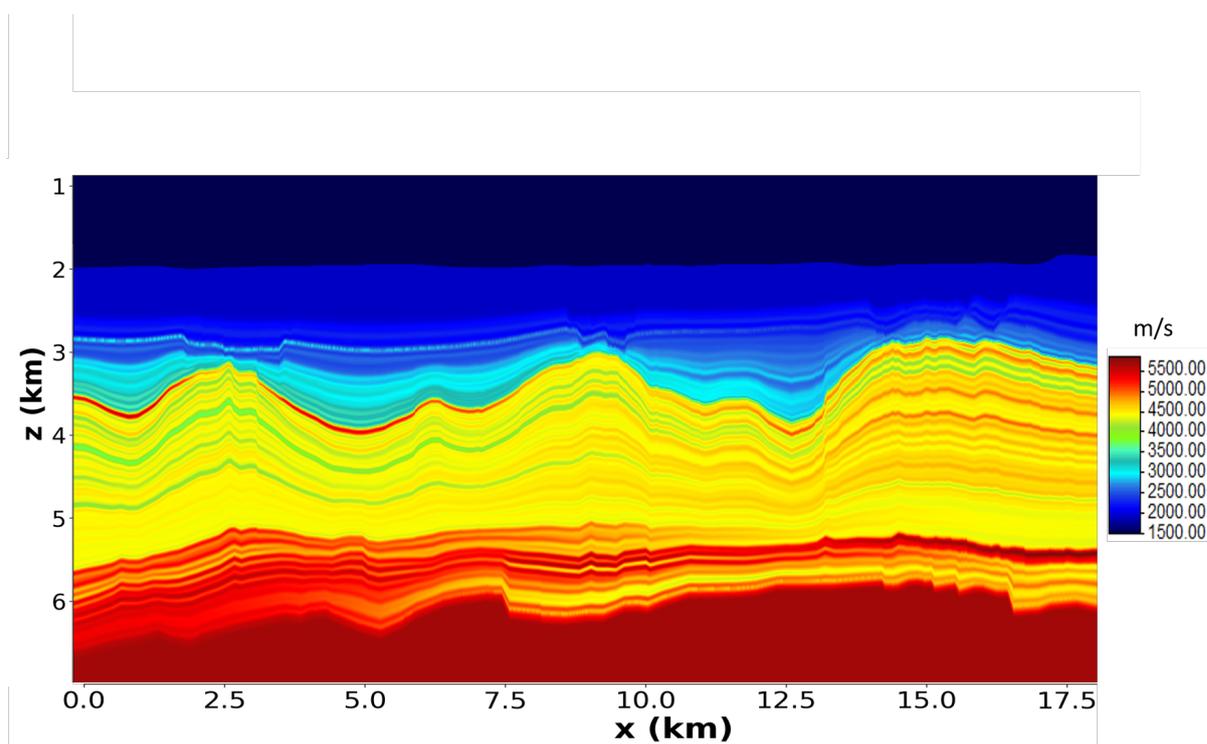


Figura 20 – Modelo de velocidades preliminar, baseado no campo de Búzios da Bacia de Santos, apresentado no *16th International Congress of the Brazilian Geophysical Society & Expogef* (KARSOU et al., 2019).

O modelo da Figura 20 foi criado a partir de dados reais cedidos pela ANP ao GISIS. Para criação deste modelo dispúnhamos de: um cubo sísmico do campo de Búzios em profundidade migrado com algoritmo Kirchhoff e alguns poços espalhados pela área com variedade de perfis geofísicos adquiridos. Como o objetivo era criar um modelo com grande

quantidade de estruturas complexas de sal presentes na bacia, incluindo um *overhang*, procuramos uma linha dentro do levantamento onde houvesse um flanco de sal com maior destaque, para facilitar o trabalho futuro de ajuste. Separamos os poços que continham uma boa coluna de perfil de velocidades e/ou densidade e partimos para a interpretação de horizontes chaves, que guiariam a extrapolação dos dados dos poços por toda a linha (ver Figura 21).

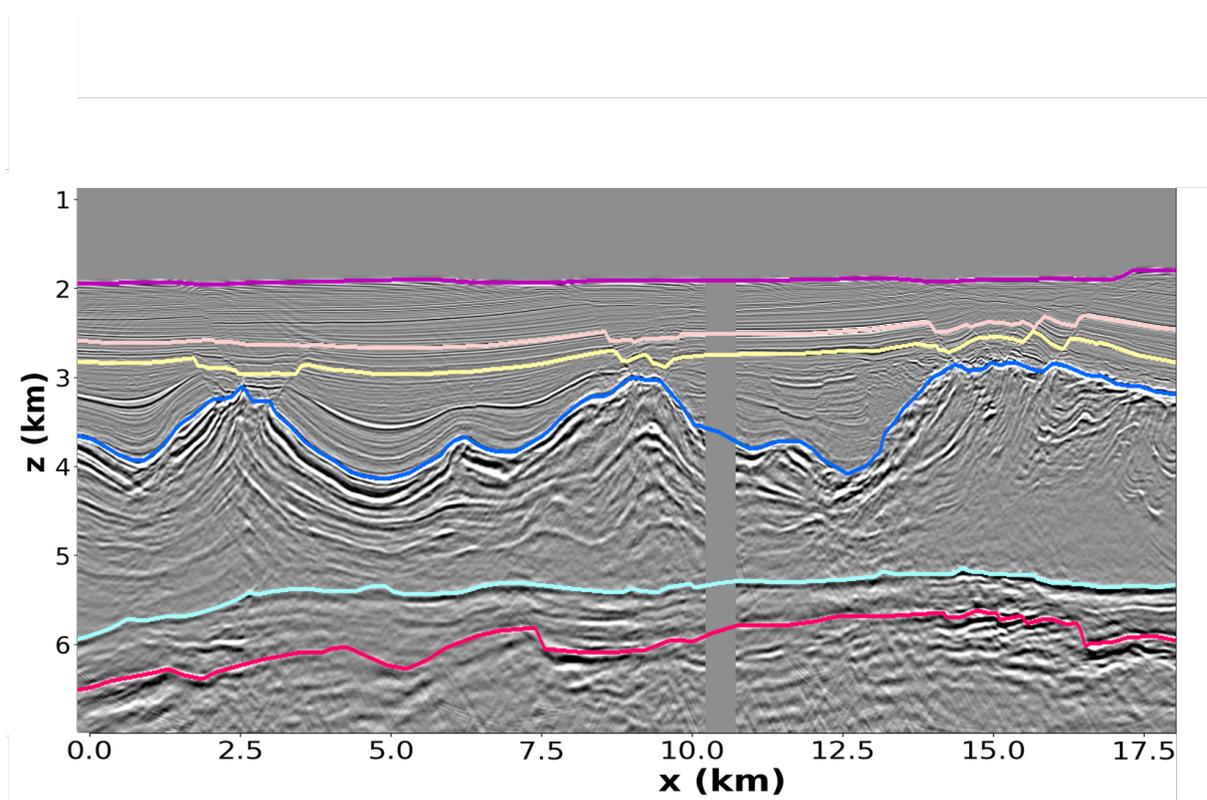


Figura 21 – Linha sísmica migrada (Kirchhoff) escolhida para o nosso modelo (KARSOU et al., 2019). Os horizontes representam: Em lilás o fundo do mar; em rosa e amarelo dois eventos erosivos dentro da formação Marambaia; em azul o topo do sal; em ciano a base do sal; e em vermelho o topo do embasamento.

De posse destes dados sísmicos, horizontes e poços com perfis sônico e de densidade, partiu-se para a criação do modelo. Note que os horizontes dentro da formação Marambaia estão interpretados representando inclusive o plano de falha. Isso foi necessário para que a extrapolação dos dados de perfis dentro da linha sísmica obedecesse o plano das falhas, como pode ser observado na Figura 20. Este modelo contém diversos elementos interessantes, mas não contém os elementos essenciais para o nosso estudo, que são justamente as estruturas complexas de sal. O corpo salino está espesso, porém muito bem comportado, além de conter uma estratificação constante para todo o modelo, algo não condizente com os dados da Bacia de Santos.

4.2.2 Modelo finalizado - O modelo de Búzios

Partindo do modelo preliminar (Figura 20) iniciou-se um trabalho para tornar o modelo mais correspondente com os dados atualmente encontrados na Bacia de Santos. Visando incluir estruturas presentes na bacia, mas não contempladas pelo modelo preliminar, partiu-se para uma edição utilizando ferramentas de programação desenvolvidas no próprio GIS. Incluiu-se: um *overhang*; um alto local na base do sal logo abaixo; uma anomalia de baixa velocidade no pós-sal; uma pequena anomalia de baixa velocidade no sedimento do pós-sal simulando um turbidito; uma fina camada de alta velocidade no topo do sal; e foi melhor definida a base do sal como um todo.

Apesar de nomearmos a camada de sal, ela não é composta por apenas um tipo. Existem diversos tipos de sal que podem ser acumulados e que formam o nosso corpo salino em subsuperfície. A diferença de impedância acústica entre os diferentes tipos de sal é responsável pela visualização de camadas intra-sal. Geralmente as estratificações são compostas por intercalações de halita, sais de alta velocidade (anidrita e gipsita, por exemplo) e sais de baixa velocidade (taquidrita, carnalita e silvita) (FALCÃO; SANTOS; MAUL, 2017).

A halita possui características distintas dos demais corpos salinos reagindo diferentemente a taxa de subsidência com movimentação lateral (GAMBÔA et al., 2008). Isso faz com que a presença marcante de estratificação se dê em áreas onde o topo do sal se encontra, hoje, mais profundo. Sendo a halita o tipo mais comum de acumulação salina, seu escape faz com que o corpo de sal perca considerável espessura. Nosso modelo preliminar não representava esta realidade.

Para tornar o modelo preliminar mais adaptado ao nosso caso, utilizamos horizontes auxiliares e, através de ferramentas próprias, alteramos as velocidades dos modelos conforme a Figura 22.

Note que o modelo apresentado na Figura 23 é composto de elementos muito próximos do que realmente se encontra na Bacia de Santos, com sal espesso, estratificado em partes, com uma camada de mais alta velocidade no topo do sal, representando presença de anidrita, ou carbonato, e um pré-sal bem desenvolvido sobre um embasamento falhado. O reservatório do pré-sal nesse modelo encontra-se muito próximo do *overhang*, colocado ali de propósito para se avaliar os impactos dos erros na construção do modelo de velocidades no posicionamento e na iluminação dessa porção do dado.

Este modelo criado é relevante para o estudo que foi aplicado neste trabalho, sendo o *overhang* e o alto logo abaixo, as estruturas mais sensíveis ao método aplicado. Este modelo assemelha-se em muitos aspectos ao contexto geológico das bacias onde explora-se o pré-sal brasileiro.

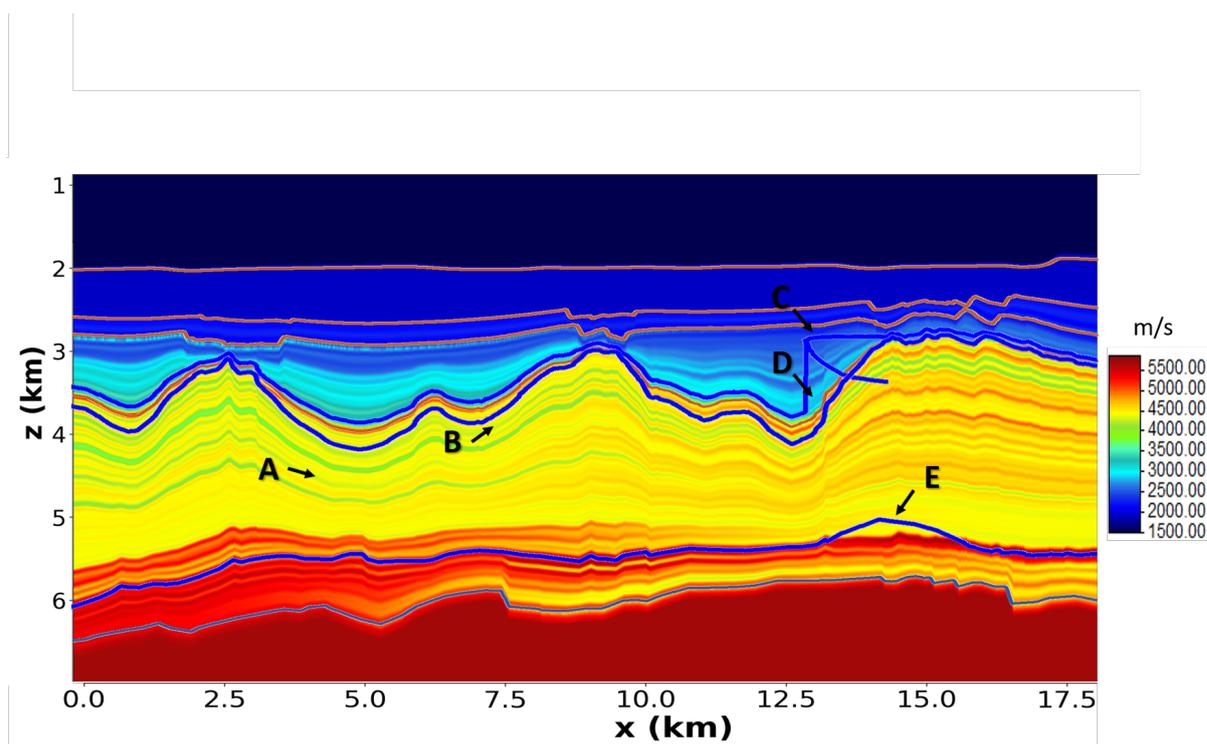


Figura 22 – Os horizontes azuis foram desenhados para auxiliar as seguintes modificações: em “A” escolhemos o local onde seria preservada a estratificação do sal, e somente ali; “B” é um horizonte auxiliar, criado pouco abaixo do topo do sal, onde a estratificação seria mantida, porém transformada em uma fina camada de anidrita com velocidade ligeiramente superior a da halita logo abaixo; “C” apresenta a protuberância que foi preenchida de sal, criando o *overhang*; “D” mostra onde a velocidade de sedimento seria preservada durante a modificação do sal; e “E” apresenta uma elevação da base do sal, criando o reservatório objetivo.

4.3 Aplicando o método *layer cake*

A construção do modelo pelo método *layer cake* implica em saber a velocidade de todas as camadas necessárias para a obtenção da imagem final. Neste trabalho escolheu-se por criar um modelo com 4 camadas (ou grupos de camadas) previamente definidos. Isto só é possível pelo grau de maturidade e conhecimento da Bacia de Santos e do método. O modelo final terá então:

- Uma camada de água,
- Um grupo contendo todos os sedimentos do pós-sal,
- O corpo de sal,
- Um grupo contendo os sedimentos do pré-sal.

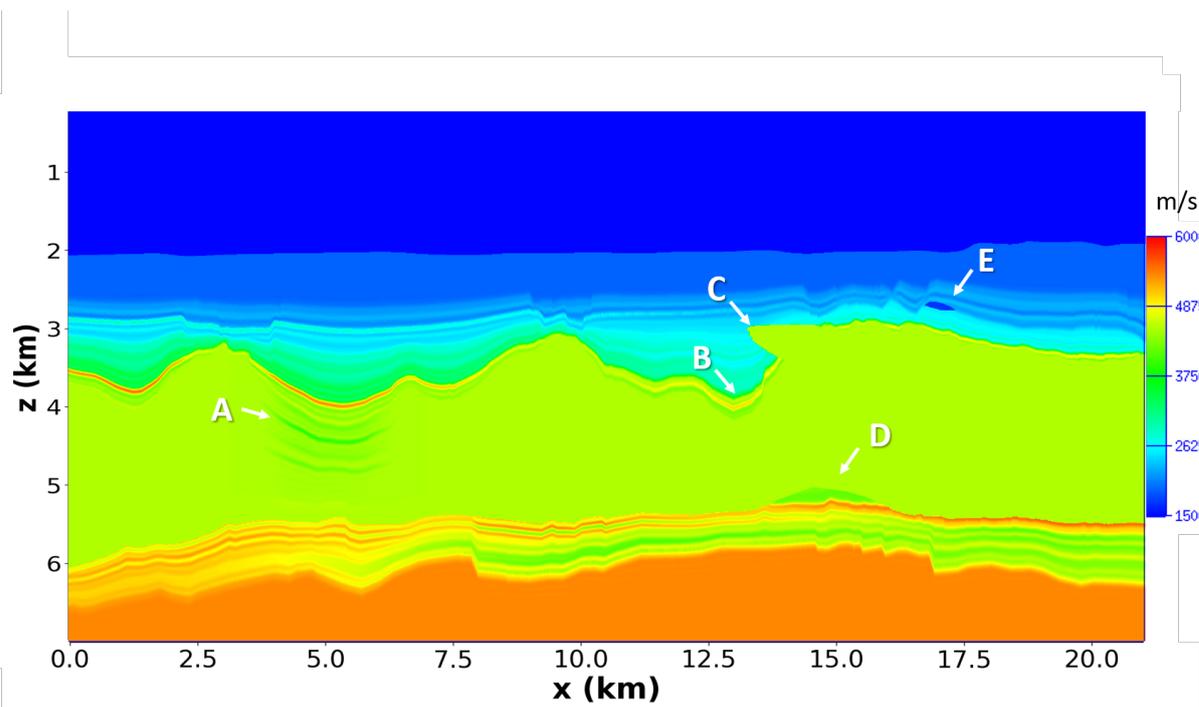


Figura 23 – Modelo de velocidades construído e utilizado neste trabalho para a modelagem. “A” apresenta uma porção do sal estratificado, com pequenas variações de velocidade inferiores a velocidade padrão de 4500 m/s. “B” aponta a camada de anidrita. “C” aponta para o *overhang* adicionado, que coloca velocidade de sal sobre uma camada de sedimentos com velocidade inferior. “D” apresenta o alto adicionado na base do sal, com baixa impedância, representando um reservatório de pré-sal e “E” aponta a anomalia semelhante a um turbidito no pós-sal.

A primeira coisa que se necessita é saber a velocidade aproximada da primeira camada (ou camadas) para realizar a primeira migração. Por se tratar de um dado marinho, sabe-se que a velocidade da água para uma onda compressional P é aproximadamente 1500 m/s. Essa é a única informação necessária para nossa primeira etapa da aplicação do método. Cria-se um modelo de velocidades com uma única velocidade, a da água. Essa etapa é chamada de *Water flood*. Essa migração será capaz de migrar corretamente apenas o horizonte do fundo do mar.

Em seguida, interpreta-se o fundo do mar e analisa-se se a imagem está satisfatória ou não. Em caso negativo entramos no *loop* de atualização do modelo de velocidades (em laranja na Figura 18). Como o modelo será atualizado? Existem diversas formas de colocarmos a velocidade de sedimentos e iniciar o nosso segundo “*flood*”, o de sedimentos. Para esse trabalho não dispomos de nenhum recurso preciso para incluir a velocidade de sedimentos, logo realizamos a inclusão de uma velocidade de sedimentos teórica.

Não se espera uma velocidade muito menor que 2000 m/s nem muito maior que 4000 m/s para os sedimentos compactados do pós-sal, considerando a camada como uma intercalação de arenitos e folhelhos. Sendo assim, atualizamos o modelo anterior em sentido

descendente, partindo do horizonte interpretado, com um gradiente crescente de 2000 a 3500 m/s. Chamamos essa atualização de *Sediment flood*. Este modelo será capaz de migrar nosso dado enquanto as velocidades estiverem coerentes. Como o sal tem velocidade muito acima do nosso gradiente, nada abaixo do topo do sal será corretamente imageado.

Temos então um modelo que contempla a velocidade da água e dos sedimentos do pós-sal. Analisamos a imagem e fazemos novamente a pergunta: Está satisfatória? Como a resposta é não, vamos então interpretar o topo do sal e, após isso, manter as velocidades do modelo deste horizonte pra cima e incluir uma velocidade teórica de sal deste ponto pra baixo. Como a velocidade da onda P na halita é aproximadamente 4500 m/s e como este é o tipo de sal mais comum nessa bacia (ver capítulo 3), incluímos esta velocidade do horizonte pra baixo e, temos então, nosso modelo *salt flood*.

Nossa terceira migração deverá imagear corretamente a base do sal, caso o sal seja simples, sem nenhuma inversão ou grandes estratificações com velocidades muito diferentes da escolhida (4500 m/s). De posse do dado migrado, vamos analisar novamente se a imagem está satisfatória. Não completamente. A base do sal vai ser imageada em grande parte da seção, porém onde há complexidade algo deverá ser feito. Maneiras de melhorar a base do sal foram apresentadas no capítulo de processamento.

Neste trabalho, optamos por seguir adiante para a última migração do método (ver Figura 12) que é a inclusão do gradiente de velocidades do pré-sal. Para tanto é necessário interpretar a base do sal. Onde ela é visível, basta seguir o refletor, onde não é, infelizmente, necessitaremos de uma “correlação” entre os pontos mais próximos visíveis. Interpretamos a base e mantemos o modelo de velocidades deste horizonte para cima, inserindo o gradiente do pré-sal deste ponto para baixo e realizando nossa quarta e última migração.

Por fim, caso os resultados estejam satisfatórios, então nosso modelo de velocidades está finalizado e nosso dado foi migrado. De posse deste resultado final, podemos analisar onde nosso método foi eficiente e os pontos de melhoria.

5 Estudo de Caso

O ponto de partida foi a construção de um modelo representativo do campo de Búzios, na bacia de Santos, com elementos encontrados comumente nos levantamentos sísmicos, que visam a exploração do pré-sal, e que demandam mais atenção neste processo. A partir do modelo criado (Figura 23) realizou-se uma modelagem simulando um levantamento sísmico marinho em duas dimensões e partiu-se para a construção de um modelo de velocidades capaz de migrar satisfatoriamente o dado, utilizando-se apenas o conhecimento da geologia da bacia e do dado simulado. Neste processo apenas precisávamos saber: sobre a natureza do dado sísmico, que havia sedimento acima de uma camada de sal, que esperava-se uma camada de sal espessa, e que abaixo do sal havia sedimento de velocidade maior que a do sal.

O processo é relativamente simples, iterativo, e necessita de um: modelo de velocidade inicial; uma migração sísmica; uma etapa de interpretação sísmica; a atualização do modelo de velocidades; e inicia-se o processo novamente, como mostra a Figura 24.



Figura 24 – Gráfico esquemático da iteração aplicada neste trabalho.

Para realizar o presente estudo utilizamos basicamente uma licença cedida ao GISIS para uso acadêmico do software *Geoview* (CGG) e algoritmos de migração RTM e modelagem sísmica, desenvolvidos no próprio laboratório de pesquisa.

5.1 Aquisição dos dados

Iniciamos com uma aquisição simulada de um navio puxando um cabo (*streamer*) com 240 canais espaçados em 12,5 m, navegando da esquerda pra direita. Foram disparados 360 tiros com 50 m de distância entre eles. Não foram consideradas reflexões na superfície da água, sendo esse dado livre da presença de fantasmas e múltiplas de qualquer tipo. Utilizamos também de bordas que não refletiam informações laterais, tornando nosso dado sem nenhum tipo de ruído. Esses tiros podem ser observados na Figura 19.

Após o dado adquirido, efetuamos a migração a partir do pressuposto que, não tínhamos nenhum conhecimento do modelo da aquisição, e nenhum poço para fornecer uma velocidade de partida, o que não é estranho, pois com o avanço da exploração do pré-sal não é raro encontrarmos projetos de aquisição e processamento sísmico onde não há nenhuma informação de poço, por se tratar de blocos novos de água ultra-profunda.

5.2 *Water Flood*

Vamos então criar o modelo de velocidades a partir da técnica *layer Cake*. O primeiro passo é migrar o dado com a velocidade média da água (ver Figura 25), também chamado de *water flood*. Sabemos que a velocidade da água varia, mas 1500 m/s é um valor médio muito adequado para sua representação, então utilizamos um modelo de velocidade constante de 1500 m/s para realizar nossa primeira migração.

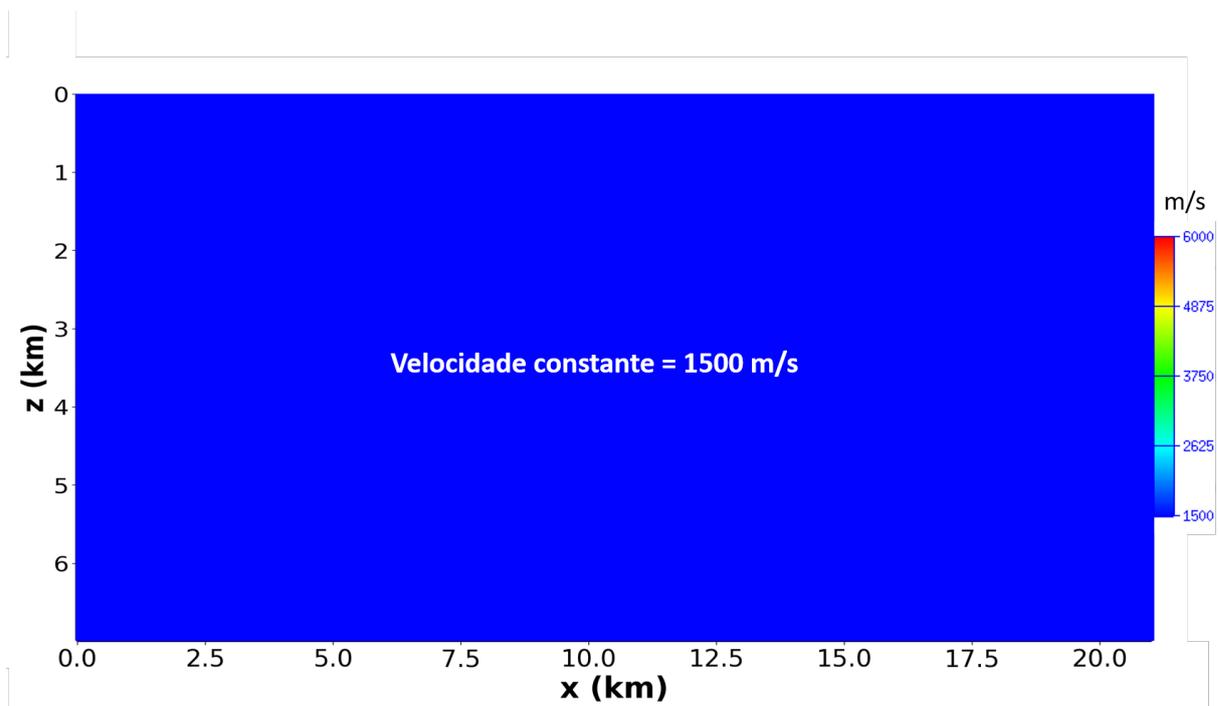


Figura 25 – Velocidade inicial, representando a velocidade média da água e igual a 1500 m/s para toda o modelo - *Water flood*.

Utilizando essa velocidade, migramos (RTM) o nosso dado adquirido. O resultado desta migração pode ser visto na Figura 26. Com essa migração temos um dado que está migrado corretamente até a superfície do fundo do mar e migrado com velocidade errada (muito inferior) deste ponto para baixo. O que se faz agora é interpretar o horizonte do fundo do mar (ver Figura 27). Com esse horizonte seremos capazes de manter a velocidade da água onde ela está correta e criar um novo modelo. Estamos prontos para partir para a segunda etapa do método (para a próxima camada do bolo).

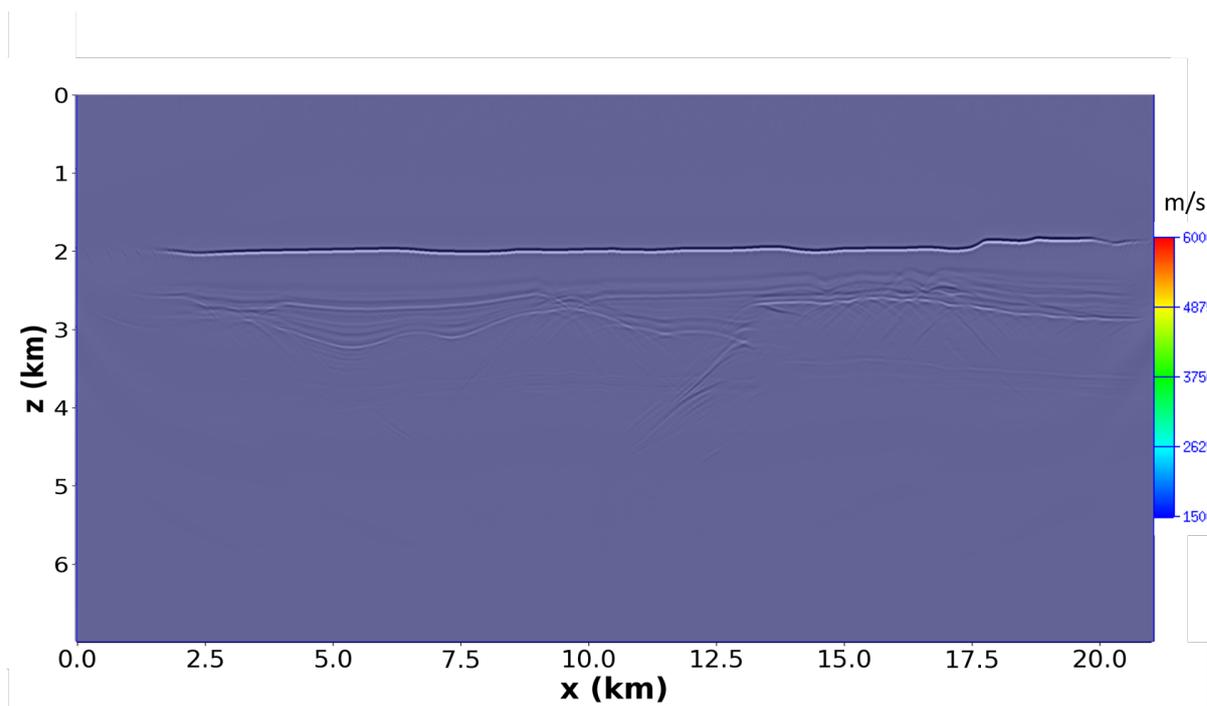


Figura 26 – Modelo de velocidade apresentado na Figura 25 com transparência sobre o dado sísmico migrado com esta velocidade.

5.3 *Sediment flood*

De posse deste horizonte interpretado, vamos agora para a segunda etapa do nosso método, onde a velocidade do *flood* anterior será mantida do início do modelo até o horizonte interpretado, e então um gradiente de velocidade compatível com as velocidades de sedimentos teóricas será inserido do fundo do mar até o final do modelo. Esta etapa é chamada *Sediment flood*.

Como explicado no capítulo anterior, utilizamos um gradiente de velocidades teórico para sedimentos do pós-sal. O modelo de velocidades passa a ser então conforme a Figura 28. Esse modelo não considera a verdadeira disposição das camadas da porção sedimentar do pós-sal, mas, mesmo assim, o resultado ainda será útil. Elementos intrusivos de origem mantélica passam a ser um problema nesta etapa, pois tem velocidade muito diferente das modeladas, mas não incluímos nenhum desses elementos em nosso modelo. Caso tivéssemos

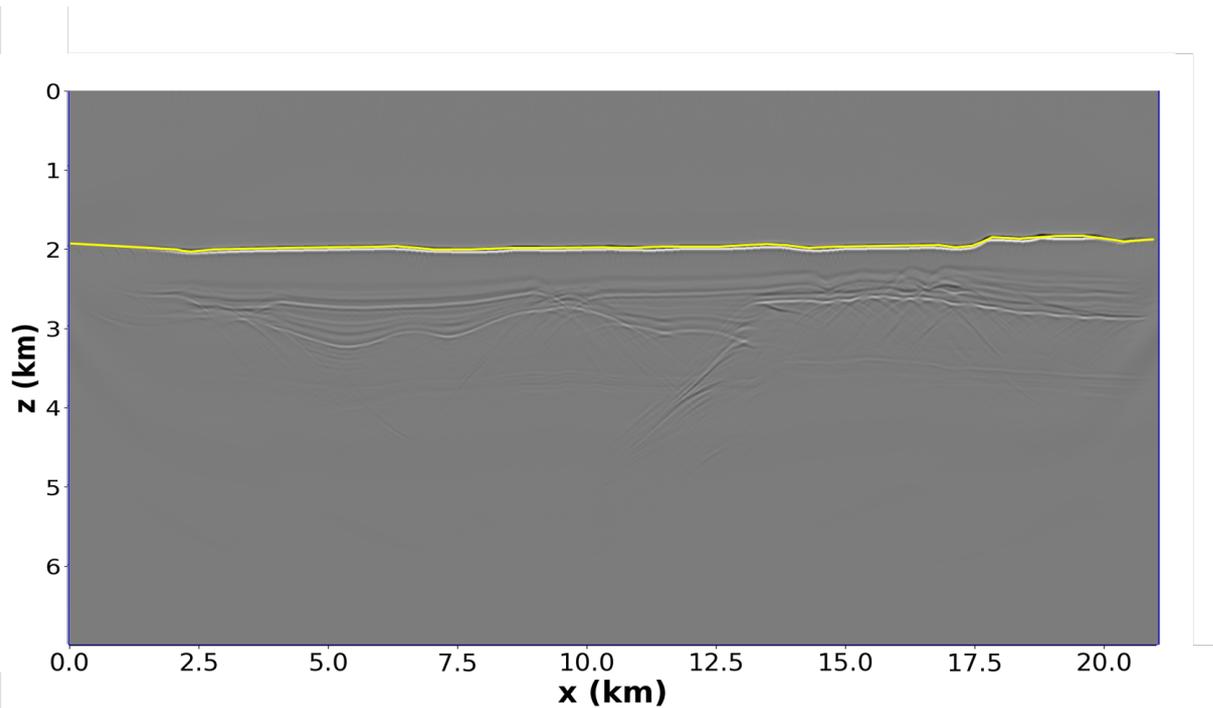


Figura 27 – Horizonte do fundo do mar (em amarelo) interpretado sobre a sísmica gerada na etapa *water flood*.

tais elementos no modelo seria necessário uma definição de topo e base, para a inclusão pontual de velocidade coerente com o evento, para não prejudicar a imagem abaixo da intrusão. Isso poderá ser feito em trabalhos futuros.

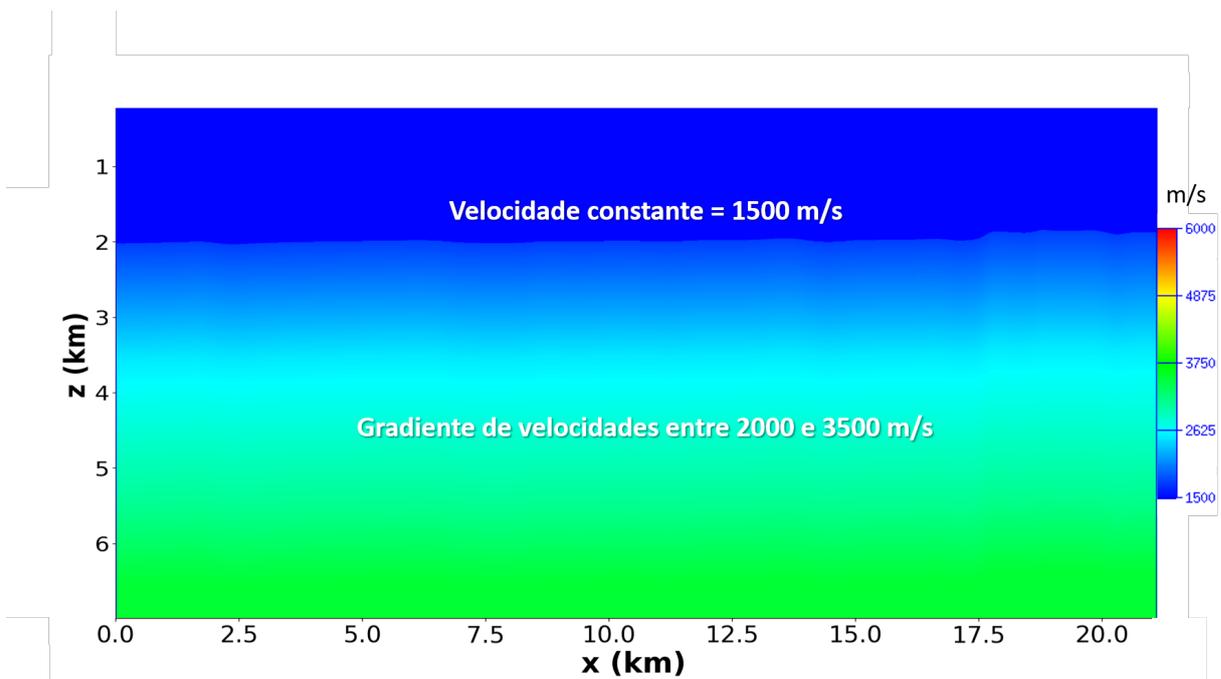


Figura 28 – Modelo de velocidades atualizado com a inclusão do gradiente de sedimentos abaixo do horizonte interpretado na Figura 27 - (*Sediment flood*).

Migramos uma segunda vez, agora com este novo modelo e passamos a ter uma sísmica

mica com velocidade correta (ou muito próximo da correta) na parte da água, parcialmente correta para o sedimento pós-sal e incorreta do topo do sal para baixo.

É possível notar se compararmos as Figuras 26 e 29, que o modelo de velocidades já consegue nesse ponto imagear razoavelmente bem as principais estruturas nos sedimentos do pós-sal e o topo do sal, mas a base do sal e o pré-sal se encontram completamente turvos e mal localizados. Apenas o *overhang* está mal imageado, pois conta com uma inversão de velocidades que o nosso modelo não contempla.

Neste momento é possível interpretar o horizonte do topo do sal, como mostra a Figura 30. Note que esse topo contém algo incoerente na região do *overhang*. Isto é comum nesta etapa do processo e a solução foi explicada na seção 2.10. Porém não aplicaremos nenhuma solução neste estudo, como explicado no capítulo de Metodologia.

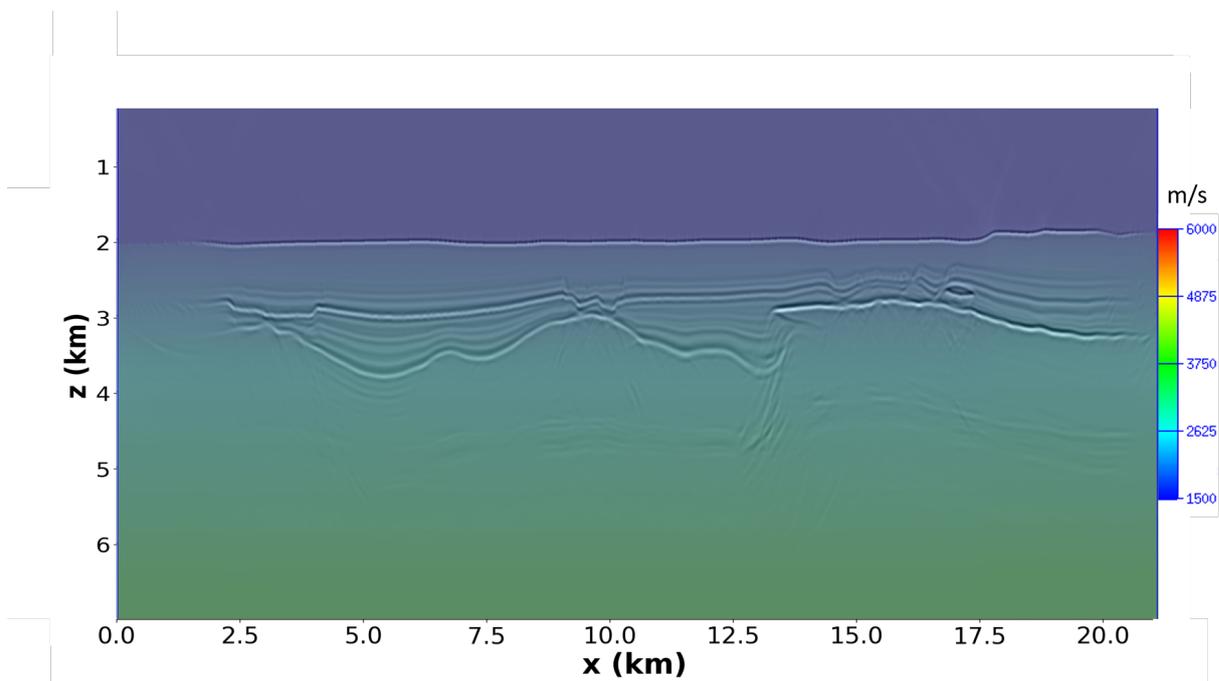


Figura 29 – Modelo de velocidade apresentado na Figura 28 com transparência sobre o dado sísmico migrado com esta velocidade.

5.4 *Salt flood*

De posse do horizonte do topo do sal interpretado, vamos inserir no modelo uma velocidade do sal deste ponto até o final do modelo. Não se tendo informação do tipo do sal, usa-se a velocidade da halita, por ser o sal mais comum nos depósitos brasileiros e que se aproxima de 4500 m/s. O modelo atualizado pode ser visualizado na Figura 31. Este modelo de velocidades será capaz de migrar o dado com grande grau de acerto até a base do sal, como mostra a Figura 32.

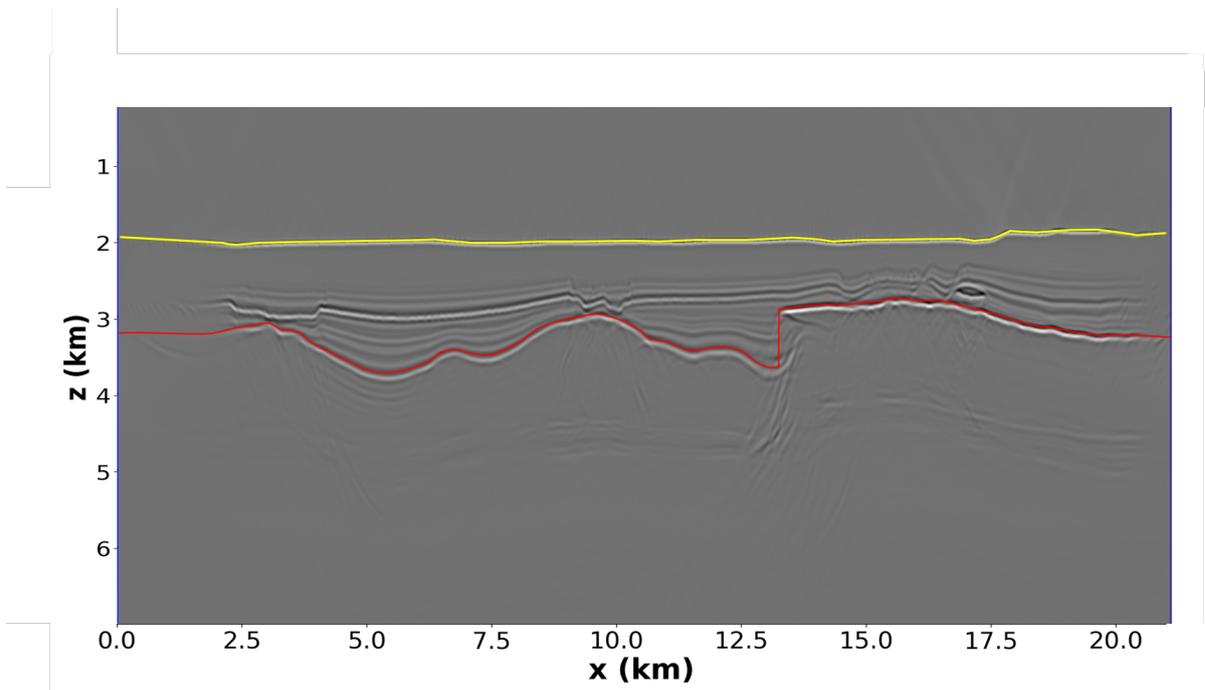


Figura 30 – Horizonte do topo do sal (em vermelho) interpretado sobre a sísmica gerada na etapa *sediment flood* e o horizonte do fundo do mar (amarelo) gerado na etapa anterior.

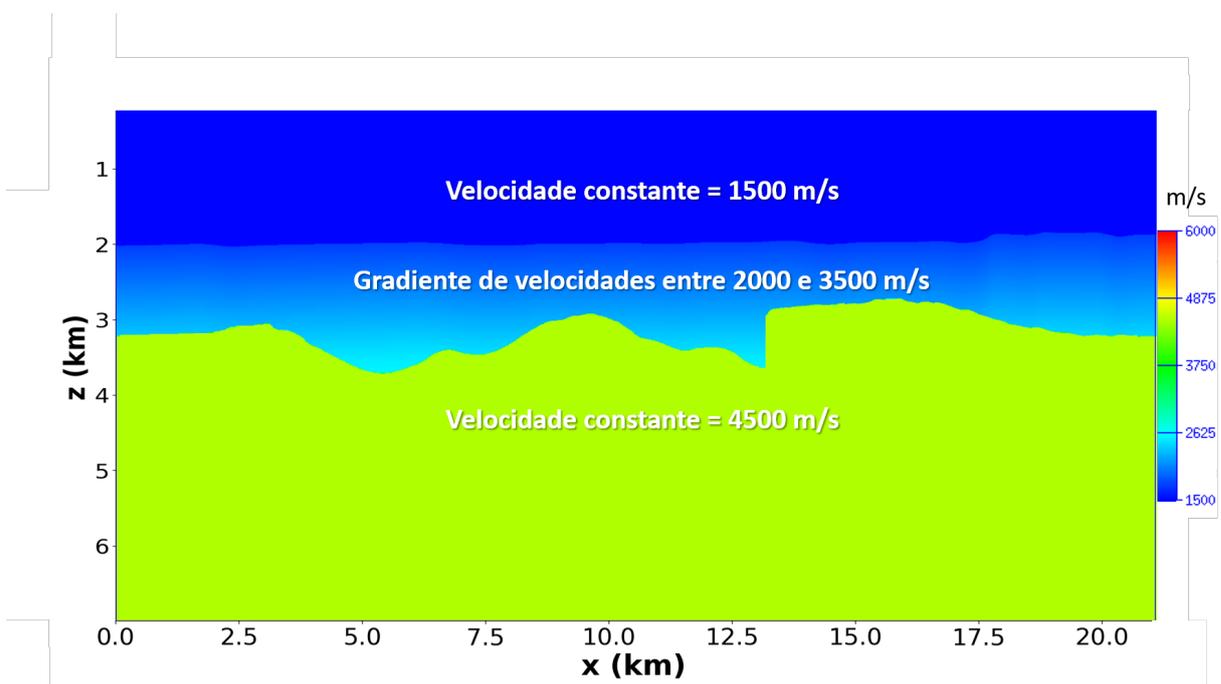


Figura 31 – Modelo de velocidades atualizado com a velocidade do sal (4500 m/s) do horizonte interpretado (Figura 30) até o final do modelo - *Salt flood*.

Note que a Figura 33 aponta para elementos importantes nessa etapa. Uma nova base e topo do sal passam a ser imageadas (seta branca). Não tínhamos essa informação quando interpretamos a etapa *sediment flood*, como mostra a Figura 29. Sem essa informação a interpretação colocou mais sal no modelo do que deveria, gerando uma velocidade maior

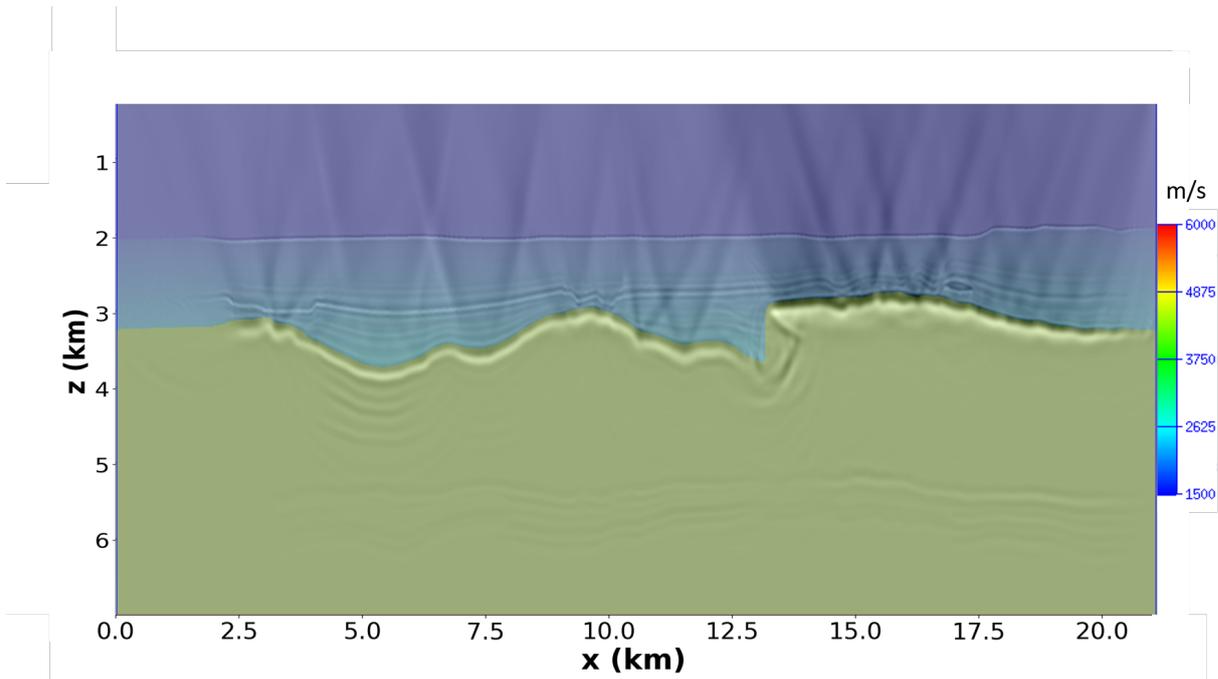


Figura 32 – Modelo de velocidade apresentado na Figura 31 com transparência sobre o dado sísmico migrado com esta velocidade.

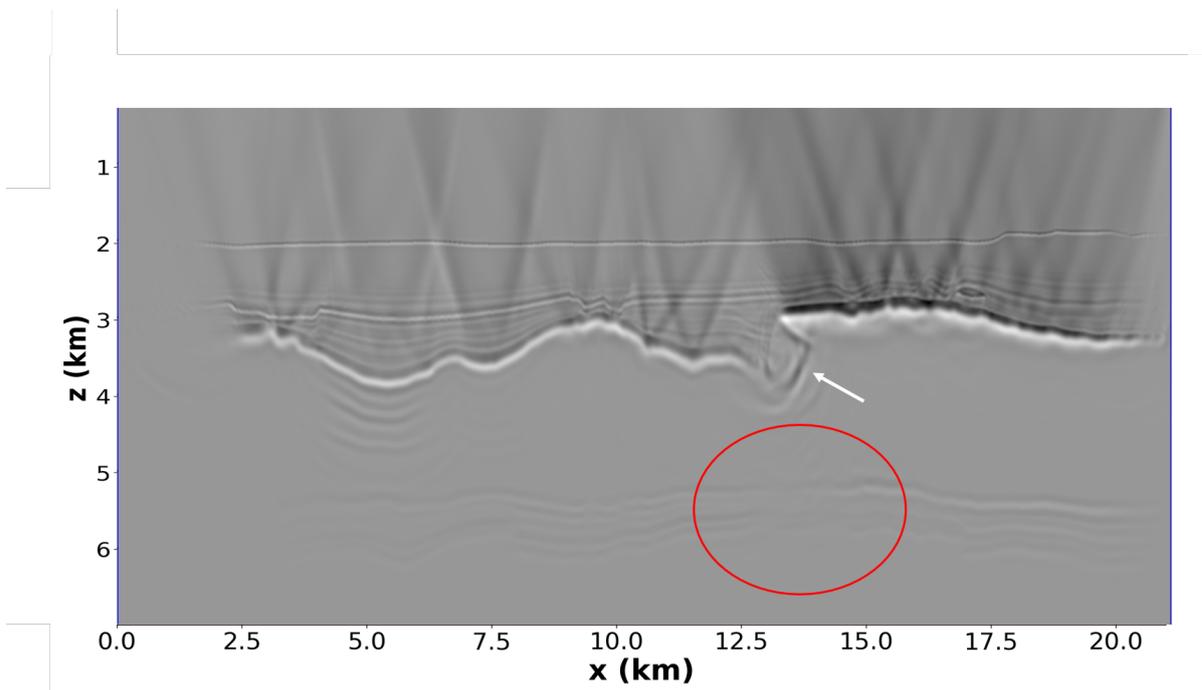


Figura 33 – Pontos de atenção na migração mais recente. A seta branca aponta para um flanco e parte do topo de sal mal imageado. O círculo vermelho apresenta a base do sal e o pré-sal sem definição.

que a real nessa parte do modelo. O resultado pode ser visto dentro do círculo vermelho da Figura 33. A base do sal, e o pré-sal logo abaixo estão mal imageados. Segundo [Zambrini et al. \(2020\)](#), é comum uma perda de energia associada a grandes mergulhos de sal e estruturas como o *overhang* e paredes de sal.

Para o nosso modelo, que contém um pequeno *overhang*, ainda é possível extrapolar a informação e interpretar uma base do sal, mesmo com a velocidade maior que a real, mas lembrando que isso vai acarretar em um horizonte mais profundo que a realidade. Em casos reais podemos ter *overhangs* muito mais desenvolvidos, onde algumas vezes o sedimento do pós-sal praticamente encosta no pré-sal, causando uma erro no modelo de velocidades bem maior que o apresentado e, por consequência, uma base do sal e um pré-sal completamente apagados, pois a condição de imagem da RTM não será satisfeita.

Para resolver esse problema, necessita-se de mais etapas de interpretação do sal, onde primeiramente a base menos profunda será imageada, e a velocidade de sedimentos será devolvida ao modelo abaixo dessa base, então uma nova migração será necessária, para se interpretar o topo mais profundo, e então recolocar a velocidade do sal abaixo desse segundo topo.

Esta etapa é de extrema importância na construção do modelo e, normalmente, a que demanda mais tempo. Sempre que a velocidade do modelo não estiver coerente com a geologia real o efeito será fortemente notado na base do sal e no pré-sal. Podemos utilizar essas regiões turvas (Figura 33) como guia para selecionarmos as partes do nosso modelo que mais precisam de atenção na nova interpretação. Diversos formatos de sal podem ser testados para se avaliar qual apresenta uma base do sal melhor definida. Chamamos esta etapa de cenários de sal. Não realizamos neste trabalho, porém deverá ser realizada em trabalhos futuros com este mesmo modelo.

Interpretando o horizonte da base do sal, temos a Figura 34.

5.5 Inclusão do gradiente do pré-sal

Interpretando a base do sal e incluindo um gradiente de pré-sal temos o modelo para a nossa migração final, como podemos ver na Figura 35. O gradiente foi inserido seguindo o formato da base do sal, com velocidades teóricas que variam de 4700 até 5500 m/s. Após a migração final (ver Figura 36) iremos então avaliar as diferenças entre os modelos de velocidade apresentados e os resultados da migração direta com a velocidade correta.

Sem as técnicas de tomografia e FWI, ou o reinício do processo, como proposto por [Marpeau e Belz \(2019\)](#), este modelo é o mais próximo que conseguimos chegar do modelo utilizado na aquisição simulada. Os gradientes não acompanham perfeitamente as camadas, apenas são repetições da camada superior. Para este modelo essas camadas estão bem comportadas, mas em regiões com o sal mais deformado, o resultado não será tão aproximado. Um ponto a se destacar é que a imagem está próxima da esperada, porém as profundidades possuem erros. Um ponto a nosso favor é que com o aumento da

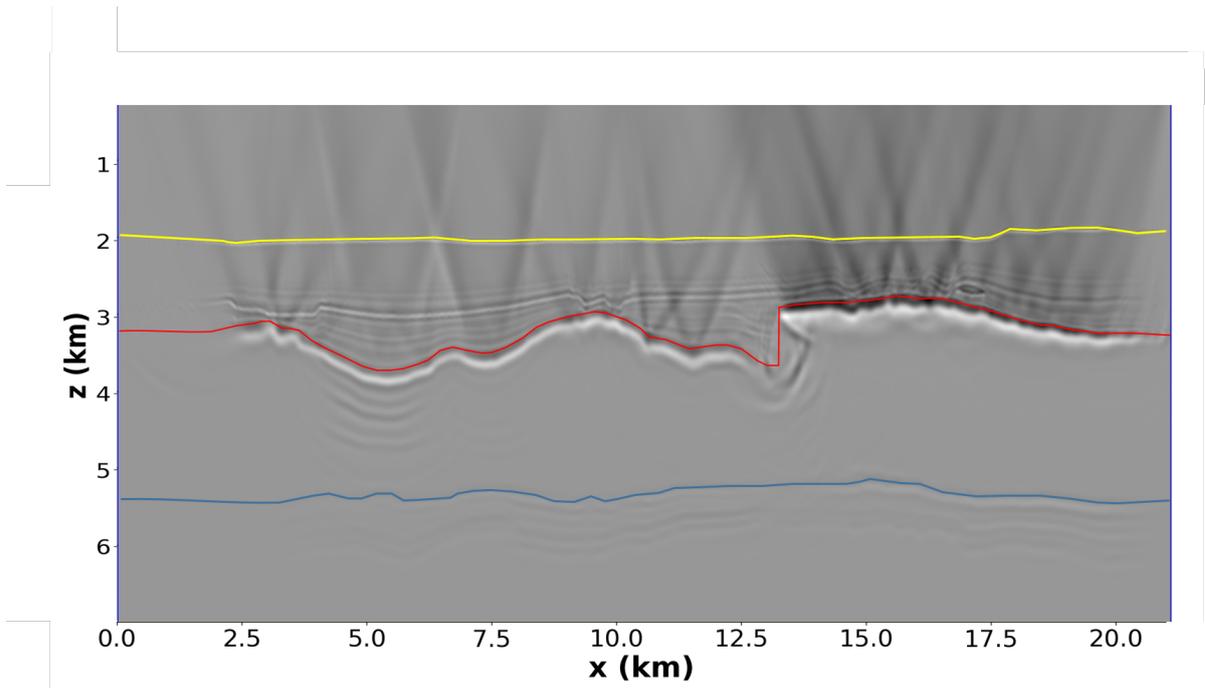


Figura 34 – Horizonte da base do sal (em azul) interpretado sobre a sísmica gerada na etapa *salt flood*, e em vermelho e amarelo os horizontes do topo do sal e fundo do mar, respectivamente, gerados em etapas anteriores.

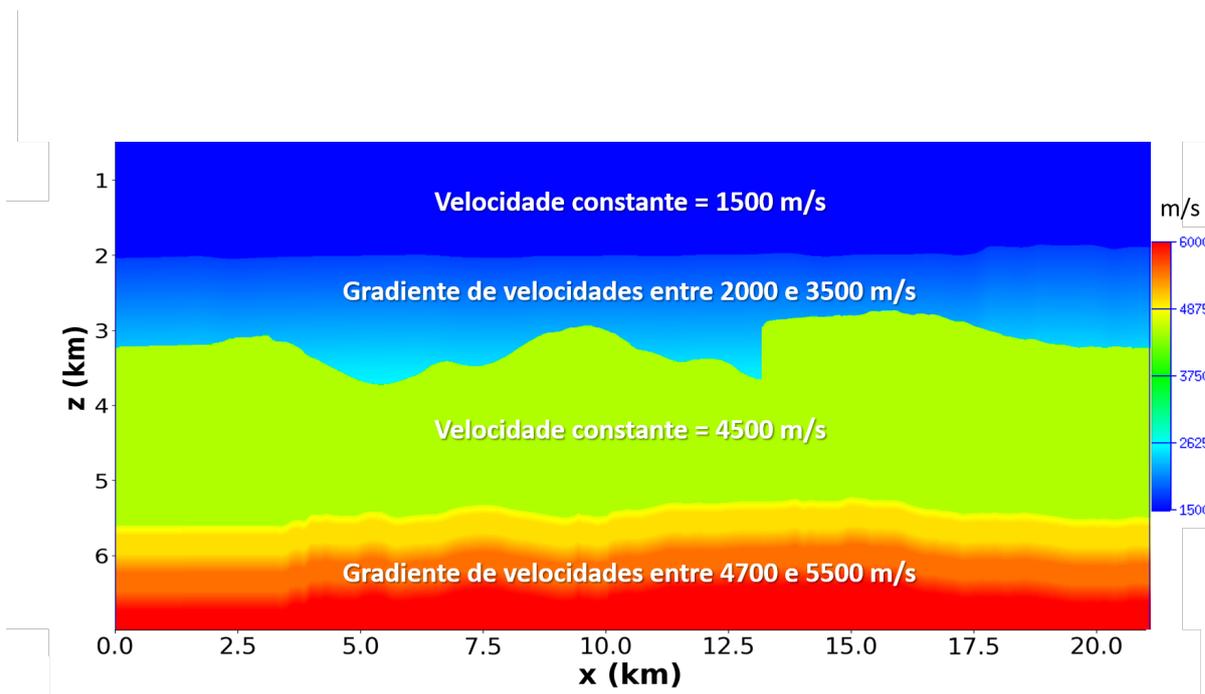


Figura 35 – Modelo de velocidades atualizado com a velocidade do pré-sal do horizonte da base do sal interpretado (Figura 34) até o final do modelo - Modelo de velocidades final.

profundidade, pequenas diferenças de velocidade geram erros menores. Sendo assim é mais importante ter velocidades corretas no sedimento do pós-sal e no topo do sal, do que no pré-sal. Técnicas de FWI tem sérias dificuldades em atualizar velocidades profundas, mas

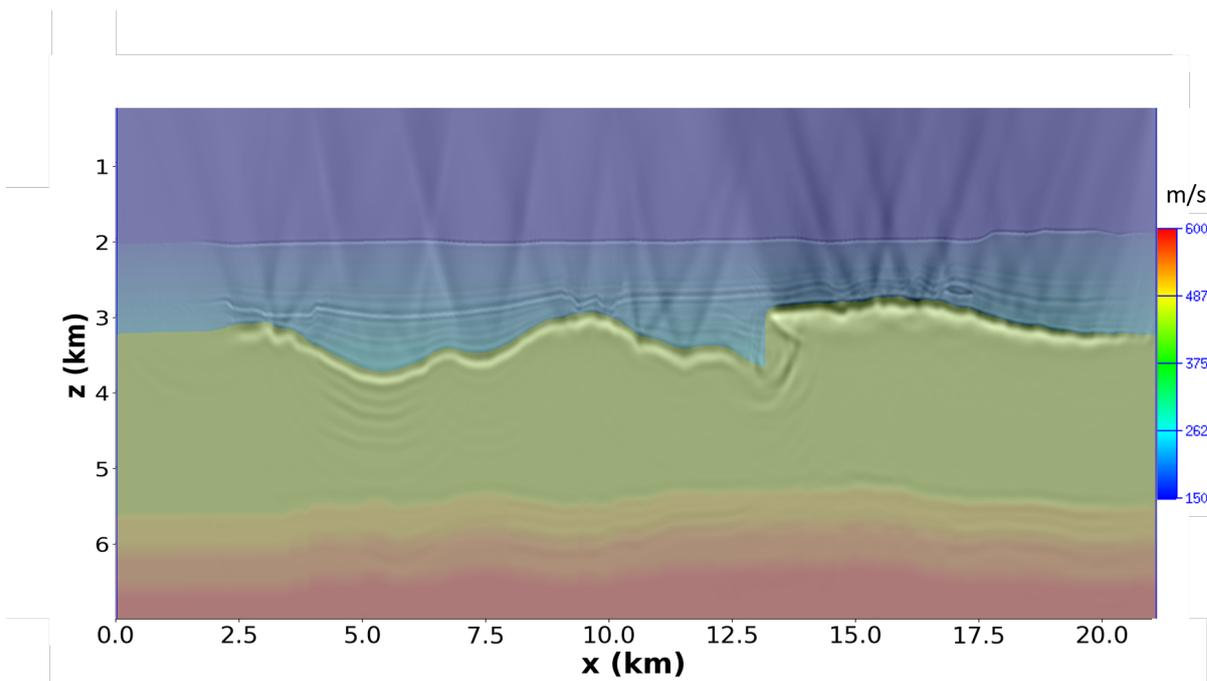


Figura 36 – Modelo de velocidade apresentado na Figura 35 com transparência sobre o dado sísmico migrado com esta velocidade. Esta é a melhor migração que conseguimos com um único ciclo para o método *layer cake* utilizando o *top-down approach*.

são muito eficientes nas partes rasas, onde, para a exploração do pré-sal, é mais importante que estejam corretas.

5.6 Comparação entre o resultado obtido e o resultado esperado

Comparamos então o resultado da migração obtido a partir da aplicação do método proposto (Figura 37) com uma migração realizada com o modelo utilizado para a modelagem (Figura 38), o que representa o melhor resultado possível. Note que apesar das diferenças das velocidades representadas nas Figuras 35 e 23, ainda sim o método aplicado foi capaz de imagear razoavelmente bem todas as estruturas. Contudo nota-se um deslocamento vertical em muitas partes, o que pode ocasionar interpretações erradas, inclusive de caminhos de migração de óleo, ou a presença ou não de um reservatório economicamente viável.

Atualmente não se faz uso deste método na indústria sem o auxílio da técnica de tomografia, e muitas vezes da FWI. Velocidades diferentes das reais serão observadas em dados abertos através da não horizontalização de eventos nas famílias CMP, ou outro arranjo que leve em consideração a abertura de ângulo de reflexão, mostrando uma curva positiva ou negativa com o aumento do *OFFSET* (ou ângulo), demonstrando que a velocidade está incorreta. As técnicas de tomografia são capazes de corrigir esses erros através da comparação entre o tempo de trânsito observado e modelado e atualizar o modelo de velocidades, diminuindo as diferenças com a velocidade real.

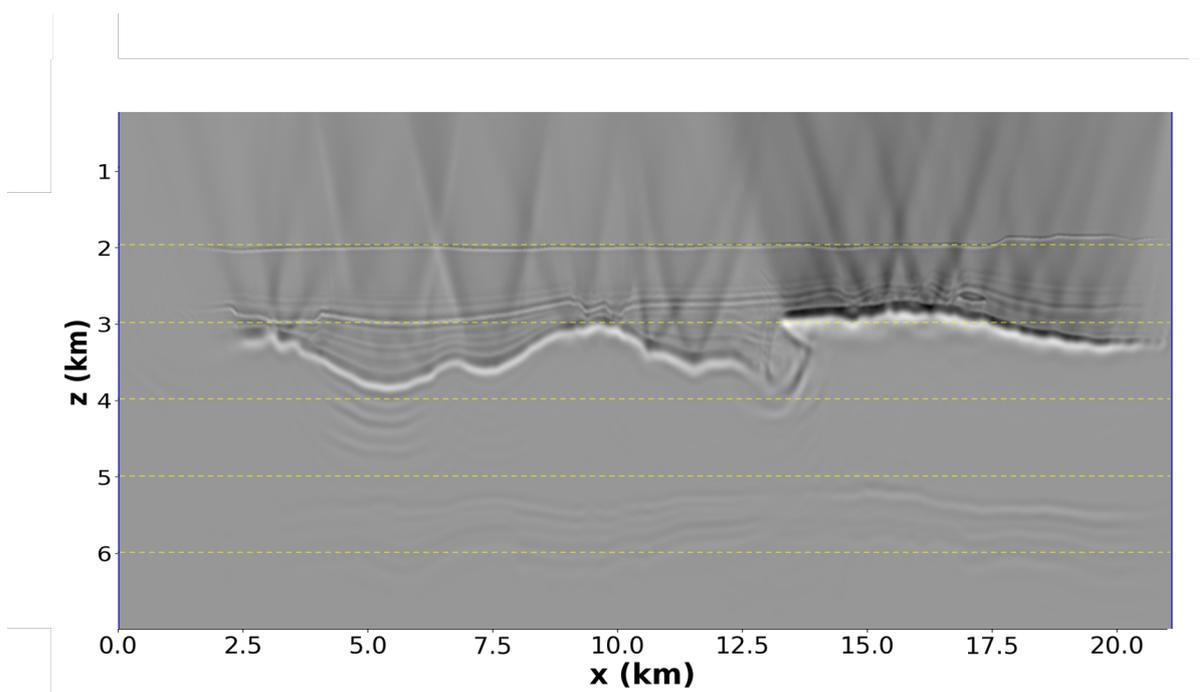


Figura 37 – Sísmica migrada com modelo de velocidades final (Figura 35). As linhas pontilhadas são guias para melhor observar as diferenças de profundidade entre esta Figura e a Figura 38, causadas pelos erros no nosso modelo final.

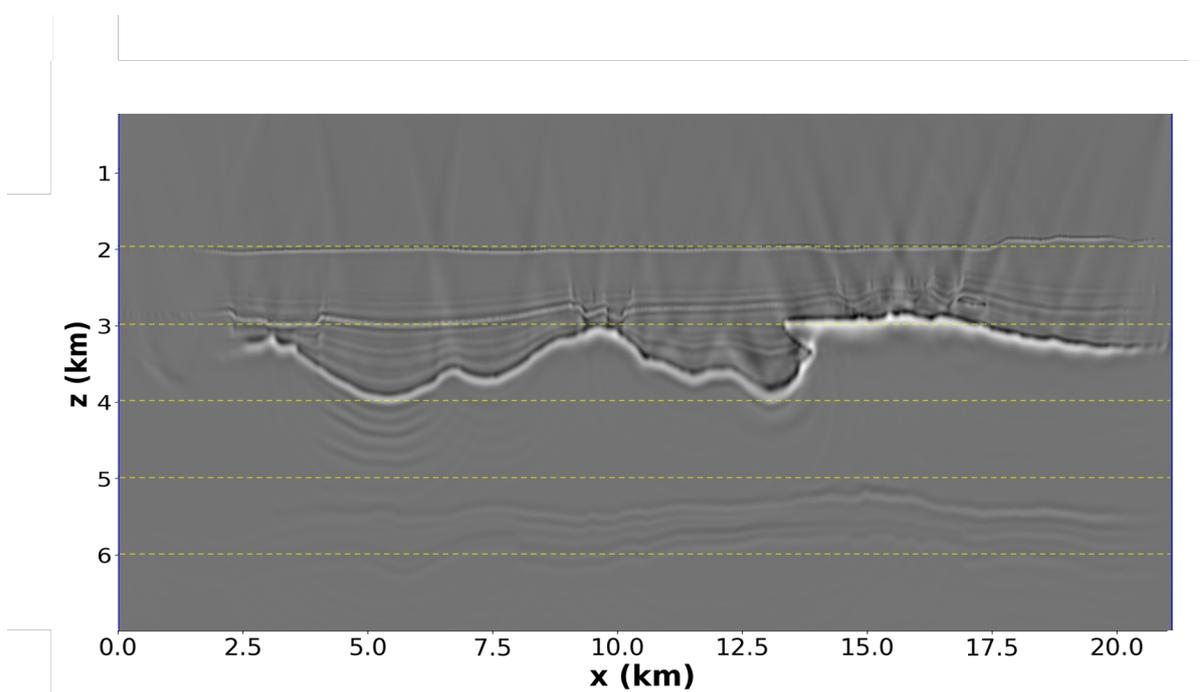


Figura 38 – Sísmica migrada com a velocidade correta (Figura 23).

5.7 Analisando os impactos dos erros da velocidade e de interpretação na região do *overhang*

Considerando que temos as velocidades corretas do sedimento, e que apenas nos falta a informação do *overhang* teríamos o seguinte modelo de velocidade, conforme a Figura 39. Este modelo seria o resultado de uma FWI (perfeita) aplicada ao modelo da Figura 28 e com posterior inclusão do sal, seguindo o horizonte da etapa *salt flood*. Vamos comparar os impactos dessa correção na velocidade do pós-sal, mas mantendo o erro de interpretação no sal, por desconsiderar o *overhang* e a camada de anidrita sobre o topo do halita.

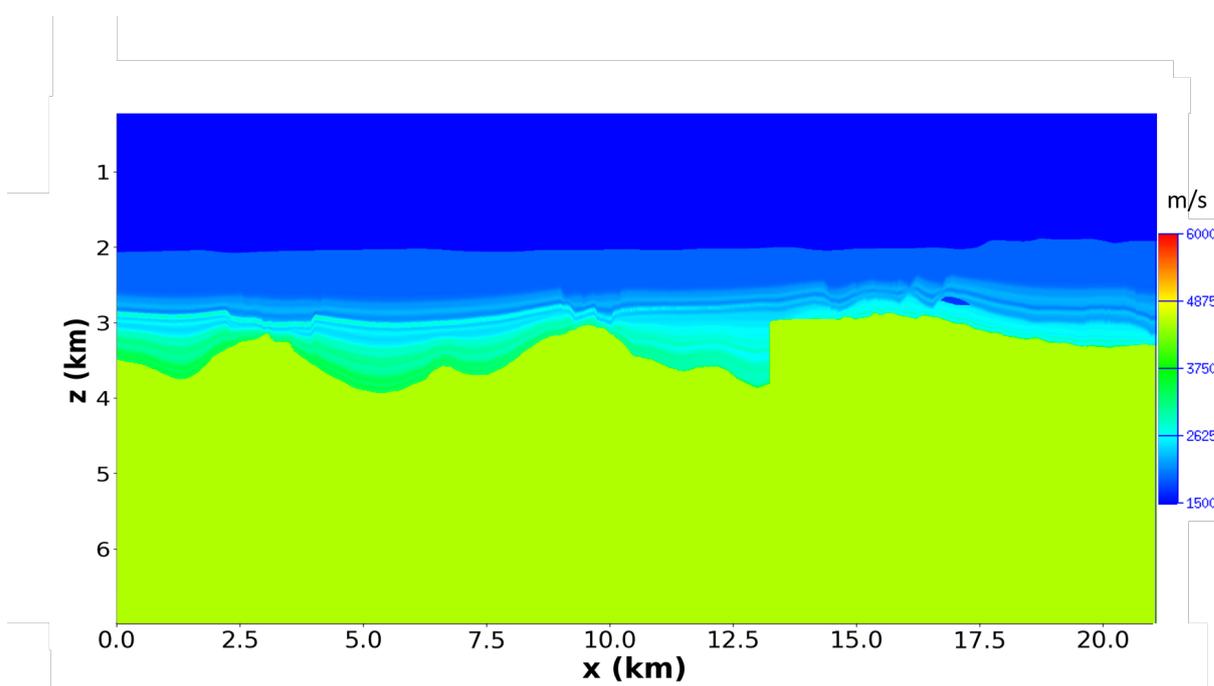


Figura 39 – Modelo de velocidades correto até o topo do sal, não diferenciando halita da anidrita.

Se compararmos as Figuras 40 e 41 podemos ver uma melhoria significativa em todo o topo do sal, um melhor posicionamento das estruturas do pós-sal e uma leve melhora no pré-sal abaixo do *overhang*, porém ainda mal imageado. Note que as falhas do pós-sal agora estão claras, assim como o topo do sal está mais *sharp*. Ainda se faz necessária a correta inclusão de velocidades de sedimentos na região do *overhang* para o correto imageamento da base.

O modelo apresentado na Figura 42 agora considera as velocidades da anidrita no topo da halita e o *overhang* está corretamente considerado neste modelo. Esse modelo será capaz de migrar corretamente a base do sal, não mais colocando dúvidas quanto a sua interpretação, conforme a Figura 43.

Como o objetivo principal é observar bem o efeito abaixo do *overhang* a Figura 44

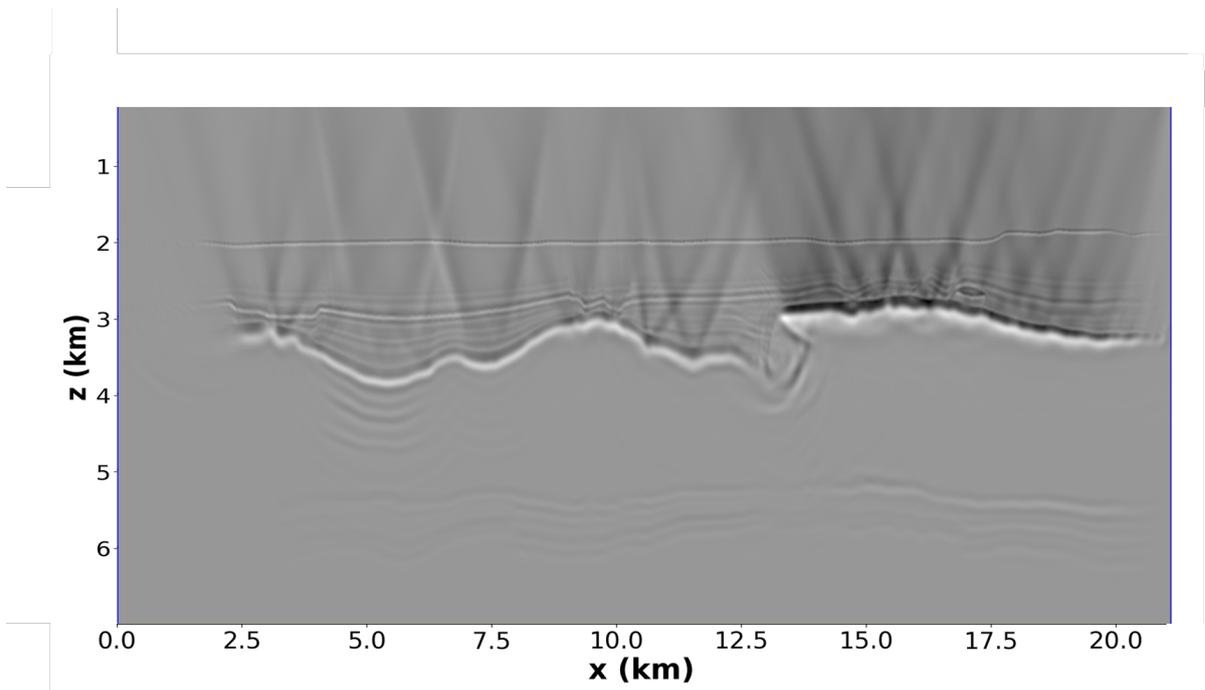


Figura 40 – Sísmica migrada com modelo de velocidades da etapa *salt flood* (Figura 32)

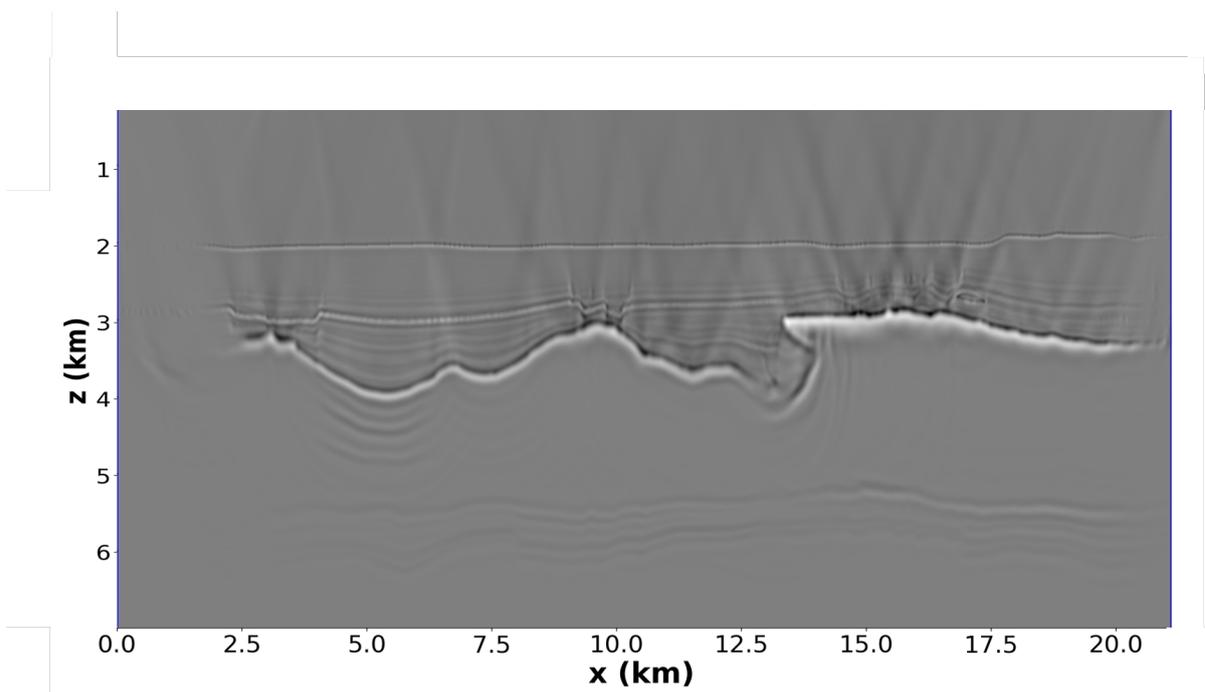


Figura 41 – Sísmica migrada com modelo de velocidades correto até o topo do sal (Figura 39).

apresenta uma área específica do modelo onde um *zoom* foi aplicado e analisado na Figura 45, que apresenta um comparativo da imagem do pré-sal abaixo da estrutura para algumas etapas importantes do processo. Note que em todas as etapas anteriores com a inclusão da velocidade do sal não é possível observar nenhuma energia coerente em sua base. Na parte “C” da Figura 45 já é possível ver a base do sal, porém exatamente abaixo do *overhang*

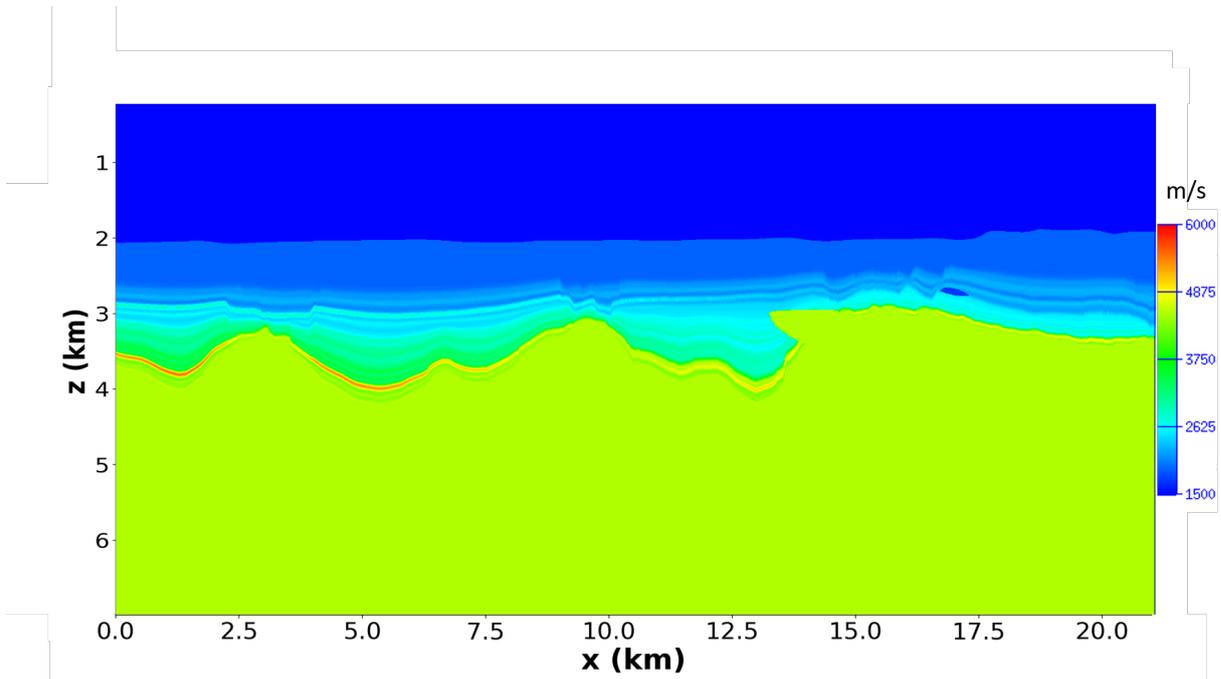


Figura 42 – Modelo de velocidades correto até o topo da halita, com a diferenciação da anidrita e com a correta interpretação do *overhang*.

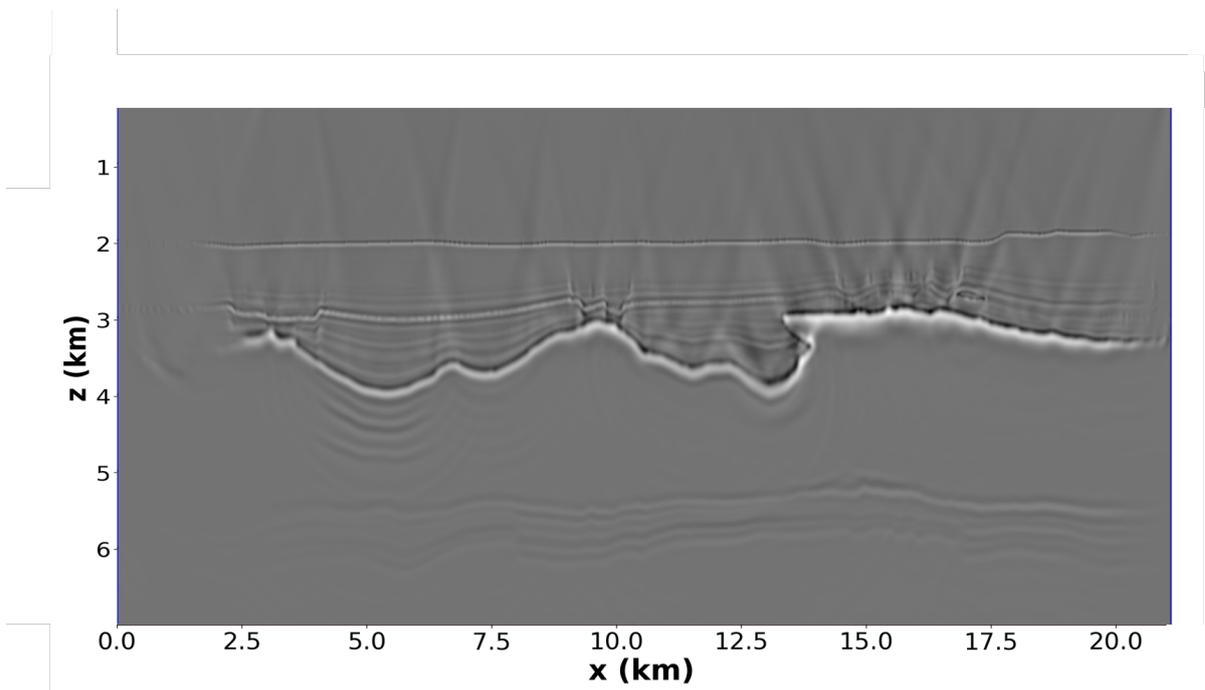


Figura 43 – Sísmica migrada com o modelo de velocidades apresentado na Figura 42.

não há focalização de energia. Isso ocorre por um erro de interpretação causado pelo método, como explicado anteriormente. Em “D”, com a correção do sal, passamos a ter uma imagem coerente no pré-sal.

Note que o modelo já é capaz de migrar com bastante precisão todos os elementos do dado. Então para resolvermos os problemas de imageamento causados pelas complexidades,

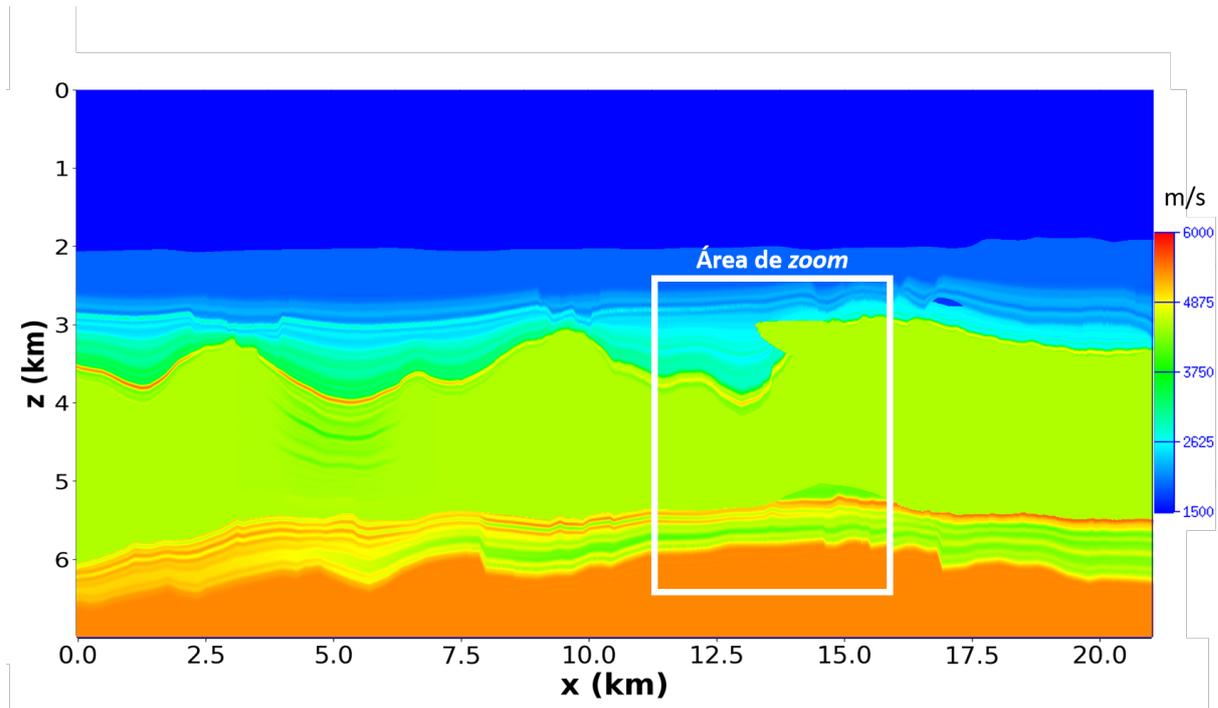


Figura 44 – Área do modelo onde aplicamos o *zoom* para melhor avaliarmos o *overhang* (ver Figura 45).

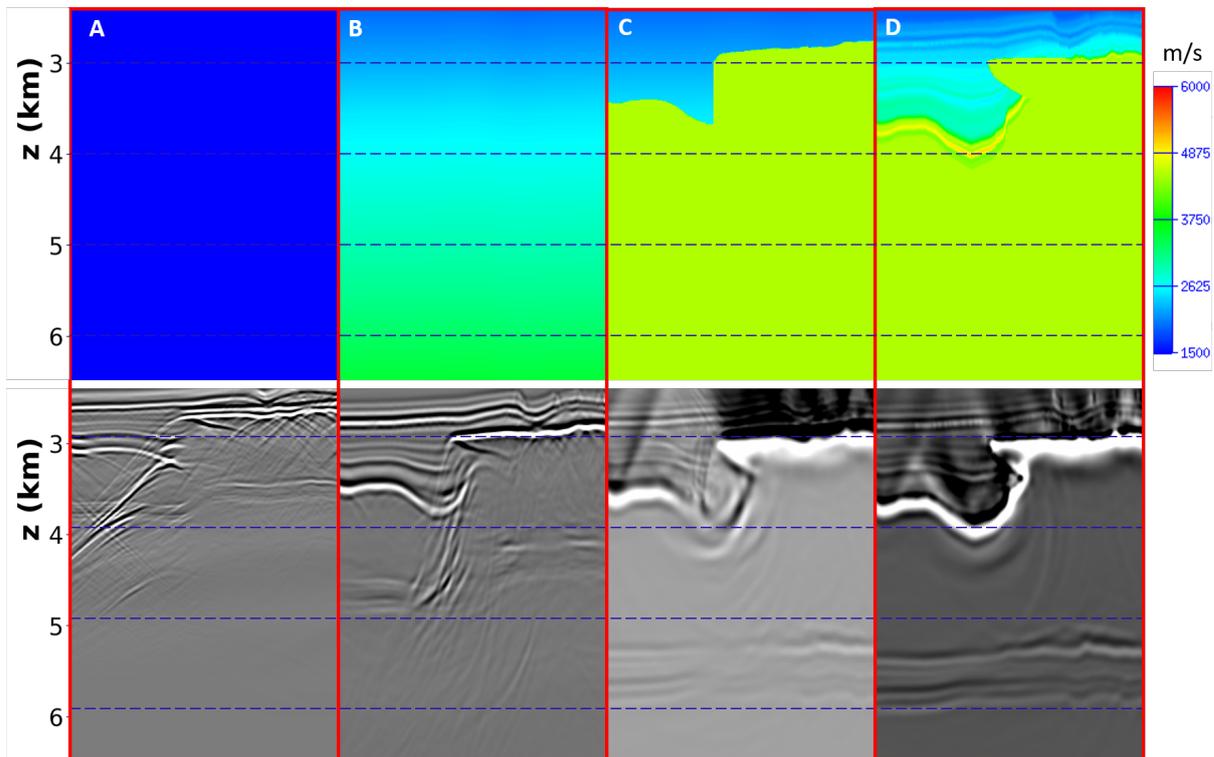


Figura 45 – A Figura apresenta a evolução da imagem (parte inferior) conforme o modelo de velocidades (parte superior) vai sendo aprimorado: “A” apresenta o modelo de velocidades do *water flood*; “B” traz o modelo de velocidades do *sedimental flood*; “C” o modelo de velocidades do *salt flood*; e “D” o resultado de um modelo de velocidades que considera o *overhang* e as complexidades do sal.

principalmente do sal, a solução é uma boa interpretação, principalmente do topo do sal e de elementos com velocidades muito contrastantes, como ígneas intrusivas, associado a uma correção do modelo de velocidades, baseado em tomografia e FWI. O trabalho apresentado por [Marpeau e Belz \(2019\)](#) nos esclarece que após finalizada a primeira etapa *top-down approach*, caso o resultado não seja capaz de imagear corretamente a área de interesse, no caso aqui a base do sal e o pré-sal, deve-se iniciar novamente o processo, concentrando os esforços principalmente na estrutura do sal, visando uma interpretação mais acurada, principalmente de *overhangs*, ou outra estrutura complexa que não tenha sido corretamente interpretada. Para que não haja no modelo inserções de velocidades de sal sobre camadas sedimentares, gerando a não focalização de energia nas regiões próximas, e principalmente, abaixo deste ponto de erro.

6 Conclusões e recomendações de trabalhos futuros

Este trabalho possuía dois objetivos principais: O primeiro era criar um modelo útil, representativo, baseado em dados reais e com pontos de atenção para as técnicas mais recentes na construção de um bom modelo de velocidades, como RTM, tomografia e FWI. O segundo objetivo era apresentar um método prático para obtenção de um modelo de velocidades adequado para o imageamento do pré-sal brasileiro, sem o uso de informações de poços, e como pequenos erros impactaram na construção do modelo e na imagem final.

A ideia inicial era fazer uma FWI no *sediment flood* (Figura 28) e no modelo *salt flood* (Figura 31), como sugerido pela Figura 12. Porém, como observado na tabela 1, o *streamer* era muito curto para a obtenção de ganho, não sendo possível apresentar resultados da FWI. Na fase da modelagem escolhemos um cabo (*streamer*) curto por conta do custo computacional. Fizemos tentativas de aplicar a FWI neste dado, porém o modelo não atualiza devido a falta de *diving waves*. Um futuro trabalho deverá ser desenvolvido neste modelo com um cabo mais longo e realizando tomografia e FWI em cada etapa de *flood*.

A imagem apresentada na Figura 37 deixa claro que o método, mesmo que utilizado de maneira linear, sem revisão de nenhum passo, nem FWI, nem tomografia, consegue imagear bem as estruturas simples, incorrendo em erros apenas nas proximidades inferiores das estruturas mais complexas. O trabalho de interpretação associado a pequenas alterações no modelo é capaz de fornecer uma melhoria considerável na imagem final, como apresentado na comparação entre as Figuras 41 e 43, onde o motivo da obtenção de ganho na imagem apenas se deu pela correta interpretação do *overhang* e da camada de alta velocidade sobre o sal.

O esquema apresentado na Figura 24 demonstra a importância da sinergia entre migração, interpretação e construção do modelo de velocidades. Esses três pilares são fundamentais para o resultado final e erros em qualquer uma dessas etapas apresentarão falhas na imagem final. Sendo o pré-sal extremamente profundo e o sal complexo e espesso, qualquer pequeno erro pode acarretar na falha de imageamento. Toda a construção do modelo utilizando o método *layer cake* contém pequenos erros, desde a velocidade do sedimento não estar correta, até erros de interpretação induzidos pelo próprio método, em certo aspecto. No entanto, é justamente embaixo das estruturas complexas que o impacto negativo é maior. Em toda nossa seção, apenas abaixo do *overhang* o pré-sal não foi imageado.

A solução viria de dois caminhos: a repetição do processo com extrema atenção na interpretação; e técnicas de inversão para encontrar as velocidades mais próximas das reais, como tomografia e FWI. Lembrando sempre que um guia de erro do modelo de velocidades é a não geração da imagem, e que a base do sal, por ser o topo do nosso reservatório, acaba sendo o nosso maior foco de imageamento.

Consideramos que os objetivos deste trabalho foram atingidos. O modelo apresentado na Figura 23 está disponível a toda a comunidade do GISIS e foi utilizado não somente neste estudo, mas em outros trabalhos para o aperfeiçoamento de técnicas de inversão. A grande maioria dos trabalhos que utilizam modelos complexos, como o Marmousi (VERSTEEG, 1994), são interessantes para os testes das técnicas, mas não se assemelham à geologia que temos encontrado no nosso pré-sal. Nosso modelo representa melhor a nossa bacia, pois foi criado após uma análise detalhada da geologia apresentada na carta lito-estratigráfica (MOREIRA et al., 2007), mantendo os desafios de imageamento dos modelos disponíveis (como Marmousi) e ainda acrescentando novos. No início deste trabalho não encontramos um modelo acadêmico que se assemelhasse ao que temos trabalhado na indústria e estamos satisfeitos com o resultado.

6.1 Recomendações para trabalhos futuros

Este trabalho apresentou uma metodologia facilmente replicável, que poderá ser utilizada em trabalhos futuros, tanto neste modelo, como em qualquer outro modelo baseado na geologia das bacia do pré-sal brasileiro. Semelhantemente ao que se aplica na indústria para estruturas complexas como o *overhang* deveríamos recomeçar o *top-down* focando em corrigir erros de interpretação para a estrutura. O ganho, caso o processo fosse retomado, estaria em um aumento do imageamento da base do sal. Caso a FWI fosse aplicada, teríamos eventos mais coerentes e melhor posicionados.

Um trabalho futuro poderia incluir novos desafios ao imageamento no modelo, como a presença de rochas intrusivas de origem mantélica, tanto no pós sal quanto intra-sal. Isso acarretaria em ainda mais inversões de velocidade. Associado a estas modificações técnicas de inversão poderiam ser aplicadas para direcionar a interpretação para tais corpos, além de sugerir uma velocidade aproximada a ser utilizada na atualização do modelo.

Outro ponto a ser trabalhado é o sugerido por Marpeau e Belz (2019), onde a técnica será aplicada quantas vezes necessária dentro de uma única etapa de *flood*, visando sempre a convergência de energia na base do sal e sua coerência geológica.

Referências

- ALVES, R. R. Emprego do método gpr e da migração reversa no tempo (rtm) na compreensão e solução de problemas geotécnicos. Universidade Federal da Bahia, Singapore, Dissertação de Mestrado - Universidade Federal da Bahia, 2015. Citado 2 vezes nas páginas 31 e 32.
- ANP. *Plano de Desenvolvimento Aprovado Reunião de Diretoria nº 832 de 18/02/2016 – Resolução nº 093/2016*. 2016. Citado 2 vezes nas páginas 8 e 46.
- ANP. *BACIA DE SANTOS - Sumário Geológico e Setores em Oferta*. 2017. Citado 3 vezes nas páginas 8, 42 e 43.
- BAYSAL, E.; KOSLOFF, D. D.; SHERWOOD, J. W. C. Reverse time migration. *Geophysics*, GEOPHYSICS. VOL. 48, NO. II; P. 1514-1524, 1983. Citado na página 34.
- BUNKS, C. et al. Multiscale seismic wave-form inversion. *Geophysics*, v. 60, p. 1457–1473, 09 1995. Citado na página 38.
- CHANG, H. K. et al. Tectonics and stratigraphy of the east brazil rift system: an overview. *Tectonophysics*, v. 213, n. 1, p. 97 – 138, 1992. ISSN 0040-1951. Geodynamics of Rifting, Volume II Case History Studies on Rifts: North and South America and Africa. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0040195192902533>>. Citado 2 vezes nas páginas 43 e 45.
- EICHKITZ, C.; AMTMANN, J. Enhanced velocity modeling for a geothermal project in the southern vienna basin - a stacking velocity approach. *72nd EAGE Conference Exhibition incorporating SPE EUROPEC Barcelona, Spain, 14 - 17 June 2010*, 2010. Citado 2 vezes nas páginas 16 e 35.
- FALCÃO, L.; SANTOS, M. C.; MAUL, A. *O SAL ESTRATIFICADO E SUA IMPORTÂNCIA NA MODELAGEM DE VELOCIDADES PARA FINS DE MIGRAÇÃO SÍSMICA*. Tese (Doutorado), 12 2017. Citado na página 52.
- FREITAS, J. T. R. Ciclos deposicionais evaporíticos da bacia de santos: uma análise cicloestratigráfica a partir de dados de 2 poços e de traços de sísmica. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Brasil, Dissertação de Mestrado, 2006. Citado 2 vezes nas páginas 42 e 46.
- GAMBÔA, L. et al. Evaporitos estratificados no atlântico sul: interpretação sísmica e controle tectono-estratigráfico na bacia de santos. *Sal: Geologia e Tectônica, Exemplos nas Bacias Brasileiras*, p. 340–359, 01 2008. Citado na página 52.
- GARCIA, S. et al. Análise de volumes de sal em restauração estrutural: um exemplo na bacia de santos. *Revista Brasileira de Geociências*, v. 42, p. 433–450, 06 2012. Citado na página 43.
- HUANG, Y. et al. Pre-salt depth imaging of santos basin, brazil. p. 2869–2873, 2009. Disponível em: <<https://library.seg.org/doi/abs/10.1190/1.3255446>>. Citado 2 vezes nas páginas 7 e 36.

- JONES, I. F. *A Practical Review of Migration Issues and Solution*. India: AAPG, 2011. Citado na página 34.
- KARSOU, A. et al. Construction of a velocity model of the brazilian pre salt based on búzios field - preliminary results. p. 1–5, 08 2019. Citado 3 vezes nas páginas 8, 50 e 51.
- KEAREY, P. *An introduction to geophysical exploration*. UK: Blackwell Science Ltd, a Blackwell Publishing Company, 2002. v. 86. Citado na página 16.
- LIMA, R. R. Q-rtm: Compensação do fator q na migração reversa no tempo. Universidade Federal da Bahia, Brasil, Dissertação de Mestrado - Universidade Federal da Bahia, 2017. Citado na página 31.
- MARPEAU, F.; BELZ, V. Status of salt interpretation for velocity model building in brazilian basins. Sixteenth International Congress of the Brazilian Geophysical Society, Sixteenth International Congress of the Brazilian Geophysical Society, 2019. Citado 5 vezes nas páginas 39, 41, 63, 71 e 73.
- MARSDEN, D. Layer cake depth conversion. *The Leading Edge*, v. 8, p. 10–14, 1989. Citado 5 vezes nas páginas 16, 17, 36, 39 e 47.
- MENDONÇA, A. et al. Cessão onerosa: governo arrecada r\$ 69,96 bilhões com megaleilão do pré-sal. **G1**, rio de janeiro e são paulo, 06 de novembro de 2019, disponível em <<https://g1.globo.com/economia/noticia/2019/11/06/cessao-onerosa-veja-os-resultados-do-megaleilao-do-pre-sal.ghtml>>. acesso em 04 de dezembro de 2020. 2019. Citado na página 42.
- MIO, E.; CHANG, H. K.; CORREA, F. S. *Integração de métodos geofísicos na modelagem crustal da Bacia de Santos*. BR: Revista Brasileira de Geofísica, 2005. v. 23. 275-284 p. Citado na página 43.
- MOHRIAK, W.; NEMCOK, M.; ENCISO, G. South atlantic divergent margin evolution: Rift-border uplift and salt tectonics in the basins of se brazil. *Geological Society, London, Special Publications*, v. 294, p. 365–398, 01 2008. Citado na página 45.
- MOREIRA, J. L. P. et al. *Bacia de Santos*. Rio de janeiro, BR: Boletim de Geociências da Petrobras, 2007. v. 15. 531-549 p. Citado 5 vezes nas páginas 8, 43, 44, 45 e 73.
- OLIVEIRA, A. E. L. d. Migração Reversa no Tempo (RTM) com Compensação de Iluminação no Dominio de Ondas Planas e por Mínimos Quadrados (LSM) no Domínio do Tiro. Universidade Federal da Bahia, Dissertação de Mestrado - Universidade Federal da Bahia, 2014. Citado na página 35.
- PEREIRA, M. J.; MACEDO, J. M. A bacia de santos: perspectivas de uma nova província petrolífera na plataforma continental sudeste brasileira. *Boletim Geociências da Petrobrás*, v. 4, p. 3–11, 1990. Citado na página 43.
- PESTANA, R.; STOFFA, P. Time evolution of the wave equation using rapid expansion method. *Geophysics*, *Geophysics*, 75(4):T121–T131, 2010. Citado na página 34.
- PETROBRAS. *Pré-Sal*. <http://www.petrobras.com.br/pt/nossas-atividades/areas-de-atuacao/exploracao-e-producao-de-petroleo-e-gas/pre-sal>. 2019. Citado na página 17.

- REDDY, P. Historical development of seismic imaging technique – an overview. 03 2019. Citado na página 50.
- ROSA, A. L. R. *Análise do sinal sísmico*. Rio de Janeiro: Sociedade Brasileira de Geofísica, 2010. Citado 3 vezes nas páginas 7, 19 e 37.
- SIDDIQUI, K. et al. Velocity model building methodology and psdm in deep water gulf of mexico: A case history. p. 442–445, 2005. Citado na página 36.
- SILVA, B.; SOUZA, F.; LEMOS, E. Water flood vs velocity profile in ultra deep water model building. In: _____. *12th International Congress of the Brazilian Geophysical Society & EXPOGEF, Rio de Janeiro, Brazil, 15–18 August 2011*. [s.n.], 2014. p. 1646–1650. Disponível em: <<https://library.seg.org/doi/abs/10.1190/sbgf2011-340>>. Citado 2 vezes nas páginas 8 e 40.
- TARANTOLA, A. Inversion of seismic reflection data in the acoustic approximation. *Geophysics*, v. 49, n. 8, p. 1259–1266, 1984. Citado na página 38.
- VERSTEEG, R. The marmousi experience: Velocity model determination on a synthetic complex data set. THE LEADING EDGE, Houston, Texas, US, 1994. Citado 2 vezes nas páginas 49 e 73.
- WANG, P. et al. Full-waveform inversion for salt: A coming of age. *Leading Edge*, v. 38, p. 204–213, 03 2019. Citado na página 38.
- WRIGHT, V.; BARNETT, A. An abiotic model for the development of textures in some south atlantic early cretaceous lacustrine carbonates. *Geological Society, London, Special Publications*, v. 418, 07 2015. Citado na página 45.
- YILMAZ, Ö. *Seismic Data Analysis*. 2. ed. Tulsa, OK, USA,; SEG, 2001. v. 1. Citado na página 16.
- ZAMBRINI, J. et al. The impact of the complex evaporites features' on the seismic illumination of the underlying rocks: A case study in the brazilian presalt. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, v. 191, p. 107177, 2020. ISSN 0920-4105. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0920410520302643>>. Citado na página 62.