

UNIVERSIDADE FEDERAL FLUMINENSE  
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS  
DEPARTAMENTO DE GEOLOGIA E GEOFÍSICA  
CURSO DE GRADUAÇÃO EM GEOFÍSICA

**ESTIMATIVA DAS VELOCIDADES SÍSMICAS EM DADOS MONOCANAL NA  
REGIÃO DE BLAKE RIDGE, COSTA LESTE DOS ESTADOS UNIDOS**

**DEBORAH SOUSA VIDAL**

NITERÓI - RJ

2017

DEBORAH SOUSA VIDAL

**ESTIMATIVA DAS VELOCIDADES SÍSMICAS EM DADOS MONOCANAL NA  
REGIÃO DE BLAKE RIDGE, COSTA LESTE DOS ESTADOS UNIDOS**

Trabalho apresentado ao curso de graduação em Geofísica da Universidade Federal Fluminense, como parte da disciplina de Projeto Final II e requisito para obtenção do título de Bacharel em Geofísica.

Orientador: Prof. Dr. Luiz Alberto Santos

Coorientador: Prof. Dr. Antonio Fernando Menezes Freire

NITERÓI – RJ

2017

V649

Vidal, Deborah Sousa

Estimativa das velocidades sísmicas em dados monocanal na região de Blake Ridge, costa leste dos Estados Unidos / Deborah Sousa Vidal. – Niterói : [s.n.], 2017.

56 f.

Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Geofísica) – Universidade Federal Fluminense, 2017.

1.Interpretação sísmica. 2.Processamento sísmico. 3.Blake Ridge (EUA). 4.Hidratos de gás. I.Título.

CDD 622.1592

DEBORAH SOUSA VIDAL

**ESTIMATIVA DAS VELOCIDADES SÍSMICAS EM DADOS MONOCANAL NA  
REGIÃO DE BLAKE RIDGE, COSTA LESTE DOS ESTADOS UNIDOS**

Projeto Final II apresentado à Universidade  
Federal Fluminense como requisito parcial para a  
obtenção do grau Bacharel em Geofísica.

Aprovado em: \_\_\_/\_\_\_/\_\_\_

---

Prof. Dr. Luiz Alberto Santos (Orientador) - UFF

---

Prof. Dr. Antonio Fernando Menezes Freire (Coorientador) – UFF

---

Prof. Dr. Cleverson Guizan Silva – UFF

---

Prof. Dr. Marco Antonio Cetale Santos - UFF

## AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus pela força em todos os momentos ao longo da faculdade e por não ter deixado eu desistir. Sem Ele nada disso teria acontecido.

Aos meus pais Flávio e Tânia, por sempre quererem e fazerem o melhor pra mim, por investirem na minha educação e por me ensinarem a nunca desistir dos meus sonhos. Ao meu irmão Renan e às minha avós Marion, Marli e Maria Raimunda por sempre estarem ao meu lado e por acreditarem em mim. Sou e serei eternamente grata a tudo o que vocês fizeram e fazem por mim.

Ao meu noivo e futuro marido Marcelo, pelo amor, pela paciência e por ser meu porto seguro sempre que precisei. Por ter segurado a minha mão e não ter deixado eu cair quando pensei que tudo ia desmoronar. Feliz por ter escolhido você como o homem da minha vida.

Às minhas amigas Ana Paula Luz, Paula Ribeiro, Juliana Gonçalves, Lais Ribeiro, Gabriela Esteves, Laisa Aguiar, Maíra Cordeiro, Carolina Ferreira, Camila Lima, Monique Chaves, Taciana Souza e Renata Colombo pela amizade, pelos conselhos, por oferecerem um ombro amigo quando precisei e por estarem ao meu lado, principalmente durante os últimos meses. Obrigada por não deixarem eu me sentir invisível.

Às minhas amigas de república por toda a paciência e carinho durante os maravilhosos meses que convivemos juntas, pelas conversas, risadas, abraços e noites de comidas gostosas.

Agradeço a *United States Geological Survey* (USGS) pelos dados cedidos, possibilitando a elaboração deste trabalho e meu conhecimento sobre a área.

Ao meu professor e orientador Luiz Alberto Santos e meu professor e coorientador Antonio Fernando Menezes Freire pelos incentivos, pelos ensinamentos que me foram passados durante este trabalho e por quererem sempre o melhor pra mim profissionalmente. Muito obrigada por toda a dedicação. Agradeço também à minha companheira de projeto Eloíse Policarpo por estar comigo desde o início e pela força que demos uma à outra.

Agradeço a todos os meus professores da UFF por todo o conhecimento que me foi passado durante a graduação e pela paciência para tirar as minhas dúvidas, especialmente os professores Cleverson Guizan Silva e Marco Antonio Cetale Santos que aceitaram fazer parte da banca.

Por fim, agradeço a todos que não foram citados aqui mas que de alguma forma me ajudaram na elaboração deste trabalho.

*“Ser capaz de perseguir nossos próprios sonhos  
é o que nos faz fortes.”*

Chester Bennington

## RESUMO

O processamento de dados sísmicos constitui um fluxo de trabalho para geração de imagens de subsuperfície. Uma das etapas desse fluxo é a estimativa do campo de velocidades, que é importante insumo para uma melhor focalização dos eventos na etapa de migração sísmica. A estimativa de velocidade de migração pós-empilhamento, em dados multicanal, é rotineiramente aplicada nos fluxos de processamento em dados de reflexão. Em dados monocal, porém, essa prática não é comum. Faltam-lhe as informações de múltiplos afastamentos fonte-receptor para proceder à análise de velocidade convencional.

Neste trabalho, contudo, sobre os dados monocal, empregou-se estimativas de velocidade a partir das difrações presentes em áreas com alguma complexidade estrutural. Essas áreas, embora não contínuas, fornecem valiosa informação acerca do campo de velocidades que é extrapolado, lateralmente, de acordo com a estratigrafia observada na seção. Esta técnica foi aplicada na linha 921217 do levantamento sísmico monocal adquirido pelo *United States Geological Survey* (USGS) na região de *Blake Ridge*, costa leste dos Estados Unidos - região notória pela ocorrência de hidratos de gás. A linha 921217 foi processada, as velocidades *Normal Moveout* (NMO) e intervalares foram estimadas e a seção migrada foi interpretada pela delimitação dos corpos de hidratos e obtenção das informações referentes à geologia local.

**Palavras-chave:** Processamento sísmico, interpretação sísmica, *Blake Ridge*, hidratos de gás.

## ABSTRACT

The seismic data processing is a workflow to provide subsurface imaging. One of the steps of this working flow is the estimation of the velocity field, which is an important input data to a better focalization of the events in the seismic migration step. The estimation of post stack migration velocity in multichannel data is routinely applied in processing working flows in reflection data. In single-channel data, however, this technique is not common. It lacks informations from multiple source-receiver offset from seismic reflections to perform the conventional velocity analysis.

In this work, however, over single-channel data, velocity estimations are estimated from diffractions present in areas with some structural complexity. These areas, although not continuous, provide valuable informations about the velocity field that is extrapolated laterally according to the stratigraphy that is observed in the section. In this work this technique was applied in the line 921217, acquired by the United States Geological Survey (USGS) during a single-channel seismic survey in the Blake Ridge's region, east coast of the United States - a known region for the occurrence of gas hydrates. The line 921217 was processed, the Normal Moveout (NMO) and interval velocities were estimated and the migrated section was interpreted to delineate the hydrate bodies and obtain the information regarding the local geology.

**Keywords:** Seismic processing, seismic interpretation, Blake Ridge, gas hydrates.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1: Mapa da localização de <i>Blake Ridge</i> , com destaque em cinza escuro e sua localização nos EUA. Modificado de Lu e McMechan (2002).....	3
Figura 2: A abertura do oceano Atlântico e, conseqüentemente, o desenvolvimento da margem continental. Extraído de Sheridan (1981).....	4
Figura 3: Parte do sudeste americano, desde a costa até o oceano, incluindo <i>Blake Ridge</i> e <i>Blake Plateau</i> . Modificado de NOAA, 2004.....	5
Figura 4: Área de pesquisa e dados batimétricos da USGS realizados em 1992. Em destaque em vermelho, a linha sísmica utilizada no presente estudo. Extraído de USGS, 2017. ....	7
Figura 5: Blocos de hidratos de gás retirados de sedimentos quaternários do Mar do Japão. Extraído de Freire (2013). ....	8
Figura 6: Diagrama de fase representando a zona de estabilidade de pressão e temperatura para os hidratos de gás na sub-superfície marinha. Modificado de Clennell (1999). ....	10
Figura 7: Localização dos hidratos de gás pelo mundo. Extraído de USGS (2014). ....	10
Figura 8: Polaridade inversa entre Fundo do mar e BSR. Modificado de Ecker (2001).....	11
Figura 9: Reflexão sísmica monocanal. Extraído de Kearey <i>et al.</i> (2009).....	13
Figura 10: Filtro passa-banda do tipo trapezoidal. Extraído de Silva, 2004. ....	16
Figura 11: (a) Antes da correção NMO, (b) Depois da correção NMO. Extraído de Yilmaz (2001). ....	20
Figura 12: Empilhamento de dados sísmicos. Extraído de Souza, 2014.....	21
Figura 13: Desenho exemplificando como as hipérboles irão se transformar em um ponto difrator no processo de migração em tempo. Extraído de Kearey <i>et al.</i> (2009).....	22
Figura 14: Resumo representando as etapas realizadas durante o estudo. ....	24
Figura 15: Seção sísmica bruta, antes da aplicação da correção estática. É possível observar o atraso na recepção dos dados, destacado em vermelho. ....	26
Figura 16: Seção sísmica com a correção estática executada no <i>Seismic Unix</i> .....	27
Figura 17: Seção sísmica com as regiões a), b) e c) destacando as difrações mais visíveis. ...	28
Figura 18: Seção sísmica com as hipérboles de difrações colapsadas após o teste das velocidades. As regiões destacadas como a) e b) obtiveram melhor resultado com velocidade 1500 m/s, enquanto que c) foi 1550 m/s. ....	29
Figura 19: Horizontes mapeados: Azul - fundo do mar (fm); Vermelho - horizonte hz1; Verde – horizonte hz2. Em preto, o pseudo-poço. ....	30

Figura 20: Gráfico gerado representando as velocidades NMO (vermelha) e intervalares (verde).....	31
Figura 21: Modelo de velocidade intervalar.....	32
Figura 22: Modelo de velocidade NMO.....	33
Figura 23: Seção sísmica com a migração <i>Kirchhoff</i> efetuada.....	34
Figura 24: Falhas interpretadas na região da linha sísmica 921217 de <i>Blake Ridge</i> . A Figura foi estendida para melhor visualização delas. ....	35
Figura 25: Modelo de velocidade intervalar com marcação do BSR.....	36
Figura 26: Modelo de velocidade NMO com marcação de BSR. ....	37

## SUMÁRIO

<b>RESUMO.....</b>	<b>VII</b>
<b>ABSTRACT .....</b>	<b>VIII</b>
<b>LISTA DE ILUSTRAÇÕES.....</b>	<b>IX</b>
<b>1 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>1</b>
<b>1.1 OBJETIVO .....</b>	<b>2</b>
<b>2 ÁREA DE ESTUDO .....</b>	<b>3</b>
<b>2.1 LOCALIZAÇÃO.....</b>	<b>3</b>
<b>2.2 GEOLOGIA LOCAL .....</b>	<b>3</b>
<b>3 DADOS SÍSMICOS UTILIZADOS PARA O ESTUDO.....</b>	<b>6</b>
<b>4 HIDRATOS DE GÁS .....</b>	<b>8</b>
<b>4.1 CONDIÇÕES DE FORMAÇÃO DOS HIDRATOS .....</b>	<b>9</b>
<b>4.2 <i>BOTTOM SIMULATING REFLECTORS - BSRs</i>.....</b>	<b>11</b>
<b>5 MÉTODO SÍSMICO DE REFLEXÃO.....</b>	<b>12</b>
<b>5.1 MÉTODO SÍSMICO DE REFLEXÃO MONOCANAL.....</b>	<b>12</b>
<b>5.2 PROCESSAMENTO DE DADOS SÍSMICOS .....</b>	<b>13</b>
5.2.1 <i>O software Seismic Unix .....</i>	13
5.2.2 <i>O fluxo de processamento .....</i>	14
5.2.2.1 <i>Pré-processamento.....</i>	14
5.2.2.1.1 <i>Geometria .....</i>	14
5.2.2.1.2 <i>Edição dos traços .....</i>	14
5.2.2.2 <i>Correção Estática.....</i>	15
5.2.2.3 <i>Atenuação de ruídos .....</i>	15
5.2.2.4 <i>Correção de divergência esférica e espalhamento geométrico.....</i>	16
5.2.2.5 <i>Deconvolução .....</i>	16
5.2.2.6 <i>Análise de velocidade.....</i>	17
5.2.2.6.1 <i>Velocidades sísmicas NMO, RMS e Intervalar.....</i>	17
5.2.2.6.1.1 <i>Velocidade NMO.....</i>	18
5.2.2.6.1.2 <i>Velocidade Intervalar .....</i>	18

5.2.2.7 Correção NMO .....	19
5.2.2.8 Empilhamento.....	20
5.2.2.9 Migração.....	21
5.2.2.9.1 Migração <i>Kirchhoff</i> .....	21
5.2.2.10 Seção sísmica final .....	22
<b>6 METODOLOGIA.....</b>	<b>23</b>
<b>7 APLICAÇÕES, RESULTADOS E DISCUSSÕES .....</b>	<b>25</b>
<b>7.1 SEISMIC UNIX .....</b>	<b>25</b>
<b>7.2 INTERPRETAÇÃO SÍSMICA .....</b>	<b>34</b>
<b>8 CONCLUSÃO.....</b>	<b>39</b>
<b>9 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>40</b>

## 1 INTRODUÇÃO

A geofísica é a ciência capaz de obter o conhecimento da Terra através do estudo dos princípios da física. Em relação à geofísica de exploração, têm-se a aquisição dos dados, o processamento e a interpretação dos dados. Desde a década de 1920, quando foi feito o primeiro levantamento sísmico, pesquisadores empregam ondas sísmicas para estimarem as características da geologia em profundidade (Kearey *et al.*, 2009).

As etapas do processamento sísmico e um bom manuseio do *software Seismic Unix* são essenciais para a obtenção de uma imagem mais representativa da geologia em subsuperfície, permitindo a interpretação da seção sísmica do local de estudo. Cada etapa do processamento sísmico realizada adequadamente tem sua importância em relação ao resultado posterior e ao resultado final do processamento, fazendo com que haja um resultado satisfatório em relação à geologia.

Dentre estas etapas, destaca-se a estimativa das velocidades sísmicas, que é importante na etapa de migração, para a conversão tempo-profundidade e colapso das difrações, contribuindo para a identificação das litologias (Kearey *et al.*, 2009). O conhecimento das velocidades é primordial nos estudos relacionados aos hidratos de gás, pois os hidratos podem causar alterações na análise das velocidades (Sheriff e Geldart, 1995). Nos estudos referentes à presença do hidrato de gás e do gás livre, a presença dos hidratos faz com que aumente a impedância acústica e o gás livre faz com que ela diminua. Consequentemente, estas mudanças poderão ocasionar o aumento da velocidade sísmica e a diminuição da mesma. Regiões como *Blake Ridge*, no qual será o foco do estudo neste trabalho, possui uma quantidade relevante de hidratos de gás, sendo um local onde são realizados diversos estudos em relação à eles, desde a sua descoberta.

Neste trabalho, o processamento sísmico e a interpretação foram realizados no *Seismic Unix*, dando ênfase nas estimativas das velocidades sísmicas, para que fosse possível obter modelos de velocidades *Normal Moveout* (NMO) e intervalar e relacioná-los à identificação do gás livre, do *Bottom-Simulating Reflector* (BSR) e do hidrato de gás na seção sísmica em estudo, além da interpretação das falhas e a relação delas também com o BSR, o gás livre e o hidrato de gás.

O presente trabalho foi dividido nos seguintes capítulos: 2) Área de estudo, contendo localização e informações referentes à geologia de *Blake Ridge*; 3) Dados sísmicos utilizados para o estudo; 4) Hidratos de gás, contendo informações sobre sua formação e BSR; 5)

Método sísmico de reflexão, contendo a parte do levantamento, método sísmico monocanal e o processamento de dados; 6) Metodologia, contendo informações de como foi realizada as etapas do trabalho em si; 7) Aplicações, resultados e discussões, com explicações, imagens e resultados do que foi realizado no trabalho e 8) Conclusão.

## 1.1 Objetivo

O objetivo do trabalho foi realizar o processamento e interpretação da linha sísmica monocanal 2D 921217, adquirida pelo *United States Geological Survey* (USGS) em *Blake Ridge*, costa leste dos Estados Unidos. Durante o processamento realizado no *software Seismic Unix*, especial ênfase foi dada às etapas de estimativa de velocidades sísmicas *Normal Moveout* (NMO) e intervalar a partir de métodos não convencionais descritos no tópico de metodologia mais adiante. A interpretação sísmica, também realizada no *Seismic Unix*, envolve a identificação de horizontes, falhas e a delimitação da base da zona de estabilidade dos hidratos de gás (BGHSZ), marcada pelo refletor que simula o fundo do mar (BSR).

O propósito que se pretendeu alcançar com as estimativas das velocidades sísmicas foi, primeiramente, a geração dos dois modelos de velocidades. Em seguida, a identificação das mudanças das velocidades nos dois modelos em relação à presença do hidratos de gás, do BSR e do gás livre, avaliando o comportamento e a mudança das velocidades ao longo dos dois modelos e comparando-os.

## 2 ÁREA DE ESTUDO

### 2.1 Localização

A área de estudo está situada na região sudeste dos Estados Unidos, próximo à margem continental dos estados da Flórida, Geórgia, Carolina do Sul e Carolina do Norte, mais precisamente na região de *Blake Ridge* (Tucholke *et al.*, 1977 *apud* Tinivella e Lodolo, 2000). A região está localizada a aproximadamente 400 km da costa americana (Egeberg e Dickens, 1999), como mostrado na Figura 1.

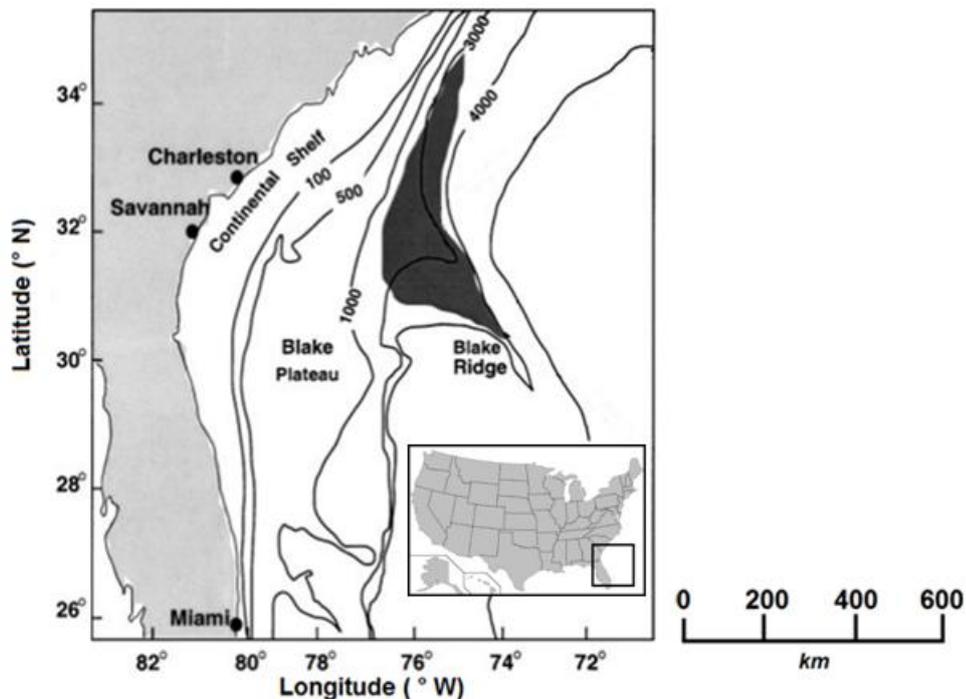


Figura 1: Mapa da localização de *Blake Ridge*, com destaque em cinza escuro e sua localização nos EUA. Modificado de Lu e McMechan (2002).

### 2.2 Geologia local

O sudeste dos Estados Unidos, na região de *Blake Ridge*, é uma margem passiva, de ambiente tectonicamente calmo (Holbrook *et al.*, 2002), possuindo grande parte dos sedimentos homogêneos (Rowe e Gettrust, 1993a, 1993b; Wood e Gettrust 1998 *apud* Wood e Ruppel, 2000). A margem continental começou a se desenvolver a partir da abertura do

oceano Atlântico (Figura 2), cujo início foi marcado por falhamentos normais e vulcanismo na fase rifte, durante o Triássico (Dillon *et al.*, 1978). O oceano foi aberto devido a um *hot spot*, no qual causou afinamento e extensão da crosta, resultando nas falhas normais (Sheridan *et al.*, 1981). Devido à sua homogeneidade litológica, espera-se que qualquer alteração importante observada no imageamento sísmico pode ser atribuída à presença de gás livre ou aos hidratos (Westbrook, Carson, Musgrave, *et al.*, 1994 *apud* Wood e Ruppel, 2000). As falhas normais presentes podem auxiliar na migração dos fluidos e do gás até o fundo marinho (Dillon *et al.*, 1996 *apud* Taylor *et al.*, 2000).

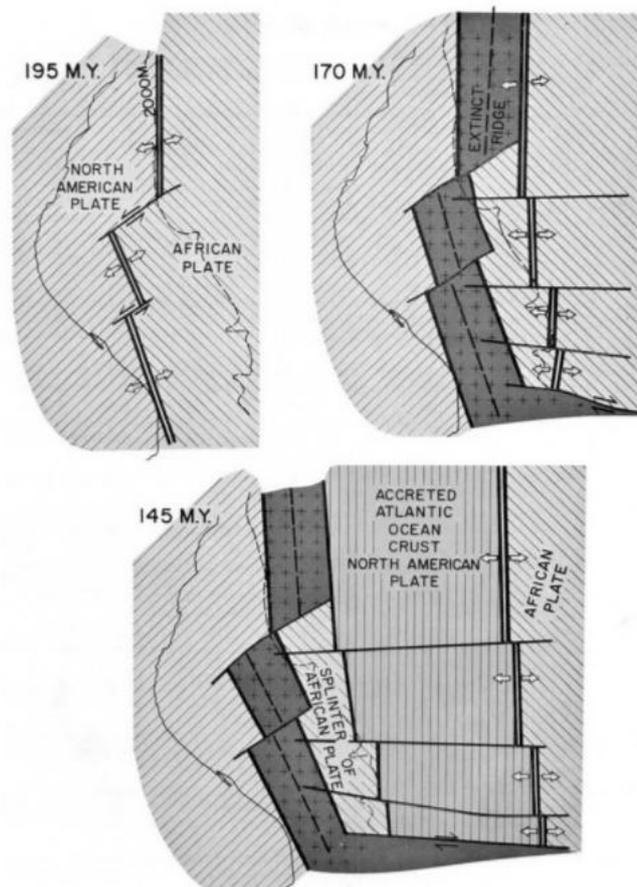


Figura 2: A abertura do oceano Atlântico e, conseqüentemente, o desenvolvimento da margem continental. Extraído de Sheridan (1981).

A região de *Blake Ridge* acumula sedimentos desde o Oligoceno (Dillon e Popenoe, 1988 *apud* Tinivella e Lodolo, 2000) e foi formada devido à erosão do *Blake Plateau* (Wood e Ruppel, 2000) (Figura 3). A região contém rochas sedimentares (Egeberg e Barth, 1998) e é considerada um local de depósitos da fase drifte (Tucholke *et al.*, 1977 *apud* Tinivella e Lodolo, 2000), sendo composta por sedimentos hemipelágicos sílticos e argilosos,

acumulados sob alta taxa de sedimentação (Guerin *et al.*, 1999), além de lama calcária (Hollister *et al.*, 1972; Sheridan *et al.*, 1983 *apud* Rowe e Gettrust, 1993). Do mesmo modo, se constitui por depósitos de corrente de contorno que fluem para o sul ao longo da margem ocidental do Atlântico Norte (Holbrook *et al.*, 2002). Ademais, *Blake Ridge* é composto por um crista alongada que se estende desde a plataforma continental em direção ao oceano Atlântico e acima de planícies abissais (Uchupi, 1968 *apud* Edeberg e Dickens, 1999), no qual os sedimentos presentes no norte são transportados em direção ao sul da crista por correntes subterrâneas (Heezen *et al.*, 1962; Haskell *et al.*, 1991 *apud* Paull *et al.*, 1996).

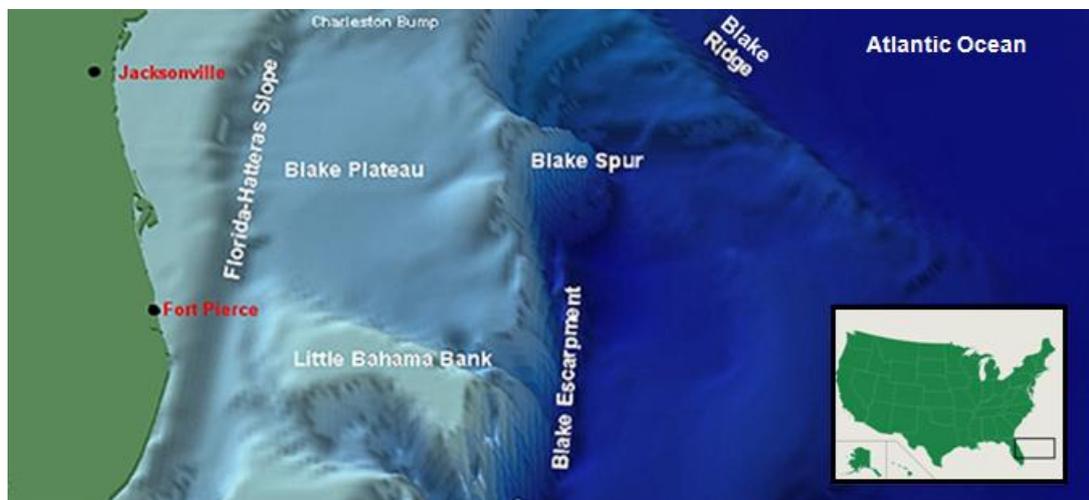


Figura 3: Parte do sudeste americano, desde a costa até o oceano, incluindo *Blake Ridge* e *Blake Plateau*. Modificado de NOAA (2004).

*Blake Ridge* é uma das descobertas mais antigas em províncias marinhas a conter quantidades relevantes de hidratos de gás (Markl *et al.*, 1970 *apud* Wood e Ruppel, 2000). Estima-se que as zonas lateralmente extensas de hidrato de gás e gás livre possuem ao todo de 30 a 40 gigatões (Gt) de carbono em forma de CH<sub>4</sub> (Holbrook *et al.*, 1996; Dickens *et al.*, 1997 *apud* Dickens, 2001). Foi neste local onde foram coletadas as primeiras amostras de hidratos de gás em subsuperfície (Holbrook *et al.*, 2002). A acumulação de hidrato na região provém da quantidade de metano que sai em relação à quantidade de metano que entra na zona de estabilidade de hidrato de gás (BGHSZ) durante todo o tempo geológico (Edeberg e Dickens, 1999).

### 3 DADOS SÍSMICOS UTILIZADOS PARA O ESTUDO

Os dados sísmicos que foram usados no estudo em questão são referentes à pesquisas de sísmica de reflexão em *Blake Ridge*, realizadas pela USGS, onde as informações podem ser encontradas na página da internet <<https://pubs.usgs.gov/of/1999/of99-372/>> como "*U.S. Geological Survey Open-File Report 99-372*". Os pesquisadores responsáveis são Michael H. Taylor, William P. Dillon, Christopher H. Anton e William Danforth. As pesquisas foram realizadas nos anos de 1992 e 1995, quando foram feitas as aquisições dos dados monocal, a navegação e o processamento, com o objetivo de mapear o volume e a distribuição de hidratos de metano na região. Nesta pesquisa, a finalidade foi obter perfis sísmicos da área para comparar as estruturas profundas com a batimetria das estruturas geológicas que sofreram rupturas, nas quais foram resultados de sedimentos associados com a dissociação do hidrato (USGS, 1999). Apenas uma linha sísmica foi utilizada nesse trabalho, a 921217 (Figura 4).

Os dados fornecidos são compostos com *offset* (distância entre a fonte e o receptor) igual a 10 m, distância entre tiros de 10.19 m, tempo de registro de aproximadamente 4 segundos, tempo inicial de 3.2 segundos e amostragem temporal de 4 milissegundos. A linha sísmica estudada possui cerca de aproximadamente 52 km.

Apesar de dados monocal possuírem normalmente maiores frequências por terem boas resoluções, no caso do trabalho, por se tratar de um dado antigo e com o uso de equipamentos antigos, a frequência será baixa.

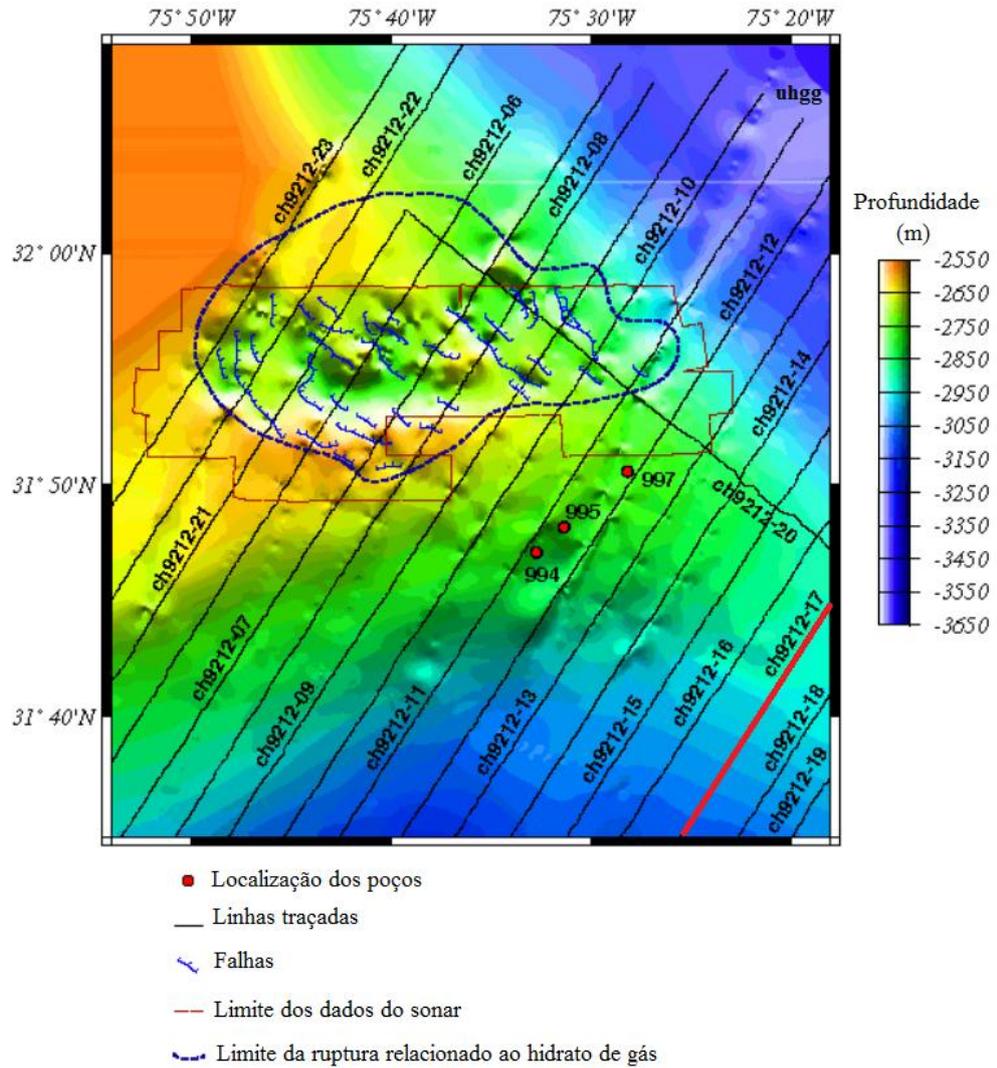


Figura 4: Área de pesquisa e dados batimétricos da USGS realizados em 1992. Em destaque em vermelho, a linha sísmica utilizada no presente estudo. Extraído de USGS (2017).

## 4 HIDRATOS DE GÁS

Hidratos de gás (ou clatratos de metano) são sólidos formados quando as moléculas de água se combinam com as moléculas de gases, podendo ser hidrocarbonetos ou não (Figura 5). Originam-se através da movimentação dessas moléculas, que ocorre devido à uma reação exotérmica, congelando a água em volta de cada molécula gasosa, aprisionando a molécula de gás em uma estrutura cristalina, circunscrita por moléculas de água. Os hidratos cristalizam-se em forma de nódulos, camadas ou preenchendo fraturas (Freire, 2013).

A temperatura, a pressão, a composição do gás e a salinidade da água são elementos fundamentais para caracterizar a temperatura máxima em que a estrutura se mantém estável (Freire, 2013). Além disso, o tamanho dos poros e a mineralogia do próprio sedimento podem influenciar na posição em que o hidrato se formará (Heriot-Watt University, 2017). Estudos experimentais indicam que 1 m<sup>3</sup> de hidrato de metano, dissociado sob pressão e temperatura atmosférica, libera 164 m<sup>3</sup> de metano natural, além de 0,8 m<sup>3</sup> de água (Kvenvolden, 1993 *apud* Freire, 2013).



Figura 5: Blocos de hidratos de gás retirados de sedimentos quaternários do Mar do Japão. Extraído de Freire (2013).

Os hidratos de metano podem ser classificados como biogênicos e termogênicos (Freire, 2013). Os biogênicos são formados a partir de microorganismos metanogênicos a baixas temperaturas (<60°C), enquanto os termogênicos são formados a partir do material

orgânico que se encontra soterrado e com elevada temperatura ( $>60^{\circ}\text{C}$ ) e alta pressão (T&R Eco-Energy, 2016). Além disso, os gases biogênicos são produzidos na zona de estabilidade do clatrato e os termogênicos migram em sentido vertical ou lateral a partir de uma rocha geradora, até alcançar a zona de estabilidade. Os hidratos de gás possuem grandes recursos energéticos, como citado, e o interesse por eles aumentou devido à comprovação de grandes reservas por cientistas (Gandara *et al.*, 2015), com influência dos desenvolvimentos tecnológico e econômico.

#### **4.1 Condições de formação dos hidratos**

Para que seja possível a formação dos hidratos são necessárias algumas condições. Em sua maioria, os hidratos estão distribuídos próximos às margens continentais, devido ao teor do material orgânico que é possível encontrar nesses locais. Esse teor deve estar entre 0,5% e 1%. Ademais, para que haja a sua produção, é necessária uma elevada taxa de sedimentação para que ocorra o soterramento rápido do material orgânico (Gandara *et al.*, 2015), o que pode ser encontrado também próximo às margens continentais. Existem também os hidratos encontrados em regiões de *permafrost* (Freire, 2013), no qual o substrato é composto por sedimentos, gelo e rochas congelados. Os hidratos formam-se de acordo com as condições físico-químicas, ou seja, dependem principalmente da temperatura e da pressão em que se encontram (Figura 6). O mapa contendo a sua localização e os hidratos de gás estimados e encontrados é representado na Figura 7.

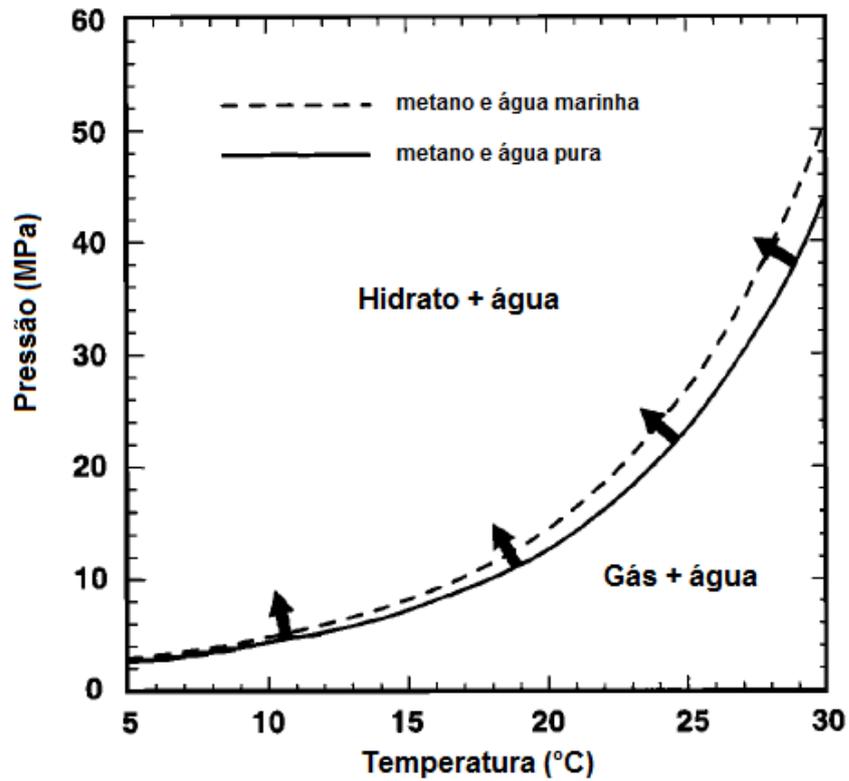


Figura 6: Diagrama de fase representando a zona de estabilidade de pressão e temperatura para os hidratos de gás na sub-superfície marinha. Modificado de Clennell (1999).

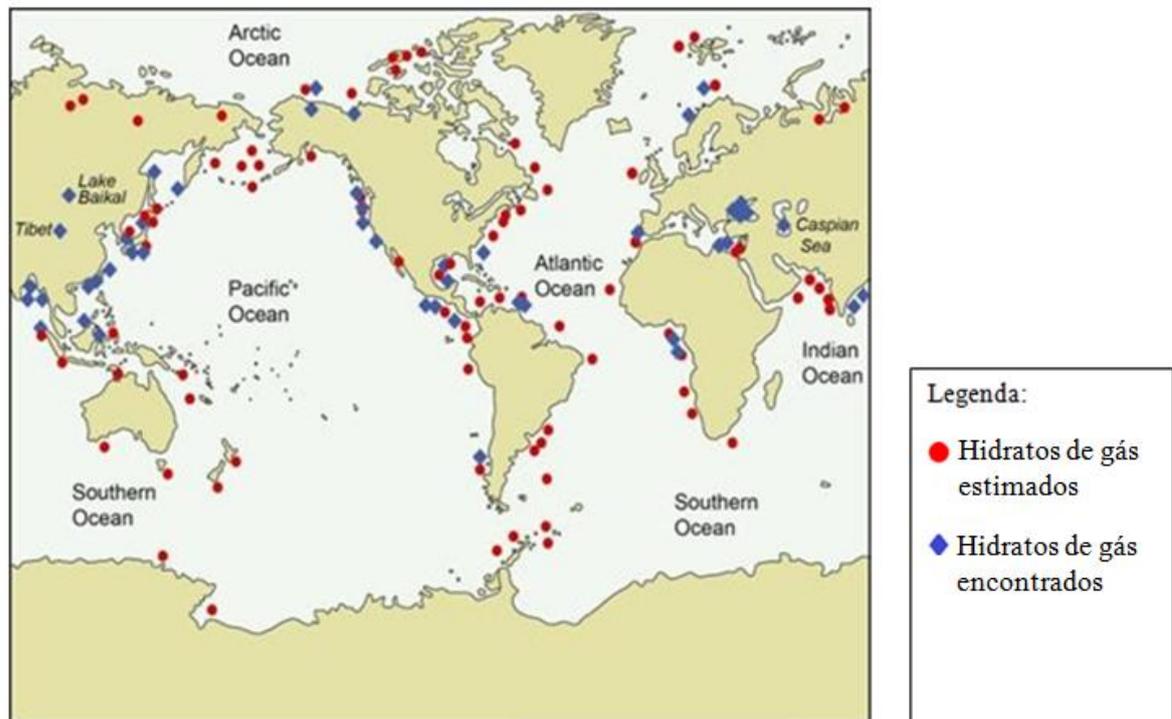


Figura 7: Localização dos hidratos de gás pelo mundo. Extraído de USGS (2014).

#### 4.2 Bottom Simulating Reflectors - BSRs

A quantidade de carbono presente nos hidratos de gás é estimada como duas vezes a quantidade presente de todo o carbono orgânico fóssil da Terra, como óleo, gás e carvão (Kvenvolden, 1993 *apud* Freire, 2013). Esta estimativa é baseada de acordo com a concentração de hidratos nos sedimentos (Milkov e Sassen, 2001) e de acordo com os *Bottom-Simulating Reflectors* (BSRs).

Os BSRs constituem a base da zona de estabilidade dos hidratos. Eles representam um contraste de impedância acústica entre a zona de estabilidade de hidratos, considerada mais densa, e a zona com a presença de gás livre, considerada menos densa (Singh *et al.*, 1993 *apud* Freire, 2013). Apresentam-se como refletores anômalos que cortam os estratos sedimentares, paralelamente ao fundo marinho e, sismicamente, possuem polaridade oposta a este (Figura 8). A razão por se apresentar paralelamente ao fundo do mar é devido a existência da estabilidade entre pressão e temperatura (Freire, 2013). Devido a essas características, o levantamento sísmico é o principal método para a prospecção de hidratos de gás, sendo o BSR de *Blake Ridge* considerado um dos mais conhecidos, devido à sua visibilidade (Shipley *et al.*, 1979 *apud* Wood e Ruppel, 2000).

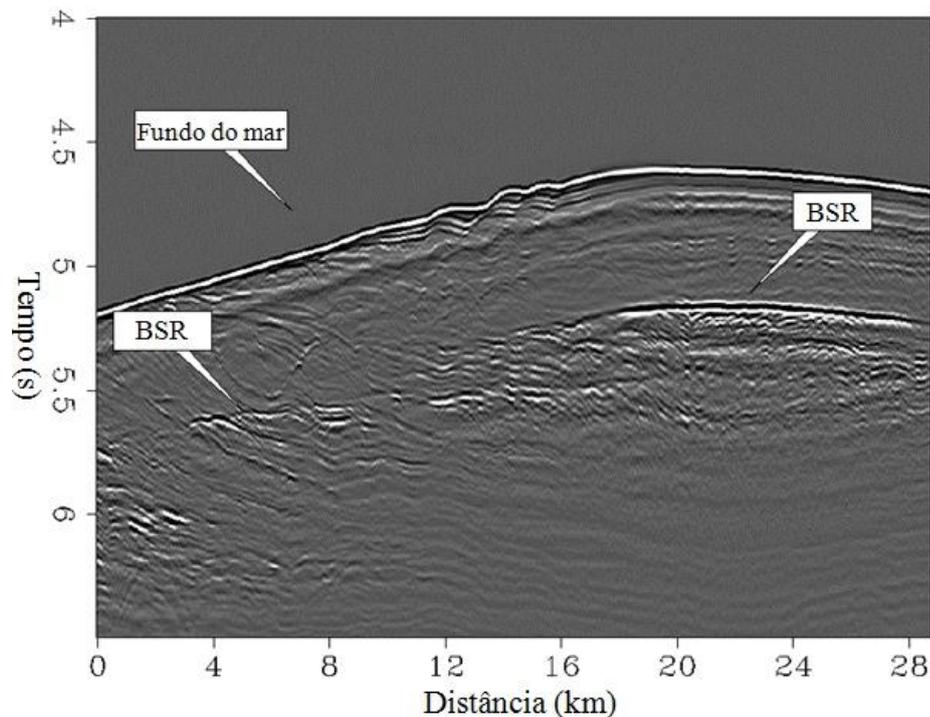


Figura 8: Polaridade inversa entre Fundo do mar e BSR. Modificado de Ecker (2001).

## 5 MÉTODO SÍSMICO DE REFLEXÃO

O método sísmico de reflexão é o mais utilizado dentre os métodos geofísicos de exploração, principalmente devido a sua grande capacidade de investigação da subsuperfície e por proporcionar resultados com alto nível de precisão e resolução (Silva, 2004). É o método mais utilizado em estudos relacionados a exploração mineral e de hidrocarbonetos.

O método consiste no uso de uma fonte sísmica, capaz de gerar ondas acústicas que, ao se propagarem para o interior da Terra, percorrem diferentes camadas com diferentes valores de impedância. Ao encontrar uma interface que limite litologias com impedâncias distintas a onda sofre partição da energia. No levantamento sísmico de reflexão há o registro na superfície dos pulsos de energia sísmica que foram refletidos pelas camadas geológicas em profundidade (Kearey *et al.*, 2009). A distância fonte-receptor é conhecida e os tempos de chegada das ondas sísmicas são medidos após as superfícies entre as unidades litológicas as refletirem.

Os dados sísmicos demandam processamento para atenuação dos ruídos, melhora do sinal, obtenção de uma imagem de subsuperfície e, a depender da qualidade dos dados, estimativa de propriedades através da inversão sísmica. Os resultados do processamento dependem das condições e técnicas que foram utilizadas durante o processo (Yilmaz, 2001).

### 5.1 Método sísmico de reflexão monocanal

A sísmica monocanal é um método não muito complexo e muito importante para o levantamento sísmico marinho. Na reflexão sísmica monocanal têm-se uma fonte acústica marinha rebocada por um navio de aquisição, que é disparada a uma taxa de tempo. Na Figura 9, pode-se observar que os receptores registram sinais refletidos pelas interfaces e as informações encontradas nos hidrofones são somadas em uma unidade de amplificação/processamento monocanal, que por fim é gravada. Geralmente, através do levantamento monocanal, é possível obter uma boa imagem da geologia do fundo marinho, permitindo assim as estimativas da profundidade e da geometria dos refletores (Kearey *et al.*, 2009).

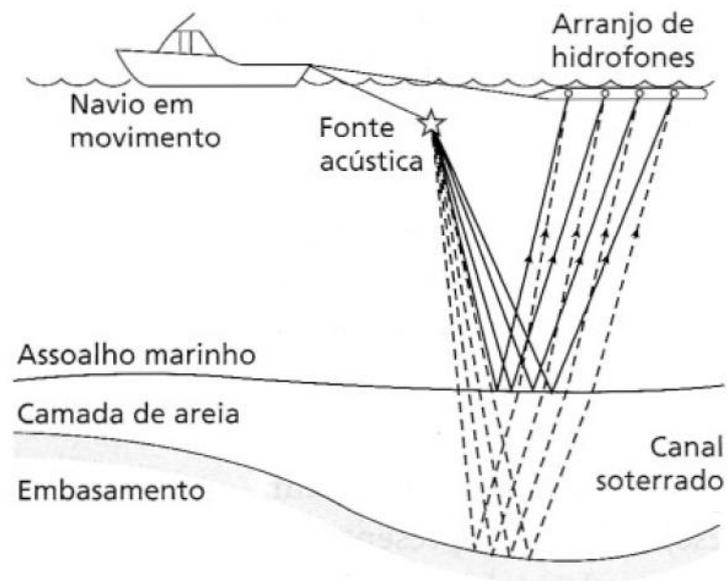


Figura 9: Reflexão sísmica monocanal. Extraído de Kearey *et al.* (2009).

## 5.2 Processamento de dados sísmicos

### 5.2.1 O software *Seismic Unix*

O *Seismic Unix* é um *software* livre voltado para o processamento de dados sísmicos. Ele é disponibilizado pela *Center for Wave Phenomena* (CWP), na *Colorado School of Mines*. Ele é utilizado, principalmente, no Linux ou no Unix. Não é necessário haver um conhecimento prévio sobre linguagem de programação, apenas os comandos simples utilizados no Linux ou Unix (Abreu, 2005).

O *Seismic Unix* possui uma coleção vasta de subrotinas, ferramentas para gráficos e aplicações de dados básicos de processamento sísmico. Além de ser usado em, no mínimo, 32 países (Murillo e Bell, 1999), é bastante utilizado na geofísica, principalmente para pesquisas relacionadas ao processamento de dados sísmicos (Cohen & Stockwell Jr., 1991 *apud* Murillo, 1996). O *software* lê as informações contidas nos arquivos de entrada e escreve um arquivo de saída, através de vários comandos (Murillo, 1996).

## **5.2.2 O fluxo de processamento**

O processamento de dados sísmicos de reflexão tem como objetivo a obtenção de uma imagem representativa da subsuperfície. Para que esse intuito seja alcançado, os dados são submetidos a uma série de operações e cálculos matemáticos. Todas as etapas realizadas compõem o fluxograma do processamento e este pode ser avaliado pela qualidade da seção sísmica empilhada que é obtida (Silva, 2004).

Com o fluxo de processamento é possível obter, a partir de critérios fundamentais, um resultado com qualidade melhor do que a qualidade do dado bruto, seguindo uma sequência de etapas, desde as mais simples até as mais avançadas. Mesmo que o dado contenha uma boa resolução, os ruídos presentes atrapalham sua visualização. Por isso, na maioria das vezes, é imprescindível um tipo de tratamento após a aquisição para o aumento da razão sinal-ruído (Gomes *et al.*, 2011). As etapas do fluxo de processamento estão descritas nos tópicos a seguir.

### **5.2.2.1 Pré-processamento**

Na etapa de pré-processamento, são obtidas todas as informações necessárias para o processamento de dados que estão presentes no relatório do observador, o qual contém dados referentes à localização e à relação entre tiros e receptores (Gomes, 2009). Nesta etapa, estão incluídas a construção da geometria e a edição de traços.

#### **5.2.2.1.1 Geometria**

O entendimento do tipo dos arranjos que foram utilizados no levantamento é fundamental para a montagem da geometria, que tem como objetivo definir as coordenadas de tiro, receptor, ponto médio comum e o *offset* de cada traço (Silva, 2004).

#### **5.2.2.1.2 Edição dos traços**

Em dados sísmicos, é comum a presença de ruídos devido a diversos fatores, como ruídos transientes, problemas nos receptores, ondas, entre outros. Na edição de traços, aqueles

que apresentam ruídos ou tiros que não tenham sido adequadamente registrados devem ser identificados e então silenciados (Costa, 2011).

Esse procedimento deve ser feito com atenção. Por se tratar da exclusão de traços, pode haver perda de informações, o que compromete a qualidade final do dado.

### **5.2.2.2 Correção Estática**

A parte mais elevada da Terra contém materiais rochosos que são instáveis, provocando distorções em ondas elásticas. Esta parte é nomeada como Zona de Baixa Velocidade (ZBV). Ela é formada por rochas que sofreram decomposição devido ao intemperismo e contém baixa velocidade de propagação de ondas elásticas (Souza, 2014).

Para a correção da ZBV e da elevação da topografia, no qual causam deslocamento nos tempos de chegada das reflexões, a correção estática é aplicada para que seja feita a correção do dado correspondente à esse deslocamento (Souza, 2016). Esse deslocamento ocorre devido principalmente às variações de espessura e velocidade de propagação de ondas elásticas (Souza, 2014). Após a correção, o resultado será uma seção sísmica gerada no qual considerará as fontes e receptores posicionados no mesmo datum (Souza, 2016), procedimento no qual é feito através de alguns métodos numéricos denominados correções estáticas.

Antes de ser realizada a correção estática, o dado não está corretamente pronto para ser trabalhado, no qual geraria resultados não suficientes com o esperado e assim as etapas que são realizadas posteriormente possuem grande probabilidade de terem erros. Caso não seja realizada a correção estática, os deslocamentos causados devido à topografia podem causar danificações com complicações na qualidade da seção sísmica (Souza, 2014), o que pode gerar problemas futuros.

### **5.2.2.3 Atenuação de ruídos**

Na atenuação de ruídos, são tratados os ruídos presentes nos dados durante a aquisição, através de filtros (Abreu, 2005). O objetivo é preservar a faixa de frequência do sinal sísmico necessário, para que, assim, as componentes de frequências indesejadas sejam removidas dos traços. O filtro mais comumente utilizado é o passa-banda, em que é definida a banda de frequência de rejeição, passagem e atenuação, como pode ser visto na Figura 10, em

que 0-f1 e a partir de f4 representam a faixa de rejeição, f1-f2 e f3-f4 representam a faixa de atenuação e f2-f3 representa a faixa de passagem.

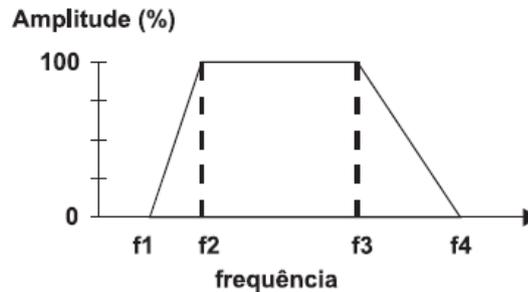


Figura 10: Filtro passa-banda do tipo trapezoidal. Extraído de Silva (2004).

#### 5.2.2.4 Correção de divergência esférica e espalhamento geométrico

Durante o pré-processamento, há também a correção de divergência esférica. Ela é aplicada para tentar resgatar a amplitude que foi perdida devido ao processo de espalhamento geométrico (Sá, 2013). A amplitude da onda é proporcional à raiz quadrada da densidade de energia, podendo ser representada por  $1/r$ , no qual  $r$  representa o raio.

#### 5.2.2.5 Deconvolução

Deconvolução é o processo que aumenta a resolução temporal do dado sísmico através da compressão do pulso básico (Yilmaz, 1987). Esta consiste na estimativa de um filtro inverso de um pulso sísmico básico (*wavelet*). Com isso será possível obter a resposta das camadas da Terra quando for aplicado ao traço sísmico. Normalmente, é realizada antes do empilhamento, mas pode ser realizada após o mesmo (Abreu, 2005). O traço sísmico pode ser representado matematicamente pela equação (1) (Yilmaz, 1987):

$$S(t) = p(t) * r(t) + n(t) \quad (1)$$

onde  $S(t)$  é o traço sísmico,  $p(t)$  representa o pulso sísmico básico,  $r(t)$  é a função refletividade,  $n(t)$  é um ruído aleatório e  $*$  corresponde à convolução.

### 5.2.2.6 Análise de velocidade

A análise de velocidade tem muita relação com o resultado final e sucesso do processamento sísmico. A qualidade da seção final que for obtida após as etapas irá depender muito desta etapa pois depende do grau de precisão alcançado das velocidades em subsuperfície (Silva, 2004 *apud* Souza, 2014). A análise de velocidade é a etapa em que são determinadas as velocidades sísmicas em subsuperfície que melhor horizontalizem a hipérbole de reflexão (Costa, 2011). A hipérbole dada pela curva de tempo de trânsito em relação ao afastamento da fonte e do receptor é indicada pela equação (2) (Yilmaz, 1987):

$$t_x^2 = t_0^2 + \frac{x^2}{V^2}, \quad (2)$$

em que  $t_x$  é o tempo de onda da fonte até o receptor,  $x$  a distância entre a fonte e o receptor,  $V$  a velocidade da camada e  $t_0$  o tempo duplo de afastamento zero.

O conhecimento da geologia do local é de extrema importância para haver a análise de velocidade, pois é imprescindível ter em mente a litologia para cada intervalo de tempo (Souza, 2014). Logo, para este trabalho, foi essencial o conhecimento da área de *Blake Ridge*.

#### 5.2.2.6.1 Velocidades sísmicas NMO, RMS e Intervalar

A velocidade *Root Mean Square* ( $V_{RMS}$ ) em dados sísmicos de reflexão é obtida a partir da velocidade intervalar, de acordo com a equação (3), denominada fórmula de Dix (1955).

$$V_{int} = \sqrt{\frac{t_2 \cdot V_{RMS_2}^2 - t_1 \cdot V_{RMS_1}^2}{t_2 - t_1}} \quad (3)$$

onde  $V_{int}$  é a velocidade intervalar,  $V_{RMS_2}$  a velocidade RMS na camada inferior,  $V_{RMS_1}$  a velocidade RMS na camada superior,  $t_2$  tempo de trânsito da camada inferior e  $t_1$  tempo de trânsito da camada superior.

A fórmula de Dix foi inferida por Charles Hewitt em 1955, no qual foi considerado um modelo simples. A partir desta fórmula, Charles Hewitt pretendeu descobrir as velocidades individuais de propagação do pulso sísmico nas camadas (Neto, 2009).

Em dados sísmicos de reflexão e para afastamentos mais curtos, é possível obter a velocidade NMO ( $V_{NMO}$ ), que se aproxima muito da velocidade RMS ( $V_{RMS}$ ) (Yilmaz, 2001). Eles possuem grandes similaridades, com isso, pode-se considerar que a  $V_{RMS}$  pode ser admitida como um caso particular de  $V_{NMO}$  em modelos plano-estratificados (Neto, 2009). Ou seja, em refletores inclinados, as velocidades encontradas serão distintas (Costa, 2011). A diferença entre eles é justamente o modelo. Em  $V_{RMS}$  considera-se modelos plano-horizontais, enquanto que em  $V_{NMO}$  considera-se modelos estratificados que possuam interfaces curvadas (Neto, 2009). No presente trabalho, foi considerada apenas a  $V_{NMO}$  no lugar da  $V_{RMS}$  durante o processamento sísmico e nos devidos resultados.

#### 5.2.2.6.1.1 Velocidade NMO

A equação (4) correlaciona os tempos de chegada dos raios de uma frente de onda com o afastamento e a velocidade NMO (Yilmaz, 1987).

$$t^2 = t_0^2 + \frac{x^2}{V_{NMO}^2}, \quad (4)$$

onde  $t_0$  é o tempo de trânsito inicial para  $x = 0$ ,  $t$  é o tempo de trânsito para um afastamento  $x$  e  $V_{NMO}$  a velocidade NMO da interface.

#### 5.2.2.6.1.2 Velocidade Intervalar

De acordo com Neto (2009), a velocidade intervalar representa a velocidade de propagação em que o pulso sísmico trafega em um meio. Além disso, é a velocidade que mais se parece com o conceito físico de velocidade. A velocidade intervalar permite fazer o cálculo das outras velocidades do processamento sísmico e caracterizar o campo a ser estudado. Ela corresponde a uma velocidade média, pois pequenas estratificações podem não ser tão nítidas na sísmica, o que também pode estar relacionada à resolução dos dados.

Alguns fatores como a pressão, saturação e temperatura podem influenciar a velocidade intervalar em uma determinada composição geológica (Yilmaz, 2001). Sintetizando, a velocidade intervalar é a velocidade média em que a onda irá se propagar entre dois refletores (Costa, 2011). Ela pode ser obtida através da equação (3), no qual não pode ser considerado em modelos muito complexos, pois pode ser sensível a erros no campo de velocidades intervalares (Neto, 2009).

### 5.2.2.7 Correção NMO

A correção NMO é apenas realizada através de uma estimativa de velocidade. Nela calcula-se a diferença entre o tempo de reflexão em um afastamento  $t_x$  e o tempo de afastamento nulo  $t_0$ , como pode ser visto na equação (5) (Yilmaz, 1987):

$$\Delta t_{NMO} = t_x - t_0 \quad (5)$$

Esta diferença faz com que os eventos sejam horizontalizados no eixo dos afastamentos e assim corrigir o atraso do tempo de chegada da reflexão com o tempo de incidência normal (Sá, 2013). Assim, as fontes e os receptores se juntarão e formarão um único ponto, que será correspondido às coordenadas de uma família CMP, ou seja, uma família de ponto médio comum, mais especificamente, o ponto médio na superfície entre as fontes e os receptores. Os traços são estirados com a correção NMO, fazendo com que esse estiramento aumente quando o tempo for curto e o afastamento for grande (Figura 11) (Costa, 2011).

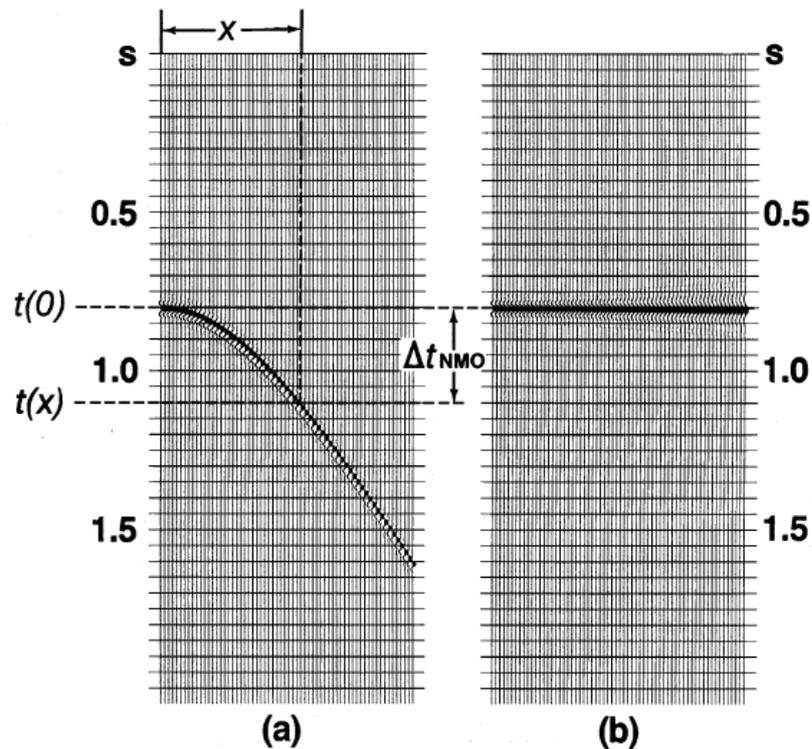


Figura 11: (a) Antes da correção NMO, (b) Depois da correção NMO. Extraído de Yilmaz (2001).

#### 5.2.2.8 Empilhamento

Após a correção NMO, os traços sísmicos serão somados ao longo do eixo dos afastamentos, fazendo com que haja um traço unitário, representando o registro de afastamento nulo para a família CMP citado acima (Figura 12). Denomina-se essa etapa de empilhamento sísmico e seu objetivo é aumentar a relação entre o sinal e o ruído (Costa, 2011) e a diminuição do tamanho do dados (Souza, 2014). O dado que for empilhado irá servir para a etapa seguinte, chamada migração (Sá, 2013). O empilhamento terá um bom resultado através de uma análise de velocidade, feita anteriormente, considerável, para que horizontalize os eventos primários (Souza, 2014).

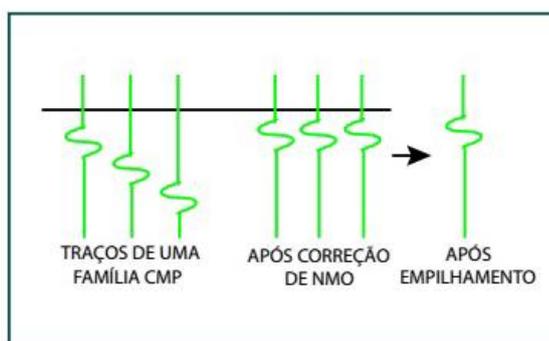


Figura 12: Empilhamento de dados sísmicos. Extraído de Souza (2014).

### 5.2.2.9 Migração

A migração consiste na etapa do processamento sísmico no qual há a correção dos efeitos que ocorreram na propagação do pulso sísmico, o posicionamento das reflexões e o colapso das difrações. O objetivo é tornar a seção empilhada anteriormente o mais próximo possível de uma seção sísmica geológica em profundidade. A migração fará com que os refletores se movam para as suas posições em subsuperfície e que as difrações colapsem, no qual irá gerar um aumento da resolução espacial (Yilmaz, 2001). Há dois tipos de migração, a migração em tempo, na qual as seções sísmicas migradas usam o tempo como dimensão vertical e a migração em profundidade. Neste trabalho, somente abordaremos a migração em tempo, ela é considerada mais simples e depende de menos esforço computacional do que a migração em profundidade (Costa, 2011).

Na migração em tempo, o campo de ondas na superfície é configurado através dos tempos em que elas irão percorrer da fonte até os detectores. É imprescindível ter a forma do campo de ondas, que será realizada pela solução da equação da onda, uma equação diferencial parcial que caracteriza o movimento das ondas geradas pela fonte (Kearey *et al.*, 2009). Nela, há a transformação dos dados sísmicos em tempos, isto faz com que as estruturas se assemelhem, ou seja, se parecem mais reais em comparação à subsuperfície (Costa, 2011).

#### 5.2.2.9.1 Migração *Kirchhoff*

A migração *Kirchhoff*, ou MK, é um método comum tanto na migração 2D, como realizada neste trabalho, quanto na migração 3D. Esse método trabalha empilhando as

amplitudes dos dados de entrada (posição e tempo) ao longo de uma hipérbole de difrações (Figura 13). A MK é indicada para o imageamento de estruturas suaves. Porém, no imageamento de estruturas complexas, o método não é recomendado (Aldunate e Pestana, 2006) por não apresentar bons resultados.

A migração *Kirchhoff* supõe que a reflexão é formada pela junção das curvas de difrações, que se originaram de pontos difratores que estão localizados sobre o refletor. Assim, a migração fornece valores de amplitude em um ponto sobre o refletor. Para obtê-la, é preciso ter um modelo do campo de velocidade que mostre a distribuição das velocidades na subsuperfície (Ferreira, 2012).

Há duas classificações para a migração *Kirchhoff*: pré-empilhamento e pós-empilhamento. Na pré-empilhamento, há a migração dos dados organizados em tiro comum. Na pós-empilhamento, é aplicado um algoritmo de migração a dados já empilhados anteriormente (Ogorodnik, 2007 *apud* Ferreira, 2012), e é o mais utilizado devido aos resultados melhores.

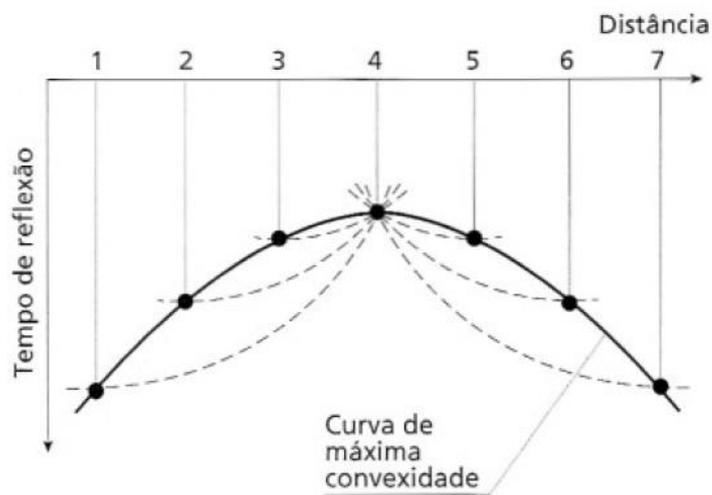


Figura 13: Desenho exemplificando como as hipérboles irão se transformar em um ponto difrator no processo de migração em tempo. Extraído de Kearey *et al.* (2009).

#### 5.2.2.10 Seção sísmica final

Na última etapa do processamento sísmico, segundo Sá (2013), serão aplicados filtros para atenuar e retirar ruídos que foram gerados nas etapas anteriores, especialmente na migração. Serão aplicados principalmente filtros passa-banda, ganhos e atenuações, obtendo uma seção sísmica final, geralmente bem diferente da seção sísmica original.

## 6 METODOLOGIA

Neste estudo, a estimativa de velocidade nos dados monocal foi realizada a partir das curvas de difrações presentes em áreas com alguma complexidade estrutural. Essas áreas, embora não contínuas, fornecem valiosa informação acerca do campo de velocidades, que é extrapolado lateralmente de acordo com a estratigrafia observada na seção.

Os dados empregados para a elaboração desse projeto são de domínio público, fornecidos pela USGS - *United States Geological Survey*. O relatório da USGS contém os dados sobre a aquisição, a navegação e o processamento.

Algumas etapas do processamento sísmico não foram empreendidas neste trabalho. O estudo focou na estimativa do campo de velocidades. A seguir estão listadas todas as etapas realizadas neste estudo e resumidas na Figura 14. Elas foram executadas com o pacote do *software Seismic Unix* e a partir de *scripts* e rotinas desenvolvidos pelos orientadores.

A primeira etapa consistiu na correção estática da linha 921217 devido a um erro no dado em relação ao tempo. Essa etapa faz parte do pré-processamento e deve ser realizada antes de identificar as difrações.

Inicialmente, foram reconhecidas as difrações na seção sísmica. De forma a colapsar essas difrações, foram aplicadas velocidades NMO de 1500 m/s a 1700 m/s, com intervalos de 50 m/s. Assim, foi possível identificar a melhor velocidade NMO para cada região.

Após determinar a velocidade NMO mais adequada para certa área da seção, foram traçados três horizontes que atuam como refletores e acompanham a geologia, sendo denominados fm (fundo do mar), hz1 (horizonte 1) e hz2 (horizonte 2). Em seguida, foi criado um pseudo-poço na estação 400, por este apresentar um local com diversas difrações visíveis.

Posteriormente, na posição do pseudo-poço, as diferentes velocidades NMO foram levadas até o tempo adequado de acordo com as relações estratigráficas dadas pelos horizontes mapeados. Assim, na posição do pseudo-poço, foi construída por interpolação a curva de velocidade NMO. A partir desta última, foi obtida a curva de velocidade intervalar no pseudo-poço.

Uma vez obtido o pseudo-poço com as velocidades NMO e intervalar, esta última foi extrapolada para toda a seção respeitando a estratigrafia fornecida pelos horizontes mapeados. Assim, foi criado o modelo de velocidade intervalar, e a partir dele, foi calculado o modelo de velocidade NMO.

Por fim, a partir do modelo de velocidade NMO, foi realizada a migração *Kirchhoff*, onde foi possível obter a seção sísmica migrada sobre a qual foram realizadas as interpretações.

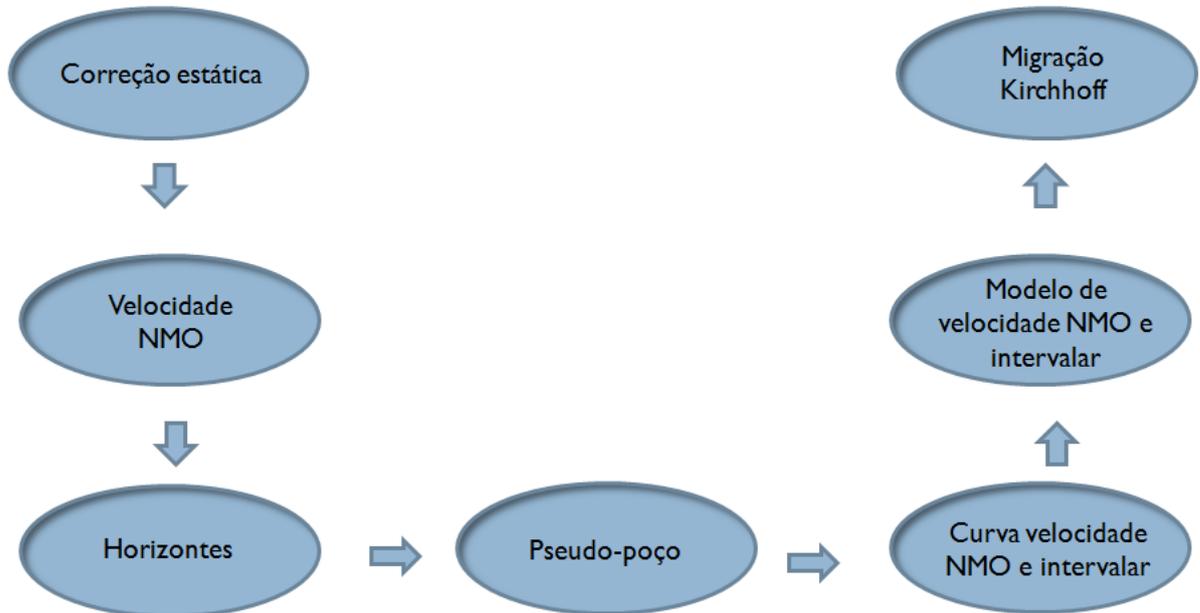


Figura 14: Resumo representando as etapas realizadas durante o estudo.

## 7 APLICAÇÕES, RESULTADOS E DISCUSSÕES

Através da metodologia descrita acima, foi possível criar dois modelos de velocidades, sendo um NMO e outro intervalar, para entender o comportamento das velocidades sísmicas, de acordo com a presença de hidratos de gás e gás livre. Além disso, foi possível analisar as falhas e associá-las aos hidratos e ao gás livre também. A seguir, serão apresentados os resultados e as interpretações da linha sísmica 921217 de *Blake Ridge* realizadas durante o projeto no software *Seismic Unix*.

### 7.1 *Seismic Unix*

Inicialmente, foi realizada a correção estática com rotinas do *Seismic Unix*. As Figuras 15 e 16 mostram a seção bruta e a seção sísmica já com a correção estática. A correção estática foi aplicada pois o dado bruto possuía um erro em relação ao tempo de aproximadamente 1 segundo. Logo, para que o trabalho fosse iniciado, foi necessária a correção estática da seção sísmica.

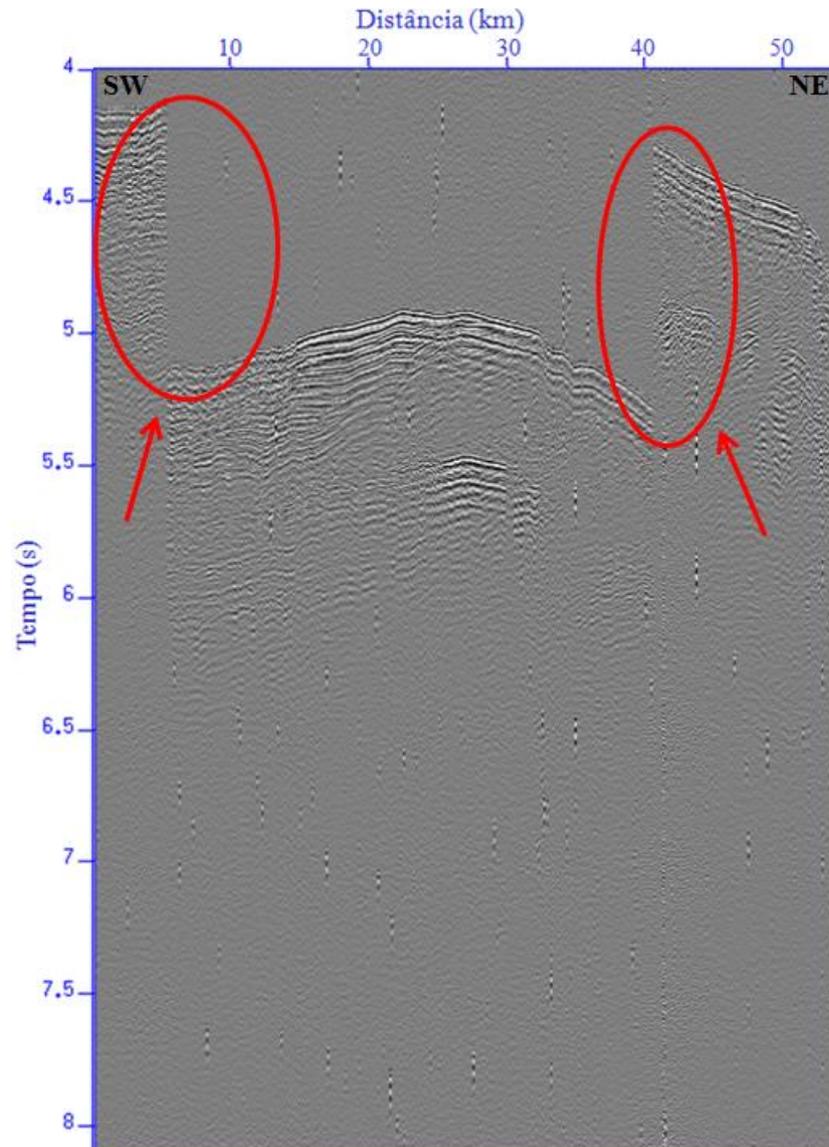


Figura 15: Seção sísmica bruta, antes da aplicação da correção estática. É possível observar o atraso na recepção dos dados, destacado em vermelho.

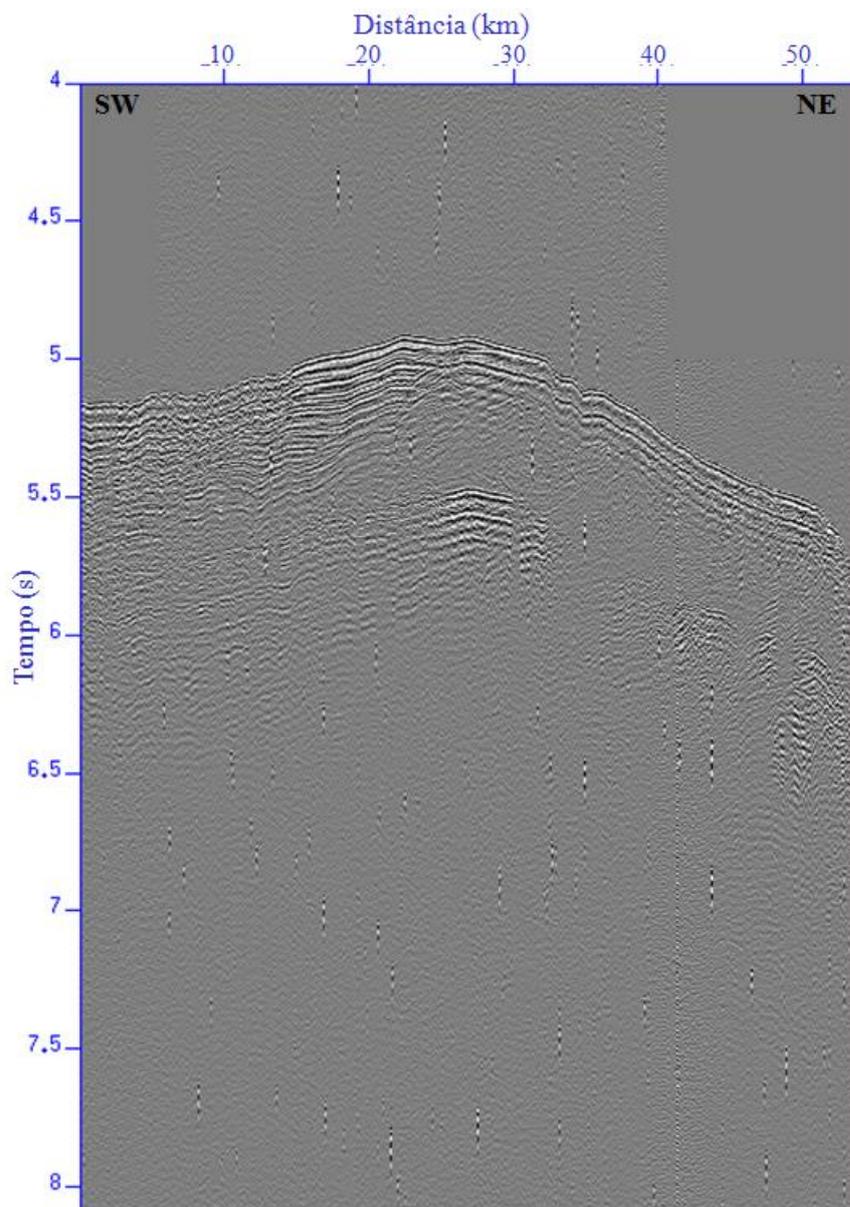


Figura 16: Seção sísmica com a correção estática executada no *Seismic Unix*.

Após a correção estática, foi possível observar três regiões com curvas de difrações mais visíveis, como mostra a Figura 17. Essas regiões foram alvo dos estudos de estimativa de velocidades NMO. A figura foi ampliada para justamente as difrações serem mais visíveis.

A técnica para estimativa de velocidade consiste em aplicar várias migrações sísmicas com velocidades NMO constantes. Os painéis migrados foram ordenados de acordo com as velocidades NMO empregadas na migração. A velocidade NMO, capaz de colapsar as hipérboles de difração de uma dada região é, portanto, a mais adequada para aquela posição. Através desse conceito, foram aplicadas velocidades constantes de 1500 m/s a 1700 m/s para analisar a colapso dessas hipérboles.

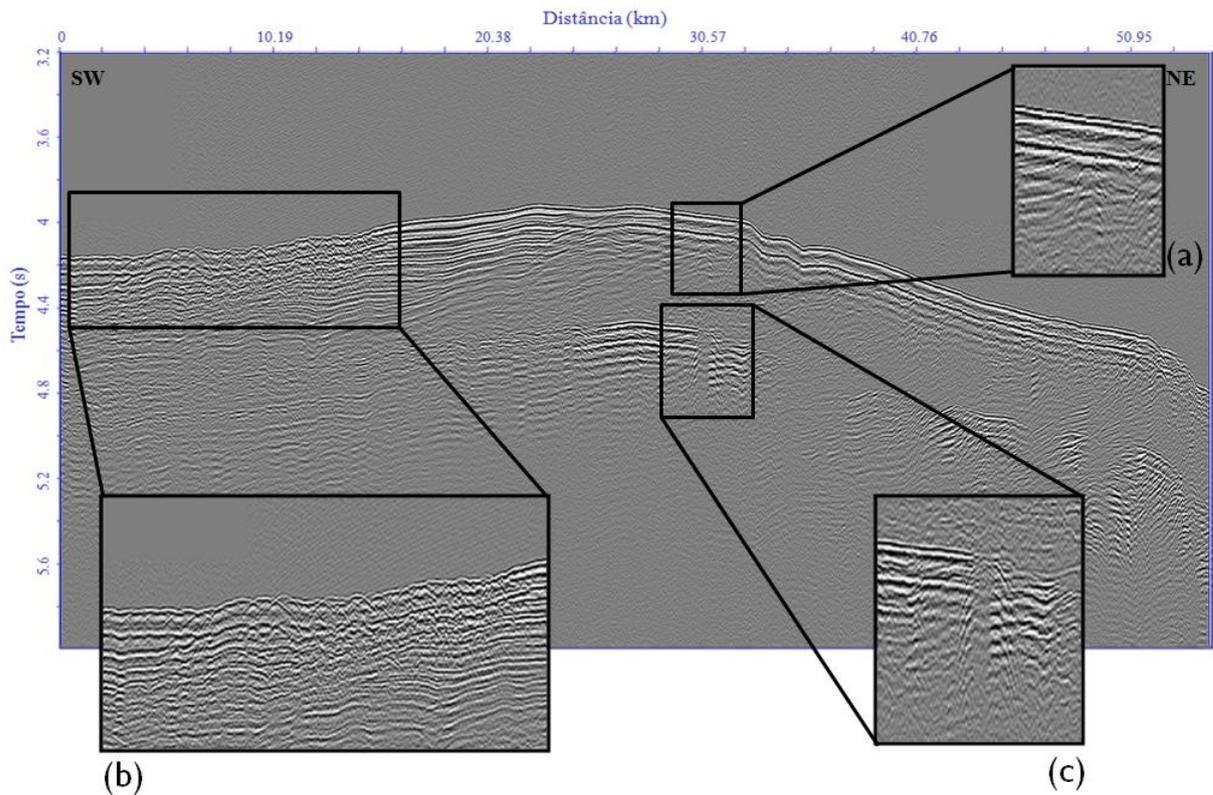


Figura 17: Seção sísmica com as regiões a), b) e c) destacando as difrações mais visíveis.

As áreas delimitadas na Figura 17 tiveram melhor resolução após efetuada a migração com velocidades iguais a 1500 m/s e a 1550 m/s. Nas áreas a) e b) a velocidade mais apropriada foi 1500 m/s, enquanto na área c), a melhor foi 1550 m/s.

Este resultado é coerente em relação à análise de velocidade, uma vez que se espera que a velocidade NMO seja crescente de acordo com a profundidade. A Figura 18 exhibe as hipérbolas colapsadas e migradas com as velocidades NMO mais adequadas. Novamente a figura foi ampliada para justamente as hipérbolas colapsadas serem mais visíveis.

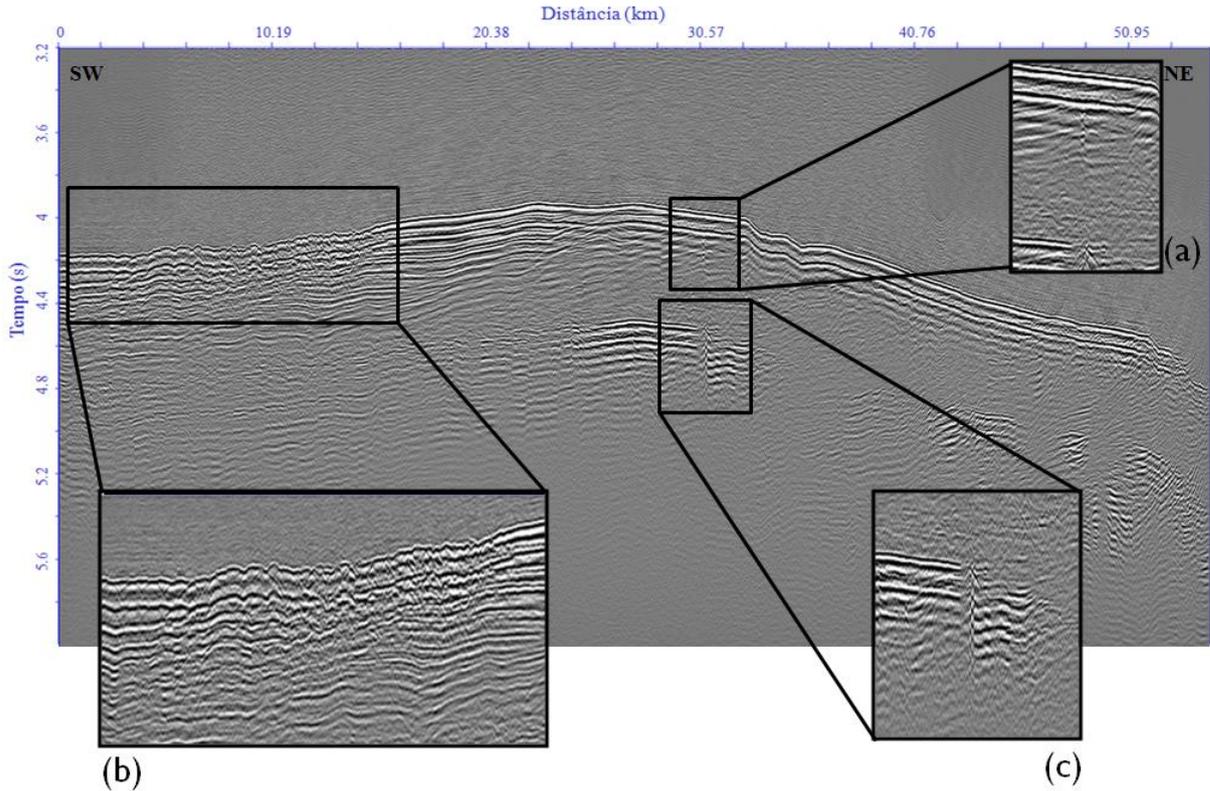


Figura 18: Seção sísmica com as hipérbolas de difrações colapsadas após o teste das velocidades. As regiões destacadas como a) e b) obtiveram melhor resultado com velocidade 1500 m/s, enquanto que c) foi 1550 m/s.

Após feita a estimativa da velocidade NMO em cada região, foram mapeados os três horizontes: o fundo do mar (fm), representado pela cor azul, além dos horizontes hz1 e hz2, representados pelas cores vermelha e verde, respectivamente. Não foi possível mapear os refletores abaixo do hz2, porque estes não apresentaram uma boa continuidade. Isto se deve principalmente à erosão e às discordâncias e à própria baixa qualidade do sinal sísmico.

Traçados os horizontes, foi preciso local um pseudo-poço, ou poço hipotético, na seção sísmica. Ele foi traçado em aproximadamente 9 km (Figura 19), uma distância coincidente com uma das regiões que apresenta alta concentração de difrações. Na posição do pseudo-poço, serão concentradas todas as estimativas de velocidade observadas na seção. As velocidades NMO, observadas nas regiões destacadas na Figura 18, foram levadas para o pseudo-poço, respeitando a estratigrafia determinada pelos três horizontes mapeados, uma aproximação razoável para o comportamento geológico da região de *Blake Ridge*. Assim, o pseudo-poço foi criado para que houvesse a interpolação das velocidades NMO, onde as informações delas fossem “resumidas” para ele.

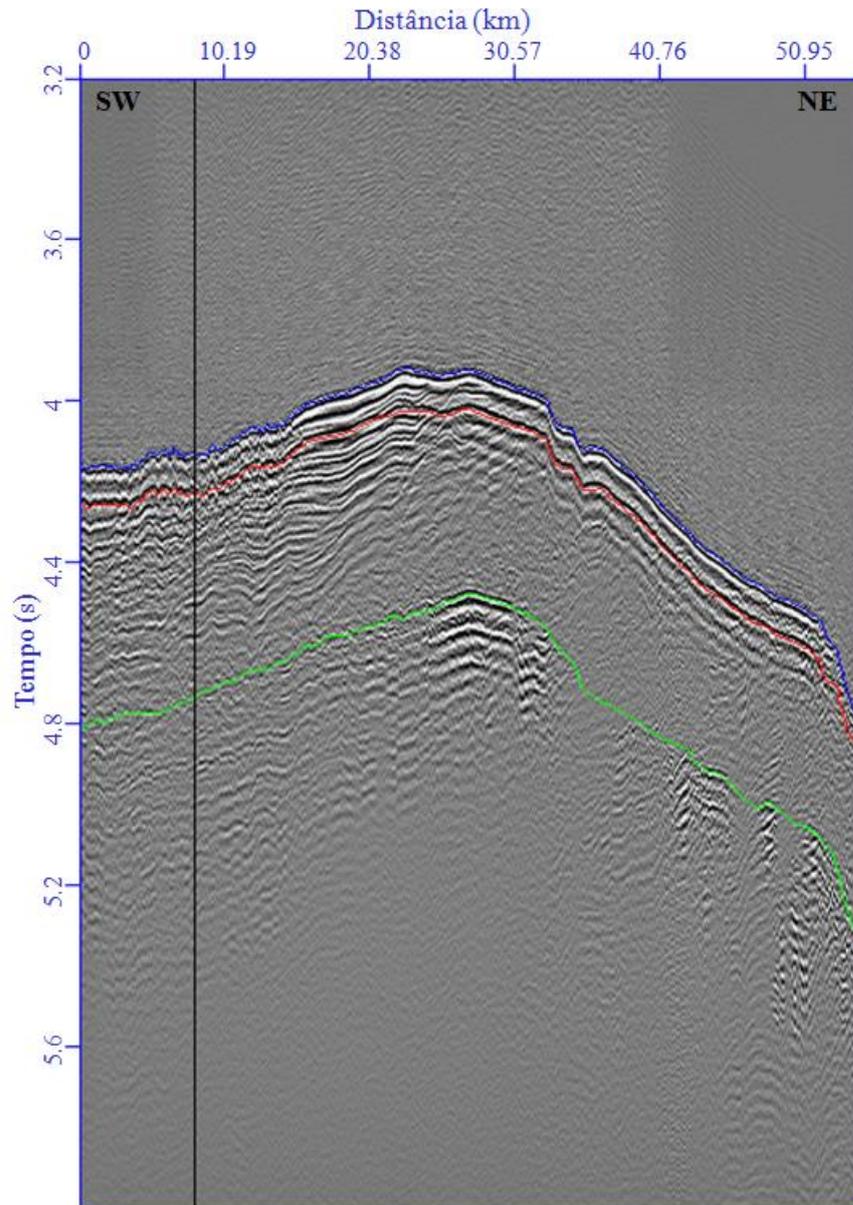


Figura 19: Horizontes mapeados: Azul - fundo do mar (fm); Vermelho - horizonte hz1; Verde – horizonte hz2. Em preto, o pseudo-poço.

A velocidade NMO na posição do pseudo-poço - aproximadamente 9 km - foi transformada em velocidade intervalar para que, assim, estas fossem extrapoladas para toda a seção sísmica, respeitando as estruturas observadas nos três horizontes mapeados. Após a transformação foi gerado um gráfico representando as velocidades NMO e intervalares, de acordo com o tempo correspondente (Figura 20). A cor verde representa a velocidade intervalar e a cor vermelha representa a velocidade NMO. A curva de velocidade NMO foi criada a partir da curva de velocidade intervalar, isto ocorre pois quem irá obedecer a geologia é a velocidade intervalar. A transformação da velocidade NMO para a velocidade intervalar é de acordo com a fórmula de Dix, vista anteriormente na equação (3).

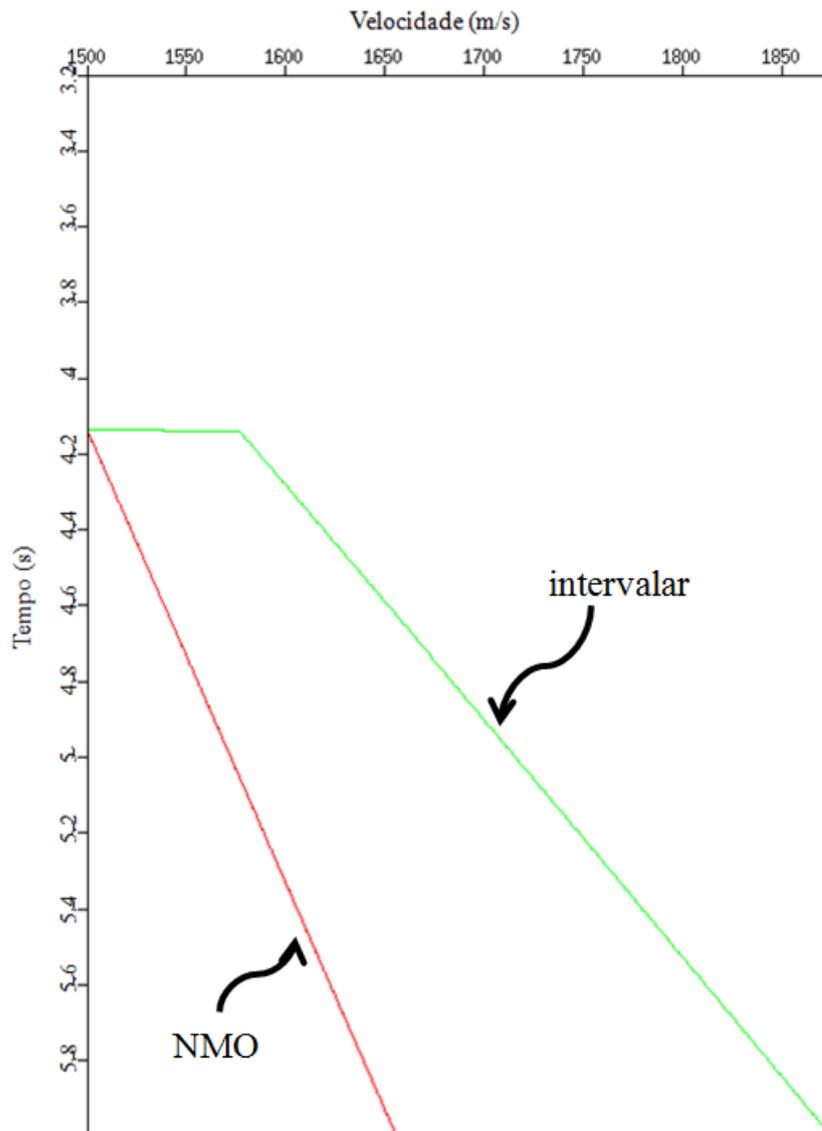


Figura 20: Gráfico gerado representando as velocidades NMO (vermelha) e intervalares (verde).

A partir do gráfico da Figura 20, a velocidade intervalar foi extrapolada, permitindo a criação do modeo de velocidade intervalar e do modelo de velocidade NMO, como podem ser vistos nas Figuras 21 e 22, respectivamente. Abaixo de 5.2 segundos, a velocidade será suposição, pois não foi possível traçar mais horizontes depois do hz2, como dito anteriormente.

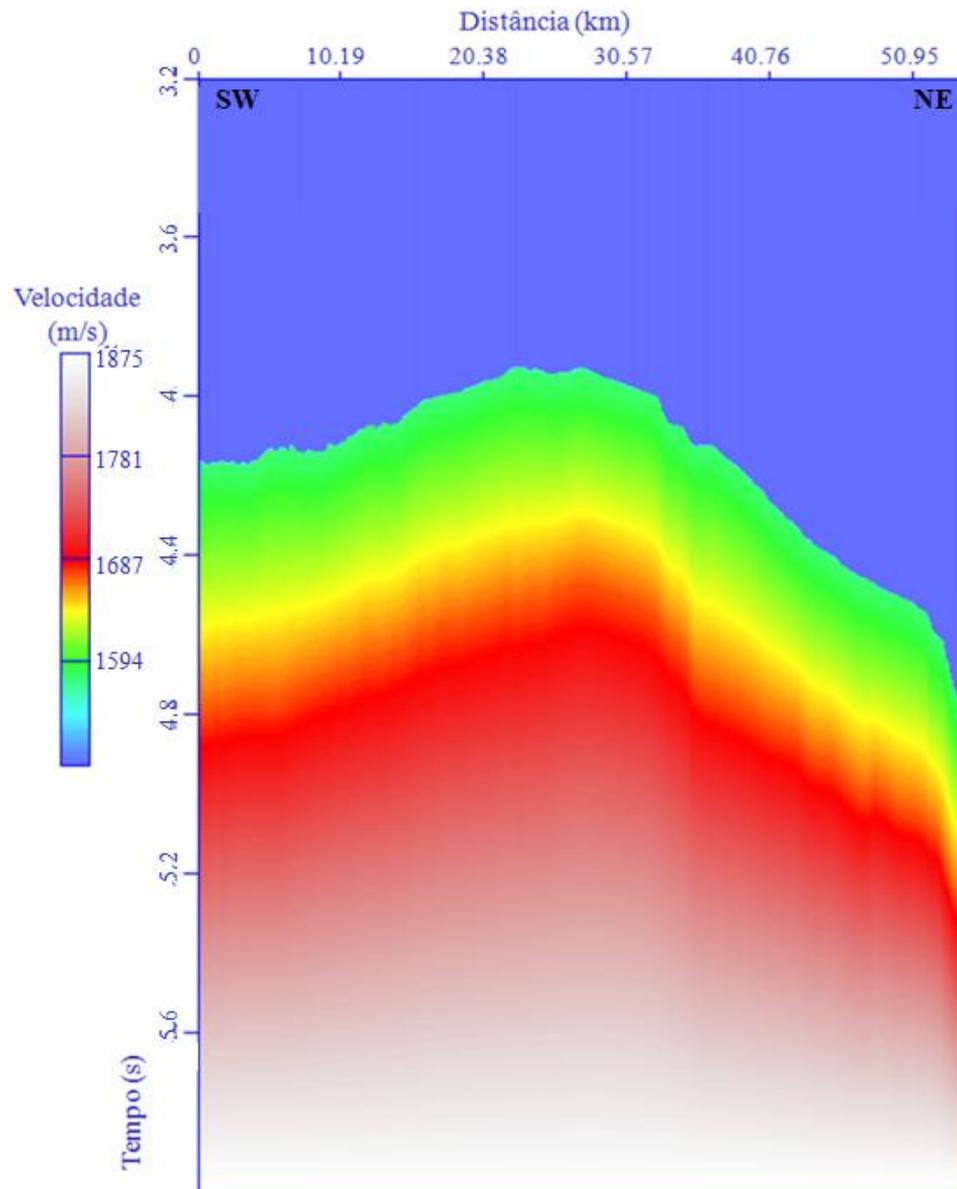


Figura 21: Modelo de velocidade intervalar.

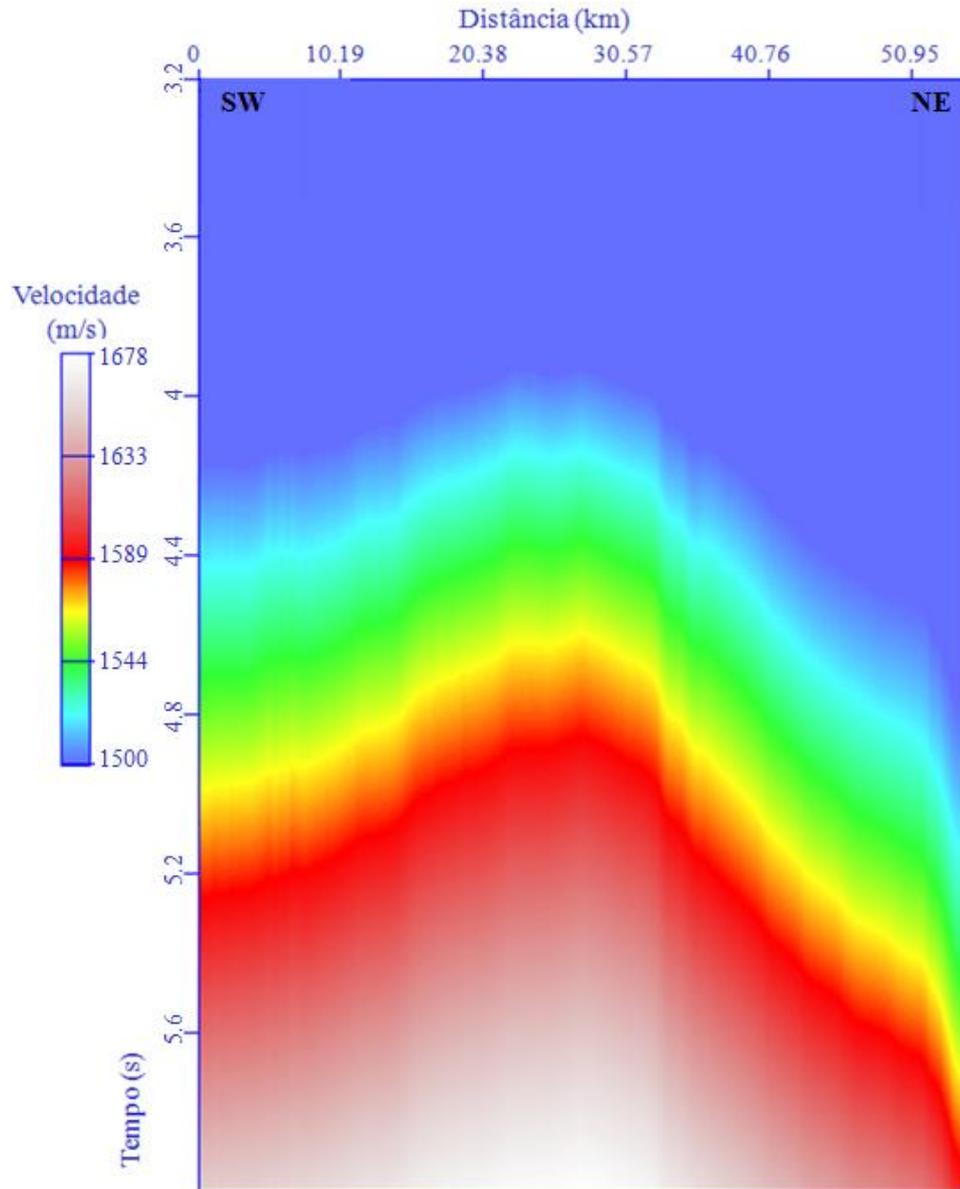


Figura 22: Modelo de velocidade NMO.

A partir do modelo de velocidade NMO, a seção sísmica foi migrada - migração *Kirchhoff* -, gerando a seção da Figura 23.

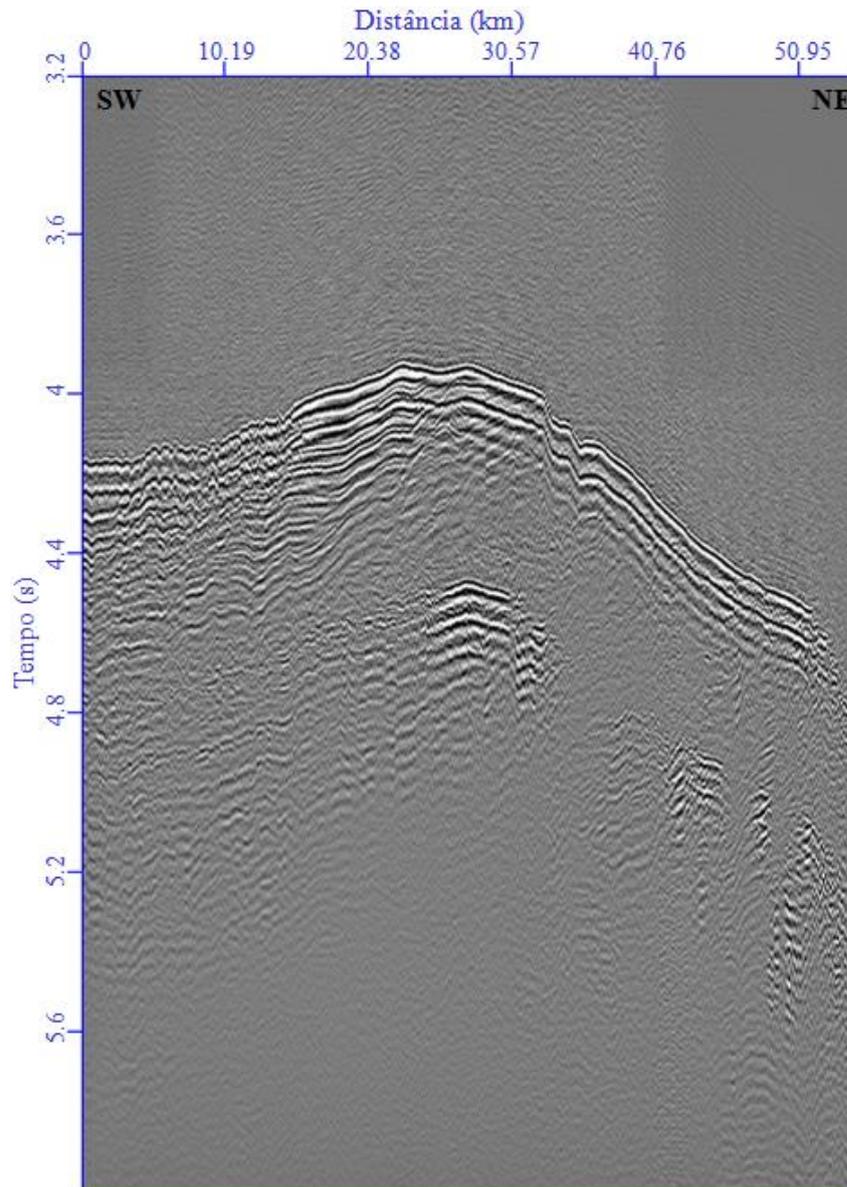


Figura 23: Seção sísmica com a migração *Kirchhoff* efetuada.

## 7.2 Interpretação Sísmica

Sobre a seção migrada, foi realizada a interpretação dos eventos e com ela foi possível identificar a presença de algumas falhas e o BSR, no qual essas falhas foram descobertas próximas à ele (Figura 24). Estas falhas podem favorecer a migração de gás para a zona de estabilidade do hidrato, podendo, inclusive, migrar até o fundo do mar (Dillon *et al.*, 1997 *apud* Max e Dillon, 1998), como dito anteriormente no estudo da geologia da região.

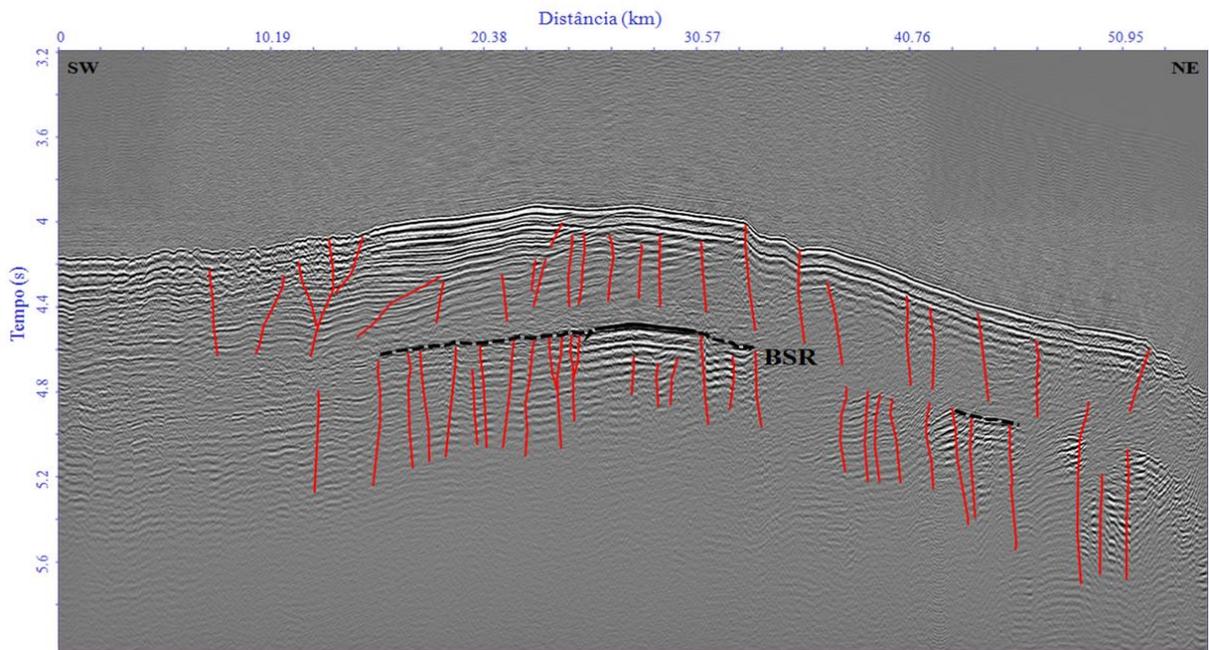


Figura 24: Falhas interpretadas na região da linha sísmica 921217 de *Blake Ridge*. A Figura foi estendida para melhor visualização delas.

A análise de velocidades do modelo intervalar permite inferir uma menor velocidade (aproximadamente 1650 m/s) acima da BSR e uma maior velocidade (aproximadamente 1700 m/s) abaixo da mesma. Em relação ao modelo de velocidades NMO, permite inferir uma menor velocidade (aproximadamente 1540 m/s) acima da BSR e uma maior velocidade (aproximadamente 1560 m/s) abaixo da mesma. Assim, em ambos os modelos, as velocidades encontradas não estão caracterizando a interface hidrato/gás livre. Nas Figuras 25 e 26 percebe-se a diferença e os comportamentos das velocidades calculadas. O BSR está representado pela linha preta. Acima dele, se encontram os hidratos e, abaixo, o gás livre. A linha tracejada é uma suposição da continuidade do BSR.

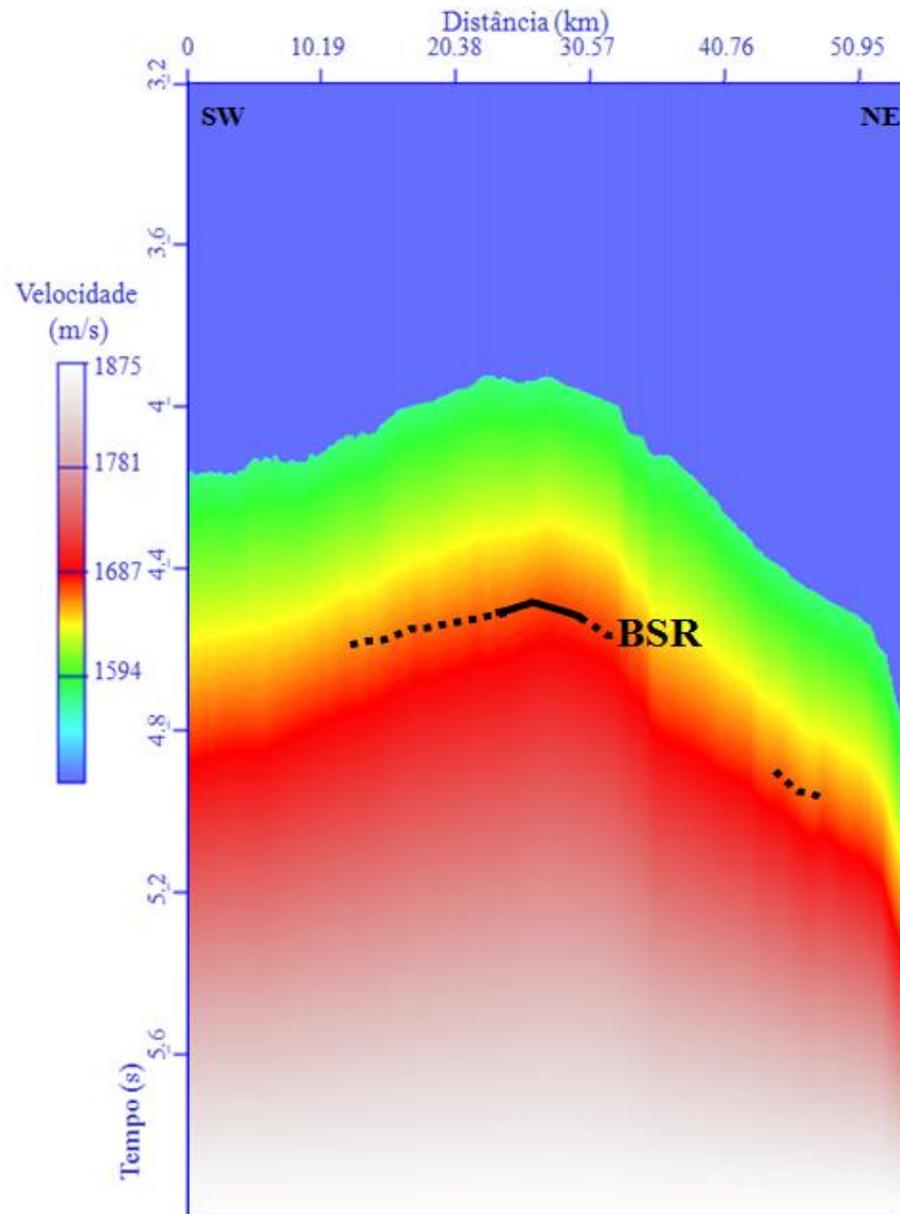


Figura 25: Modelo de velocidade intervalar com marcação do BSR.

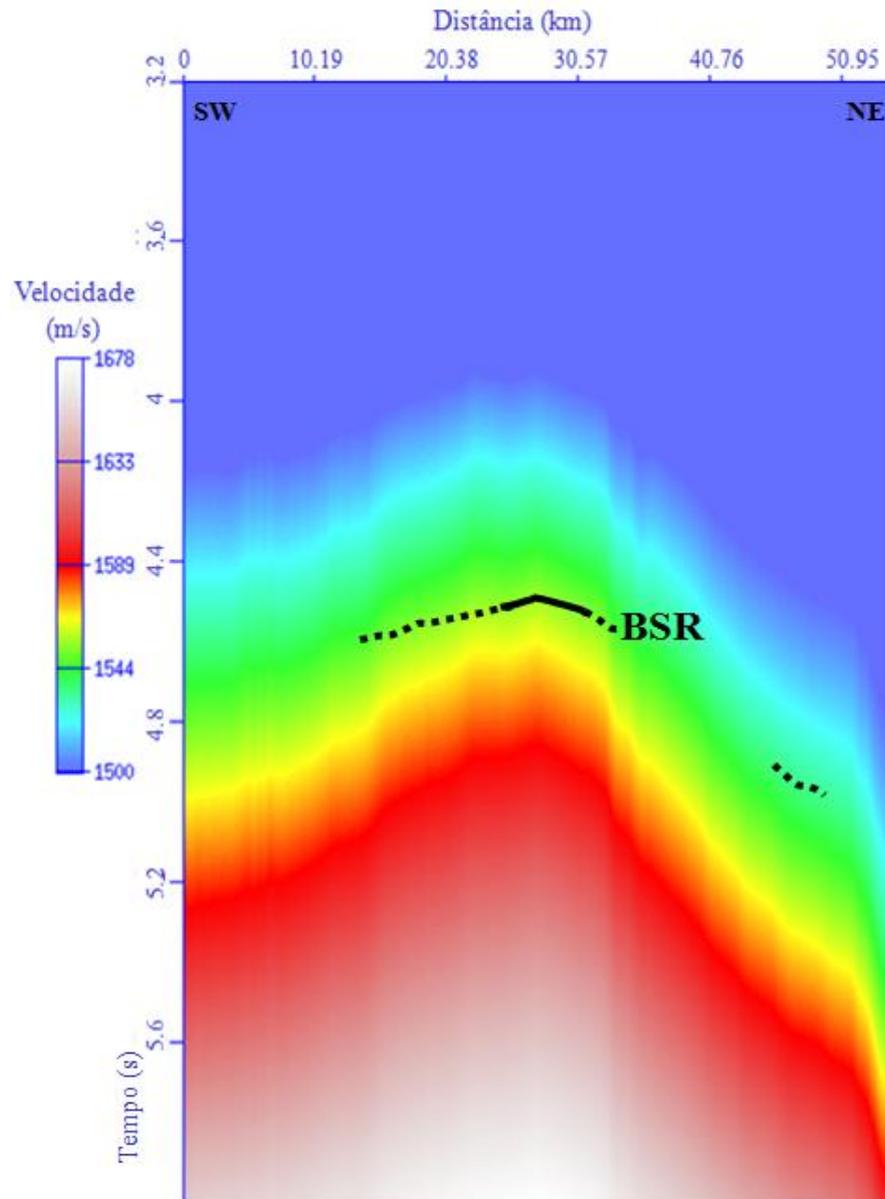


Figura 26: Modelo de velocidade NMO com marcação de BSR.

O modelo de velocidade intervalar e o modelo de velocidade NMO são similares, porém é possível notar algumas diferenças entre eles. No modelo de velocidade intervalar, há uma abrupta mudança de velocidade na interface entre a água e o fundo do mar. No modelo de velocidade NMO, não ocorre essa abrupta mudança, havendo uma transição. Também há uma pequena diferença de velocidades dos hidratos de gás e do gás livre para os dois modelos e as velocidades NMO são menores quando comparadas com as intervalares.

O método não foi suficiente nessa seção sísmica para mostrar um contraste nítido entre os hidratos e o gás livre. Por isso, tanto no modelo de velocidade intervalar quanto no modelo de velocidade NMO não é possível afirmar que a velocidade sísmica tenha aumentado devido

à presença dos hidratos de metano e diminuído em consequência do gás livre. O que seria o mais esperado, pois o hidrato de gás faz com que aumente a impedância e o gás livre faz com que ela diminua. Devido a isto, e considerando somente esta linha sísmica, não foi possível afirmar que as alterações vistas nos dois modelos foram atribuídas aos hidratos e ao gás livre.

## 8 CONCLUSÃO

Neste trabalho, as etapas realizadas no software *Seismic Unix* e os campos de velocidades gerados permitiram que fossem estimadas velocidades NMO e intervalar na linha 921217 na região de *Blake Ridge*. Ambas as velocidades obtidas NMO e intervalar, de acordo com as estimativas, são crescentes com a profundidade em função da topografia do fundo oceânico. Trata-se de um modelo do tipo  $v(z=\text{fundo do mar})$ , portanto não plano-paralelo horizontal. As velocidades intervalares estimadas variaram de 1500 m/s a 1875 m/s, enquanto as velocidades NMO variam de 1500 m/s a 1678 m/s, respectivamente.

A técnica empregada exibiu velocidades intervalares compatíveis com aquelas encontradas para a região de *Blake Ridge* (Santos *et al.*, 2012 e Tinivella e Lodolo, 2000). Neste sentido, o método se mostrou robusto e eficaz para estimativa de um campo de velocidades suave na seção sísmica estudada. Contudo, em função da reduzida quantidade e distribuição de difrações na linha sísmica 921217, os elementos empregados não são suficientes para exibir contrastes bruscos de velocidades a ponto de distinguir o contato da zona de estabilidade de hidratos com a zona de gás.

O campo de velocidade NMO obtido é passível de uso na migração *Kirchhoff*, proporcionando maior focalização de eventos, melhorando o trabalho de interpretação de horizontes e falhas e a identificação do BSR.

Uma possibilidade de uso da velocidade intervalar para o auxílio na delimitação da zona de hidrato de gás careceu de mais difrações nesta linha. Para este intento recomenda-se a extensão da técnica usada na linha 921217 em outras seções sísmicas na região de *Blake Ridge*, por exemplo, na parte mais central do mapa da Figura 4, por haver a possibilidade de ter mais falhas e mais difrações. Neste processo seriam integradas mais difrações com maior distribuição espacial que, em um ambiente 3D, confeririam maior nível de detalhe na estimativa de velocidades em subsuperfície.

Contudo, o objetivo do trabalho foi satisfatoriamente alcançado, pelos resultados adquiridos através do processamento e interpretação realizados no *Seismic Unix*, vistos nas figuras presentes. Ademais, apesar de que com o método utilizado não foi possível exibir os contrastes bruscos de velocidades, o resultado foi aceitável por ter gerado os dois modelos de velocidades, analisar o comportamento das velocidades sísmicas e associar as falhas presentes com a movimentação do gás livre.

## 9 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABREU, Anderson Santos. **Processamento de dados sísmicos do Golfo do México usando o SEISMIC UNIX**. 2005. 78 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Geofísica) - Universidade Federal da Bahia, Salvador, 2005.

ALDUNATE, Gary C; PESTANA, Reynam C. Método híbrido de migração pré-empilhamento em profundidade no domínio da frequência em duas etapas com interpolação. **Revista Brasileira de Geofísica**, São Paulo , v. 24, n. 1, p. 91-102, mar. 2006.

CLENNELL, M. B.; HOVLAND, M.; BOOTH, J. S.; HENRY, P.; WINTERS, W. J. Formation of natural gas hydrates in marine sediments 1. Conceptual model of gas hydrate growth conditioned by host sediment properties. **Journal of Geophysical Research**, v. 104, n. B10, p. 22.985-23.003, oct. 10, 1999.

COSTA, Cristiane de Souza. **Avaliação de fluxos de processamento para atenuação de múltiplas de superfície em dados sísmicos 2D**. 2011. 57 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Geofísica) - Faculdade de Geofísica, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Pará, Belém, 2011.

DICKENS, G. R. Sulfate profiles and barium fronts in sediment on the Blake Ridge: Present and past methane fluxes through a large gas hydrate reservoir. **Geochimica et Cosmochimica Acta**, v. 65, no. 4, p. 529-543, 2001.

DILLON, W. P.; PAULL, C. K.; BUFFLER, R. T.; FAIL, J-P. Structure and Development of the Southeast Georgia Embayment and Northern Blake Plateau: Preliminary Analysis. **The American Association of Petroleum Geologists**, p. 27-41, 1978.

Dix, C. H. **Seismic velocities from surface measurements**. *Geophysics*, v. 20, n. 1, p 68-86, 1955.

ECKER, Christine. **Velocity structure of the methane hydrate formation at the Blake Outer Ridge**. 2001. Disponível em:

<[http://sepwww.stanford.edu/public/docs/sep84/christin2/paper\\_html/index.html](http://sepwww.stanford.edu/public/docs/sep84/christin2/paper_html/index.html)>. Acessado em: 26 de novembro de 2017.

EGEBERG, Per K.; BARTH, Tanja. Contribution of dissolved organic species to the carbon and energy budgets of hydrate bearing deep sea sediments (Ocean Drilling Program Site 997 Blake Ridge). **Chemical Geology**, v. 149, p. 25-35, 1998.

EGEBERG, Per K.; DICKENS, Gerald R. Thermodynamic and pore water halogen constraints on gas hydrate distribution at ODP Site 997 (Blake Ridge). **Chemical Geology**, v. 153, p. 53-79, 1999.

ESTUARY to the Abyss: Exploring Along the Latitude 31-30 Transect. **NOAA**, United States, ago 20 - set 1, 2004. Disponível em:

<<http://oceanexplorer.noaa.gov/explorations/04etta/welcome.html>>. Acessado em: 5 nov. 2017.

FERREIRA, Daniel Galvão. **Processamento de dados sísmicos reais da Bacia do Amazonas utilizando as migrações de Kirchhoff pós e pré-empilhamento em tempo**. 2012. 74 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Geofísica) - Faculdade de Geofísica, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Pará, Belém, 2012.

FREIRE, Antonio Fernando Menezes. Controle estrutural-estratigráfico na distribuição de hidratos e gases livres do anticlinal Umitaka, Bacia Joetsu, margem leste do Mar do Japão. **Boletim de Geociências da Petrobras**, v. 21, n.1, p. 63-84, nov. 2012/maio 2013.

GANDARA, R.; LIGUORI, F. A.; CASAZZA, F.; RODEGHER, M. G.; MAISONNAVE, P. P.; BERMAN, C. Aproveitamento Energético do Hidrato de Metano. In: **AGRENER GD 2015, Congresso sobre Geração Distribuída e Energia no Meio Rural**, 10., 2015, São Paulo. Anais... São Paulo: USP, nov. 2015, 26 p.

GAS Hydrates Primer. **USGS**, United States, may 8, 2014. Disponível em: <<https://woodshole.er.usgs.gov/project-pages/hydrates/primer.html>>. Acessado em: 25 jul. 2017.

GOMES, Moab Praxedes. **Aquisição, processamento e análise de dados de sísmica de alta resolução na plataforma continental norte do Rio Grande do Norte: Vale inciso do Rio Açu**. 2009. 69 f. Dissertação (Mestrado em Ciências da Terra) - Centro de Ciências Exatas e da Terra, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Rio Grande do Norte, 2009.

GOMES, M. P.; VITAL, H.; MACEDO, J. W. P. Fluxo de processamento aplicado a dados de sísmica de alta resolução em ambiente de plataforma continental. Exemplo: Macau-RN. **Revista Brasileira de Geofísica**, v. 29(1), p. 173-186, 2011.

GUERIN, G.; GOLDBERG, D.; MELTNER, A. Characterization of in situ elastic properties of gas hydrate-bearing sediments on the Blake Ridge. **Journal of Geophysical Research**, v. 104, n. B8, p. 17.781-17.795, aug. 10, 1999.

HOLBROOK, W.S.; GORMAN, A.R.; HORNBACH, M.; HACKWITH, K.L., NEALON, J.; LIZARRALDE, D.; PECHER, I.A. Seismic detection of marine methane hydrate. **The Leading Edge**, United States, New Zealand, p. 686-689, jul. 2002.

KEAREY, P.; BROOKS, M.; HILL, I. **Geofísica de exploração**. São Paulo: Oficina de Textos, 2009.

LU, Shaoming; MCMECHAN, George A. Estimation of gas hydrate and free saturation, concentration, and distribution from seismic data. **Geophysics**, v. 67, p. 582-593, mar-apr. 2002.

MAX, M. D.; DILLON, W. P. Oceanic Methane Hydrate: The Character of the Blake Ridge Hydrate Stability Zone, and the Potential for Methane Extraction. **Journal of Petroleum Geology**, v. 21(3), p. 343-357, jul., 1998.

MILKOV, Alexei V.; SASSEN, Roger. Economic Geology of the Gulf of Mexico and the Blake Ridge Gas Hydrate Provinces. **Gulf Coast Association of Geological Societies Transactions**, v. LI, p. 219-228, 2001.

MURILLO, Alejandro E. DSU: Distributed Parallel Processing With Seismic Unix. **Society of Exploration Geophysicists**, p. 997-1000, 1996.

MURILLO, Alejandro E.; BELL, Jean. Distributed Seismic Unix: a tool for seismic data processing. **Concurrency: Practice and Experience**, v. 11(4), p. 169-187, 1999.

NETO, Valter Marques dos Santos. **Inversão de Velocidades Intervalares Usando Decomposição em Valores Singulares e Entropia Relativa Mínima**. 2009. 86 f. Trabalho (Graduação em Geofísica) - Departamento de Geologia e Geofísica Aplicada, Instituto de Geociências da Universidade Federal da Bahia, Salvador, 2009.

PAULL, C. K.; BUELOW, W. J. USSLER III, W.; BOROWSKI, W.S. Increased continental-margin slumping frequency during sea-level lowstands above gas hydrate-bearing sediments. **Geology**, v. 24, no. 2, p. 143-146, fev. 1996.

ROWE, M. M.; GETTRUST, J. F. Faulted structure of the bottom simulating reflector on the Blake Ridge, western North Atlantic. **Geology**, v. 21, p. 833-836, set. 1993.

SÁ, Antônio Jorge. **Aplicação do método de decomposição em modos empíricos no processamento de dados sísmicos marítimos**. 2013. 83 f. Dissertação (Mestrado) - Pós-Graduação em Geofísica, Instituto de Geociências da Universidade Federal da Bahia, Salvador, 2013.

SANTOS, L. A.; MANSUR, W. J.; MCMECHAN G. A. Tomography of diffraction-based focusing operators. **Geophysics**, v. 77, no. 5, p. R217-R225, set-out. 2012.

SHERIDAN, R. E.; CROSBY, J. T.; KENT, K. M.; DILLON, W. P.; PAULL, C. K. The Geology of the Blake Plateau and Bahamas Region. **Geology of the North Atlantic Borderlands: Canadian Society of Petroleum Geologists**, Memoir 7, p. 487-502, 1981.

SHERIFF, Robert E.; GELDART, Lloyd P. **Exploration Seismology**. 2ª ed. Estados Unidos: Cambridge University Press, 1995.

SILVA, Michelangelo G. **Processamento de dados sísmicos da bacia do Tacutu**. 2004. Dissertação (Mestrado em Geofísica) - Universidade Federal da Bahia, Bahia, 2004.

SOUZA, J. A. G; PORSANI, Milton; SOUZA, Wilker. Correção estática residual aplicada no processamento sísmico da linha 59-RL-44 da Bacia do Parnaíba. In: **Simpósio Brasileiro de Geofísica**, 7., 2016, Ouro Preto. Anais... Ouro Preto, 2016, 06 p.

SOUZA, Wilker Eduardo. **Processamento CMP de Dados Sísmicos Levantados no Norte da Bacia do São Francisco Utilizando o Software Seispace**. 2014. 64 p. Trabalho (Graduação em Geofísica) - Universidade Federal da Bahia, Salvador, 2014.

TAYLOR, M. H.; DILLON, W. P.; ANTON, C. H.; DANFORTH, W. Seismic-Reflection Surveys of the Blake Ridge, R/V Cape Hatteras 1992 and 1995: Data Acquisition, Navigation and Processing. **U.S. Geological Survey Open-File Report 99-372**, 1999. Disponível em: <<https://pubs.usgs.gov/of/1999/of99-372/>>. Acessado em: 10 jun. 2017.

TAYLOR, M. H.; DILLON, W. P.; PECHER I. A. Trapping and migration of methane associated with gas hydrate stability zone at the Blake Ridge Diapir: new insights from seismic data. **Marine Geology**, v. 164, p. 79-89, 2000.

TINIVELLA, Umberta; LODOLO, Emanuele. 28. The Blake Ridge bottom-simulating reflector transect: tomographic velocity field and theoretical model to estimate methane hydrate quantities. **Proceedings of the Ocean Drilling Program, Scientific Results**, Texas, v. 164, p. 273-281, 2000.

T&R ECO-ENERGY, **Gás Natural**, 2016. Disponível em: <<http://tereenergy.com.br/gas-natural/>>. Acessado em: 22 out. 2017.

WHERE are Gas Hydrates Found?. **Heriot-Watt University**, 2017. Disponível em: <[http://www.pet.hw.ac.uk/research/hydrate/hydrates\\_where.cfm](http://www.pet.hw.ac.uk/research/hydrate/hydrates_where.cfm)>. Acessado em: 07 jul. 2017.

WOOD, Warren T.; RUPPEL, Carolyn. 26. Seismic and thermal investigations of the Blake Ridge gas hydrate area: A synthesis. **Proceedings of the Ocean Drilling Program, Scientific Results**, Texas, v. 164, p. 253-264, 2000.

YILMAZ, Öz. **Seismic Data Analysis: Processing, Inversion, and Interpretation of Seismic Data**. Turkey: Society of Exploration Geophysicists, 2001.

YILMAZ, Öz. **Seismic Data Processing**. Turkey: Society of Exploration Geophysicists, 1987.