

UNIVERSIDADE FEDERAL FLUMINENSE  
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS  
DEPARTAMENTO DE GEOLOGIA E GEOFÍSICA

ANA CAROLINA FERREIRA DOMINGUEZ

INTERPRETAÇÃO DE DADOS SÍSMICOS MONOCANAL DO  
ANTICLINAL UMITAKA SPUR NA BACIA DE JOETSU – MAR  
DO JAPÃO

NITERÓI - RJ, BRASIL  
2018

ANA CAROLINA FERREIRA DOMINGUEZ

**INTERPRETAÇÃO DE DADOS SÍSMICOS MONOCANAL DO ANTICLINAL  
UMITAKA SPUR NA BACIA DE JOETSU – MAR DO JAPÃO**

Projeto Final II em Geofísica, apresentado à Universidade Federal Fluminense como exigência parcial para obtenção do título de Bacharel em Geofísica.

Orientador: Prof. Dr. Antonio Fernando Menezes Freire

Coorientador: Prof. Dr. Luiz Alberto Santos

NITERÓI – RJ, BRASIL  
2018

ANA CAROLINA FERREIRA DOMINGUEZ

**INTERPRETAÇÃO DE DADOS SÍMICOS MONOCANAL DO ANTICLINAL  
UMITAKA SPUR NA BACIA DE JOETSU – MAR DO JAPÃO**

Projeto Final II em Geofísica, apresentado à Universidade Federal Fluminense como exigência parcial para obtenção do título de Bacharel em Geofísica.

Orientador: Prof. Dr. Antonio Fernando Menezes Freire

Coorientador: Prof. Dr. Luiz Alberto Santos

**BANCA EXAMINADORA**

---

Prof. Dr. Antonio Fernando Menezes Freire – Universidade Federal Fluminense

---

Prof. Dr. Luiz Alberto Santos – Universidade Federal Fluminense

---

Prof. Dr. Cléverson Guizan Silva – Universidade Federal Fluminense

## AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer aos meus pais Cely Ferreira Dominguez e Roberto Blanco Dominguez pelos anos de dedicação, compreensão e amor, além do apoio incondicional para que eu consiga realizar e encerrar mais uma etapa da minha vida. Ao meu irmão e melhor amigo Rafael Ferreira Dominguez por sua maturidade invejável e pelas risadas nos momentos em que mais precisei. Ao meu *abuelito* Anselmo Perez por todo o carinho, e à minha *abuelita*, Teresa Perez (*in memoriam*), que foi e continua sendo meu exemplo de vida.

Gostaria de agradecer ao Matheus Signorelli por toda ajuda e companheirismo. Em especial, por ser minha calmaria nesse período. Aos melhores amigos que fiz durante essa graduação: Lys Rizzi, Lucas Bragança, Felipe Farias e Pedro Vianna. Obrigada por todos os momentos de alegria, e que venham muito mais! Agradeço também à Nathalia Azevedo e Ibsen Gomes por terem sido meus pilares nessa reta final.

Agradeço à Eloíse Policarpo e à Laisa Aguiar por serem as meninas superpoderosas que sempre me acalmam e me direcionam para o caminho certo. Agradeço também às novas (e não muito novas) amigadas por toda a ajuda: Carolina Ferreira, Thais Sales, Lorena Gonçalves, Evelyn Nascimento, Júlia Machado, Maria Luiza Paiva, Amanda Bourguignon, Ilson de Oliveira e Mariana Lebre. À Flávio Oliver e à Tone Rodrigues pelas aulas de Petrel e pelas diversas mensagens respondidas, sempre dispostos a oferecer ajuda, muito obrigada por tudo!

Agradeço a todos os professores da Universidade Federal Fluminense por contribuírem para o meu crescimento acadêmico. Agradeço, em especial, aos professores Cléverson Silva e Luiz Santos, que também me coorientou, por aceitarem fazer parte desta banca e, principalmente, ao meu orientador Fernando Freire, que foi peça fundamental na minha permanência na Geofísica, além de me ajudar a evoluir profissionalmente e pessoalmente. Não estou sozinha quando falo que o meu orientador é o professor que mais consegue incentivar os alunos da graduação e, por isso, receba toda a minha gratidão. Por fim, gostaria de agradecer à Agência Japonesa de Ciências Marinhas e da Terra (JAMSTEC) pelos dados sísmicos de reflexão 2D, e à Schlumberger pela disponibilização da licença acadêmica do Petrel, sem o qual não seria possível realizar este estudo.

*“Que todos os nossos esforços estejam sempre focados no desafio à impossibilidade. Todas as grandes conquistas humanas vieram daquilo que parecia impossível”*

*(Charles Chaplin)*

## RESUMO

O hidrato de gás é um importante objeto de estudo, devido ao seu grande potencial como fonte de energia alternativa e como mecanismo de ampliação de emissões de gases causadores do efeito estufa, uma vez que o metano é, junto com o CO<sub>2</sub>, o seu principal causador. Com a sua ampla distribuição geográfica, o hidrato de gás é considerado a maior fonte de carbono do planeta, sendo um dos principais recursos energéticos e estimulando estudos em vários países, como por exemplo os Estados Unidos, o Japão e o Brasil.

Este estudo tem como objetivo identificar o refletor simulador de fundo (*Bottom Simulating Reflector* – BSR) e feições submarinas geradas a partir da exsudação de gases e de afloramentos de hidratos de gás, utilizando seções obtidas através de uma aquisição sísmica 2D monocanal (SCS – *Single Channel Seismic*), realizada em 2007 e 2008 na Bacia de *Joetsu*, através do R/V *Natsushima*, pertencente à frota de navios da Agência Japonesa de Ciências e Tecnologias Marinhas e da Terra (JAMSTEC).

A seção sísmica estudada está localizada no anticlinal *Umitaka Spur*, na margem leste do mar do Japão. Nesta seção foram feitas análises de atributos sísmicos, através do *software Petrel*, para maximizar as anomalias de amplitudes, geradas pela presença de acumulações de hidratos de gás. E, assim, melhorar a sua identificação e a sua delimitação.

**Palavras-chave:** Hidratos de Gás, Mar do Japão, Refletores Simuladores de Fundo, Aquisição Sísmica Monocanal, Atributos Sísmicos.

## ABSTRACT

Gas hydrate is an important research field because of the great potential as an alternative energy source, and as reduction mechanism of gas emissions of the greenhouse effect, since methane is, together with CO<sub>2</sub>, the main trigger agent. With large geographic distribution, gas hydrates are considered the biggest carbon source in the planet being one of the main energy resources, stimulating studies in several countries, such as United States, Japan and Brazil.

The objective of this study is to identify the Bottom Simulating Reflector (BSR) and submarine features generated from gas seeps and gas hydrate outcrops. Seismic data were acquired through a single channel seismic 2D survey (SCS) occurred in 2007 and 2008 in Joetsu Basin using the R / V Natsushima (Japanese Agency of Marine Earth Science and Technology – JAMSTEC).

Seismic profile is located at the Umitaka Spur anticline, at the eastern margin of the Japan sea. In this section, seismic attributes analysis were made through the software Petrel, to maximize the amplitude anomalies generated by the accumulations of gas hydrates, and, consequently, improve their identification and delimitation.

**Keywords:** Gas Hydrate, Japan sea, Bottom Simulating Reflector, Single Channel Seismic, Seismic Attributes.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1: Mapa da área de estudo .....	11
Figura 2: Linha sísmica US-51 antes e após ser interpretada .....	13
Figura 3: Imagem de ecobatímetro de uma das plumas de gás presente na Bacia de Joetsu .....	15
Figura 4: Mapa batimétrico do Esporão Umitaka .....	16
Figura 5: Sistema petrolífero do <i>Umitaka Spur</i> .....	17
Figura 6: Formação de mounds e pockmarks. ....	18
Figura 7: Hidrato de Gás na parte central do Esporão Umitaka .....	19
Figura 8: Fontes e migração dos gases .....	20
Figura 9: Estruturas químicas dos hidratos de gás.....	21
Figura 10: Ocorrência de hidratos de gás pelo mundo .....	22
Figura 11: Zona de estabilidade do hidrato de gás.....	23
Figura 12: Blanking indicando o BSR .....	24
Figura 13: Aquisições sísmicas .....	28
Figura 14: (a) Trajetórias dos raios refletidos (b) Curva tempo-distância para raios refletidos .....	29
Figura 15: Esquema de uma aquisição de sísmica de reflexão monocanal.....	30
Figura 16: Representação espacial do sinal complexo.....	31
Figura 17: Categorização de atributos pelas suas propriedades .....	32
Figura 18: Traço sísmico e seu respectivo envelope.....	34
Figura 19: Diagrama de espaçamento (offset) da aquisição sísmica monocanal utilizada por R/V Natsushima da JAMSTEC.....	36
Figura 20: Fluxograma do Projeto Final em Geofísica II.....	37
Figura 21: Seção sísmica US-19 não interpretada .....	39
Figura 22: Seção sísmica US-19 interpretada .....	40
Figura 23: Seção US-19 e sua comparação com o uso do atributo Envelope .....	41
Figura 24: Seção sísmica com atributo sísmico Envelope aplicado .....	42
Figura 25: Seção sísmica US-19 com o atributo <i>Sweetness</i> .....	43
Figura 26: Seção sísmica US-19 com o atributo Amplitude RMS .....	44
Figura 27: Seção US-19 sem filtro e com junção dos atributos Amplitude RMS e <i>Sweetness</i> .....	45

Figura 28: Seção US-19, com aplicação dos atributos Amplitude RMS e <i>Sweetness</i> , interpretada.....	46
Figura 29: Parte leste da seção US-19 com demarcações do Trecho 1 e Trecho 2 .	47
Figura 30: Comparação de amplitudes sísmicas - Trecho 1.....	48
Figura 31: Comparação de amplitudes sísmicas - Trecho 2.....	50

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Planilha comparativa entre as amplitudes do fundo marinho e BSR no Trecho 1 .....	48
Tabela 2: Planilha comparativa entre as amplitudes do fundo marinho e BSR no Trecho 2.....	49

## Sumário

AGRADECIMENTOS .....	III
RESUMO .....	V
ABSTRACT.....	VI
LISTA DE ILUSTRAÇÕES .....	VII
<b>1 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>10</b>
1.1 OBJETIVO .....	10
1.2 ÁREA DE ESTUDO.....	11
1.2.1 LOCALIZAÇÃO .....	11
1.2.2 GEOLOGIA REGIONAL DO MAR DO JAPÃO.....	12
1.2.2.1 HIDRATO DE METANO NA BACIA DE JOETSU .....	14
<b>2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA .....</b>	<b>19</b>
2.1 HIDRATO DE GÁS .....	19
2.1.1 CLASSIFICAÇÃO DOS HIDRATOS.....	20
2.1.2 OCORRÊNCIA DOS HIDRATOS .....	21
2.1.3 DETECÇÃO GEOFÍSICA DE HIDRATOS DE GÁS .....	22
2.1.4 HIDRATO DE GÁS COMO FONTE POTENCIAL DE ENERGIA .....	24
2.1.4.1 EXPLORAÇÃO COMERCIAL E RISCOS .....	25
2.2 ESTUDOS SÍSMICOS EXPLORATÓRIOS .....	26
2.2.1 MÉTODO SÍSMICO DE REFLEXÃO.....	27
2.2.1.1 DADOS SÍSMICOS MONOCANAL .....	29
2.3 ATRIBUTOS SÍSMICOS.....	30
2.3.1 CLASSIFICAÇÃO DOS ATRIBUTOS SÍSMICOS .....	32
2.3.1.1 ENVELOPE / AMPLITUDE INSTANTÂNEA.....	33
2.3.1.2 AMPLITUDE RMS E SWEETNESS .....	34
<b>3 MÉTODOS .....</b>	<b>35</b>
3.1 AQUISIÇÃO SÍSMICA MONOCANAL .....	35
3.2 FLUXOGRAMA .....	36
3.2.1 IMPORTAÇÃO DE DADOS E ANÁLISE .....	37
3.2.2 IINTERPRETAÇÃO E IDENTIFICAÇÃO DE FEIÇÕES SÍSMICAS .....	38
<b>4 RESULTADOS E DISCUÇÕES .....</b>	<b>38</b>
4.1 APLICAÇÃO DE ATRIBUTOS .....	41
4.1.1 ENVELOPE .....	41
4.1.2 AMPLITUDE RMS E SWEETNESS .....	43
4.2 COMPARAÇÃO DAS AMPLITUDES .....	47
<b>5 CONCLUSÃO .....</b>	<b>51</b>
<b>6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>52</b>

## 1 INTRODUÇÃO

A Bacia de Joetsu, localizada no Mar do Japão, é alvo de muitos estudos e pesquisas devido à descoberta de ocorrências de hidratos de gás no anticlinal Joetsu (*Joetsu Knoll*) e no anticlinal Umitaka (*Umitaka Spur*), onde este projeto está focado. Estes hidratos de gás são recursos petrolíferos não-convencionais que vêm se tornando cada vez mais importantes, devido ao seu grande potencial energético e à abundância desses em relação às fontes convencionais.

A presença de hidratos de gás é frequentemente inferida devido à aparência em perfis sísmicos de um refletor forte, de amplitude negativa e subparalelo ao fundo do mar, conhecido como refletor simulador de fundo (*Bottom Simulating Reflector – BSR*). No anticlinal Umitaka é observado um forte BSR a cerca de 120 metros abaixo do fundo do mar, particularmente, associado a chaminés de gás, onde existem feições caóticas e refletores descontínuos.

Para se obter uma maior precisão na interpretação, foram escolhidos três atributos sísmicos, afim de tornar mais visíveis as anomalias de amplitudes. São eles: Envelope, Amplitude RMS e *Sweetness*. A aplicação destes atributos possibilitou mapear indicadores sísmicos que sugerem a presença de hidratos de gás, à exemplo do BSR, chaminés de gás (*Gas Chimneys*), montes submarinos (*mounds*) e depressões (*pockmarks*).

### 1.1 OBJETIVO

O objetivo deste trabalho foi a interpretação de seções obtidas através de uma aquisição sísmica 2D monocanal (SCS – *Single Channel Seismic*), realizada em 2007 e 2008 na Bacia de Joetsu, através do R/V Natsushima (Agência Japonesa de Ciências Marinhas e da Terra - JAMSTEC).

Há diversas maneiras de se identificar hidratos de gás. A mais eficaz para a detecção em larga escala é a extração de atributos sísmicos que surgem como potencial elemento auxiliar na interpretação das ocorrências (Barros, 2009). Como legado, as informações obtidas possibilitaram o mapeamento do BSR, presentes nas demais seções sísmicas adquiridas na área de estudo, além de estimar a distribuição das acumulações de hidratos no anticlinal *Umitaka Spur*.

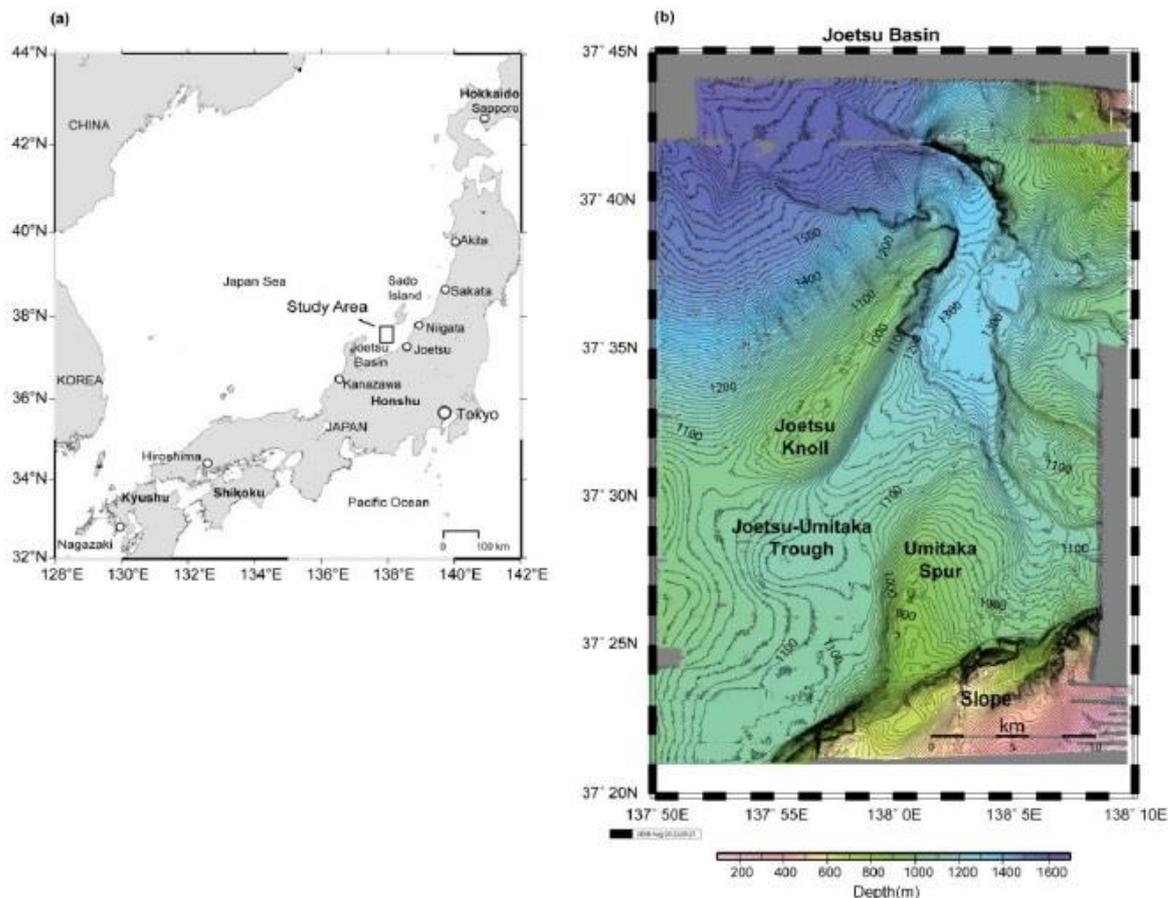
## 1.2 ÁREA DE ESTUDO

### 1.2.1 LOCALIZAÇÃO

A Bacia de Joetsu é localizada na parte sudoeste da Ilha Sado e foi formada durante o Mioceno (Suzuki, 1979; Okui *et al.*,2008; *apud* Freire, 2010). O Esporão Umitaka (*Umitaka Spur*) é um anticlinal assimétrico que vem sendo formado desde o Plioceno Médio, quando se iniciou a inversão tectônica. A estrutura possui um alinhamento regional NE-SW e localiza-se a cerca de 30 km a oeste da costa da cidade de Joetsu (Freire, 2013).

O *Umitaka Spur* possui uma área de 43 km<sup>2</sup> com uma inclinação suave no lado leste e um declive íngreme na parte oeste (Figura 1). A crista do anticlinal está em uma cota batimétrica de 900 m, estando a base da elevação por volta de 1.100 m. Na porção sul, o Esporão Umitaka está conectado ao talude continental, sendo um fator importante para o aporte de sedimentos terrígenos através de fluxos de detritos.

**Figura 1:** (a) Mapa da área de estudo (b) Mapa do relevo do fundo do mar da bacia de Joetsu, mostrando os dois anticlinais Joetsu Knoll e Umitaka Spur, onde há a ocorrência de hidratos de gás.



Fonte: Freire, 2010

### 1.2.2 GEOLOGIA REGIONAL DO MAR DO JAPÃO

O mar do Japão é uma típica bacia de retro-arco (*back-arc*) formada atrás do arquipélago Japonês, através do rifteamento na margem oeste da Euroásia há aproximadamente 25 Ma (Tamaki e Isezaki, 1996; Freire, 2010). A abertura foi completada antes de 15 Ma com a formação da crosta oceânica na região denominada Bacia do Japão (Jolivet *et al.*, 1994 *apud* Freire, 2013).

A Bacia de Joetsu é um sistema de rifte ao longo da margem leste do Mar do Japão e foi formada durante o Mioceno (Suzuki, 1979; Okui *et al.*, 2008, *apud* Freire, 2010). Rochas geradoras se formaram nesse período devido à alta produtividade de matéria orgânica sob condições anóxicas, nas formações *Nanatani* (<12,5 Ma) e *Teradomari* (12,5~5,5 Ma). Durante o Mioceno Médio, após o estágio de rifteamento inicial, a bacia foi preenchida principalmente por folhelho silicoso (Muramoto *et al.*, 2007; Okui *et al.*, 2008, *apud* Nakajima *et al.*, 2014).

Entre 10 Ma e 3,5 Ma houve um intenso aporte de sedimentos grossos para a Bacia de Joetsu, tendo sido formados depósitos turbidíticos com boas condições para reservatórios nas formações *Teradomari* e *Shiyya* (5,5~3,5 Ma) (Okui *et al.*, 2008 *apud* Freire 2013).

A Formação *Nishiyama* (3.5 Ma ~ 1.3 Ma) sobrepõe a Formação *Shiyya* e é composta principalmente de lamitos (*mudstones*) com arenitos, além de rochas vulcânicas como dacitos e andesitos (Freire, 2010). O topo da formação *Nishiyama* é caracterizado por um sistema de falhas normais em estilo dominó, composto por *horsts* e *grabens* (Freire, Matsumoto e Santos, 2011). Falhas normais e inversas são observadas, refletindo o complexo campo de tração envolvido (Seno, 1999, *apud* Freire, Matsumoto e Santos, 2011). Algumas dessas falhas pertencem ao tempo do rifteamento, tendo sido reativadas durante o processo de inversão tectônica no Plioceno Médio (Jolivet *et al.*, 1994; Taira, 2001, *apud* Freire, Matsumoto e Santos, 2011).

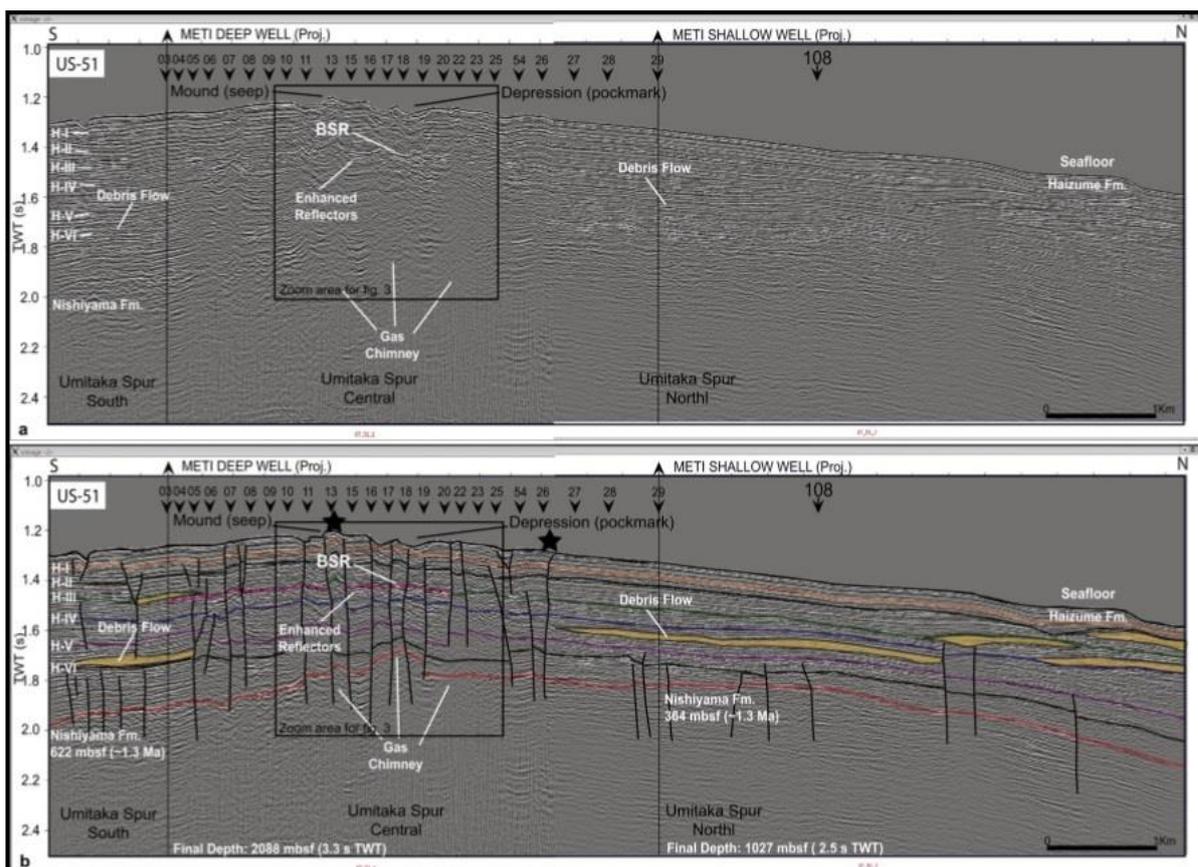
As formações *Nishiyama* (3,5 Ma ~ 1,3 Ma) e *Haizume* (1.3 Ma) sobrepõe a Formação *Shiyya* (5.5 ~ 3.5 Ma) (Muramoto *et al.*, 2007; Okui *et al.*, 2008, *apud* Nakajima *et al.*, 2014). Desde o Pleistoceno Tardio a Formação *Haizume* (1.3 Ma) tem sido depositada e com predomínio de sedimentos argilosos (Son *et al.*, 2001, *apud* Freire, 2010).

Durante o Plioceno Médio, o estilo tectônico mudou de extensional para compressional (Tamaki, 1988, *apud* Freire, Matsumoto e Santos, 2011),

acompanhado de uma inversão da bacia (Okamura *et al.*, 1995, *apud* Nakajima *et al.*, 2013). Dessa forma, uma série de estruturas anticlinais e sinclinais com alinhamento NNE-SSW, foram formadas ao longo da margem leste do Mar do Japão (Okui *et al.*, 2008, *apud* Freire, 2010), onde é observada uma zona de subducção incipiente (Takeuchi, 1996, *apud* Freire, Sugai e Matsumoto, 2010). Conseqüentemente, potenciais trapas de hidrocarbonetos foram formadas durante esse período e a subsidência contínua gerou áreas com soterramentos suficientes para aumentar a temperatura, favorecendo a maturação das rochas geradoras (Okui *et al.*, 2008, *apud* Freire, 2010).

Neste projeto, a interpretação de refletores sísmicos, consiste na identificação de: falhas e fraturas, refletores, e feições relacionadas à ocorrência de hidratos e gás livre. A Figura 2 mostra a seção sísmica semilongitudinal (*quase-strike*) US-51 interpretada por Freire em 2010, onde os números no topo representam o cruzamento com linhas transversais à estrutura (*dip*).

**Figura 2:** Linha sísmica US-51 antes e após ser interpretada com o posicionamento dos poços Meti-D e Meti-S.



Fonte: Freire, 2010

O topo da formação Nishiyama, caracterizado por um forte refletor, é cortado por várias falhas normais e reversas de alto ângulo, sugerindo o reaproveitamento das primeiras durante a inversão tectônica (Freire, 2013). A formação Haizume foi subdividida através da análise de seis refletores sísmicos pleistocênicos, contínuos e correlacionáveis, representados na Figura 2 como: H-I, H-II, H-III, H-IV, H-V, H-VI.

É válido mencionar que houve um exagero de 20 vezes para este levantamento sísmico monocanal, fazendo com que as estruturas geológicas apareçam mais verticalizadas, e falhas aparentem um grau muito maior de inclinação do que são na realidade.

Os limites das Chaminés de gás são cortados por falhas profundas que interligam o topo da Formação Nishiyama ao assoalho oceânico, passando através dos refletores pleistocênicos da Formação Haizume. Isto sugere intensa atividade tectônica, pelo menos durante todo o Holoceno. Em alguns casos é possível identificar estruturas *pull-up* dentro de chaminés de gás, interpretadas como resultado da propagação das ondas sísmicas através de zonas com hidratos (Freire, 2013).

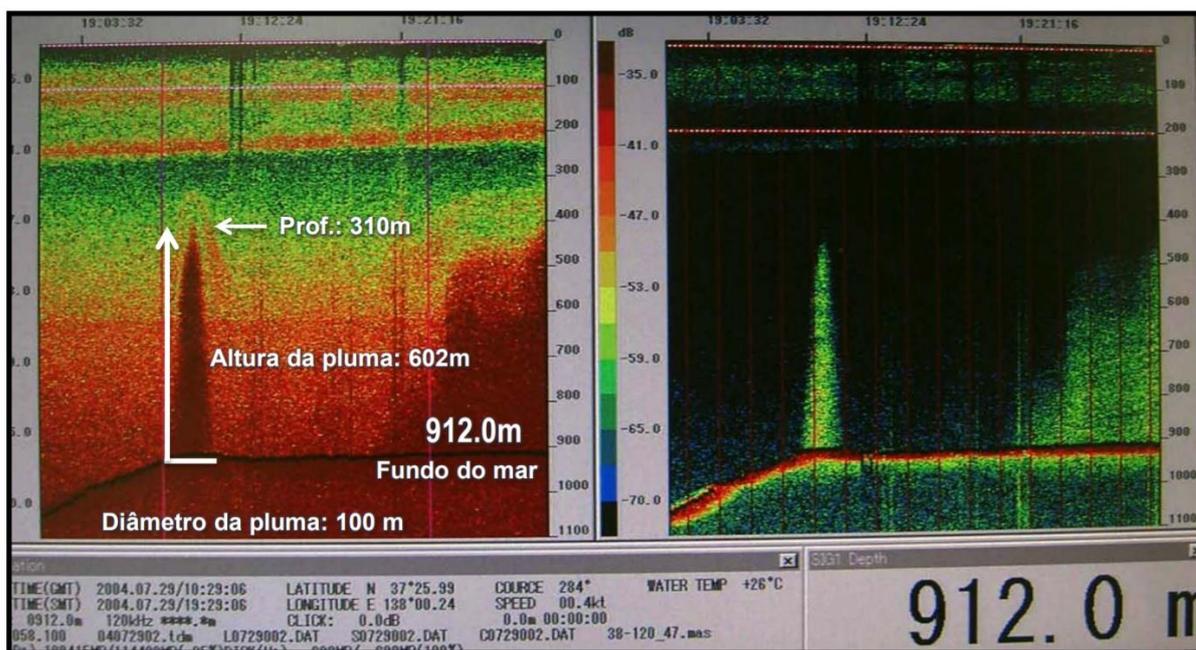
Esse fenômeno é observado também na base da zona de estabilidade de hidratos, onde sua concentração é maior. O BSR marca o limite entre uma fase com hidratos sólidos acima e outra fase abaixo composta por gás livre (Hyndman e Daveis, 1992 *apud* Freire, 2013), e por isso gera uma forte inversão de polaridade, sugerindo que as ondas sísmicas transitaram de um meio mais denso (hidratos) para um meio menos denso (gás livre).

Zonas caóticas com fluxo de detritos também são observadas acima e abaixo do BSR, o que pode se tornar um potencial reservatório de hidrato ou gás natural, dependendo de condições permoporosas.

#### **1.2.2.1 HIDRATO DE METANO NA BACIA DE JOETSU**

Em alguns dos anticlinais gerados, como *Joetsu Knoll* e *Umitaka Spur*, um sistema de falhamentos de plano axial NNE-SSW é observado, sendo analisado um intenso escape de gases, formando plumas na coluna d'água. Os gases que chegam ao fundo do mar (*gas seeps*) induzem à formação de plumas gigantes de metano (Figura 3), algumas com centenas de metros de altura e dezenas de metros de diâmetro (Matsumoto *et al.*, 2009 *apud* Freire, 2013). Entretanto, parte desses gases permanece aprisionada na zona de estabilidade de hidratos de gás (GHSZ), formando hidratos de metano.

**Figura 3:** Imagem de ecobatímetro de uma das plumas de gás presente na Bacia de Joetsu.

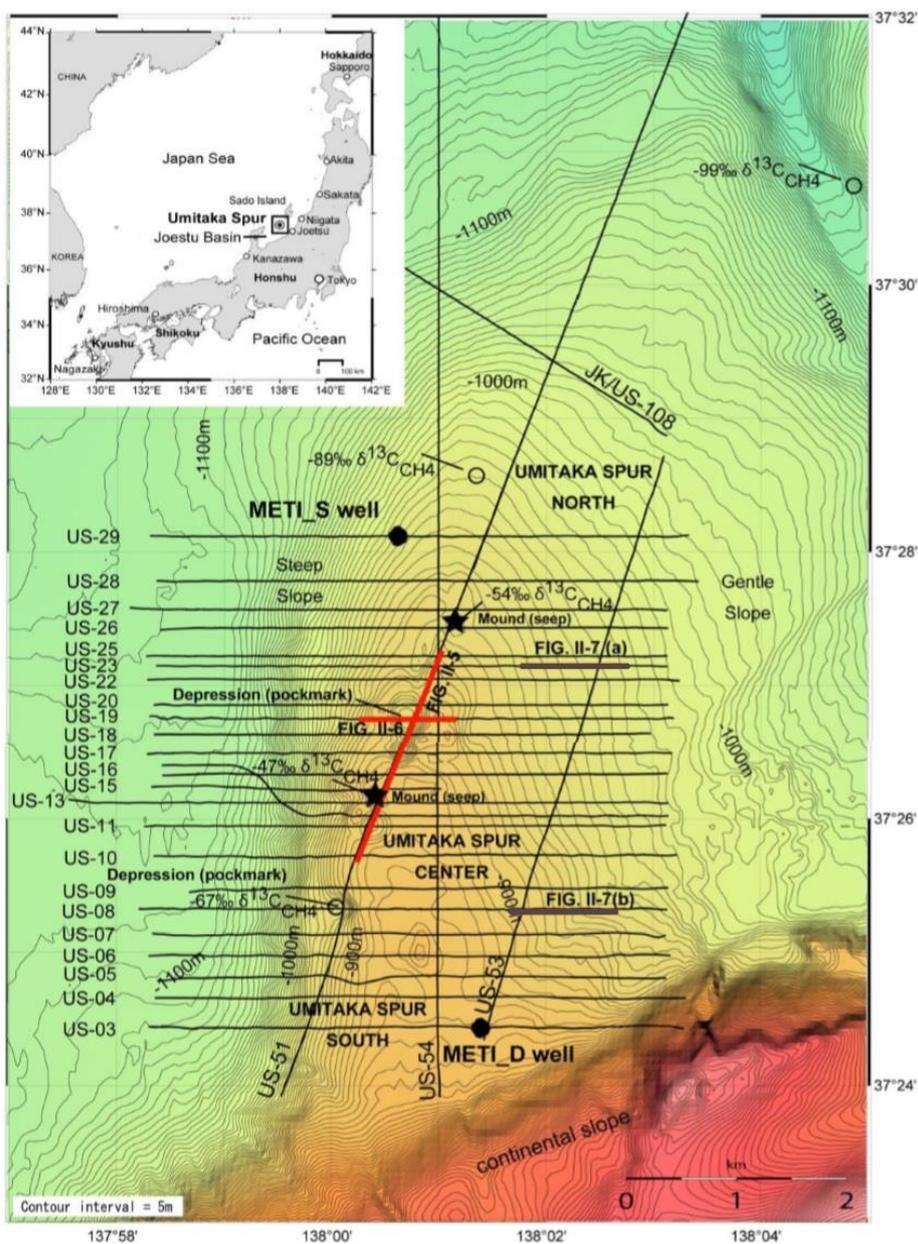


Fonte: Matsumoto, 2009

Os BSRs são amplamente desenvolvidos em cerca de 120 metros abaixo do fundo do mar (mbsf – *meters below seafloor*), particularmente, dentro das chaminés de gás, onde existem feições caóticas e os refletores se apresentam de forma descontínua (Freire, 2010).

Um levantamento sísmico 3-D foi realizado pelo Ministério da Economia, Comércio e Indústria (METI) em 2003 (Saeki *et al.*, 2009, *apud* Freire, 2010), cuja interpretação resultou na perfuração de dois poços exploratórios (*METI Deep* e *METI Shallow*), ambos localizados no Esporão Umitaka (*Umitaka Spur*) (Figura 4) em 2004, com o propósito de testar a existência de um sistema petrolífero no local (Okuiet *al.*, 2008, *apud* Freire, 2010).

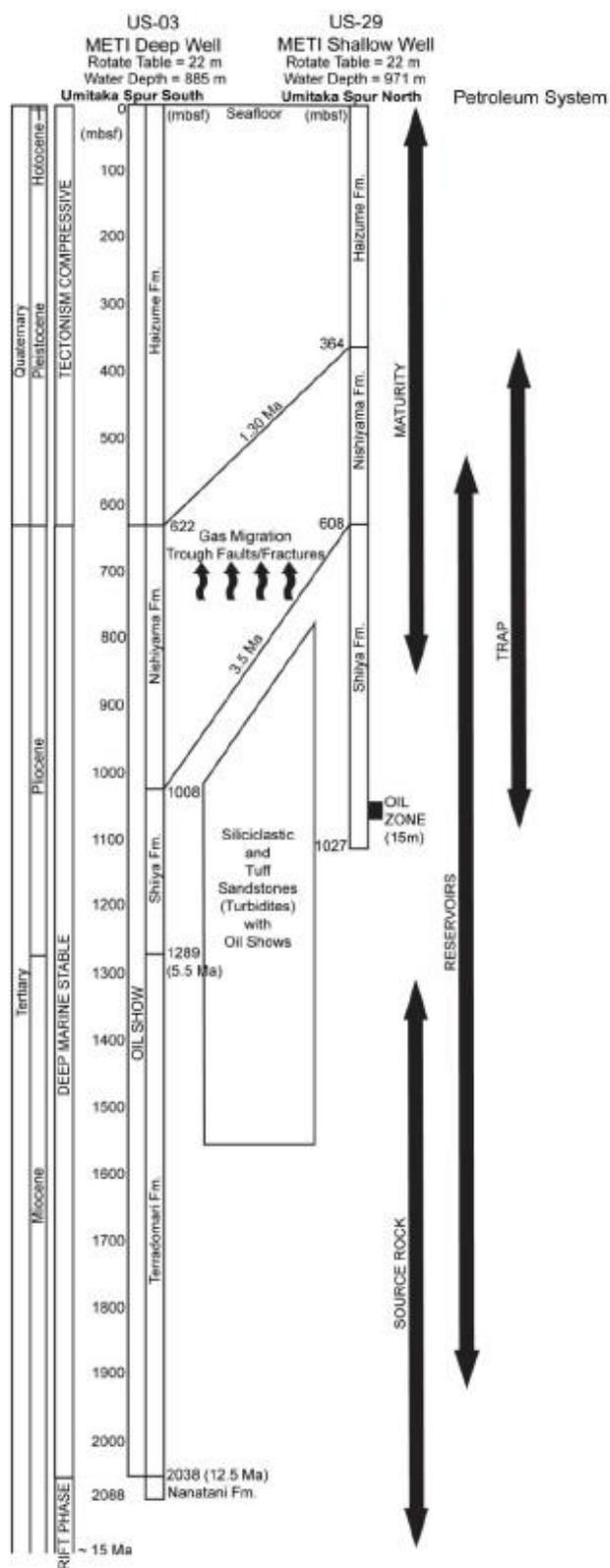
**Figura 4:** Mapa batimétrico do Esporão Umitaka mostrando as linhas de levantamento sísmico e os poços Metis-S e Metis-D.



Fonte: Freire, 2010

Esses dois poços e o levantamento sísmico monocanal investigaram a seção sedimentar profunda, revelando um sistema petrolífero ativo (Figura 5).

**Figura 5:** Sistema petrolífero do Umitaka Spur, baseado nos dois poços METI (Deep e Shallow) perfurados em 2004 (diagrama baseado em Okui et al., 2008).

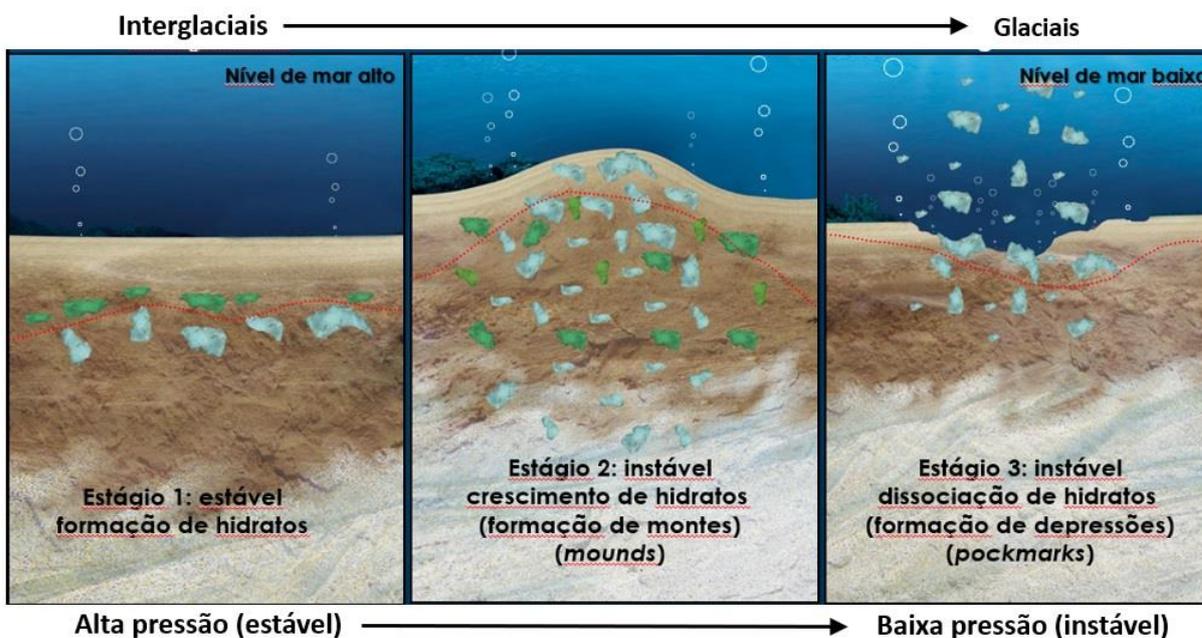


Fonte: Freire, 2010

Esse sistema contém acumulações subcomerciais em arenitos localizados entre o intervalo 1000/1300 metros abaixo do fundo do mar (mbsf), além de rocha geradora, datada como do Mioceno Médio, com profundidade abaixo de 1360 mbsf (Okuiet *al.*, 2008, *apud* Freire, 2010). A geração do óleo ocorreu no Mioceno e uma coluna de óleo de 15m foi confirmada em arenitos tufáceos, localizados na parte inferior da Formação de *Shiia* (5,5 Ma ~ 3,5 Ma) no poço *METI Shallow* (Okuiet *al.*, 2008, *apud* Freire, 2010).

O mapa batimétrico (Figura 4), além de mostrar os poços *METI Deep* e *METI Shallow*, indica a localização de exsudações e plumas gigantes, sugerindo a presença de migrações gasosas a partir de reservatórios profundos, particularmente a associadas a zonas de falhas. Esse processo pode atrair organismos bentônicos no fundo do mar que, por sua vez, atraem organismos pelágicos, dando assim, a possibilidade de surgimento de uma cadeia alimentar marinha. As estrelas presentes no mapa batimétrico mostram os *mounds* e *pockmarks* alinhados NE-SW, formados devido às dissociações de hidrato em períodos de mar baixo, liberando imensas quantidades de metano para a atmosfera (Figura 6).

**Figura 6:** Formação de mounds e pockmarks.



Fonte: Freire, 2013

## 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

### 2.1 HIDRATO DE GÁS

Hidratos de gás natural são sólidos cristalinos inflamáveis, formados por moléculas de água, arranjadas em uma estrutura capaz de aprisionar moléculas de gases. Por essa razão os hidratos também são conhecidos como claratos, podendo conter hidrocarbonetos ( $\text{CH}_4$ ,  $\text{C}_2\text{H}_6$ ) ou outros gases ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{S}$ ,  $\text{H}_2$ ,  $\text{N}_2$ ). O gás metano ( $\text{CH}_4$ ), por sua vez, é o mais encontrado, e por isso, também são chamados de hidratos de metano.

Para se cristalizar e se preservar, o hidrato depende de condições de alta pressão e baixa temperatura, tendo aparência semelhante à neve compactada (Figura 7).

**Figura 7:** Hidrato de Gás na parte central do Esporão Umitaka. Foto retirada pelo ROV Hyper Dolphin da JAMSTEC.



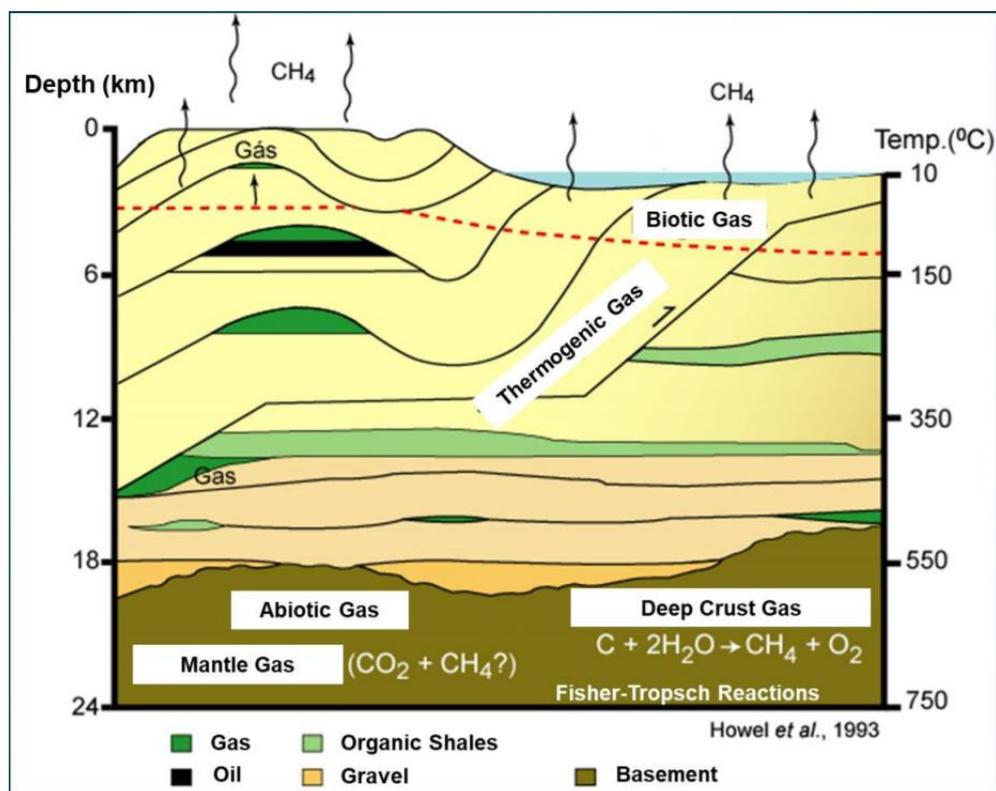
Fonte: Freire, 2010

Estudos indicam que a maior parte das ocorrências de hidratos de metano existam em sedimentos marinhos nas margens continentais, a profundidades de até aproximadamente 1.000 m dentro da coluna sedimentar, em regiões com lâminas d'água de 300 a 500 m.

### 2.1.1 CLASSIFICAÇÃO DOS HIDRATOS

Os hidratos podem ser de origem termogênica, microbial ou abiótica. Será de origem termogênica quando o gás em questão foi proveniente de uma transformação térmica da matéria orgânica que se gaseificou devido a altas profundidades e temperaturas. A origem microbial é comumente observada a menores profundidades e ocorre devido a processos biológicos, como por exemplo, ações de bactérias metanogênicas. Já o gás de origem abiótica provém de reações químicas ocorridas no manto (Figura 8).

**Figura 8:** Fontes e migração dos gases. Linha vermelha tracejada indicando o limite de profundidade entre o gás de origem microbial (*biotic gas*) e o gás de origem termogênica (*thermogenic gas*).



Fonte: Howel et al., 1993

Os hidratos também são divididos de acordo com a quantidade de componentes gasosos, podendo classificá-los como:

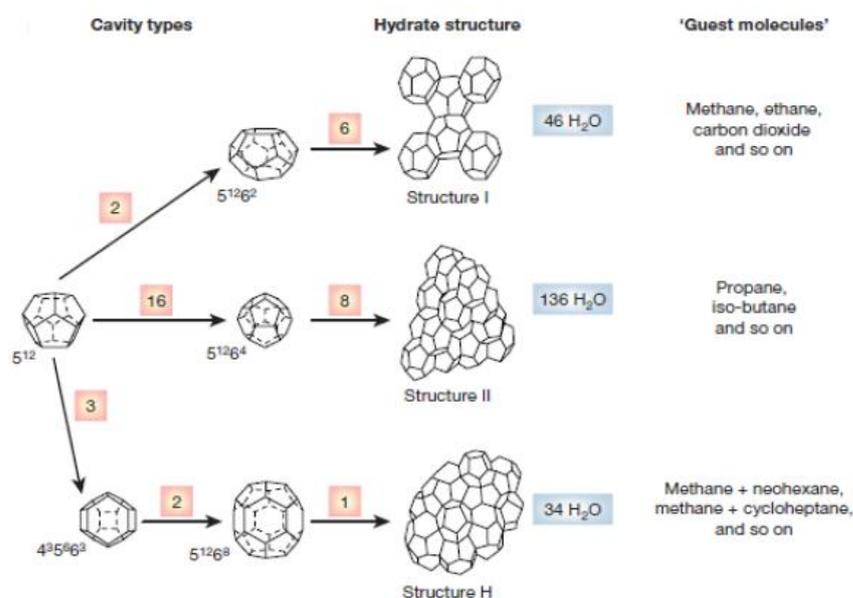
**Misto:** Quando há mais de um componente gasoso na mesma cavidade.

**Duplos:** Quando há mais de um componente gasoso, porém, em cavidades diferentes.

**Simples:** Quando há apenas um tipo de gás.

A classificação das estruturas químicas dos hidratos de gás depende do tamanho da molécula do gás e da quantidade de água aprisionada, podendo ser divididas em I, II e H. O tipo H é instável e não costuma ocorrer na natureza, existente em hidratos artificiais duplos ou mistos. Já os tipos I e II são estáveis e geralmente encontrados em hidratos de gás natural simples ou duplos (Figura 9).

**Figura 9:** Representação gráfica dos três tipos de estruturas químicas dos hidratos de gás.



Hydrate crystal structure	I		II		H		
	Small	Large	Small	Large	Small	Medium	Large
Cavity	5 <sup>12</sup>	5 <sup>12</sup> 6 <sup>2</sup>	5 <sup>12</sup>	5 <sup>12</sup> 6 <sup>4</sup>	5 <sup>12</sup>	4 <sup>3</sup> 5 <sup>6</sup> 6 <sup>3</sup>	5 <sup>12</sup> 6 <sup>8</sup>
Description	5 <sup>12</sup>	5 <sup>12</sup> 6 <sup>2</sup>	5 <sup>12</sup>	5 <sup>12</sup> 6 <sup>4</sup>	5 <sup>12</sup>	4 <sup>3</sup> 5 <sup>6</sup> 6 <sup>3</sup>	5 <sup>12</sup> 6 <sup>8</sup>
Number of cavities per unit cell	2	6	16	8	3	2	1
Average cavity radius (Å)	3.95	4.33	3.91	4.73	3.91 <sup>†</sup>	4.06 <sup>†</sup>	5.71 <sup>†</sup>
Coordination number*	20	24	20	28	20	20	36
Number of waters per unit cell	46		136		34		

\*Number of oxygens at the periphery of each cavity.

<sup>†</sup>Estimates of structure H cavities from geometric models.

Fonte: Sloan, 2003, apud Freire, 2010

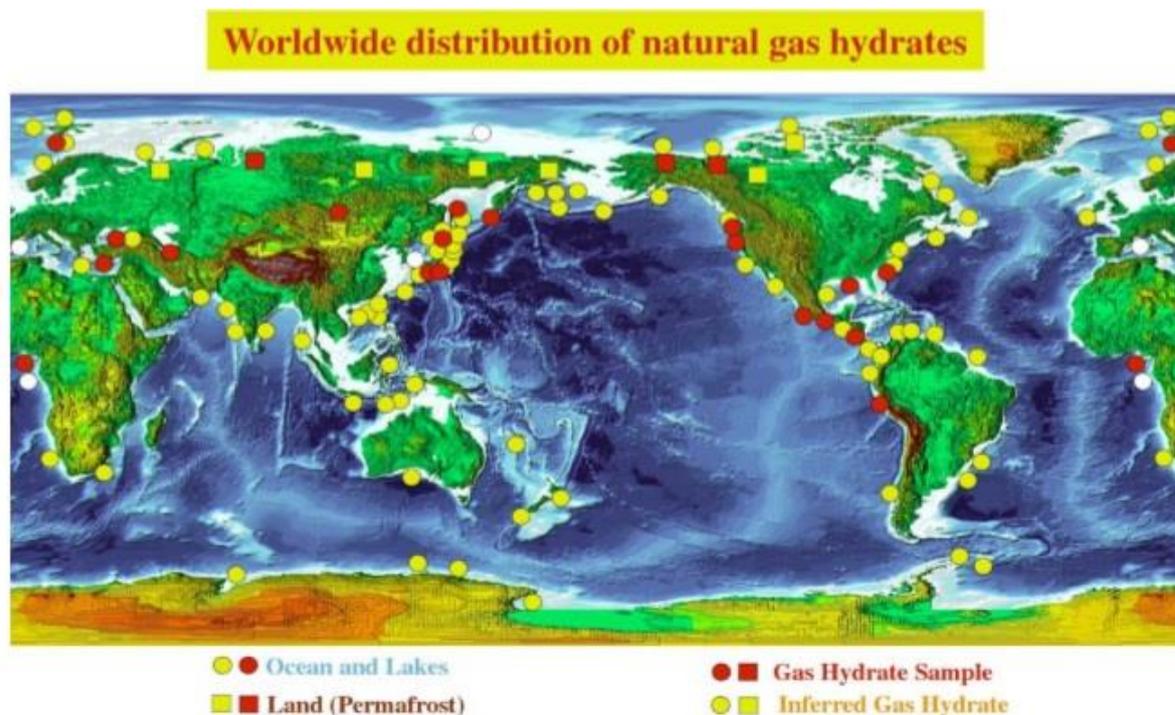
## 2.1.2 OCORRÊNCIA DOS HIDRATOS

Acredita-se que hidratos de estrutura H ocorram de forma natural no Golfo do México, devido a suprimentos de hidrocarbonetos termogenicamente produzidos na região, e também no Cânion de Barkley no mar canadense (Riedel, Willoughby e Chopra, 2010).

Como já foi citado, os hidratos de gás ocorrem em sedimentos marinhos e em

regiões polares abaixo do permafrost, pois são regiões onde as condições de pressão-temperatura estão dentro da Zona de Estabilidade dos Hidratos de gás (GHSZ) (Figura 10). Podem ser interpretados, sismicamente, através da localização do BSR (*Bottom Simulating Reflector*), e através de dados geológicos e geoquímicos.

**Figura 10:** Ocorrência de hidratos de gás em sedimentos submarinos e *Permafrost* pelo mundo.



Fonte: Freire, 2010

Estudos sobre a presença de hidratos não se limitam só ao planeta Terra, Kieffer *et al.* (2006) sugerem que a atividade de gêiser no pólo sul da lua Encélado, que orbita Saturno, se origina da decomposição de hidratos, nos quais dióxido de carbono, metano e nitrogênio são liberados quando expostos ao vácuo espacial pelas fraturas das "Listras de Tigre" daquela área.

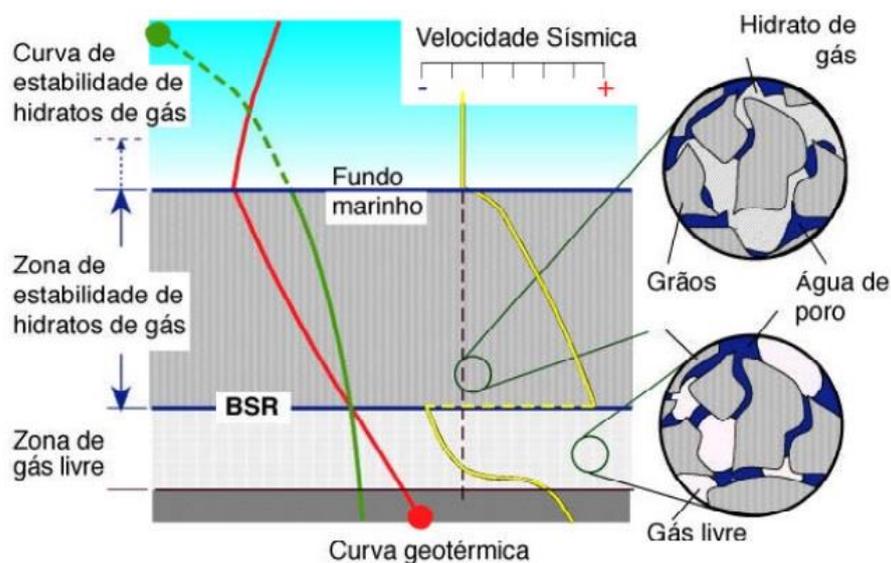
### 2.1.3 DETECÇÃO GEOFÍSICA DE HIDRATOS DE GÁS

A presença de hidratos de gás é freqüentemente inferida devido à aparência em perfis sísmicos de um refletor forte, de amplitude negativa e sub-paralelo ao fundo mar (Shiple et al., 1979). Dois padrões de reflexão, em geral associados, permitem a determinação das ocorrências de hidratos de gás: o BSR (*Bottom Simulating Reflection*) e o *Blanking* ("clareamento" ou "branqueamento") (Ferreira, Guizan e Reis,

2008).

Para se reconhecer o BSR, é necessário saber que a Zona de Estabilidade de Hidratos de Gás (GHSZ) está limitada pela interseção da curva de estabilidade do clatrato com a curva de temperatura dentro dos sedimentos marinhos (Figura 11). A GHSZ surge em regiões rasas com aproximadamente 300m a 600m abaixo do assoalho marinho.

**Figura 11:** Zona de estabilidade do hidrato de gás.



Fonte: Michael B. Clennell, 2001

A espessura da Zona de Estabilidade de Hidratos de Gás na margem continental é controlada por condições de pressão e temperatura que existem dentro dos sedimentos. Com uma lâmina de água mais profunda, a temperatura de dissociação dos hidratos fica mais alta, e a espessura da camada de sedimentos, que pode suportar a ocorrência de hidratos, fica mais extensa (Michael B. Clennell, 2000).

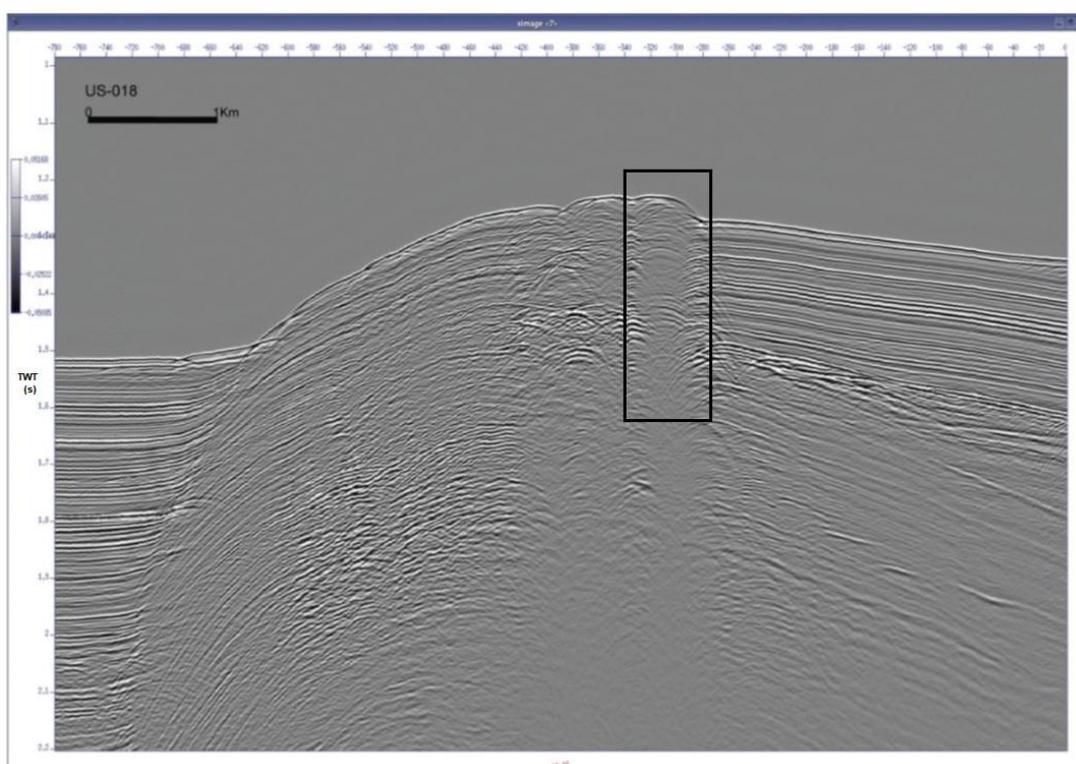
O BSR marca a base de uma região onde existe estabilidade entre pressão e temperatura, as quais são controladas pela profundidade dentro da coluna sedimentar (pressão litostática e gradiente geotérmico). Por esta razão o BSR é, geralmente, paralelo ao fundo do mar. Em regiões onde os estratos são inclinados, o BSR corta esses refletores e é de fácil reconhecimento (Freire, 2012).

Na Bacia de Joetsu a interpretação e o mapeamento do BSR possuem um certo grau de dificuldade, pois as camadas sedimentares também são paralelas ao fundo

do mar, assim o BSR raramente cruza estratos. Como o hidrato possui uma grande densidade, é possível observar uma alta velocidade sísmica. Logo abaixo, normalmente com uma zona de gás livre liberada pela ascensão de gases profundos, pode ser observado uma baixa velocidade sísmica.

O *Blanking*, por sua vez, é um intervalo onde ocorre grande atenuação da amplitude do sinal, devido à alta velocidade sísmica, o que imprime um aspecto “blindado” na região onde ocorre, não sendo possível visualizar qualquer sinal correspondente à estratigrafia encontrada no local (Ferreira, Guizan e Reis, 2008). A Figura 12 mostra uma possível chaminé de gás com o *blanking* ocultando refletores fracos.

**Figura 12:** *Blanking* indicando chaminé de gás.



Fonte: Freire, 2010

#### 2.1.4 HIDRATO DE GÁS COMO FONTE POTENCIAL DE ENERGIA

Como o gás natural queima de forma limpa, provoca menos poluição e produz menos dióxido de carbono, comparado à queima de óleo ou carvão. Por isso, motores podem ser convertidos de gasolina ou diesel para gás natural, reduzindo impactos ambientais.

Os hidratos são considerados uma fonte potencial de energia, com volumes extraordinários, uma vez que cerca de 1 m<sup>3</sup> de hidrato pode liberar 164m<sup>3</sup> de gás, nas condições normais de temperatura e pressão (Kastner, 2001). Estima-se que o volume de metano presente nos hidratos seja 3000 vezes maior do que a quantidade presente na atmosfera. Estudos realizados pelo *United States Geological Survey* – USGS efetuaram uma estimativa dos depósitos de hidrato em nível mundial, indicando ser o dobro da energia de hidrocarbonetos fósseis do globo terrestre.

#### **2.1.4.1 EXPLORAÇÃO COMERCIAL E RISCOS**

Todos os processos de extração se baseiam no deslocamento do equilíbrio termodinâmico no sistema e podem ser divididos em três fases: Despressurização, Estimulação térmica e Injeção de inibidores. Acredita-se que o método de despressurização apresenta melhores resultados em reservatórios cuja temperatura inicial está distante dos 0°C e também para maiores valores de permeabilidade (Zocoli, Padovan e Loss, 2015).

A injeção de fluidos quentes, com substâncias que promovam a dissociação dos hidratos, como o etanol, aquecem o reservatório e são aplicáveis em conjunto à despressurização, porém encarece todo o processo produtivo, necessitando uma profunda análise de viabilidade econômica (Freire, 2012).

Um fator a favor da exploração comercial do composto é que os gases confinados sob forma de hidratos são naturalmente separados da água no processo de ascensão; dessa maneira não haveria a necessidade de processamento do gás, apenas de sua estocagem e transporte. Dentre todos os aspectos positivos, merece destaque o fato de que o metano possui 80% do poder energético do petróleo, o que é muito elevado quando comparado à outras fontes alternativas de energia.

Um dos maiores problemas é efeito estufa potencializado, pois, o metano é considerado 20 vezes mais danoso do que o dióxido de carbono. Cuidado redobrado deve ser tomado para garantir que, quando da extração comercial, metano extra não seja liberado para a atmosfera, seja por conta de falhas na estrutura de transporte ou na estrutura de coleta. Além de chegar à atmosfera, um desprendimento de metano na água do mar poderia ocasionar alterações de pH e solubilidade do dióxido de carbono na água. Esse metano extra contribui para agravar o efeito estufa, o que gera um ciclo de aumento de temperaturas e maior liberação de metano. Isso poderia levar

a mudanças climáticas e extinções em massa.

## **2.2 ESTUDOS SÍSMICOS EXPLORATÓRIOS**

Há uma divisão geral dos métodos de levantamentos geofísicos em dois tipos: os que fazem uso dos campos naturais da Terra (gravitacional, magnético, elétrico e eletromagnético) e aqueles que envolvem a aplicação na superfície de energia gerada artificialmente, onde envolvem a geração de ondas sísmicas, cuja velocidade de propagação e caminhos de transmissão através da subsuperfície são mapeados para fornecer informações sobre a distribuição dos limites geológicos em profundidade (Kearey, Brooks e Hill, 2009).

O contato entre diferentes tipos de corpos geológicos com diferentes velocidades de transmissão de ondas sísmicas, definem superfícies de separação em que as ondas sofrem refração, reflexão e difração. O objetivo da sísmica de exploração é inferir informações sobre as propriedades físicas das rochas e sobre os comportamentos das camadas através da observação da amplitude, frequência, fase, forma e tempos de chegada das ondas sísmicas (Telford, Geldart e Sheriff, 2004).

A exploração sísmica consiste em três etapas principais: aquisição, processamento e interpretação de dados. No processamento sísmico, as três principais etapas - deconvolução, empilhamento e migração - constituem a base do fluxograma de rotina. Processos auxiliares podem melhorar a eficácia desses principais processos, como a filtragem, direção do feixe e correções de estática residual (Yilmaz, 2001 *apud* Policarpo Neves, 2017).

### **2.2.1 MÉTODO SÍSMICO DE REFLEXÃO**

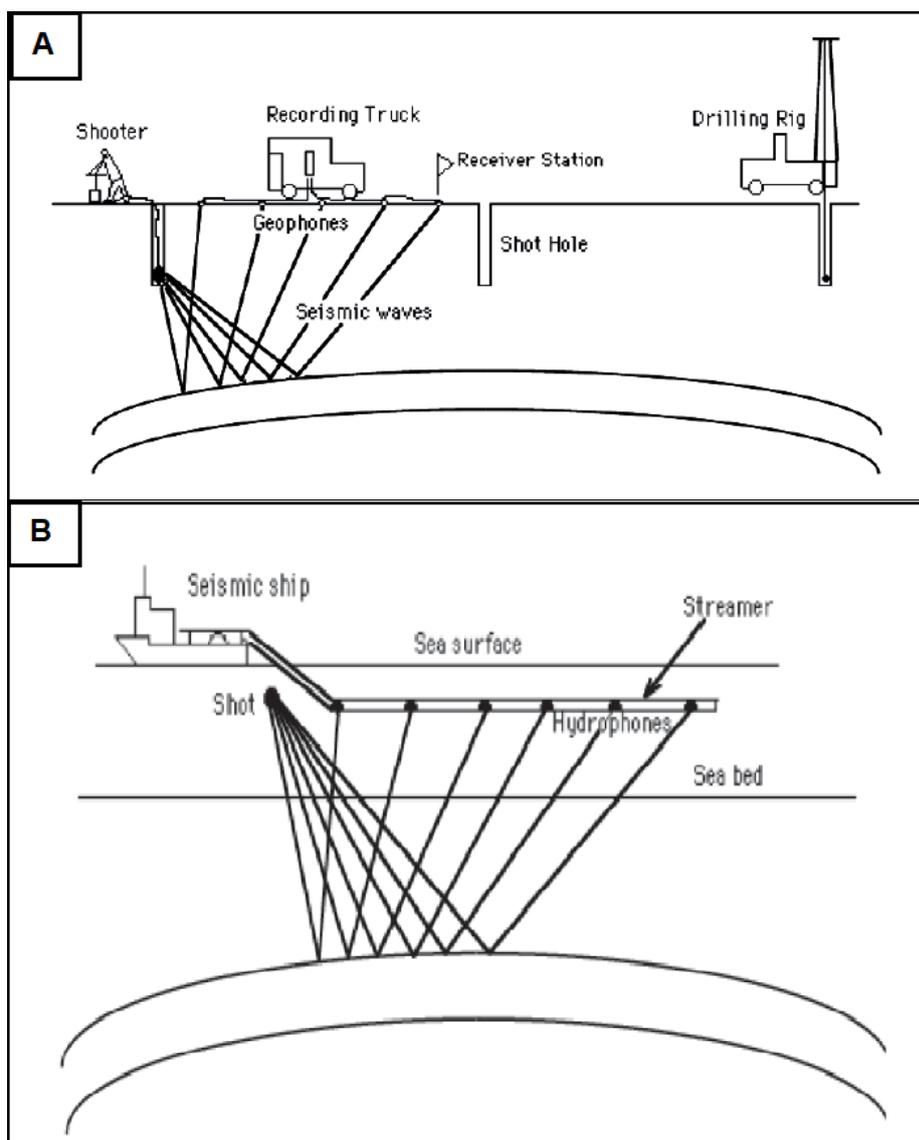
Devido ao enorme investimento feito pela indústria petrolífera, o levantamento sísmico de reflexão, além de ser a técnica geofísica mais utilizada, vem sendo aprimorado junto ao desenvolvimento da tecnologia eletrônica e de computação avançada. As seções sísmicas agora produzidas, revelam detalhes de estruturas geológicas em escalas que variam de dezenas de metros de camada de solo intemperizado até a litosfera como um todo (Kearey, Brooks e Hill, 2009). Esse levantamento normalmente é executado em áreas de sequências sedimentares de baixos mergulhos, com ângulo de incidência próximo da normal, onde a velocidade varia com a profundidade devido às diferentes propriedades físicas de cada camada.

A velocidade pode variar também horizontalmente, devido a mudanças laterais da litologia.

Este método consiste em medir os tempos de chegada das ondas sísmicas aos geofones ou hidrofones (Figura 13), após terem sido refletidas pela superfície de contato entre as várias unidades litológicas. A partir dos tempos de chegada e das respectivas velocidades é possível reconstruir a trajetória das ondas P e delimitar a disposição dos horizontes sísmicos ao longo do perfil. A clareza com que estes dados de reflexão surgem, dependem de um coeficiente de reflexão que, por sua vez, depende da amplitude da onda incidente e refletida, da diferença de densidade entre o material inferior e superior e da relação da velocidade de propagação das ondas P entre os materiais. Quanto maior é a diferença entre os materiais que limitam uma superfície, maior será a reflexão.

Porém, no levantamento sísmico de reflexão, os registros são normalmente restritos a pequenas distâncias de afastamento, menores que a distância crítica para as interfaces refletoras de maior interesse. As fases refletidas devem ter amplitudes muito baixas, uma vez que os refletores geológicos tendem a possuir coeficientes de reflexão pequenos. Dessa forma, as reflexões geralmente são mascaradas, nos registros sísmicos, por eventos de amplitudes mais altas, como ondas de corpo diretas ou refratadas, e por ondas de superfície. Os métodos de levantamento sísmico de reflexão, então, devem ser capazes de distinguir entre energia refletida e ruídos sincrônicos (Kearey, 2009).

**Figura 13:** Exemplos de aquisições sísmicas (A) Aquisição sísmica terrestre (B) Aquisição sísmica marinha.

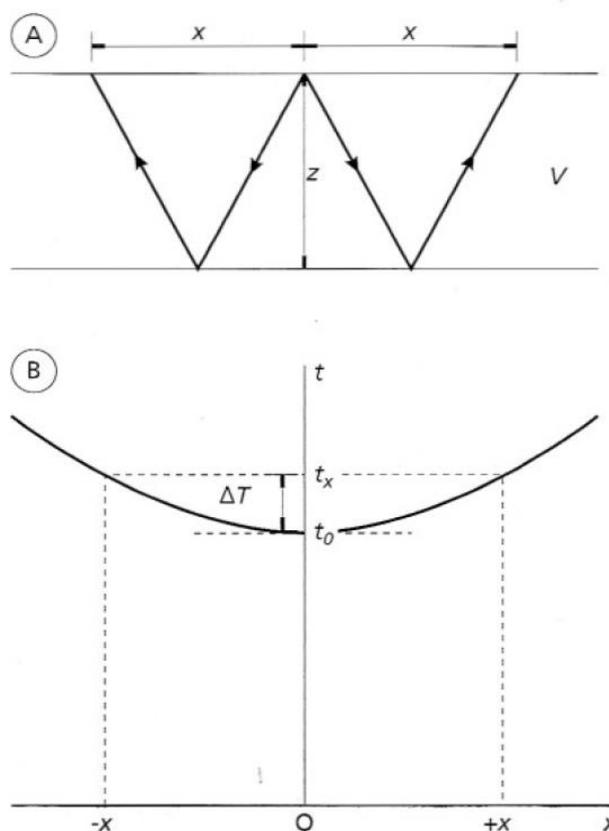


Fonte: Modificado de Evans, 1997 *apud* Kearey, 2009.

Em meios homogêneos e isotrópicos o tempo de percurso de um raio refletido é dado pela equação de uma hipérbole, formando uma curva tempo – distância, onde  $x$  = Distância de afastamento,  $z$  = Profundidade e  $V$  = Velocidade (Figura 14):

$$t_{\text{refl}} = (x^2 + 4z^2)^{1/2} / V$$

**Figura 14:** (A) Seção através de uma camada horizontal única mostrando a geometria das trajetórias dos raios refletidos (B) curva tempo-distância para raios refletidos a partir de um refletor horizontal.



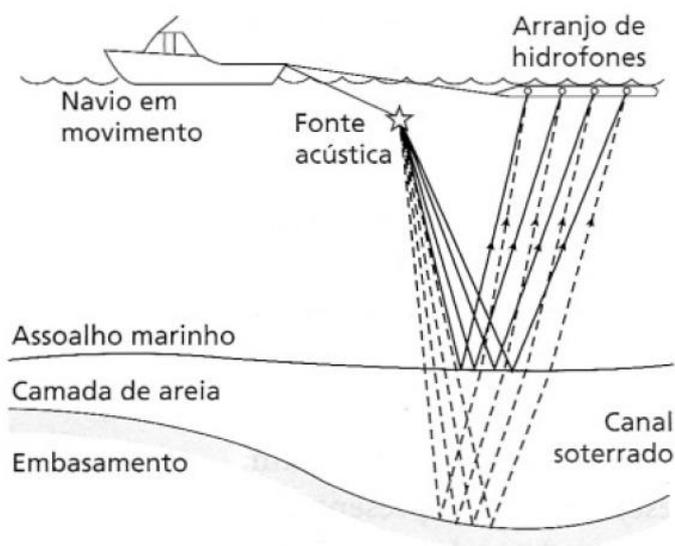
Fonte: Kearey, 2009

O sobretempo normal (NMO) para uma distância de afastamento  $x$  é a diferença no tempo de percurso entre as chegadas refletidas para  $x$  e para o afastamento zero, logo, também é uma função do afastamento, da velocidade e da profundidade do refletor. Dessa forma, o conceito de sobretempo é fundamental para a identificação, correlação e identificação dos eventos de reflexão, e para o cálculo das velocidades utilizando os dados de reflexão (Kearey, 2009).

### 3.3.1.2 DADOS SÍSMICOS MONOCANAL

A perfilagem de reflexão monocanal é um método simples, mas altamente eficaz. Ela representa o levantamento de reflexão reduzido ao mínimo essencial: uma fonte sísmica/acústica marinha é rebocada por um navio de aquisição e disparada a uma taxa fixa de tiro. Sinais refletidos pelo fundo e sub-fundo marinhos são detectados por um arranjo rebocado nas proximidades da fonte (Figura 15).

**Figura 15:** Esquema de uma aquisição de sísmica de reflexão mono canal.



Fonte: Kearey, 2009

A impedância registrada pelos hidrofones é influenciada pelas características físicas do fundo do mar tais como tamanho do grão e grau de compactação. Como em todos os outros sistemas, a frequência, a duração do pulso emitido, a potência de transmissão, a velocidade do barco e a taxa de disparo são fatores importantes na avaliação dos resultados finais (Ayres, 2000).

Esse procedimento de aquisição não é possível em terra, porque somente no mar a fonte e o detector podem se mover continuamente para a frente, e a taxa de tiro obtida é suficientemente alta para possibilitar que um levantamento seja efetuado continuamente por um veículo em movimento (Kearey, 2009).

### 2.3 ATRIBUTOS SÍSMICOS

Os atributos sísmicos são excelentes ferramentas para a interpretação sísmica, além da grande importância que apresentam no contexto da exploração de hidrocarbonetos (Taner, 1994).

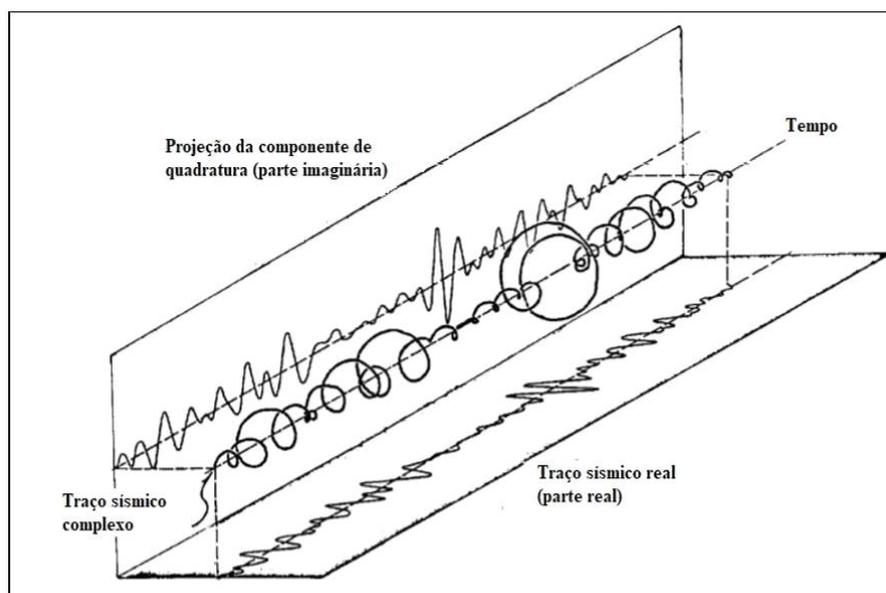
Desde aproximadamente o início da década de 50 os atributos sísmicos foram desenvolvidos e introduzidos no contexto exploratório. Posteriormente, a busca de atributos que ressaltassem padrões específicos, propulsionou o seu desenvolvimento. Balch foi reconhecido ao exibir o primeiro artigo com dados sísmicos em cores, publicado na GEOPHYSICS em 1971, o que proporcionou significativas melhorias

na análise desses dados (Chopra & Marfurt, 2005).

Através da aplicação desses atributos é possível obter novas noções e um conhecimento mais detalhado e preciso sobre os parâmetros estruturais, estratigráficos e litológicos que compõem o prospecto sísmico (Taner et al., 1979). As décadas de 80 e 90 foram marcadas pelo surgimento de centenas de novos atributos criados por diversos autores, cada atributo com a finalidade de facilitar a interpretação do dado sísmico de acordo com o interesse do intérprete.

Foi desenvolvido uma fundamentação matemática para computação de atributos, onde a amplitude do traço sísmico é tratada como a parte real de um sinal analítico complexo, enquanto a parte imaginária é extraída através da Transformada de Hilbert (Taner et al. 1979 *apud* Chopra & Marfurt, 2005), (Figura 16). A partir desse conceito foi criada uma família de atributos sísmicos nomeada de: Atributos Instantâneos, como Envelope, Fase, Frequência, etc. (Taner e Sheriff, 1997 *apud* Barros, 2009).

**Figura 16:** Representação espacial do sinal complexo.



Fonte: Taner et al.1979

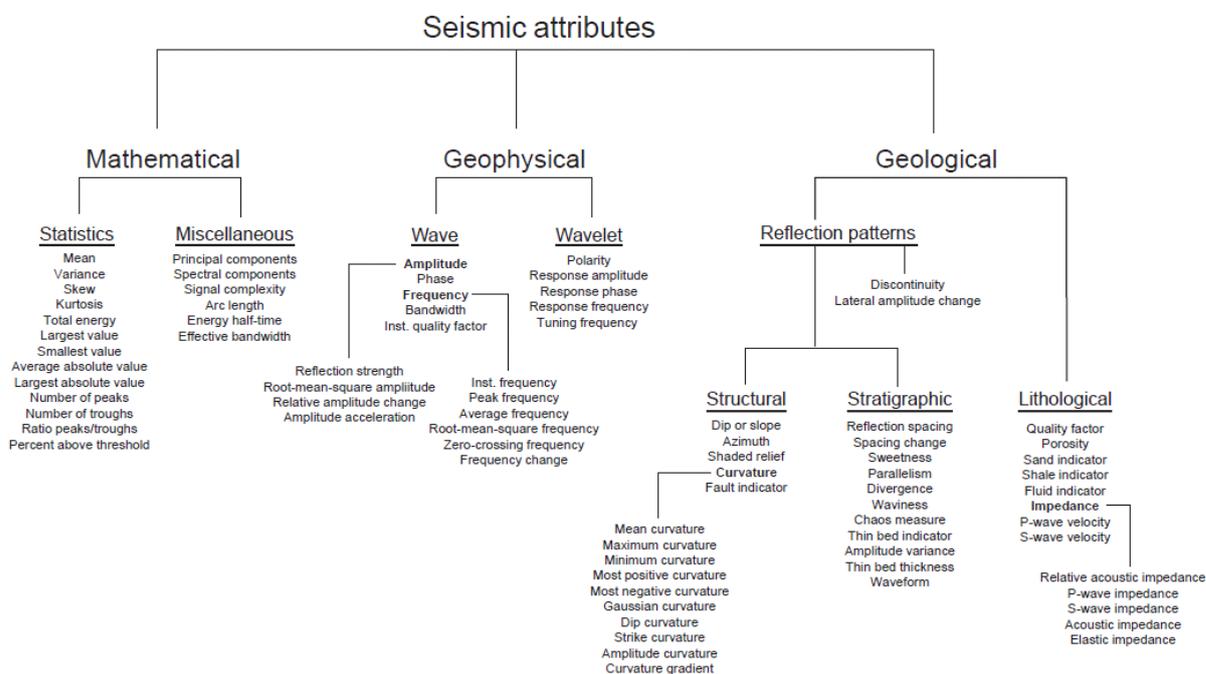
Taner et al. (1979) observaram que, a partir da análise do traço sísmico complexo, é possível separar as duas componentes do traço sísmico, sendo elas a amplitude e a fase. A amplitude dos dados sísmicos é considerada como o fator

principal para a determinação de parâmetros físicos, como impedância acústica, coeficientes de reflexão, velocidades e absorção. Já a componente de fase é o principal fator na determinação das formas dos refletores e de suas configurações geométricas (Taner, 2001).

### 2.3.1 CLASSIFICAÇÃO DOS ATRIBUTOS SÍSMICOS

Os atributos sísmicos podem ser classificados como geológicos, geofísicos ou matemáticos (Figura 17). Atributos geológicos são os que tem maior utilidade, os geofísicos possuem uma utilidade intermediária, e matemáticos a menor, a depender da utilização que se destinam.

Figura 17: Categorização de atributos pelas suas propriedades



Fonte: Brown, 2001

Outra forma de classificar atributos, consiste na subdivisão em duas grandes ramificações destacadas em termos de processamento: atributos pré-empilhamento e atributos pós-empilhamento.

#### Atributos Pré-Empilhamento:

Nesse tipo de atributo os dados de entrada são CDP (*Common Depth Point*) ou

*Image Gather Traces*, e vão reunir informações relacionadas com a direção (azimute) e afastamento fonte-receptor (*offsets*). Possuem como característica a geração de arquivos muito grandes e por isso não são indicados para estudos iniciais (Taner, 1992 apud Barros, 2009).

#### **Atributos Pós-Empilhamento:**

Segundo Barros (2009), devido ao processo de empilhamento (*Stacking*) a perda de informações relacionadas a *offsets* e a azimute é inevitável. Os dados de entrada podem ser CDPs empilhados ou migrados, mas é importante ressaltar que a migração em tempo irá preservar as relações com o tempo, as variações em tempo, e a frequência.

Evidentemente existe uma gama imensa de dados sísmicos, mas pela eficiência para se detectar hidratos os principais seriam: Velocidade Intervalar, Impedância Acústica, Amplitude vs *Offset* (AVO), Envelope, Frequência Instantânea, Fase Instantânea e Fator de Qualidade (Barros, 2009). Neste projeto foram utilizados os atributos: Envelope, Amplitude RMS e *Sweetness*, que, mesmo não sendo citado por Barros, apresentou uma melhoria no contraste entre as impedâncias.

#### **2.3.1.1 ENVELOPE / AMPLITUDE INSTANTÂNEA**

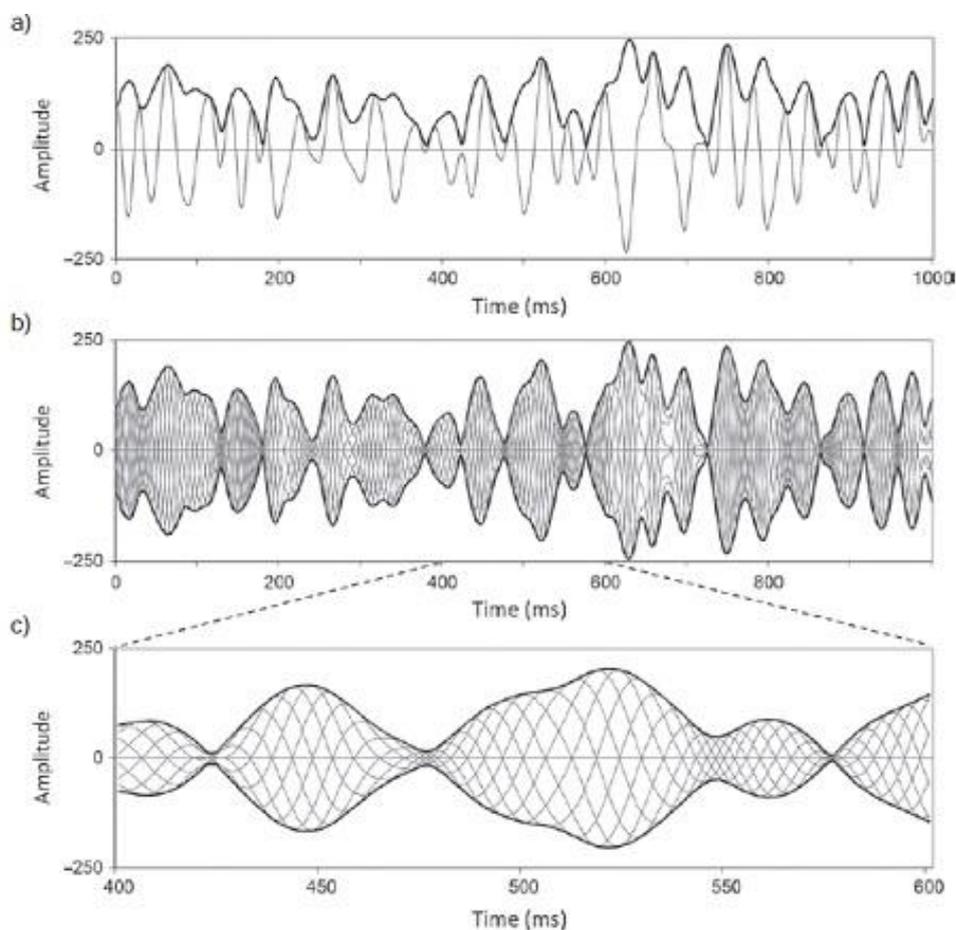
Envelope é uma medição de amplitude independente da polaridade ou fase do sinal, mais comumente chamada de Envelope do traço ou *Reflection Strength* (força de reflexão). Em um dado instante de tempo, representa a magnitude da senoide que melhor representa o traço sísmico.

Segundo Baner (2016), o Envelope é definido mais precisamente como o equivalente ao valor máximo que o traço pode obter através de uma rotação de fase constante. Consequentemente a amplitude instantânea é invariante com relação à rotação de fase do traço, e delimita todas as rotações de fases constantes (Figura 18). Matematicamente o Envelope é definido como:

$$Envelope = \sqrt{f^2 + g^2}$$

O  $f$  e o  $g$  são os componentes “real” e “imaginário” do traço sísmico. Se  $f$  for a parte real, ou seja, parte original do traço sísmico,  $g$  será a parte da transformada de Hilbert.

**Figura 18:** a) Um traço sísmico (linha clara) e seu respectivo envelope (linha escura). b) O traço rotacionado por 0, 45, 90, 135, 180, 225, 270 e 315 graus. c) Destaque da porção central de b) ampliada. O envelope é a linha escura acima de todas as rotações de fase, assim como também o seu reverso (multiplicado por -1) abaixo.



Fonte: Baner, 2016

Em teoria espera-se que o atributo sísmico de envelope venha a destacar o alto contraste de impedância acústica, definida pela fórmula  $Z = P/(V \times S)$ , onde  $Z$  é a impedância,  $P$  a pressão sonora,  $V$  a velocidade do som no material e  $S$  é a área da superfície na qual o som se propaga. Este alto contraste evidencia o próprio BSR e pode indicar possíveis zonas de estabilidade de hidratos de gás (Canario, 2013).

### 2.3.1.2 AMPLITUDE RMS E SWEETNESS

O atributo sísmico amplitude RMS foi definido por diversos autores como

o correspondente intervalar da amplitude instantânea, tendo em vista que seus resultados são similares. A amplitude RMS de um traço sísmico  $x_n$  com  $N$  amostras é definido matematicamente como:

$$x_{rms} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N x_n^2}$$

O *Sweetness* é um atributo que tende a destacar unidades litológicas com acumulações relativamente altas de hidrocarbonetos, já que a presença de gás irá gerar altos valores de amplitude instantânea, que por si só já tende a baixar os valores de frequência instantânea. Tais acumulações tendem a ser chamadas de “*sweet spots*”, daí vem o nome do atributo: *Sweetness*. Deste modo, é considerado também um atributo estratigráfico, já que geralmente ajuda a destacar grandes pacotes areníticos. O atributo *Sweetness* é a combinação dos atributos Envelope e Frequência instantânea, definido como:

$$Sweetness = \frac{Envelope}{\sqrt{Frequência\ Instantânea}}$$

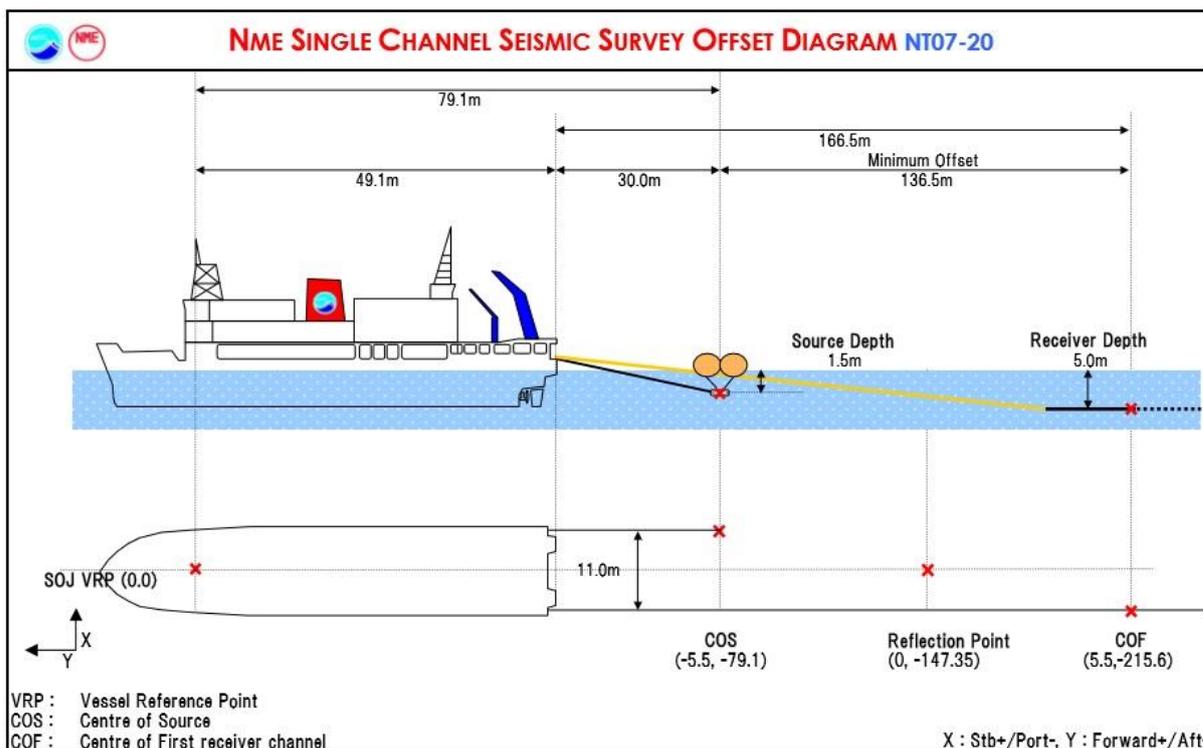
### 3 MÉTODOS

#### 3.1 AQUISIÇÃO SÍSMICA MONOCANAL

O equipamento de aquisição sísmica 2D monocanal (*single channel seismic – SCS*) utilizado neste projeto, foi planejado para avaliar uma profundidade de aproximadamente 600 m, três vezes mais profunda que a base da zona de estabilidade de hidratos, prevista para ocorrer por volta de 200 m abaixo do assoalho marinho (Freire, 2013). Esta aquisição foi realizada em 2007 e 2008 através do R/V Natsushima da Agência Japonesa de Ciências e Tecnologias Marinhas e da Terra (JAMSTEC) na Bacia de Joetsu, tendo sido composta por uma fonte artificial, contendo uma pistola pneumática (*air gun*) do tipo *Bolt cluster*.

As fontes foram rebocadas a cerca de 30 m do navio com profundidades variando entre 1,5 m e 7,4 m com um conjunto de 48 hidrofones espaçados de 1 m (Freire, 2013) (Figura 19).

**Figura 19:** Diagrama de espaçamento (offset) da aquisição sísmica monocanal utilizada por R/V Natsushima da JAMSTEC.



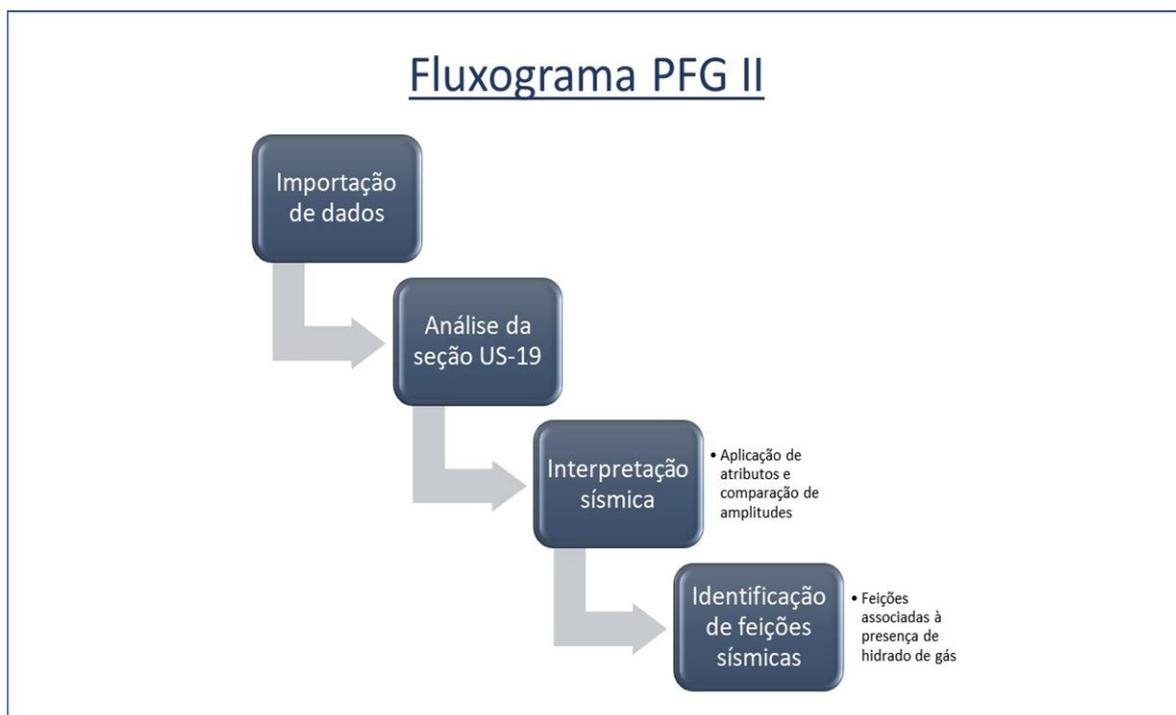
Fonte: Freire, 2010

A velocidade do navio foi de 3,1 nós com pontos de tiro a cada 5s, o que configurou um tiro a cada 8,3m. O tempo de registro do sismograma foi de 4,0s com 1ms de taxa de amostragem, a qual conferiu uma frequência Nyquist máxima de 500Hz e média de 125Hz

### 3.2 FLUXOGRAMA

Com objetivo de organizar o procedimento do estudo, foi realizado o fluxo de interpretação sísmica constituído por 4 etapas principais: Importação de dados, análise da seção sísmica US-19, Interpretação sísmica com a aplicação de atributos, e, por fim, a identificação de feições sísmicas associadas à presença de hidrato de gás (Figura 20).

**Figura 20:** Fluxograma do Projeto Final em Geofísica II.



### 3.2.1 IMPORTAÇÃO DE DADOS E ANÁLISE

O software escolhido para a execução do projeto foi o *Petrel 2016* devido à sua facilidade na importação e na interpretação sísmica. Após a correção das coordenadas das seções sísmicas, já migradas através da JAMSTEC, as linhas sísmicas de reflexão 2D (*pós-stack*) foram importadas dando início ao projeto de nome “Umitaka”.

Após serem analisadas todas as linhas sísmicas do anticlinal *Umitaka Spur* da Bacia de *Joetsu*, foi realizada uma triagem a fim de escolher a seção mais adequada para a execução deste projeto. Assim, a seção US-19 foi selecionada por se tratar do seu posicionamento seccionando dois *mounds* por onde emanam grandes plumas de metano, além de ser possível observar as feições de interesse, associadas à presença dos hidratos de gás, como chaminés e branqueamento.

### 3.2.2 INTERPRETAÇÃO E IDENTIFICAÇÃO DE FEIÇÕES SÍSMICAS

A feição BSR coincide com a base da zona de estabilidade dos hidratos de gás, marcando a interface entre a zona de estabilidade dos hidratos (com velocidade sísmica mais alta) e a camada com gás livre abaixo dessa curva de estabilidade (com velocidade mais baixa), o que gera um refletor com elevada polaridade negativa em relação ao fundo do mar (Kvendolven, 1993).

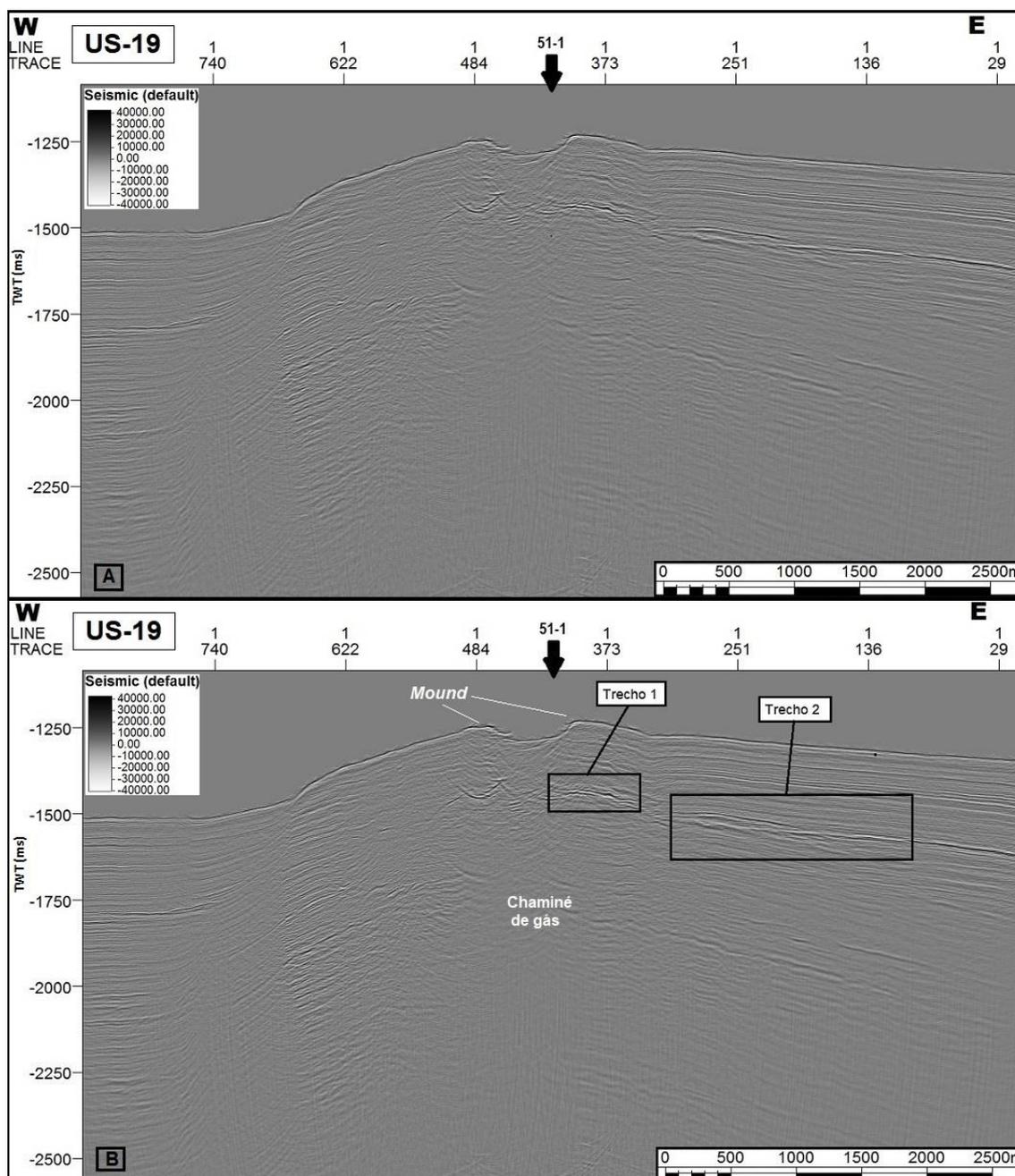
Neste estudo, o mapeamento do fundo do mar e das falhas geológicas foi realizado utilizando a escala de cores *grayscale*. Para assessorar e melhorar a qualidade da interpretação, foram utilizados os atributos sísmicos Envelope, Amplitude RMS e *Sweetness*, com a intenção de verificar a presença de BSRs. Posteriormente, efetuou-se a comparação das amplitudes do fundo marinho com as amplitudes do possível BSR, através de planilhas e gráficos em trechos distintos, a fim de expor a inversão da polaridade do sinal e ratificar a localização do refletor.

A identificação de hidratos de gás no anticlinal *Umitaka Spur* foi realizada com base na interpretação de seções sísmicas de reflexão 2D monocanal, sendo o critério básico estabelecido para esta interpretação o mapeamento de dois padrões sísmicos (BSR, *blanking*) típicos de zonas com ocorrência de hidratos e chaminés de gás.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Para dar início à interpretação da seção sísmica US-19, a escala de cores foi definida de modo que a cor preta apresenta amplitudes positivas e a cor branca apresenta amplitudes negativas, com o objetivo de localizar mais facilmente as feições sísmicas associadas à presença de hidratos de gás (Figura 21). Nesta imagem a seta preta na parte superior representa o cruzamento com a linha transversal US-51.

**Figura 21:** Seção sísmica US-19 não interpretada (A), e com demarcação de possível BSR, *mounds*, *pockmark* e chaminé de gás (B).

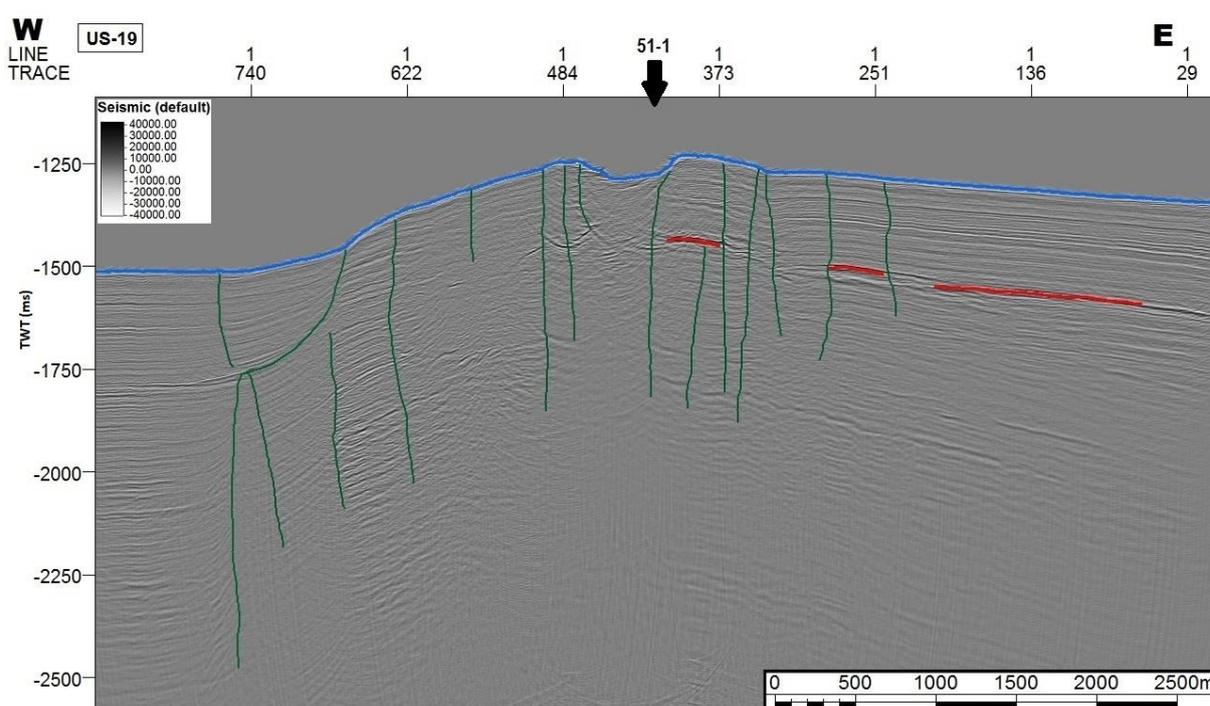


Nas seções em que a estratificação é paralela ao fundo do mar, o BSR pode ser camuflado, dificultando a sua identificação (Holbrook et. al., 2002), porém com o forte contraste de impedância foi possível identificar dois trechos onde os possíveis BSRs podem estar localizados. O trecho 1 entre os traços 407 e 364, e o trecho 2 começando no traço 285 e terminando aproximadamente no traço 103.

Na figura 21, além dos *mounds* e do *pockmark*, facilmente identificados na imagem (B), analisou-se uma possível chaminé de gás devido à carência de sinal proveniente de uma conturbação no local, podendo ser interpretada como a migração de gás através de falhas.

Posteriormente, foi realizada a primeira interpretação da seção sísmica US-19 sem o auxílio de atributos, com o mapeamento do fundo do mar, principais falhas e BSR (Figura 22).

**Figura 22:** Seção sísmica US-19 interpretada. Cor azul indicando o fundo marinho, verde indicando as principais falhas e vermelho os possíveis trechos do BSRs.



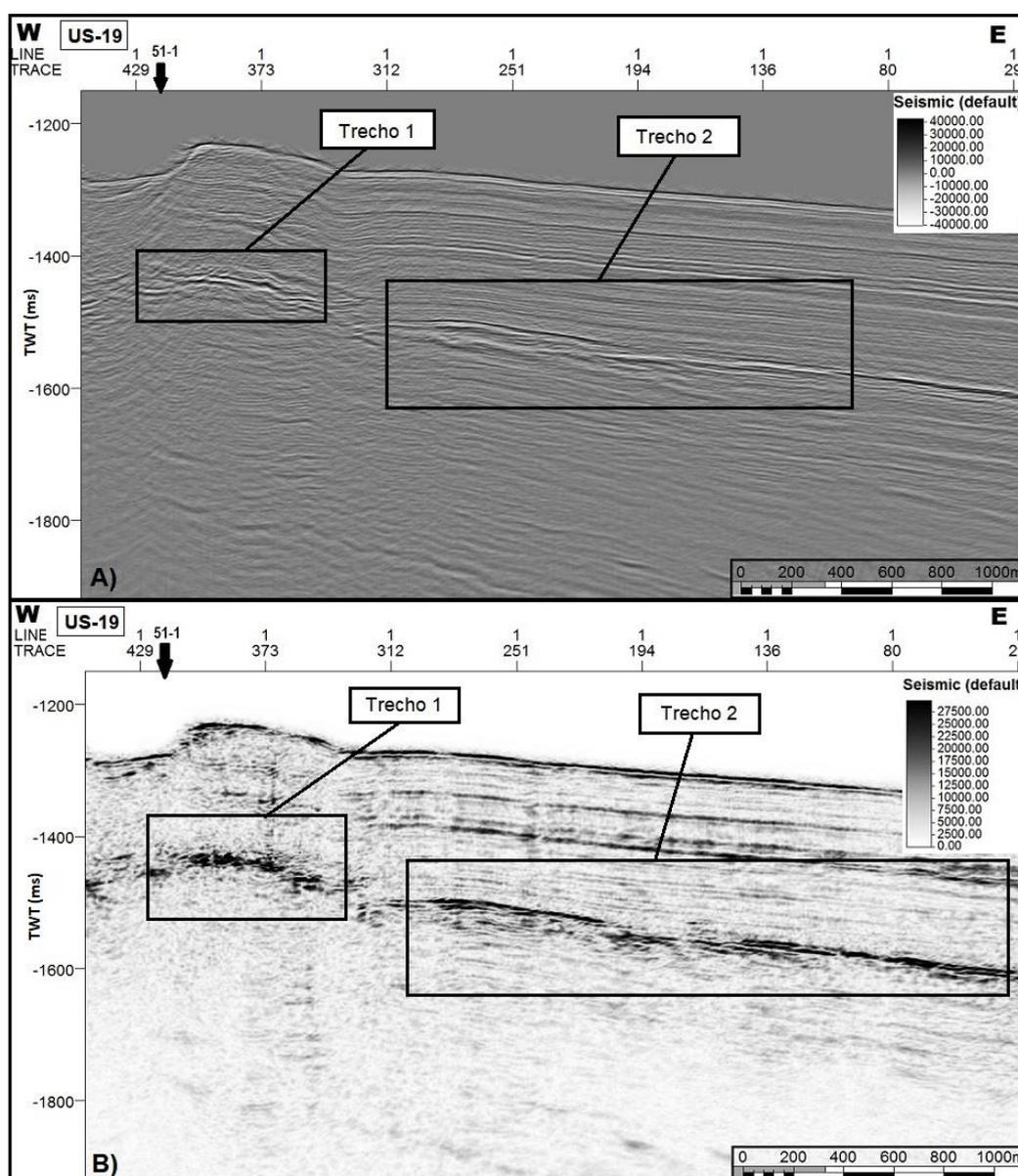
Como observado na figura acima, a parte que foi inicialmente definida como Trecho 2 na figura 21, foi subdividida em duas linhas de BSR, descontínuas entre si. Nesse caso, o uso dos atributos sísmicos Envelope, Amplitude RMS e *Sweetness*, além da análise das amplitudes sísmicas, tornam-se essenciais para mitigar essas incertezas e inferir na presença dos hidratos de metano.

## 4.1 APLICAÇÃO DE ATRIBUTOS SÍSMICOS

### 4.1.1 ENVELOPE

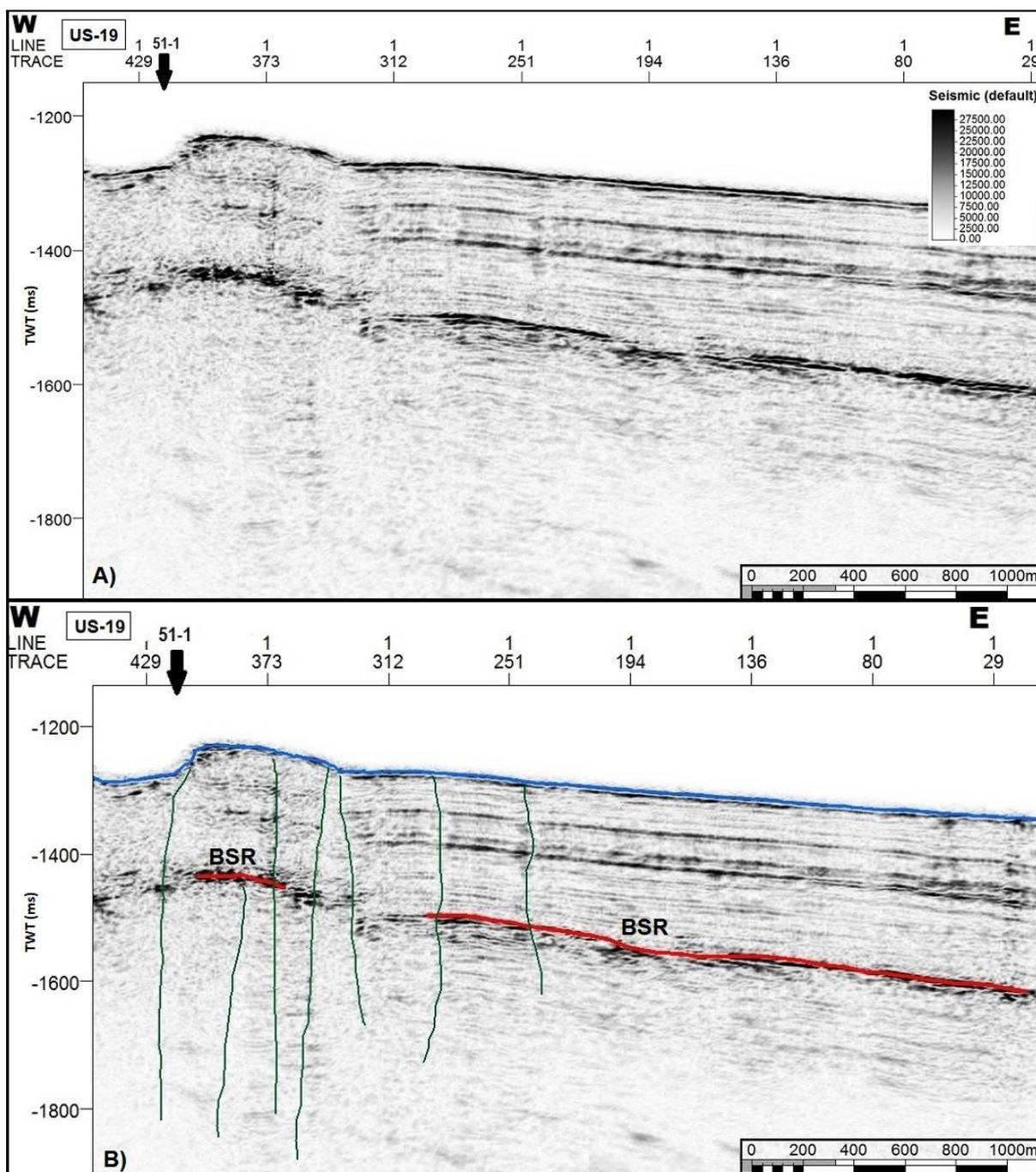
O alto contraste de impedância acústica, proporcionado pelo transiente de velocidades dos hidratos de gás (2250 m/s), e velocidades próximas de 1660 m/s para sedimentos abaixo dessa zona de estabilidade, geralmente atribuída a gases livres, é um bom indicativo da presença de hidratos (Canario, 2013). Neste estudo, o envelope destacou o contraste de impedância acústica, evidenciando assim o próprio BSR (Figura 23).

**Figura 23:** Parte leste da seção US-19. (A) Amplitudes; (B) Seção com o atributo Envelope.



Após aplicar o atributo sísmico Envelope, se torna nítida a melhoria no que diz respeito a mapear o BSR. Além de deixar contínuo o possível BSR no Trecho 2, o atributo foi capaz de delimitar melhor o seu comprimento. Devido a esta mudança, uma segunda interpretação da seção US-19 foi executada (Figura 24).

**Figura 24:** Seção sísmica com atributo sísmico Envelope aplicado. (A) Seção não interpretada; (B) Seção interpretada.

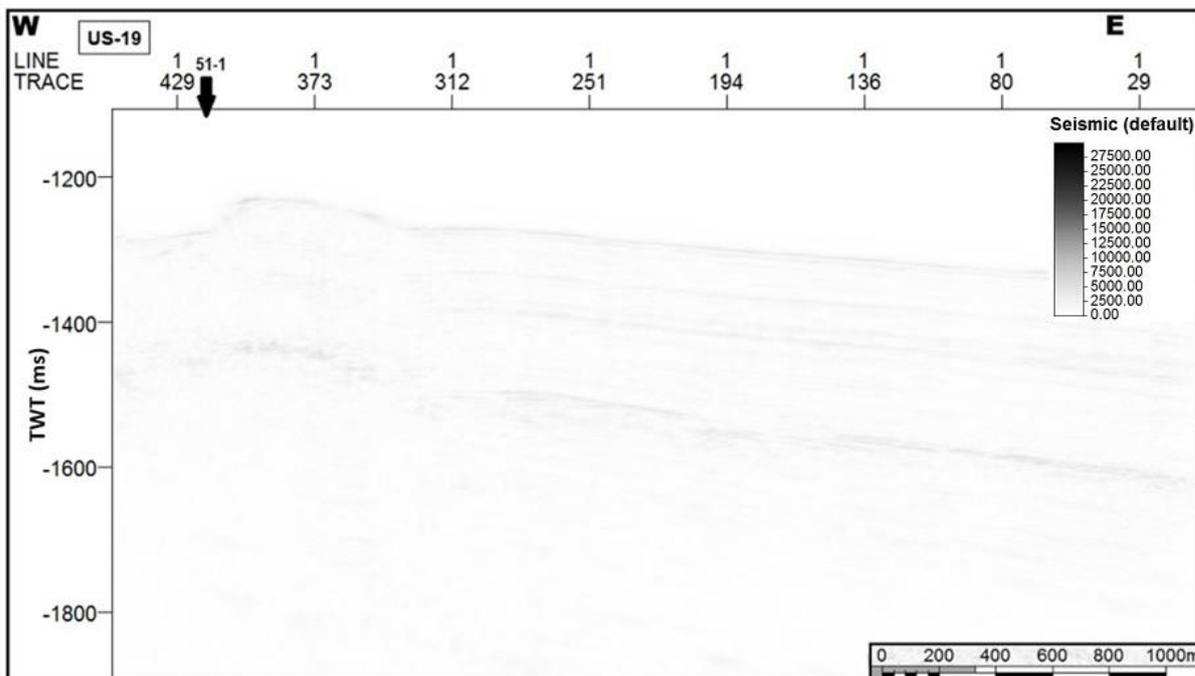


O uso do atributo envelope facilitou a visualização e a identificação da feição BSR, principalmente no intervalo entre os números de traços 406 e 366 para o trecho 1 e entre os traços 292 e 14 para o trecho 2.

#### 4.1.2 AMPLITUDE RMS E SWEETNESS

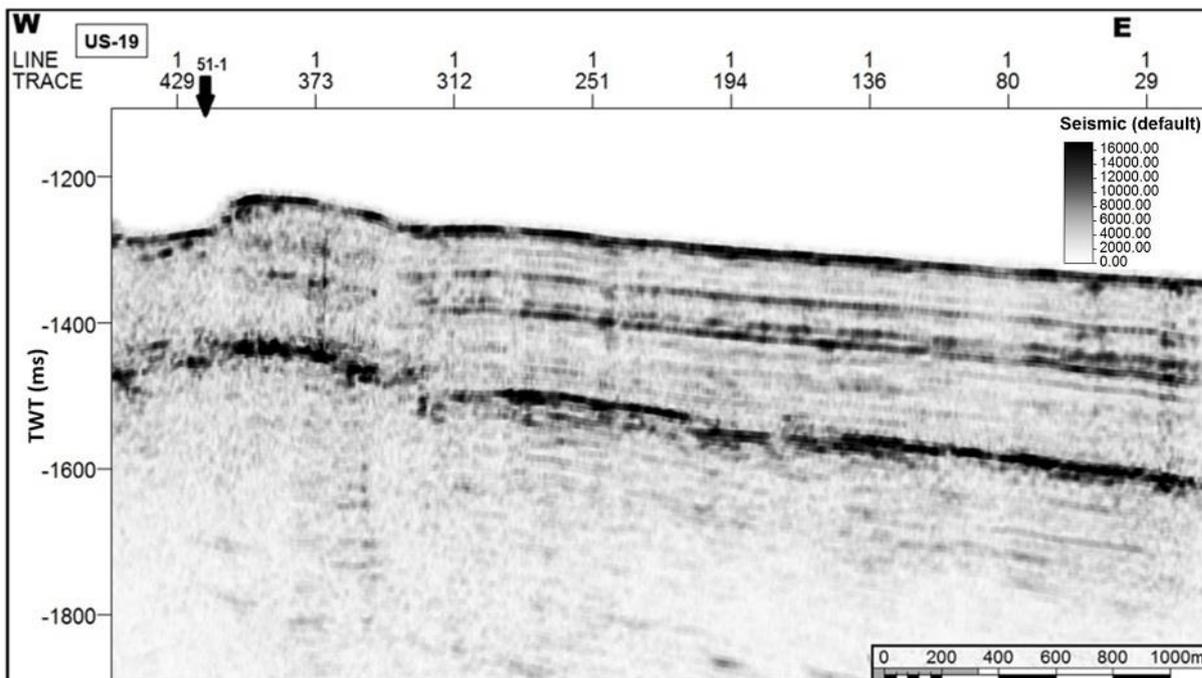
A priori, foi implantado o atributo *Sweetness* direto na linha US-19 sem filtro, devido ao fato de ser um ótimo localizador de camadas espessas onde existe a presença de hidrato de gás. Esse feito não obteve o sucesso esperado, pois mesmo delimitando melhor as regiões já estabelecidas como Trecho 1 e Trecho 2, a imagem se tornou muito clara (Figura 25), deixando assim uma certa ambiguidade em sua interpretação.

**Figura 25:** Linha sísmica US-19 com o atributo Sweetness.



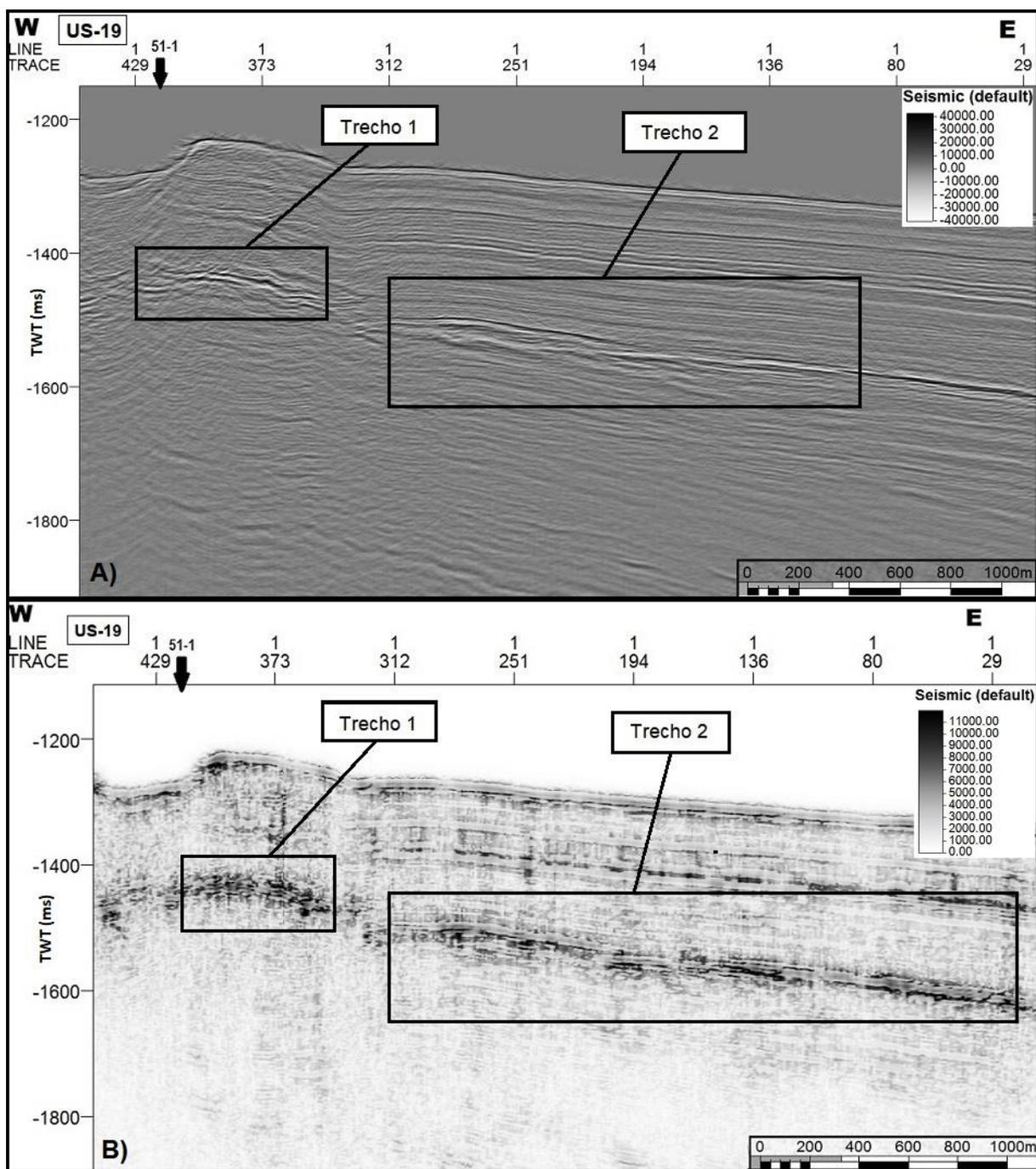
Em seguida foi implantado o atributo Amplitude RMS na linha sísmica US-19 sem filtro, que por evidenciar a amplitude instantânea, espera-se um maior contraste de impedância e um resultado similar ao do atributo Envelope (Figura 26).

**Figura 26:** Linha sísmica US-19 com o atributo Amplitude RMS.

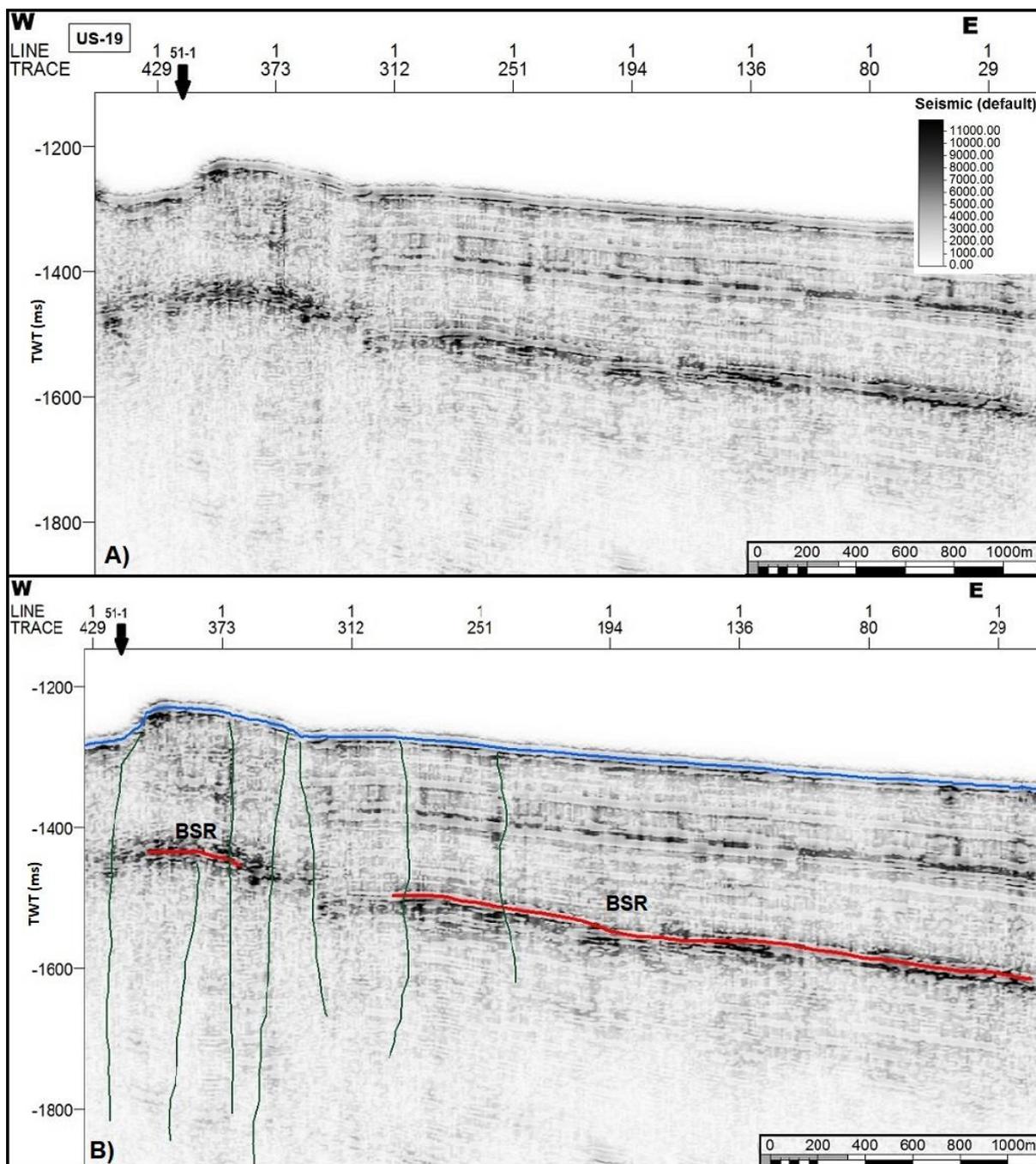


Enfim, os dois atributos sísmicos foram unidos, com o *Sweetness* sobreposto na Amplitude RMS (Figura 27). Após essa união, foi possível observar uma grande melhoria na imagem, facilitando, assim, a interpretação da linha US-19 em ambos os trechos, no que diz respeito a mapear as feições de interesse (Figura 28).

**Figura 27:** Parte leste da seção US-19. (A) Amplitudes; (B) Seção com os atributos Amplitude RMS e Sweetness aplicados.



**Figura 28:** (A) seção US-19 com aplicação dos atributos Amplitude RMS e *Sweetness*; (B) seção US-19 com aplicação dos atributos Amplitude RMS e *Sweetness* interpretada.

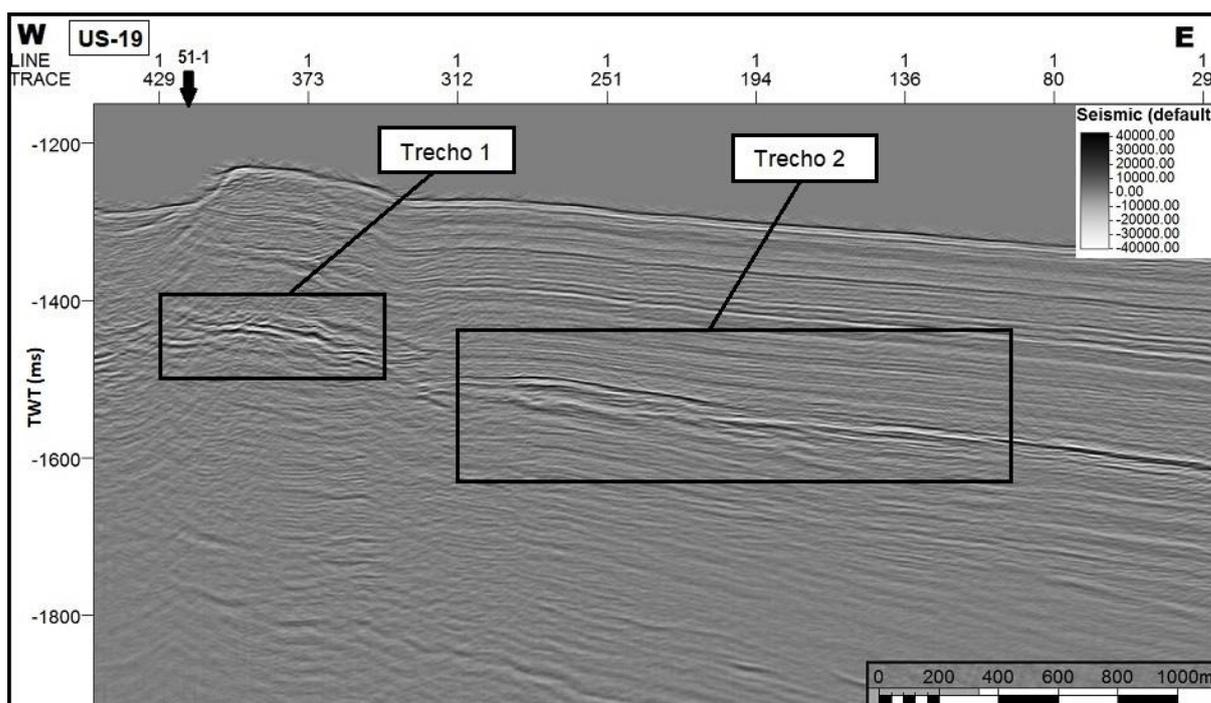


## 4.2 COMPARAÇÃO DAS AMPLITUDES

A densidade dos sedimentos de fundo é função basicamente da mineralogia, da porosidade e do teor de água. Estes fatores variam localmente em maior escala, controlando, portanto, de maneira mais intensa, a impedância dos sedimentos (Ayres, 2001). Já o BSR pode ser definido por inversões na polaridade dos coeficientes de reflexão, em comparação ao fundo do mar. Teoricamente, espera-se que as amplitudes desses refletores bem marcados (BSR) sejam negativas e grandes em módulo, com polaridades reversas aos coeficientes do fundo marinho (Dillon et al., 1996).

Com o objetivo de confirmar a teoria citada acima, foram criadas duas planilhas, comparando os valores de amplitude do fundo marinho com os valores de amplitude do BSR. As planilhas e os gráficos foram divididos de modo que especifiquem os dois trechos demarcados previamente neste projeto, onde foram analisados como possíveis locais com presença de clarato (Figura 29).

**Figura 29:** Parte leste da linha US-19 com demarcações do Trecho 1 e Trecho 2.

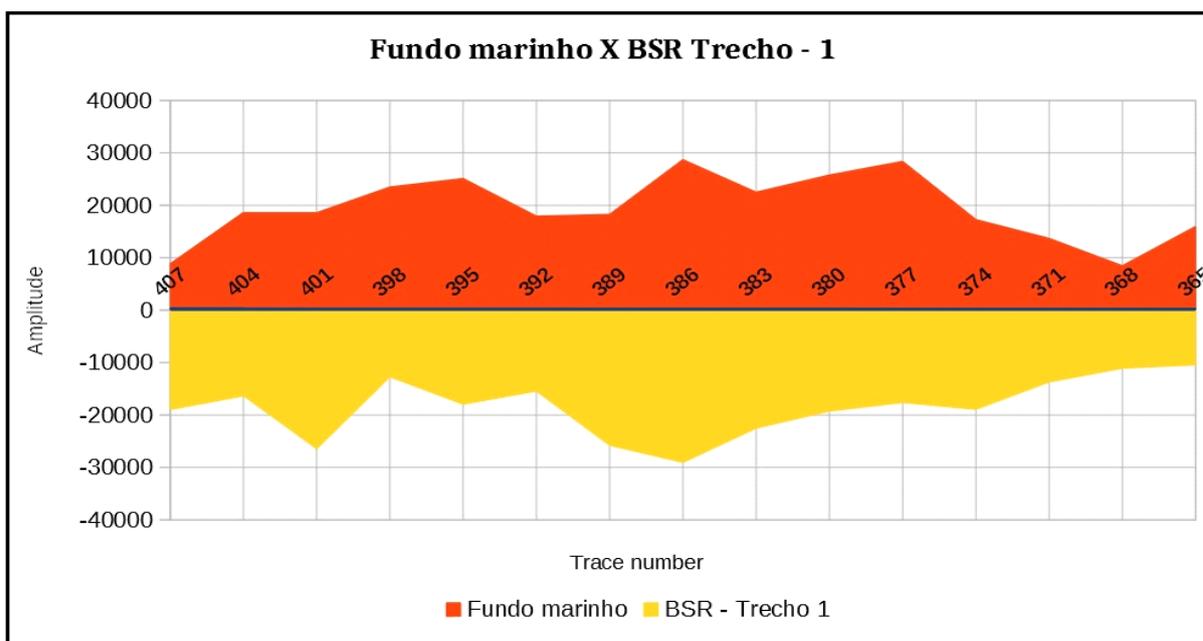


A primeira planilha exibe as amplitudes do fundo marinho e do BSR no Trecho 1, delimitado pelo traço 407 ao traço 365 (Tabela 1).

**Tabela 1:** Planilha comparativa entre as amplitudes do fundo marinho e BSR no Trecho 1

Trace number	Fundo marinho	BSR - Trecho 1
407	8816,39	-18938,9
404	18612,37	-16326,64
401	18612,37	-26449,16
398	23510,36	-12734,78
395	25143,03	-17959,3
392	17959,3	-15447,04
389	18285,84	-25796,09
386	28734,89	-29061,42
383	22530,76	-22530,76
380	25796,09	-19265,44
377	28408,35	-17632,77
374	17306,24	-18938,9
371	13714,38	-1374,38
368	8489,85	-11102,12
365	16000,11	-10449,05

A partir dessa planilha, foi criado um gráfico onde é possível comparar o comportamento dessas amplitudes (Figura 31).

**Figura 30:** Comparação de amplitudes sísmicas: Fundo marinho e BSR - Trecho 1.

A partir do gráfico representado acima, torna-se evidente a inversão de polaridades no sinal entre o fundo marinho (polaridade positiva) e o BSR (polaridade negativa). É possível notar a aproximação modular entre a maior parte dos valores de

amplitude, com os traços 383 e 371 apresentando uma perfeita inversão entre eles. Este resultado confirma a teoria e, conseqüentemente, ratifica as primeira análises deste projeto, onde afirmava a possível presença de hidrato no Trecho 1.

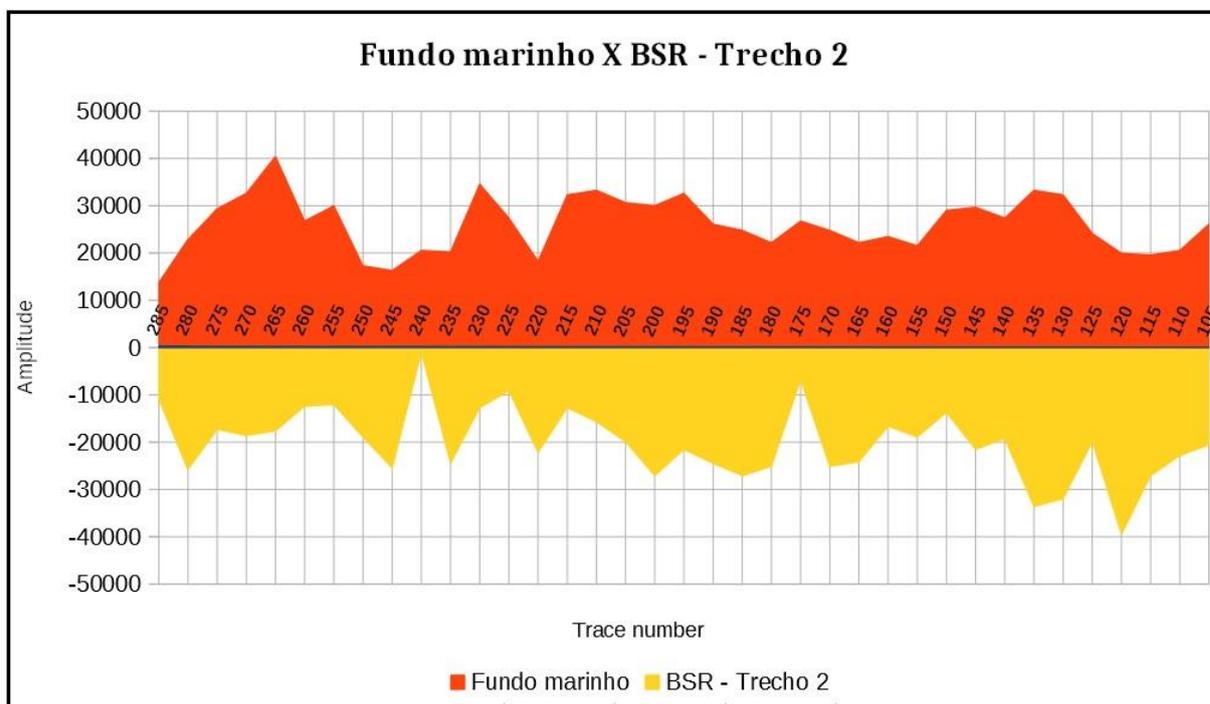
De maneira análoga ao trecho 1, também foi criada uma planilha para o Trecho 2 com o objetivo de comparar o comportamento das amplitudes entre o fundo do mar e o BSR inferido (Tabela 2).

**Tabela 2:** Planilha comparativa entre as amplitudes do fundo marinho e BSR no Trecho 2

Trace number	Fundo marinho	BSR - Trecho 2
285	13714,38	-10775,58
280	22857,29	-25796,09
275	29387,95	-17306,24
270	32653,28	-18612,37
265	40490,07	-17632,77
260	26775,69	-12408,25
255	30041,02	-12081,71
250	17306,24	-18938,9
245	16326,64	-25469,56
240	20571,57	-1077,58
235	20245,03	-24489,96
230	34612,48	-12734,78
225	27428,75	-9142,92
220	18285,84	-22204,23
215	32326,75	-12734,78
210	33306,34	-15673,57
205	30694,08	-19918,5
200	30041,02	-27102,22
195	32653,28	-21551,16
190	26122,62	-24489,96
185	24816,49	-27102,22
180	22204,23	-25143,03
175	26775,69	-6857,19
170	24816,49	-25143,04
165	22204,23	-24163,43
160	23510,36	-16653,17
155	21551,16	-18938,9
150	29061,42	-13714,38
145	29714,48	-21551,16
140	27428,75	-19265,44
135	33306,34	-33632,88
130	32326,75	-32000,21
125	24163,43	-19918,5
120	19959,3	-39510,47
115	19591,97	-27102,22
110	20571,57	-22857,29
105	26122,62	-20571,57

A partir dessa planilha, foi criado um gráfico onde é possível comparar o comportamento dessas amplitudes (Figura 33).

**Figura 31:** Comparação de amplitudes sísmicas: Fundo marinho e BSR - Trecho 2.



O gráfico acima, similar ao gráfico do Trecho 1, deixa evidente a inversão de polaridades no sinal entre o fundo marinho e a BSR. Intervalos como dos traços 140 ao traço 125 apresenta uma aproximação modular dos valores quase que perfeita, porém em alguns outros intervalos, como por exemplo do traço 240 ao 225, observa-se uma discrepância entre os valores de amplitude. Estudos mostram que, em alguns casos, a baixa saturação de hidratos de metano no solo ou a ausência de gás livre abaixo dos hidratos de metano pode fazer com que não sejam observados BSR em ensaios sísmicos.

## 5 CONCLUSÃO

Após o processamento sísmico adequado, a presença de hidratos pode ser inferida baseando-se em interpretações sísmicas a partir de feições conhecidas como *Bottom Simulated Reflectors* (BSR) em conjunto com *blanking* (ausência de sinal), que surgem quando há uma camada de hidrato sobre uma camada de gás livre, com mudança brusca de impedância acústica.

Todos os atributos, utilizados nesse estudo, foram bem sucedidos para caracterizar a ocorrência de hidratos de gás. O atributo Envelope realçou o refletor associado ao hidrato em detrimento das reflexões com baixa energia instantânea, permitindo uma comparação qualitativa entre o contraste de impedância do BSR e de outros refletores. A junção dos atributos Amplitude RMS e *Sweetness* apresentaram resultados análogos aos do Envelope, porém com ênfase ainda maior na recuperação de algumas reflexões importantes para a interpretação de processos associados aos hidratos.

As tabelas e os gráficos, comparando as amplitudes dos refletores, mostraram que há inversão de polaridades no sinal entre o fundo do mar (polaridade positiva) e a feição da BSR (polaridade negativa), apesar dessa inversão não ser modular. Este procedimento ratifica a presença de hidratos de gás na região.

O uso dessas ferramentas em conjunto permitiu validar a identificação do BSR na seção sísmica US-19. Conclui-se então, que é válida a aplicação de todos os atributos sísmicos apresentados neste trabalho, sendo cada qual utilizado com critérios específicos, observando a natureza de cada um. A comparação de amplitudes foi fundamental para a complementaridade das interpretações, principalmente no que diz respeito a delimitação dos trechos especificados como possíveis locais com presença de hidratos de gás.

## 6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AGUIAR, L. F.; Análise de atributos na identificação de feições sísmicas associadas à presença de hidratos de gás na bacia da Foz do Amazonas. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado) - Curso de Geofísica, LAGEMAR, UFF, Niterói, 2017.
- AYRES, A.; Uso da sísmica de reflexão de alta resolução e da sonografia na exploração mineral submarina. **Revista Brasileira de Geofísica**, São Paulo, vol.18, n.3, 2000.
- BARROS, C. S.; Análise de Atributos Sísmicos para Caracterização de Hidratos de Gás no Cone do Amazonas. 62 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado) - Curso de Geofísica, LAGEMAR, UFF, Rio de Janeiro, 2009.
- BROWN, A. R.; Understanding seismic attributes. **Geophysics**. Dallas, v. 66, n. 1, p.47-48, 2001.
- CANARIO, R. S.; Avaliação de Atributos Sísmicos utilizados no reconhecimento de Hidratos de Gás no Cone do Amazonas. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado) - Curso de Geofísica, LAGEMAR, UFF, Niterói, 2013.
- CHOPRA, S.; MARFURT, K. J. Seismic attributes - A historical perspective. **Geophysics**, v.70, n. 5, 2005.
- CHOPRA, S., WILLOUGHBY, E. C., RIEDEL, M. Geophysical Characterization of Gas Hydrates. **Society of Exploration Geophysicists**; Geophysical Developments Series, n. 14, 2010.
- CLENNEL, B. M.; Hidrato de gás submarino: natureza, ocorrência e perspectivas para exploração na margem continental brasileira. **Brazilian Journal of Geophysics**, v. 18(3), 2000.
- FREIRE, A. F. **An Integrated Study on the Gas Hydrate Area of Joetsu Basin, Eastern Margin of Japan Sea, using Geophysical, Geological and Geochemical**. 2010. p.263. Tese (Doutorado) – University of Tokyo, Tokyo, 2010.
- FREIRE, A. F. **Gas hydrates and the Gas Seeps Phenomenon**. ALAGO WORKSHOP. 2017.
- FREIRE, A. F.; MATSUMOTO, R.; SANTOS, L. A. Structural-stratigraphic control on the Umitaka Spur gas hydrates of Joetsu Basin in the eastern margin of Japan Sea. **ELSEVIER – Marine and Petroleum Geology**. v. 28, out. 2010.
- FREIRE, A. F.; SUGAI, T.; MATSUMOTO, R. O uso de cinzas vulcânicas para correlações estratigráficas na margem leste do Mar do Japão. **B. Geoci. Petrobras**. v. 18, n. 1, p. 97-121, nov. 2009.
- FREIRE, A. F. Controle estrutural-estratigráfico na distribuição de hidratos e gases livres do anticlinal Umitaka, Bacia Joetsu, margem leste do Japão. **B.Geoci. Petrobrás**. v.21, n.1, p.63-84, nov. 2012.
- HOLBROOK, W. S. et al. Seismic detection of marine methane hydrate. **The Leading Edge**, v. 21, n.7, p. 686-689, 2002.

HYNDMAN, R. D.; SPENCE, G. D. A seismic study of methane hydrate marine bottom simulating reflectors. **Journal of Geophysical Research: Solid Earth**, v. 97, n. B5, p. 6683-6698, 1992.

KASTNER, M. Gas hydrates in convergent margins: formation, occurrence, geochemistry, and global significance. Natural gas hydrates: occurrence, distribution, and detection. **American Geophysical Union**. Washington, DC, p.67-86, 2001.

KEAREY, P.; BROOKS, M.; HILL, I. **Geofísica de Exploração**. 1. ed. São Paulo, 2009.

KIEFFER, S. W., XINLI LU, C. M., BETHKE, J. R., SPENCER, S. M., NAVROTSKY, A. A Clathrate Reservoir Hypothesis for Enceladus' South Polar Plume. **Science**, v.314 (5806), p.1764–1766, 2006.

KVENDOLVEN, K.A. Gas hydrates-geological perspective and global change. **Geophysics**, v. 31, p. 173-187, 1993.

MELO, F. F.; GUIZAN, C.; REIS, T. A.; Hidratos de Gás no Leque Submarino do Amazonas: Ocorrência e Formação. **SBGf 2008**. III Simpósio Brasileiro de Geofísica.

NAKAJIMA, T. et al. Formation of pockmarks and submarine canyons associated with dissociation of gas hydrates on the Joetsu Knoll, eastern margin of the Sea of Japan. **ELSEVIER – Journal of Asian Earth Sciences**. v. 90, 2014.

OKUI, A., KANEKO, M., NAKANISHI, S., MONZAWA, N., YAMAMOTO, H.; An Integrated Approach to Understanding the Petroleum System of a Frontier Deep-Water Area, Offshore Japan. **Petroleum Geosciences**, v.14, p.1-12, 2008.

POLICARO, H. E.; Processamento e interpretação de dados sísmicos monocanal no anticlinal Joetsu Bacia de Joetsu – Mar do Japão. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado) - Curso de Geofísica, LAGEMAR, UFF, Niterói, 2017.

SANTOS, L. A.; FREIRE, A. F.; MATSUMOTO, R. Q estimation in hydrate bearing sediments at Joetsu Knoll – Japan Sea. **Eleventh International Congress of Brazilian Geophysical Society**, 2009.

SHIPLEY, T.H.; HOUSTON, M.H.; BUFFLER, R.T.; SHAUB, F.J.; MCMILLEN, K.J.; LADD, J.W.; WORZEL, J.L. Seismic reflection evidence for widespread occurrence of possible gas-hydrate horizons on continental slopes and rises. **American Association of Petroleum Geologists Bulletin**, v. 63, p. 2204–2213, 1979.

SUZUKI, U.; Petroleum Geology of the Sea of Japan, Northern Honshu. **Journal of the Japanese Association for Petroleum Technology**, v.44, p.291-307, 1979.

TANER M. T. Seismic attributes. **CSEG – Canadian Society of Exploration Geophysicists**, v 26 (9), p. 48 - 56, 2001.

TANER, M. T. et al. Seismic attributes revisited. In: **SEG Technical Program Expanded Abstracts 1994**. Society of Exploration Geophysicists, p. 1104-1106, 1994.

TANER, M. Turhan. Attributes Revisited. **Rock Solid Images**. Houston, Texas, p. 3 - 27, 1992.

TANER, M. T.; KOEHLER, F.; SHERIFF, R. E. Complex seismic trace analysis. **Geophysics**, v. 44, n. 6, p. 1041-1063, 1979.

TELFORD, W. M.; GELDART, L. P.; SHERIFF, R.E. Applied Geophysics. 2 ed. Cambridge University Press, 1990.

ZOCOLI, Y. M.; PADOVAN, L. A.; LOSS, J. C.; Extração de hidrato de gás natural: uma simulação de um reservatório. **Latin American Journal of Energy Research – Lajer**, Vila Velha, ES, v. 2, n. 2, p. 18-27, 2015.