

UNIVERSIDADE FEDERAL FLUMINENSE

LAISA DA FONSECA AGUIAR

**ANÁLISE DE ATRIBUTOS NA IDENTIFICAÇÃO DE FEIÇÕES SÍSMICAS  
ASSOCIADAS À PRESENÇA DE HIDRATOS DE GÁS NA BACIA DA FOZ DO  
AMAZONAS**

Niterói

2017

LAISA DA FONSECA AGUIAR

**ANÁLISE DE ATRIBUTOS NA IDENTIFICAÇÃO DE FEIÇÕES SÍSMICAS  
ASSOCIADAS À PRESENÇA DE HIDRATOS DE GÁS NA BACIA DA FOZ DO  
AMAZONAS**

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

2017

LAISA DA FONSECA AGUIAR

**ANÁLISE DE ATRIBUTOS NA IDENTIFICAÇÃO DE FEIÇÕES SÍSMICAS  
ASSOCIADAS À PRESENÇA DE HIDRATOS DE GÁS NA BACIA DA FOZ DO  
AMAZONAS**

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/Petrobrás

---

Prof. Dr. Cléverson Guizan Silva – Universidade Federal Fluminense

---

Prof. Dr. Marco Antonio Cetale Santos – Universidade Federal Fluminense

A282

Aguiar, Laisa da Fonseca

Análise de atributos na identificação de feições sísmicas associadas à presença de hidratos de gás na Bacia da Foz do Amazonas / Laisa da Fonseca Aguiar. – Niterói : [s.n.], 2017.

61 f.

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

1.Sísmica de reflexão. 2.Hidratos de gás. 3.Atributos sísmicos. 4.Amplitude sísmica. 5.Foz do Amazonas. I.Título.

CDD 622.1592

## AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer aos meus pais - meus jujus - Sônia Aguiar e Laumir Aguiar por todo o amor e o apoio incondicionais ao longo dessa jornada. À minha vó, Dalva Fonseca, por toda loucura, doçura, amor e cuidado que você tem por mim. Também gostaria de agradecer a minha irmã mais velha, Pâmella Sorrentino, e ao meu cunhado, Tasso Sorrentino, que mesmo à distância não deixaram me faltar carinho, confiança e amor. Ao Marvin Coutinho, por todo amor e compreensão, e por ser meu ponto de calma em meio à tantas nuvens. Obrigada por seguir em frente junto comigo. E a toda a minha família e aos meus amigos que me acompanharam nessa caminhada e acreditaram em mim.

Agradeço aos meus amigos e colegas da turma de 2012.1 por todo o carinho, abraços, troca de conhecimento e conversas existenciais sobre a vida, o universo e tudo o mais nesses últimos anos. Em especial, gostaria de agradecer às melhores amigas que a vida me apresentou: Camila Lima, Carolina Ferreira, Clara Porto, Danielle Lopes, Deborah Vidal, Eloíse Policarpo, Esthephany Oliveira, Maíra Cordeiro e Monique Chaves. Vocês são meus potinhos de felicidade, minhas pedrinhas preciosas, e eu fico muito feliz por ter compartilhado meus anos de UFF com vocês. Obrigada por estarem comigo nos meus piores e nos melhores momentos. Eu espero que a nossa amizade perdure por muitas eras geológicas. Eu amo muito vocês, gatitas.

Gostaria de agradecer aos meus amigos, amores e melhores presentes do intercâmbio: seja de Fayetteville ou de Los Angeles – vocês são essenciais para mim. Em especial, quero agradecer a Karin Moreira, Janaina Miranda e Abrahão Cardoso por tornarem a minha experiência no Ciência sem Fronteiras, em uma pequena cidadezinha no meio do Arkansas, a melhor da minha vida. Sou ainda mais grata por continuar compartilhando a minha vida com vocês, e por saber que a distância e a saudade nos mantêm mais unidos, fortes e barrados. Também quero agradecer aos meus potinhos de luz, minhas emos e góticas, Lalesca Fravoline e Izabela Cunha, por todos esses anos de amizade, amor e luz. Vamos errar o chão e voar, meus passarinhos.

Agradeço à Horizonte Soluções Geofísicas por todo o conhecimento obtido e pela confiança depositada em mim, e a todas as pessoas que conheci durante o meu tempo na empresa. Vocês mudaram a minha perspectiva e me ajudaram a me tornar uma pessoa melhor. Que vocês floresçam ainda mais. Também quero agradecer ao David Stahle e Kenneth Nelson por serem os melhores professores-amigos do intercâmbio que eu tive, e por todas as conversas sobre universo, ciência e Brasil. Gostaria de agradecer ao meu orientador do estágio, Daniel Franco, do Observatório Nacional, por toda confiança e conhecimento adquiridos ao longo deste último ano. Você é uma das minhas maiores inspirações; ao Ian Muzy, por tornar minhas segundas e quartas no ON mais divertidas; e à Ana Carolina Dominguez e Tatiane Moura por todo suporte nos últimos meses, por sempre me ajudarem nos meus momentos de desespero e por toda empatia e luz que irradiam. Vocês são umas fofas e merecem todo o sucesso do mundo.

Agradeço a todos os professores da Universidade Federal Fluminense por todo o conhecimento ao longo desses anos e por contribuírem para o meu crescimento acadêmico e pessoal. Em especial, quero agradecer aos professores que aceitaram fazer parte desta banca. Sou grata também à ANP por ceder os dados sísmicos de reflexão 2D e ao professor Cléverson Silva por disponibilizá-los para a elaboração desse trabalho. Também gostaria de agradecer imensamente ao meu orientador, Fernando Freire, por me acolher, me incentivar e acreditar em mim, e por tornar este trabalho possível com tanta atenção e dedicação. Você é uma das minhas inspirações como pessoa e profissional: quando eu crescer quero ser igual a você.

E, por fim, agradeço à minha irmã gêmea, minha alma gêmea e melhor amiga: Louise Aguiar. Você é a minha âncora para as estrelas e a melhor parte de mim. Obrigada por sempre acreditar em mim e por estar comigo em todos os momentos da minha vida. Esse diploma também é seu. Obrigada por ser meu *ka-tet* e por todos os peixes.

*“Vá embora e tente continuar a sorrir. Ouça um pouco de rock-and-roll no rádio e vá em direção a toda vida que existe com toda a coragem que você consegue reunir e toda a crença que tem. Seja verdadeiro, seja corajoso, resista.”*

*(Stephen King)*

## RESUMO

A bacia da Foz do Amazonas se localiza na porção norte da Margem Equatorial Brasileira. Situa-se ao longo da costa do estado do Amapá e em parte do litoral noroeste do estado do Pará, tendo sido alvo de diversas pesquisas na área de geociências, destacando-se estudos relacionados à delimitação das áreas de ocorrência dos hidratos de metano. A sísmica de reflexão é uma das ferramentas mais utilizadas para inferir a localização desses hidratos através de refletores sísmicos que simulam o fundo do mar, conhecidos como *Bottom Simulating Reflectors* - BSR. O presente trabalho tem como objetivo identificar essas feições sísmicas, associadas à presença de hidratos de metano na Foz do Amazonas, através da aplicação de atributos sísmicos. A linha sísmica 0239-0047, fornecida pela Agência Nacional de Petróleo (ANP), foi escolhida para a execução deste projeto, onde foram analisados os atributos envelope e segunda derivada do envelope. Estes atributos se mostraram eficazes para destacar o BSR na sísmica. De maneira complementar, também foi realizada uma comparação entre as amplitudes sísmicas do fundo do mar e do BSR para validar a feição sísmica inferida.

**Palavras-chave:** hidratos de gás, Foz do Amazonas, BSR, atributos sísmicos, envelope, segunda derivada do envelope, amplitude sísmica



## ABSTRACT

The Foz do Amazonas basin is located at the northern portion of the Brazilian Equatorial Margin, and it is situated along the coast of Amapá state and the northwest coast of the Pará State. This basin has been the subject of several studies in geosciences, mostly related to the occurrence of methane hydrates. Seismic reflection is one of the most helpful methods for identify gas hydrate occurrence. Well-marked reflectors that simulate the seafloor, known as Bottom Simulating Reflectors (BSR), are used to infer the presence of gas hydrates. This study aims to identify these seismic features associated with the presence of methane hydrates in the Foz do Amazonas basin through the application of seismic attributes. Line 0239-0047 provided by the Agência Nacional de Petróleo - ANP was chosen for the execution of this project, in which the attributes of envelope and second derivative of the envelope were analyzed, highlighting the BSR in the seismic section. Besides, a comparison between seismic amplitudes from the seafloor and BSR was realized to validate the inferred seismic feature.

**Keywords:** methane hydrates, Foz do Amazonas, BSR, seismic attributes, envelope, second derivative of envelope, seismic amplitude

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 1:</b> Mapa da região de estudo com as linhas sísmicas fornecidas pelo Banco de Dados de Exploração e Produção (BDEP). Em destaque a linha 0239-0047 que será estudada neste trabalho .....	3
<b>Figura 2:</b> Carta estratigráfica da bacia da Foz do Amazonas .....	6
<b>Figura 3:</b> Carta estratigráfica com destaque para as sequências deposicionais a partir do Paleoceno .....	7
<b>Figura 4:</b> Estruturas de hidratos de gás natural .....	11
<b>Figura 5:</b> GHSZ em ambientes <i>permafrost</i> (superior) e em ambientes de águas profundas (inferior).....	13
<b>Figura 6:</b> Reservas de hidratos de metano ao redor do mundo (comprovadas ou inferidas) .....	14
<b>Figura 7:</b> Esquema de como podem ser identificados o BSR numa seção sísmica. ....	16
<b>Figura 8:</b> Seção sísmica empilhada, com destaque para o BSR. Notar a inversão de polaridade entre o BSR (pico branco) e o fundo do mar (pico preto) .....	16
<b>Figura 9:</b> Esquema de raios transmitido e refletido a partir de um raio com incidência normal na interface entre duas camadas .....	18
<b>Figura 10:</b> Os atributos sísmicos e sua evolução ao longo dos anos.....	21
<b>Figura 11:</b> Análise de um sinal sísmico complexo.....	22
<b>Figura 12:</b> Fluxograma do Projeto Final em Geofísica II. ....	26
<b>Figura 13:</b> Linha 0239-0047 não interpretada.....	28
<b>Figura 14:</b> Linha 0239-0047 com os trechos do BSR interpretados em branco. A linha contínua representa o refletor BSR mais facilmente identificado, uma vez que ele trunca outros refletores sísmicos. A linha tracejada corresponde ao trecho em que há incerteza quanto à caracterização da feição BSR, uma vez que o BSR estaria paralelo a outros refletores. ....	29
<b>Figura 15:</b> Linha 0239-0047 com os trechos em destaque. O trecho 1 corresponde ao intervalo em que o BSR é evidenciado, enquanto o trecho 2 corresponde ao intervalo em que há incerteza quanto à caracterização do refletor.....	30
<b>Figura 16:</b> Linha 0239-0047 não interpretada com o atributo envelope aplicado. ....	31
<b>Figura 17:</b> Atributo envelope aplicado na linha 0239-0047. A linha contínua alaranjada representa o BSR no trecho em que essa feição pode ser inferida mais facilmente (trecho 1). Já a linha	

tracejada representa o intervalo em que a identificação do BSR na sísmica é menos intuitiva (trecho 2).....	32
<b>Figura 18:</b> Linha 0239-0047 com o atributo envelope empregado. Em destaque, têm-se os prováveis BSRs do trecho 1 e do trecho 2.....	33
<b>Figura 19:</b> Linha 0239-0047 com o atributo segunda derivada do envelope aplicado. ....	34
<b>Figura 20:</b> Linha 0239-0047 com a segunda derivada do envelope. A linha contínua preta realça a feição BSR do trecho 1, enquanto a linha tracejada em vermelho destaca a localização do BSR no trecho 2. ....	35
<b>Figura 21:</b> Linha 0239-0047 com o atributo segunda derivada do envelope aplicado. Em destaque, têm-se o provável BSR do trecho 1 (linha contínua) e do trecho 2 (linha tracejada).....	36
<b>Figura 22:</b> Linha 0239-0047 com os trechos em destaque. O trecho 1 corresponde ao intervalo em que o BSR é mais facilmente identificado porque corta os refletores não-paralelos, enquanto o trecho 2 corresponde ao intervalo em que há maior incerteza quanto à caracterização do mesmo.....	37
<b>Figura 23:</b> Planilha comparativa entre as amplitudes do fundo do mar e da feição BSR no trecho 1. É possível observar a inversão da polaridade do sinal, apesar dessa inversão não ser modular.....	38
<b>Figura 24:</b> Comparação de amplitudes sísmicas: Fundo do mar e BSR - Trecho 1.....	39
<b>Figura 25:</b> Planilha comparativa entre as amplitudes do fundo do mar e da feição BSR no trecho 2. Como visto também no trecho 1, nota-se a inversão da polaridade do sinal.....	40
<b>Figura 26:</b> Comparação de amplitudes sísmicas: Fundo do mar e BSR - Trecho 2.....	41

## SUMÁRIO

AGRADECIMENTOS .....	V
RESUMO.....	VIII
ABSTRACT.....	IX
LISTA DE FIGURAS.....	X
1 INTRODUÇÃO .....	1
1.1 Objetivos.....	2
2 ÁREA DE ESTUDO .....	3
2.1 Contexto Geológico da bacia da Foz do Amazonas .....	4
2.1.1 Cone do Rio Amazonas.....	4
2.2 Evolução tectono-sedimentar da Bacia da Foz do Amazonas .....	5
3 HIDRATOS DE GÁS NATURAL .....	10
3.1 Definição de hidratos de gás natural.....	10
3.2 Formação dos hidratos de gás natural.....	11
3.3 Ocorrência dos hidratos de gás natural.....	14
3.4 Identificação dos hidratos de gás natural.....	15
4 SÍSMICA DE REFLEXÃO .....	17
4.1 Ondas sísmicas .....	17
4.2 Reflexão e transmissão de ondas sísmicas normalmente incidentes .....	18
5 ATRIBUTOS SÍSMICOS .....	20
5.2 Classificação dos atributos sísmicos.....	23
5.3. Envelope e Segunda derivada do envelope .....	24
6 MÉTODOS.....	26
6.1 Importação dos dados sísmicos .....	26
6.2 Controle de qualidade das linhas sísmicas .....	27

6.3	Interpretação sísmica .....	27
6.4	Aplicação de atributos sísmicos e comparação de amplitudes .....	27
7	RESULTADOS E DISCUSSÕES .....	28
7.1	Aplicação de atributos sísmicos .....	30
7.2	Comparação das amplitudes .....	37
8	CONCLUSÕES.....	42
9	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	43
10	REFERÊNCIAS COMPLEMENTARES .....	48

# 1 INTRODUÇÃO

A Bacia da Foz do Amazonas tem sido estudada por geocientistas, principalmente em aspectos ligados à evolução tectono-sedimentar, ao estudo da tectônica gravitacional e à ocorrência de hidrocarbonetos (óleo e gás). A evolução desta bacia da margem equatorial brasileira está atrelada ao processo de formação do Oceano Atlântico e sua sedimentação se estende da margem continental ao Cone Profundo do Amazonas (Soares *et al.*, 2008).

A ocorrência de hidratos de gás natural na Bacia da Foz do Amazonas, bem como em outras regiões ao redor do mundo, é alvo de interesse crescente em virtude do seu potencial energético. Destacam-se também os aspectos ambientais relativos aos hidratos de metano: suas consequências no clima do planeta, como intensificador do efeito estufa, e no contexto de instabilidade do fundo marinho, o que pode desencadear movimentos de massa. Estes aspectos impulsionam a busca por novas pesquisas nesta área científica.

A presença dos hidratos de metano pode ser inferida através de dados de sísmica de reflexão, uma vez que refletores sísmicos paralelos e que simulam o fundo do mar, conhecidos como BSRs (*Bottom Simulating Reflectors*), coincidem com a base da zona de estabilidade desses hidratos, o que gera um refletor com polaridade negativa em relação ao fundo marinho (Kvendolven, 1993; Hyndman & Spence, 1992). Assim, esses refletores bem marcados funcionam como uma assinatura sísmica para identificar as áreas de ocorrência dos hidratos (Joshi *et al.*, 2017).

O uso de atributos sísmicos permite extrair informações dos dados sísmicos sobre a geometria e os parâmetros físicos de subsuperfície, a fim de obter um conhecimento mais detalhado sobre o contexto geológico do prospecto sísmico (Taner, Koehler & Sheriff, 1979; Taner, 1994). A escolha do atributo a ser aplicado depende da característica específica, da própria fundamentação matemática e do conhecimento que pode ser obtido (Chen & Sidney, 1997).

Este estudo visa utilizar atributos sísmicos para identificar e verificar a presença de feições sísmicas relacionadas à ocorrência de hidratos de metano na bacia da Foz do Amazonas, utilizando o *software* livre de interpretação sísmica OpendTect, onde foram carregados os dados de sísmica de reflexão 2D fornecidos pelo Banco de Dados de Exploração e Produção (BDEP) da Agência Nacional de Petróleo (ANP).

## 1.1 Objetivos

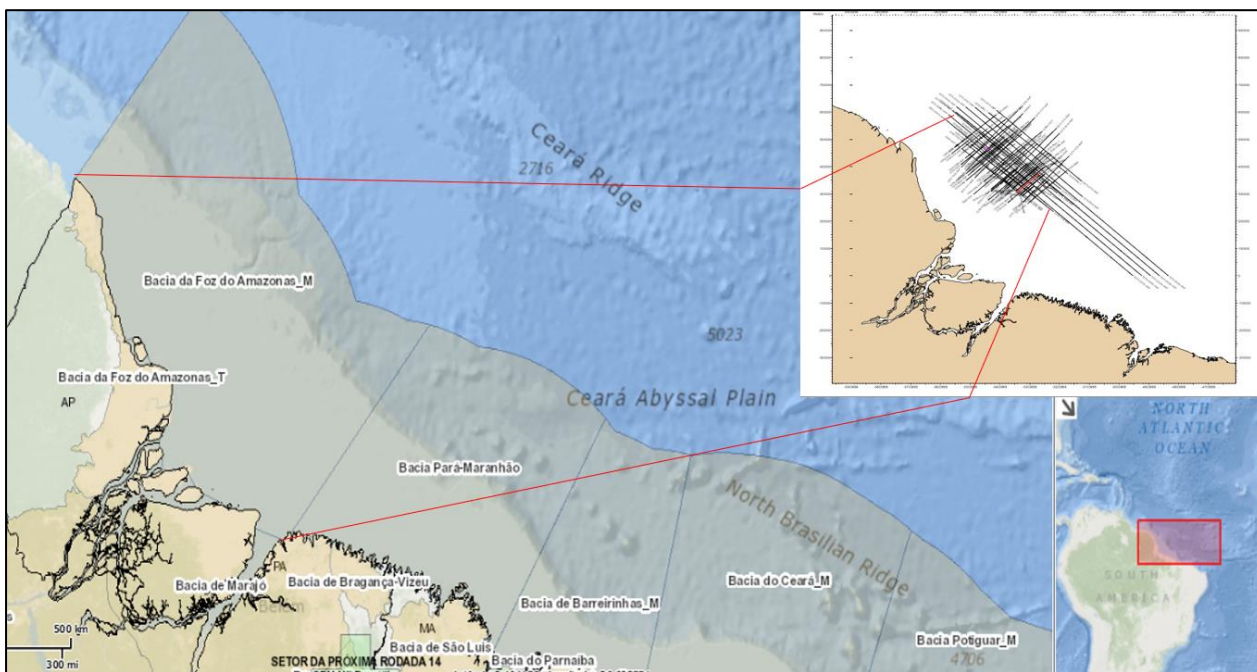
Este trabalho tem por finalidade identificar feições sísmicas associadas à presença de hidratos de metano na Foz do Amazonas através da análise de atributos sísmicos.

Como objetivos específicos, pretende-se:

- I. Identificar e mapear o fundo do mar e o BSR (*Bottom Simulating Reflector*) em uma seção sísmica específica (0239-0047);
- II. Aplicar diversos atributos sísmicos através do *software OpendTect*;
- III. Escolher os atributos que melhor destacaram os BSRs;
- IV. Fazer uma comparação entre as amplitudes sísmicas do fundo do mar e dos BSRs a fim de validar a localização do *Bottom Simulating Reflector* na sísmica.

## 2 ÁREA DE ESTUDO

A bacia da Foz do Amazonas está localizada na porção norte da Margem Equatorial Brasileira e ocupa uma área total de aproximadamente 268.000km<sup>2</sup>. Está situada ao longo da costa do estado do Amapá e em parte do litoral noroeste do estado do Pará, conforme mostra a **Figura 1** (Brandão & Feijó, 1994; Figueiredo *et al.*, 2007). A bacia da Foz do Amazonas possui uma parte emersa e outra submersa. Sua área marítima abrange uma área de 250.000 km<sup>2</sup>, incluindo a plataforma continental, talude e região de águas profundas, também conhecida como Cone do Rio Amazonas. De acordo com Bruno (1987), 55% da área ocupada por esta bacia corresponde à plataforma continental, que se estende até a cota batimétrica de -200m, sendo 45% corresponde à região de águas profundas.



**Figura 1:** Mapa da região de estudo com as linhas sísmicas fornecidas pelo Banco de Dados de Exploração e Produção (BDEP). Em destaque a linha 0239-0047 que será estudada neste trabalho. Fonte: WebMaps (Acessado em 28 de junho de 2017).



## **2.1 Contexto Geológico da bacia da Foz do Amazonas**

A evolução tectônica da bacia da Foz do Amazonas, de margem passiva, está associada ao processo de ruptura do supercontinente Gondwana, no Aptiano, à separação das placas tectônicas Sul-Americana e Africana e à conseqüente formação do Oceano Atlântico (Carvalho, 2008).

O processo de evolução das bacias da margem equatorial brasileira, incluindo a bacia da Foz do Amazonas, pode ser dividido em 4 estágios de deformação, sendo estes 1) extensão NE-SW, no Triássico-Jurássico; 2) extensão E-W no Neocomiano; 3) duas fases de cisalhamento dextral durante o Aptiano-Cenomaniano, formando o “Corredor Transtraccional Dextral”, que se estende da Foz do Amazonas até a Bacia de Potiguar e 4) espalhamento oceânico durante o Cretáceo Superior ao Cenozoico (Azevedo, 2001; Carvalho, 2008).

Segundo Soares *et al.* (2008), o arcabouço estrutural da bacia da Foz do Amazonas pode ser explicado através de três eventos tectônicos. O primeiro evento, do Neotriássico, está associado à formação do Oceano Atlântico Central, o qual formou um hemigráben alongado e limitado por falhas normais de direção NW-SE, cujo magmatismo culminou na formação das rochas vulcânicas da Formação Calçoene. O segundo evento tectônico ocorreu no Eocretáceo, formando um gráben alongado que contém sedimentos da Formação Cassiporé. O terceiro evento começou no Albiano e está ligado ao processo final de separação das placas Africana e Sul-Americana. Neste evento houve a instalação da margem passiva e o começo da instalação de falhas transformantes de direção ENE-WSW, que seccionaram os grábens.

### **2.1.1 Cone do Rio Amazonas**

O Cone do Rio Amazonas (ou Leque Submarino do Amazonas) é a feição morfológica de maior expressão na bacia da Foz do Amazonas (Araújo *et al.*, 2009), cuja formação está associada a uma elevada taxa de sedimentação siliciclástica prográdante, a partir do Mioceno Médio, oriunda da implantação do sistema de drenagem do rio Amazonas para o Oceano Atlântico, como resultado do soergimento dos Andes (Figueiredo *et al.*, 2007; Pasley, 2004).

O Leque do Amazonas se estende cerca de 700 km a partir da região da quebra de plataforma continental (Rimington *et al.*, 2000) e alcança cotas batimétricas entre -1000 m e -4800 m, com um gradiente de 0,4° (Rimington *et al.*, 2000; Araújo *et al.*, 2009; Da Silva, 2008). Cobbold

*et al.* (2004) estimaram que o Cone apresenta uma espessura de aproximadamente 10 km, com uma taxa de sedimentação média de 1m/ka.

Estudos realizados por Damuth & Kumar (1975) delimitaram o cone do Amazonas em três compartimentos de acordo com mudanças no gradiente: superior (até -3000 m de cota batimétrica), médio (até -4200 m) e inferior (até -4800 m). Vários autores apontam a existência de depósitos de movimento de massa ligados à deslizamentos gravitacionais na região mais central do Cone, sendo a dissociação dos hidratos de metano um possível gatilho para esses deslizamentos (Piper *et al.*, 1997a; Araújo *et al.*, 2009; Kowsmann, 2002).

## **2.2 Evolução tectono-sedimentar da Bacia da Foz do Amazonas**

O preenchimento sedimentar desta bacia é composto por duas sequências estratigráficas das fases rifte e de margem passiva, de forma que a sequência da fase rifte é composta pelas formações Cassiporé (inferior ao Cenomaniano) e Calçoene (inferior ao Jurássico). A sequência da margem passiva é dividida em Pré-Amazonas (Cenomaniano ao Mioceno) e no Cone do Amazonas (Mioceno ao Recente) (Soares *et al.*, 2008 – **Figura 2**).

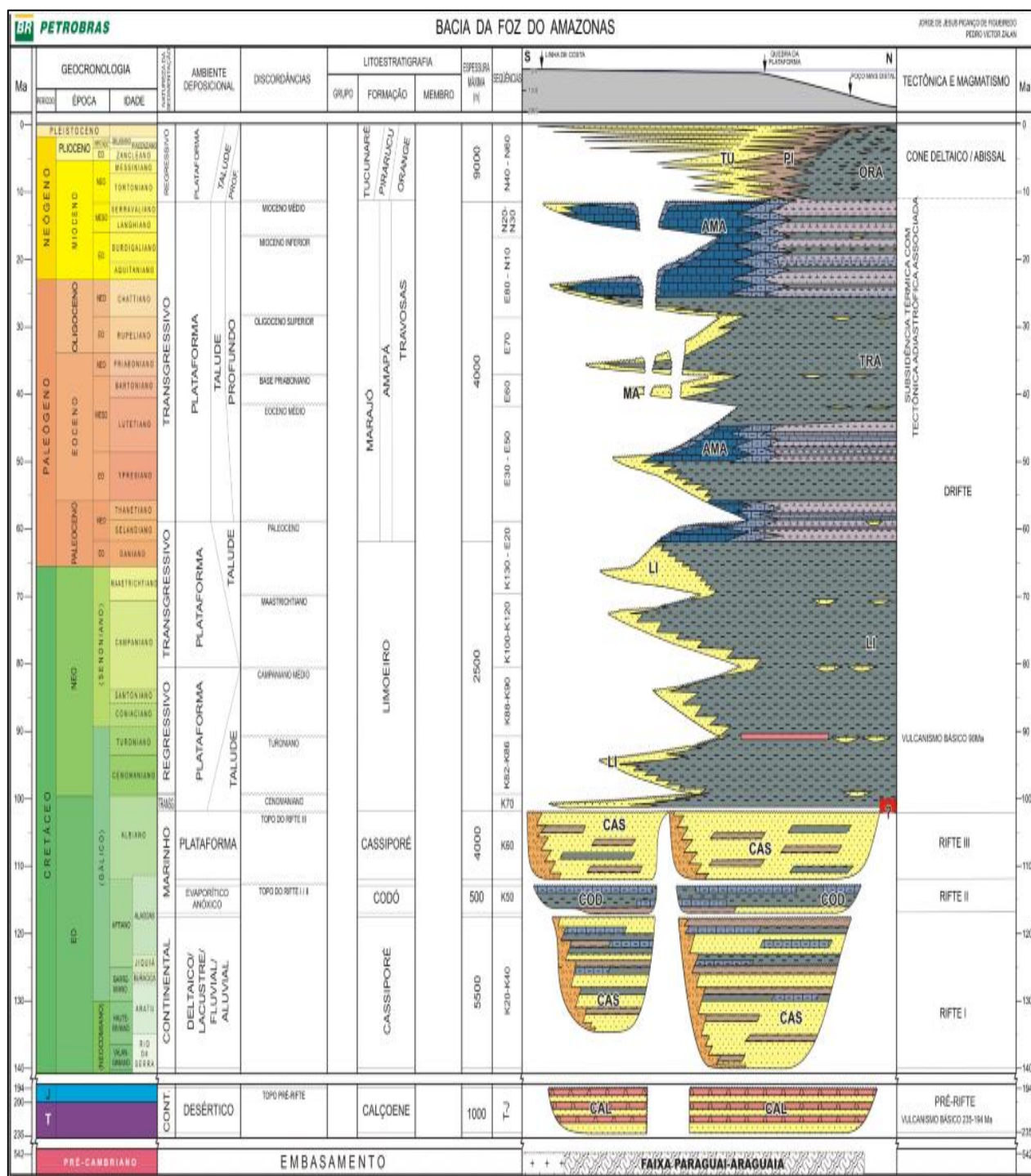
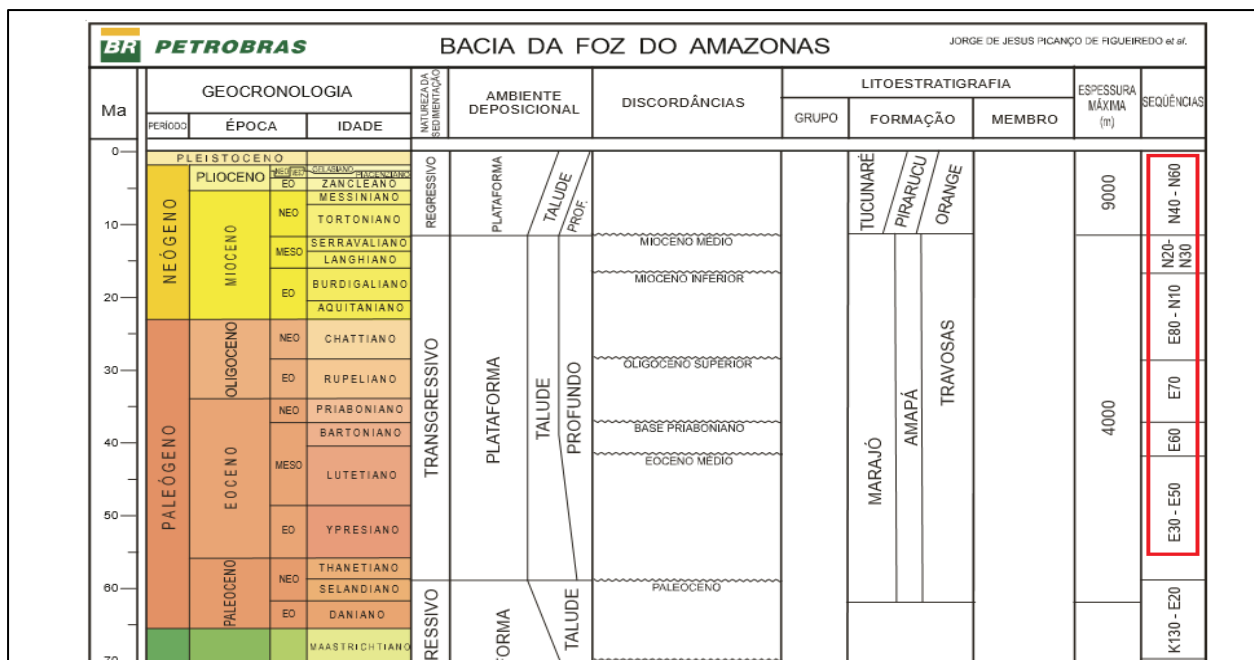


Figura 2: Carta estratigráfica da bacia da Foz do Amazonas. Fonte: Figueiredo *et al.* (2007).

Como este trabalho visa estudar a ocorrência dos hidratos de gás, este tópico abordará apenas os pacotes sedimentares mais recentes, a partir do Eoceno médio (~45 Ma) no Paleógeno (Figura 3).



**Figura 3:** Carta estratigráfica com destaque para as seqüências deposicionais a partir do Paleoceno. Fonte: Modificado de Figueiredo *et al.* (2007).

De acordo com Figueiredo *et al.* (2007), a fase rifte final da bacia da Foz do Amazonas ocorreu no Eoalbio quando foi iniciada a sedimentação marinha siliciclástica que aconteceu durante todo o Neocretáceo até o Neopaleoceno, quando foi interrompida. A partir do Neopaleoceno ocorreu a instalação de uma plataforma mista, composta por sedimentos carbonáticos e siliciclásticos. Esta plataforma prosseguiu durante o Paleógeno até ser interrompida pela chegada dos sedimentos terrígenos provenientes do Rio Amazonas, a partir do Neomioceno, propiciando a formação do Cone do Rio Amazonas. O estudo deste trabalho se concentrará a partir do Mioceno, quando o Cone se instalou.

Esta seção seguirá a classificação proposta por Figueiredo *et al.* (2007), a partir do Thanetiano (~58 Ma):

- Sequência E30 – E50

Teve duração de aproximadamente 18 Ma, a partir da discordância no Thanetiano até a discordância no Eoceno médio (Lutetiano ~42 Ma). Possui uma complexidade deposicional associada à chegada de sedimentos siliciclásticos na porção sudeste, interrompendo, regionalmente, o desenvolvimento de carbonatos que se propagavam desde o Neopaleoceno. A deposição desses sedimentos teve como consequência a diferenciação deposicional na bacia e a formação de uma plataforma mista (carbonática/siliciclástica) na metade da porção sudeste, paralela a uma plataforma carbonática na porção noroeste. Assim, essa sequência tem no seu início um predomínio de deposição de carbonatos, tendo sido substituída por uma sedimentação siliciclástica, permanecendo até o fim do Ypresiano, quando a deposição dos carbonatos voltou a predominar por 2/3 do Lutetiano. Ao final deste estágio e até o final da sequência E30-E50, os sedimentos siliciclásticos foram predominantes.

- Sequência E60

Esta sequência começa a partir da discordância do Lutetiano e se estende até o limite do Bartoniano e do Priaboniano (~37 Ma). Foi depositada majoritariamente por sedimentos siliciclásticos na porção SE, enquanto a porção NO constitui-se, principalmente, por sedimentos carbonáticos.

- Sequência E70

Esta sequência é limitada na base do Priaboniano até a base do Chatiano (~28,5 Ma) e confirma que há uma boa correlação entre os eventos geológicos obtidos através da plataforma com os observados na seção dos sedimentos depositados em águas profundas da bacia. Sua estratigrafia é predominantemente composta por sedimentos terrígenos na parte SE e sedimentos carbonáticos na região NO.

- Sequência E80-N10

Possui duração de cerca de 12 Ma, com limite no topo da discordância do Chatiano e na base do Burdigaliano (~16,5 Ma). Foi depositada essencialmente por carbonatos, com exceção da sua base. Nesta sequência ocorreu a máxima inundação da bacia.

- Sequência N20-N30

Durante esta sequência ocorreu a progradação dos sistemas deposicionais costeiros depois da inundação máxima do Eomioceno, registrada nas porções proximais da margem equatorial. De forma paralela, nas regiões distais, permaneceu a deposição de sedimentos carbonáticos.

- Sequência N40-N60

Esta é a última sequência da bacia da Foz do Amazonas, iniciada a cerca de 10,7 Ma, continuando até o Presente. Esta sequência contém o Cone do Amazonas e corresponde a mais de 50% de volume de sedimentos depositados na bacia desde o final do Albiano.

### 3 HIDRATOS DE GÁS NATURAL

O interesse científico nos hidratos de gás vem crescendo consideravelmente nos últimos anos, a partir da década de 60, principalmente como uma fonte alternativa de energia. Além disso, o estudo dos hidratos de gás também se torna essencial no entendimento das mudanças climáticas sofridas no planeta, porque podem ter um papel significativo no processo do aquecimento global, graças à liberação do gás metano na atmosfera. Outras motivações para o entendimento dos gases de metano estão relacionadas à sua importância no estudo de estabilidades de taludes e em estudos paleoambientais. (Sloan, 2003; Clennell, 2000; Freire, 2017).

Assim, esta seção busca abordar alguns aspectos cruciais dos hidratos de gás, como definição, formação/origem, ocorrência e identificação.

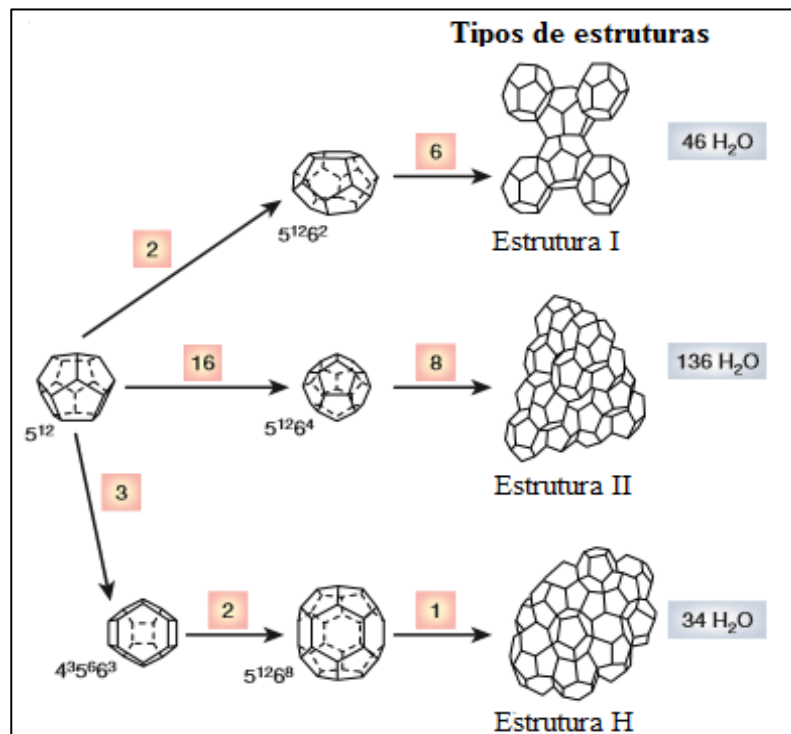
#### 3.1 Definição de hidratos de gás natural

Hidratos de gás natural são substâncias sólidas que são formadas a partir da combinação de água e gás (comumente metano), que ocorrem em condições propícias de temperatura e pressão, compreendidas na zona de estabilidade dos hidratos de gás (*Gas Hydrate Stability Zone - GHSZ* (Kvendolven, 1998 *apud* McConnell & Kendall, 2002; Sloan, 2003). Essas substâncias são parecidas com gelo ou neve compactada, sendo estáveis quando em baixa temperatura e alta pressão (Sloan, 2003). No ambiente em que as condições de pressão são satisfeitas e a concentração de gases for suficiente, os hidratos podem se formar mesmo quando a temperatura estiver acima do ponto de fusão da água (Edmonds *et al.*, 1996 *apud* Freire, 2010).

Os hidratos de metano são formados quando as moléculas de metano, em contato com a água nas condições adequadas de temperatura (menor do que 300 K) e pressão (maior do que 0.6 MPa), são “encapsuladas” por uma estrutura cristalina de água congelada (Sloan, 2003). Isso faz com que a molécula de gás se aprisione no interior desta estrutura e, por esta razão, esses gases também são conhecidos como clatratos (Freire, 2010).

De acordo com Sloan (2003), há 3 tipos de estruturas de hidratos de gás: 1) estrutura cúbica I, que contém moléculas de gases pequenas, sendo esta estrutura mais abundante em ambientes naturais; 2) estrutura cúbica II, que hospeda gases relativamente maiores e ocorre mais comumente em ambientes artificiais (laboratório e dutos); 3) estrutura hexagonal H, que pode ocorrer em

ambos os ambientes, mas apenas com um misto de moléculas de gás pequenas e grandes. Além disso, os hidratos podem ser simples, se formados por apenas uma molécula de gás; duplos, com mais de um componente gasoso, separados por uma cavidade; e mistos, se formados por mais de uma molécula de gás em uma mesma cavidade. A **Figura 4** exemplifica os tipos de estruturas de hidratos.



**Figura 4:** Estruturas de hidratos de gás natural. Modificado de Sloan, 2003.

### 3.2 Formação dos hidratos de gás natural

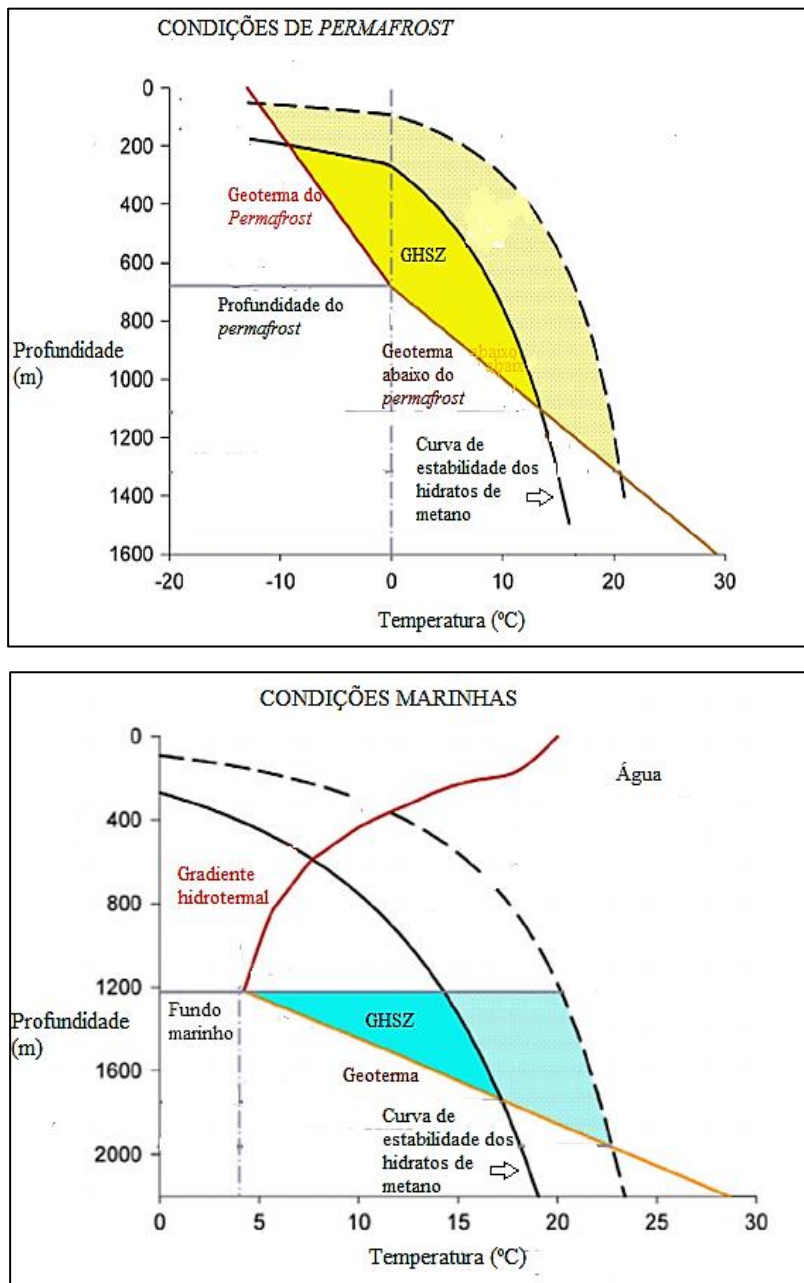
O metano contido sobre a forma de hidratos pode ter origem termogênica ou biogênica. A origem termogênica está ligada à transformação térmica da matéria orgânica em grandes profundidades, onde a temperatura pode atingir temperaturas acima de  $60^\circ\text{C}$ , enquanto a origem biogênica do metano é associada à deterioração da matéria orgânica por microrganismos decompositores, geralmente a temperaturas menores que  $60^\circ\text{C}$  (Paull *et al.*, 1994 *apud* Clennell, 2000). Desta forma, compreende-se que o teor de matéria orgânica é relevante para a origem dos



hidratos de metano. Assim, os hidratos de gás biogênico não são comuns em regiões distantes do continente (zonas abissais) ou em regiões com baixa taxa de sedimentação (Paull *et al.*, 1994 *apud* Clennell, 2000), salvo nos hidratos relacionados às exsudações de gases termogênicos (Freire, 2010).

De acordo com Kvenvolden (1993), as condições apropriadas de temperatura e pressão para a formação dos hidratos de metano comumente ocorrem em dois ambientes: *permafrosts*, em regiões árticas, ou em bacias de águas profundas, adjacentes às plataformas continentais.

A zona de estabilidade dos hidratos de gás (GHSZ) é definida em termos de temperatura e pressão, embora haja outros fatores que também são importantes para a formação dos hidratos em ambientes naturais. Segundo diversos estudos publicados por Makogon (1972, 1974, 1982, 2010), demais critérios para a formação destas substâncias dependem das condições termodinâmicas, da variação das geotermas na zona de estabilidade, do grau de saturação/salinidade e da temperatura da água. Além disso, a composição do gás, as condições de porosidade/permeabilidade e os parâmetros físico-químicos dos sedimentos que abrigam os hidratos nos poros intersticiais também influenciam na ocorrência e estabilidade dos clatratos. A **Figura 5** representa a GHSZ nos dois ambientes de ocorrência dos hidratos.

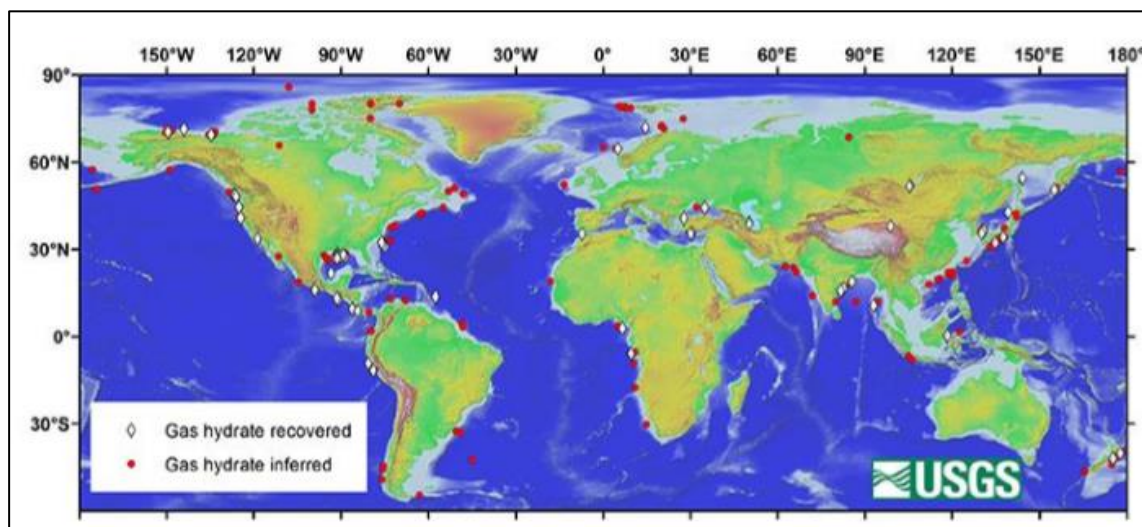


**Figura 5:** GHSZ em ambientes *permafrost* (superior) e em ambientes de águas profundas (inferior). Fonte: Modificado de Chong *et al.* (2016).

### 3.3 Ocorrência dos hidratos de gás natural

A ocorrência dos hidratos de metano, como abordada anteriormente, está intimamente relacionada às condições de temperatura e pressão adequadas para a formação dos mesmos. Além disso, é necessário um volume suficiente de metano para que os clatratos sejam formados; esses fatores restringem as regiões que satisfazem as condições de estabilidade desses hidratos (Kvenvolden, 1993), sendo mais comumente encontradas em regiões polares, regiões de águas profundas, plataformas continentais e taludes.

Na **Figura 6** é possível observar a distribuição mundial de reservas de hidratos de gás natural, sendo estas já comprovadas (*recovered*) ou simplesmente inferidas (*inferred*), através de dados obtidos pela *U. S. Geological Survey* (USGS) em 2001.



**Figura 6:** Reservas de hidratos de metano ao redor do mundo (comprovadas ou inferidas). Fonte: USGS, 2001.

No Brasil, apenas uma área de ocorrência dos hidratos de metano foi comprovada. Trata-se da região conhecida como no Cone do Rio Grande, na bacia de Pelotas (Miller *et al.*, 2015). Os hidratos do Cone do Amazonas, na bacia da Foz do Amazonas, ainda não possuem registros publicados, sendo inferidos apenas pela presença de BSR.

### 3.4 Identificação dos hidratos de gás natural

A identificação e a caracterização de reservas de hidratos de metano podem ser feitas através de estudos geoquímicos, métodos diretos (testemunhos, amostras de fundo) ou indiretos (sísmica de reflexão, ecobatímetro, perfilagem geofísica de poços e métodos geoeletricos) (Miller *et al.*, 2015; Freire, 2017). Outras maneiras indiretas de identificar os hidratos de gás, associadas às exsudações de gás natural ou vulcões de lama, são realizadas através do imageamento de alta resolução do fundo marinho e através do uso de *Remoted Operated Vehicle* (ROV) e de testemunhadores a pistão (Freire, 2017).

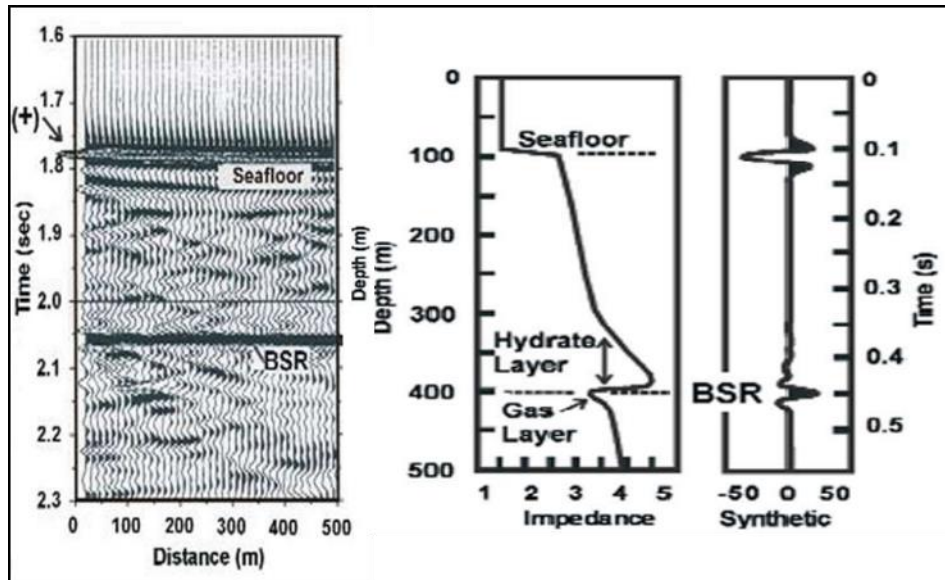
De maneira geral, dos métodos indiretos, o método da sísmica de reflexão é o mais usado para a inferir a presença de hidratos de metano, através de feições sísmicas denominadas *Bottom Simulating Reflectors* (BSR), *blanking*, *mounds* e *pockmarks* (Shipley *et al.*, 1979, Katzman *et al.*, 1994, Gehrman *et al.*, 2009 *apud* Miller *et al.*, 2015, Freire *et al.*, 2011).

No perfil sísmico, *blanking* é uma feição sísmica em que ocorre uma zona de branqueamento da seção devido à presença de gases, o que causa uma redução nos contrastes de impedância acústica, resultando na diminuição das amplitudes dos refletores sísmicos (Lee *et al.*, 1993 *apud* Rosa *et al.*, 2006).

*Pockmarks* (crateras) são identificadas nas seções sísmicas em formato de “V” e estão associadas a processos de escape do gás que estava contido em subsuperfície, que podem ocorrer devido à dissociação desses hidratos de gás. O processo de escape acontece por meio de zonas de falhas ou fraturas, formando uma espécie de “chaminé” que se estende do reservatório até o leito marinho (Hovland & Judd, 1988 *apud* Rosa *et al.*, 2006; Clennel, 2001).

Finalmente, a presença dos hidratos de gás é frequentemente detectada através do BSR, que é um refletor de alta amplitude que possui polaridade invertida em relação ao fundo do mar, marcando a profundidade máxima da zona de estabilidade dos hidratos de metano (Kvendolven, 1993; Kvendolven & Lorenson, 2001). A **Figura 7** traz um esquema de como podem ser identificados estes refletores anômalos. Na **Figura 8**, tem-se um exemplo de um BSR numa seção sísmica. Inferior à curva de estabilidade, através de perfurações realizadas pela *Ocean Drilling Program* (ODP), sugere-se a presença de uma zona contendo sedimentos com gás livre, menos

densa e de baixa velocidade sísmica, o que gera um contraste de impedância acústica responsável pela formação do BSR. (Singh *et al.*, 1993 *apud* Freire, 2013; McConnell & Kendall, 2002).



**Figura 7:** Esquema de como podem ser identificados o BSR numa seção sísmica. Fonte: Freire, 2017.



**Figura 8:** Seção sísmica empilhada, com destaque para o BSR. Notar a inversão de polaridade entre o BSR (pico branco) e o fundo do mar (pico preto). Modificado de Pintas, 2011.

## 4 SÍSMICA DE REFLEXÃO

Como visto anteriormente, a interpretação das seções sísmicas possui um papel fundamental na identificação dos hidratos de metano.

O levantamento sísmico é o método geofísico em que as ondas sísmicas, naturais ou artificiais, se propagam em subsuperfície. Instrumentos espalhados ao longo da superfície do levantamento detectam os tempos de chegada dessas ondas. Esses tempos de percurso podem ser convertidos em valores de profundidade, o que permite obter informações das estruturas geológicas em subsuperfície (Kearey *et al.*, 2009).

### 4.1 Ondas sísmicas

Ondas sísmicas se propagam radialmente a partir de uma fonte sísmica (Kearey *et al.*, 2009) e podem ser divididas em ondas de corpo (compressionais ou de cisalhamento) e ondas superficiais (Rayleigh e Love). A propagação dessas ondas depende das propriedades elásticas das rochas (Telford *et al.*, 1990).

As ondas compressionais (primárias) ou ondas P se propagam por compressão e expansão paralela à direção de propagação da onda, enquanto as ondas de cisalhamento (secundárias) ou ondas S se propagam por meio de cisalhamento numa direção perpendicular à direção da onda.

A razão entre as velocidades de propagação das ondas compressionais e de cisalhamento pode ser definida pela equação abaixo, obtida através de sua relação com os módulos elásticos e as propriedades físicas do meio, sendo  $\sigma$  a razão de Poisson para determinado meio.

$$\frac{Vp}{Vs} = \left[ \frac{2(1 - \sigma)}{1 - 2\sigma} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (1)$$

Assim, Kearey *et al.* (2009) concluem que as ondas P são mais usadas para o levantamento sísmico, porque são mais rápidas do que as ondas S (logo são as primeiras a serem registradas num sismograma) e porque tornam mais simplificadas as técnicas da aquisição.

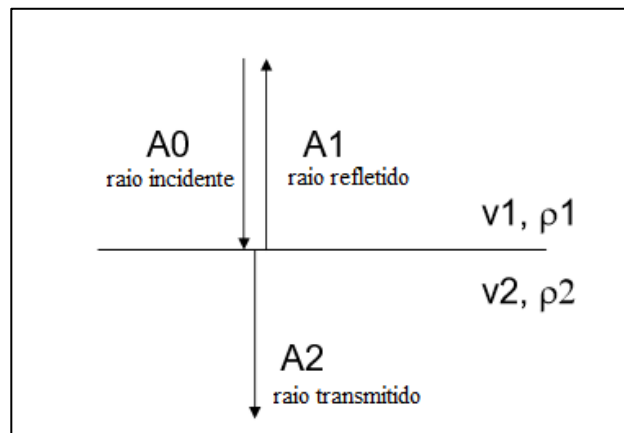
As ondas de superfície são assim denominadas pois se propagam ao longo das superfícies que o limitam. As ondas Rayleigh se propagam ao longo de uma interface entre dois meios sólidos distintos, e as partículas possuem um movimento elíptico perpendicular ao plano e na direção de

propagação da onda. Quanto às ondas Love (ou de Love), são ondas de cisalhamento em que as partículas se propagam na direção da superfície e transversal à direção de propagação (Kearey *et al.*, 2009).

#### 4.2 Reflexão e transmissão de ondas sísmicas normalmente incidentes

Segundo Ayres (2000), através da geração das ondas sísmicas (elásticas) e analisando o tempo de chegada em diferentes pontos, é possível determinar a distribuição de velocidades e interfaces em que a onda foi refletida ou refratada.

Numa interface entre duas camadas de rochas há uma mudança na velocidade de propagação, resultado das diferentes propriedades físicas dessas camadas. Nessa interface, a energia contida em um pulso incidente pode ser dividida em pulsos transmitidos ou refletidos (**Figura 9**) e a amplitude desses pulsos vai depender da velocidade, densidade das duas camadas e do ângulo de incidência na interface (Kearey *et al.*, 2009).



**Figura 9:** Esquema de raios transmitido e refletido a partir de um raio com incidência normal na interface entre duas camadas. Modificado de Kearey *et al.*, 2009.

Assim, quando o raio incidente encontra uma impedância acústica ( $Z$ ) diferente do meio em que está sendo propagado, pode ser inferido que ocorreu uma mudança de litologia. A energia dos raios refletido e transmitido depende do contraste de impedância acústica entre duas camadas, sendo a impedância acústica de uma rocha definida como o produto da velocidade no meio ( $v$ ) pela densidade ( $\rho$ ):

$$Z = \rho v \quad (2)$$

Dessa forma, tem-se a seguinte forma simplificada da relação da amplitude do sinal refletido, definida para ângulos de incidência normal à superfície refletora (Sharma, 1997 *apud* Ayres, 2000): o coeficiente de reflexão (R) define a quantidade de energia que é refletida e pode ser escrita como a razão entre a amplitude do sinal refletido e a amplitude da onda incidente, ou seja, depende do contraste de impedância acústica entre o meio 1 (Z1) e o meio 2 (Z2) (Kearey *et al.*, 2009; Telford *et al.*, 1990).

$$R = \frac{A1}{A0} = \frac{\rho_2 v_2 - \rho_1 v_1}{\rho_2 v_2 + \rho_1 v_1} = \frac{Z2 - Z1}{Z2 + Z1} \quad (3)$$

Assim, essas interfaces aparecem nos registros sísmicos como horizontes refletores ou apenas refletores sísmicos. Pode-se dizer, então, que cada refletor corresponde a uma camada geológica (Ayres, 2000).

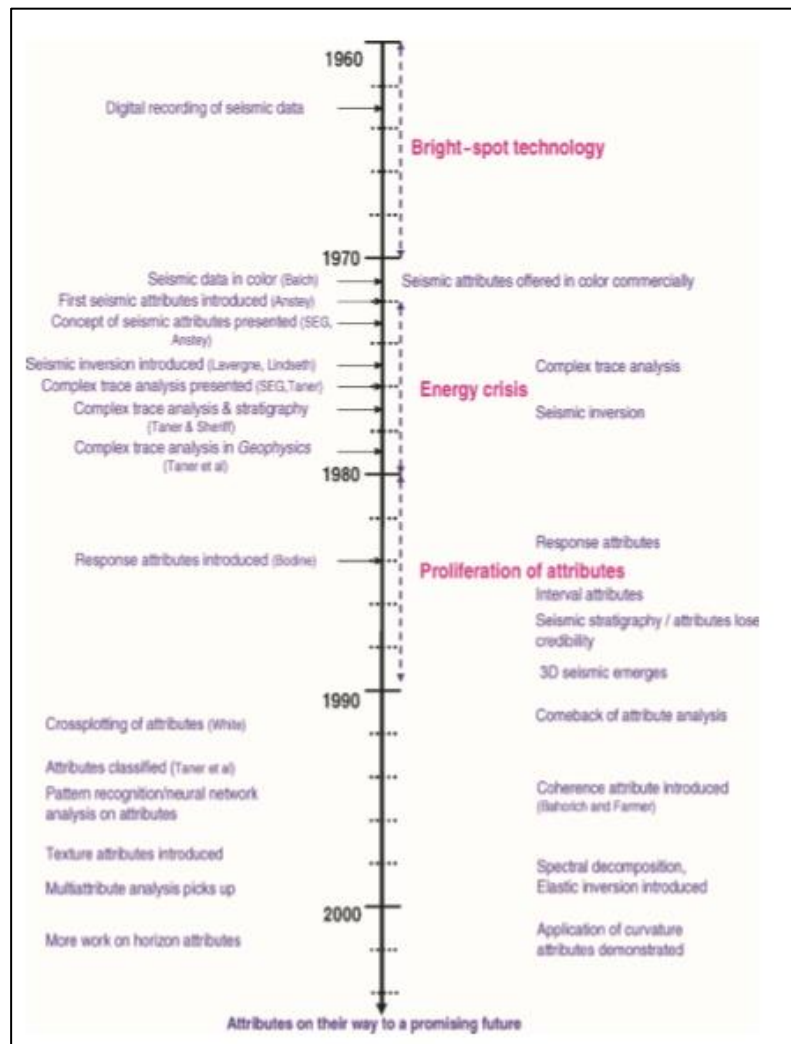
O *Bottom Simulating Reflector* é um refletor sísmico que simula o fundo marinho, possui amplitude elevada e polaridade invertida. Corresponde ao contraste de impedância acústica entre a camada de estabilidade dos hidratos (zona mais densa, com velocidade mais alta) e a camada inferior à esta curva de estabilidade (zona com bolhas de gás livre, menos densa), onde a velocidade é mais baixa, o que gera um refletor com polaridade negativa em relação àquele referente ao fundo do mar (Singh *et al.*, 1993 *apud* Freire, 2013; McConnell & Kendall, 2002).



## 5 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). O desenvolvimento da fundamentação teórica dos atributos sísmicos acompanha a evolução da sísmica de exploração e está atrelada aos avanços de diversas tecnologias de computação, como a transição para o formato digital dos dados sísmicos que ocorreu nos meados dos anos 60. Isso possibilitou a identificação e a análise de reflexões fortes com amplitudes sísmicas elevadas, que posteriormente seriam denominadas de “*bright spots*” e associadas à presença de gás (Chopra & Marfurt, 2005). Em 1971, Balch teve reconhecimento por publicar na *GEOPHYSICS* o primeiro artigo que exibiu dados sísmicos em cores, o que proporcionou significantes melhorias na análise desses dados, assim marcando o início de uma nova fase para a interpretação sísmica (Chopra & Marfurt, 2005).

Segundo Taner (1994, 2001), os atributos foram introduzidos no começo dos anos 70, onde inicialmente eram utilizados apenas como ferramenta de visualização. Essa perspectiva rapidamente evoluiu para o uso dos mesmos na interpretação qualitativa da geometria e dos parâmetros físicos de subsuperfície. Mais recentemente, com a calibração de dados sísmicos com dados de poços, o uso desses atributos busca ter uma abordagem mais quantitativa das características sísmicas de interesse. A **Figura 10** traz uma linha do tempo mais detalhada sobre a evolução dos atributos sísmicos nas últimas décadas.

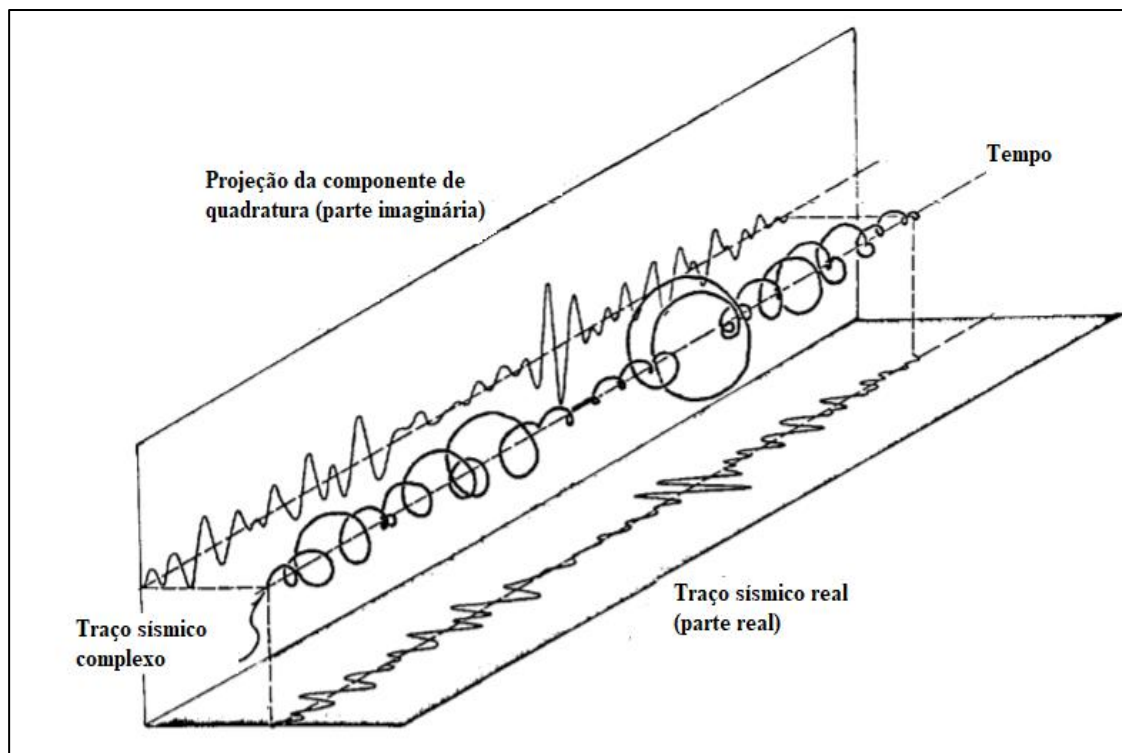


**Figura 10:** Os atributos sísmicos e sua evolução ao longo dos anos. Fonte: Chopra & Marfurt, 2005.

Taner (1994, 2001) definiu atributos sísmicos como informações que podem ser adquiridas dos dados sísmicos, seja por medições diretas/estatísticas ou por experiência dos intérpretes. 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, Koehler & Sheriff, 1979). A escolha dos atributos depende da natureza particular de cada um e das circunstâncias onde eles se demonstram mais úteis, de modo que um determinado atributo pode ser mais sensível para certos ambientes de reservatórios, enquanto

alguns são melhores em revelar anomalias subterrâneas ou como indicadores de hidrocarbonetos (Chen & Sidney, 1997).

Taner, Koehler e Sheriff (1979) desenvolveram 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), como é possível observar na **Figura 11**.



**Figura 11:** Análise de um sinal sísmico complexo. Modificado de Taner *et al.* (1979).

A partir da combinação do traço sísmico de entrada com a Transformada de Hilbert, surgem os denominados Atributos Instantâneos. Estes são computados amostra por amostra e representam a variação instantânea de vários parâmetros. São eles: envelope, fase instantânea, frequência instantânea, derivadas do envelope, dentre outros (Taner *et al.* 1979, Taner, 2001; Russell, 2004).

Taner *et al.* (1979) observaram que, a partir da análise do sinal sísmico como um sinal analítico (ou seja, 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).

## **5.2 Classificação dos atributos sísmicos**

Diversos autores contribuíram para a classificação dos atributos sísmicos em diferentes grupos. Neste trabalho, será seguida a classificação proposta por Taner na publicação oficial da *Canadian Society of Exploration Geophysics* (CSEG), de 2001. Primeiramente, os atributos são classificados quanto ao processamento (*Pre-Stack* ou *Post-Stack*), baseados no domínio das características de cada atributo, mas eles também podem ser classificados de acordo com suas características computacionais.

### **5.2.1 Atributos Pré-Empilhamento (*Pre-Stack*)**

Segundo Taner (2001), nestes atributos os dados de entrada são *Common Mid Point* (CDP) ou *Image Gather Place*, que oferecem informações sobre azimute e distância fonte-receptor (*offset*). Este atributo não é tão prático para estudos iniciais porque uma quantidade considerável de dados é gerada. Entretanto, o seu uso permite entender mais sobre o conteúdo de fluido e sobre a orientação de fraturas.

### **5.2.2 Atributos Pós-Empilhamento (*Post-Stack*)**

Durante o processo de empilhamento ocorre a perda de informação de azimute e offset. Os dados de entrada são *Common Mid Point* (CDP) empilhados ou migrados. A migração em tempo mantém as relações de tempo e variáveis temporais como a frequência tem suas dimensões preservadas. Para seções migradas em profundidade, a frequência é substituída pelo número de onda. Este tipo de atributo é mais indicado para analisar grandes volumes de dados em estudos iniciais (Taner, 2001).

### **5.2.3 Atributos relacionados à geologia**

Neste contexto, os atributos podem ser divididos em diferentes subclassificações. Os atributos físicos são comumente usados para classificação litológica e caracterização de reservatórios, relacionando parâmetros físicos da subsuperfície às características da litologia (Taner, 2001). Essa relação pode ser exemplificada pela amplitude do traço do envelope ser proporcional ao contraste de impedância acústica. Taner (1994) descreveu atributos que estão incluídos nessa categoria, sendo eles: envelope do traço, primeira e segunda derivadas do envelope, fase instantânea, frequência instantânea, polaridade aparente, Q instantâneo, entre outros.

Atributos geométricos correspondem a uma outra categoria de atributos e são usados para interpretação estratigráfica e estrutural. A principal aplicação destes atributos consiste em evidenciar as configurações geométricas e as relações espaciais dos eventos sísmicos, como continuidades, terminações, mergulhos e padrões de deposição (Taner, 1994).

Neste trabalho, após diversas tentativas para a escolha dos melhores atributos para enfatizar a BSR da seção sísmica analisada, foram selecionados dois atributos físicos, os quais apresentaram os melhores resultados: o envelope e a segunda derivada do envelope. Assim, o próximo tópico descreve estes atributos e suas principais características.

### **5.3. Envelope e Segunda derivada do envelope**

O atributo envelope também é conhecido como “amplitude instantânea”, “amplitude do envelope” ou *reflection strength* (Taner *et al.*, 1979; Chen & Sidney, 1997). A fundamentação teórica dos atributos instantâneos foi desenvolvida por Taner *et al.* (1979) e tem como base a análise do traço sísmico complexo.

Conforme descrito por Taner *et al.* (1979), um traço sísmico complexo pode ser escrito como:

$$C(t) = s(t) + ih(t) \quad (4)$$

onde  $s(t)$  corresponde à parte real do traço sísmico complexo;  $h(t)$  é a transformada de Hilbert do traço sísmico, sendo a parte imaginária do traço (também conhecida como quadratura) (Russell, 2004). A componente imaginária  $h(t)$  é obtida pela aplicação da Transformada de Hilbert no traço sísmico  $s(t)$ , nas seguintes condições para  $h(t)$ :

- 1) seja determinada a partir de  $s(t)$  através de uma operação de convolução linear;
- 2) reduza à representação fasorial (em números complexos) se  $s(t)$  for uma função senoidal.

Respeitando essas condições é possível determinar  $h(t)$  para qualquer  $s(t)$  que possa ser representado por uma série ou integral de Fourier (Taner *et al.*, 1979). O uso do traço sísmico complexo permite computar amplitude instantânea, fase instantânea e frequência instantânea em extensões lógicas de oscilação harmônica simples. Logo, o traço sísmico complexo pode ser reescrito na forma polar:

$$C(t) = A(t)e^{i\theta(t)} \quad (5)$$

$A(t)$  é o envelope do traço sísmico (ou amplitude/energia instantânea) e corresponde ao módulo da função complexa  $C(t)$ :

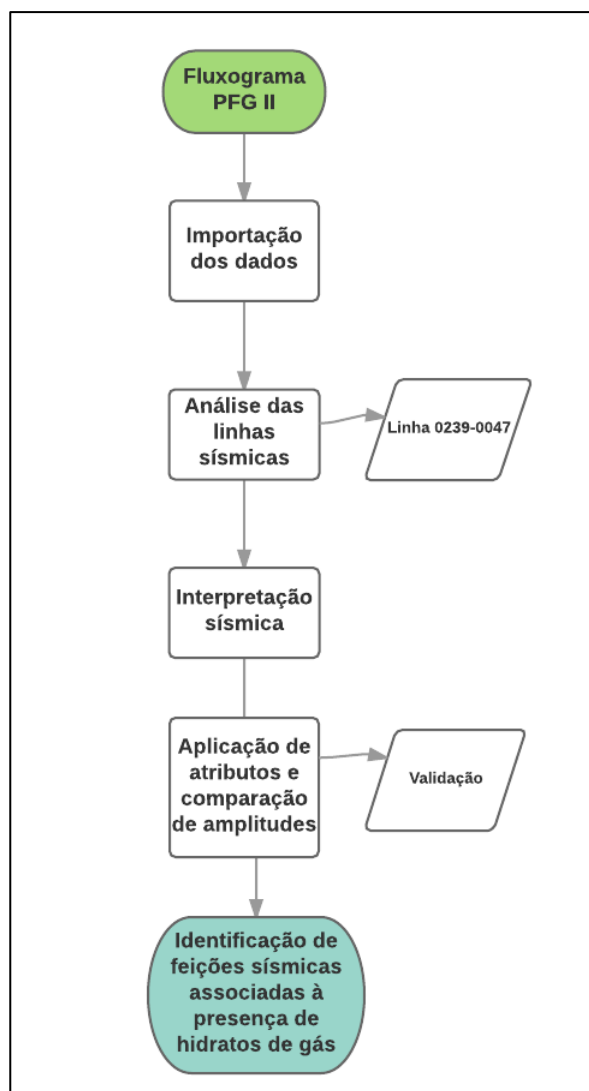
$$A(t) = \sqrt{s(t)^2 + h(t)^2} \quad (6)$$

O envelope é independente da fase e é sensível a alterações em impedância acústica, enfatizando mudanças de amplitude da seção sísmica original. Este atributo é relacionado à refletividade, porque é proporcional ao contraste de impedância acústica. Além disso, ele pode ser um bom discriminante de inúmeras características geológicas, como *bright spots*, possíveis acumulações de gás, discordâncias, mudanças na litologia e nos ambientes de deposição, limites de sequências, entre outros (Taner, 1992 *apud* Taner, 2001).

A segunda derivada do envelope é um atributo sísmico que fornece uma medida de nitidez do pico do envelope, o que pode ser muito útil. Ele mostra todos os picos do envelope, assim permite obter uma boa representação da subsuperfície, identificando todas as interfaces de reflexão visíveis dentro da largura de banda sísmica. Este atributo também evidencia mudanças bruscas de litologia e do ambiente deposicional, mesmo quando o envelope correspondente é baixo (SEG Wiki, acessado em 16 de outubro de 2017).

## 6 MÉTODOS

Este trabalho foi realizado conforme descrito no fluxograma abaixo (**Figura 12**). O *software* escolhido para a execução do projeto foi o OpendTect, por se tratar de um *software* livre de interpretação sísmica.



**Figura 12:** Fluxograma do Projeto Final em Geofísica II.

### 6.1 Importação dos dados sísmicos

A primeira etapa para a realização deste trabalho consistiu no carregamento de dados sísmicos fornecidos pelo Banco de Dados de Exploração e Produção (BDEP) da Agência Nacional

de Petróleo (ANP) no *software* OpendTect. Inicialmente, foram definidas as coordenadas da região de estudo para a criação do projeto “Foz”. Após a área que abrange as linhas sísmicas ter sido estabelecida, foram importadas 74 linhas sísmicas de reflexão 2D (*pos stack*).

## **6.2 Controle de qualidade das linhas sísmicas**

Devido à grande quantidade de linhas sísmicas e ao tempo que demandaria mapear os horizontes (fundo do mar e BSR) de todas, foi realizada uma triagem a fim de escolher a linha sísmica mais adequada para a execução deste projeto.

Inicialmente, os dados sísmicos importados foram previamente interpretados com o objetivo de analisar a qualidade das linhas e obter um conhecimento preliminar sobre os principais refletores sísmicos. Assim, a linha 0239-0047 (**Figura 13**) foi selecionada por ser possível observar as feições de interesse, associadas à presença dos hidratos de gás.

## **6.3 Interpretação sísmica**

O principal objetivo da interpretação sísmica foi o mapeamento 2D de horizontes e a identificação de possíveis BSRs. A linha 0239-0047 teve o refletor correspondente ao fundo do mar mapeado. Também foram mapeados os refletores sísmicos que podem ser inferidos como provável BSR.

## **6.4 Aplicação de atributos sísmicos e comparação de amplitudes**

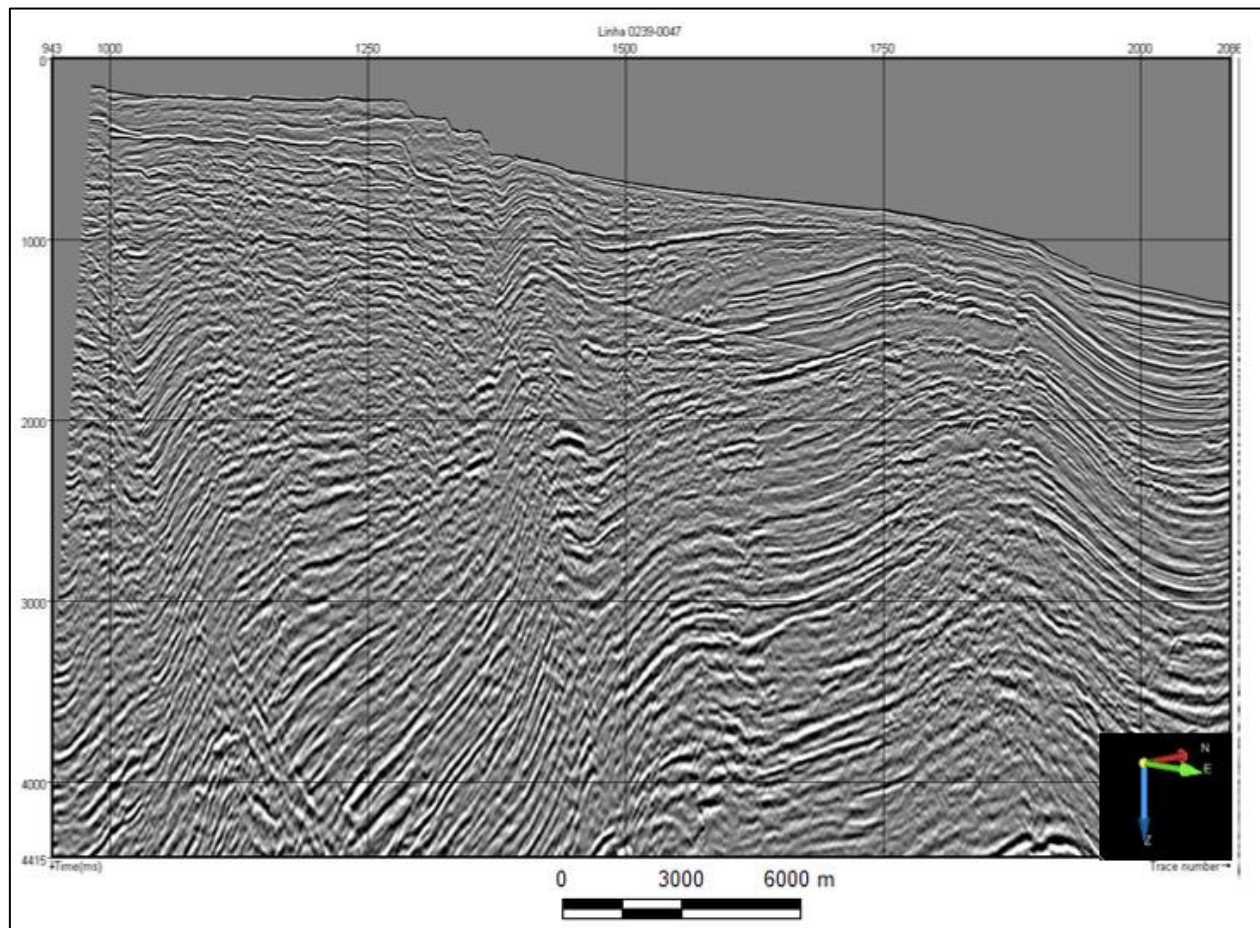
Nesta etapa foram utilizados diversos atributos sísmicos para identificar o BSR e inferir a presença de hidratos de gás na Foz do Amazonas na linha 0239-0047. Foram escolhidos dois atributos que melhor destacaram o BSR, sendo estes: envelope e segunda derivada do envelope.

Posteriormente, foram criadas duas planilhas que permitiram analisar o comportamento do possível BSR em comparação ao fundo marinho, em dois trechos distintos, com o objetivo de ratificar a localização deste refletor de interesse na seção sísmica.

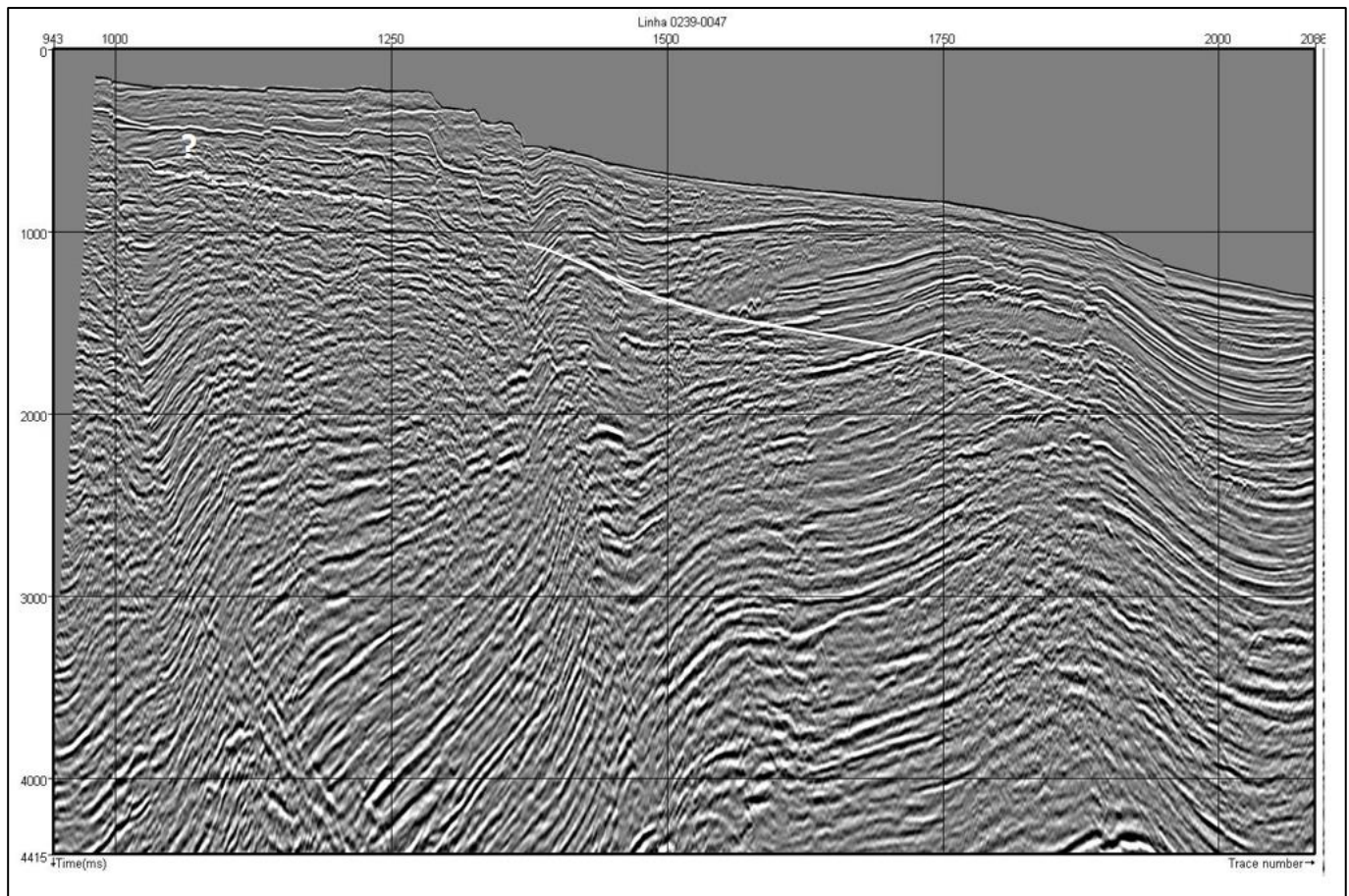


## 7 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Através da metodologia descrita acima, foi possível interpretar a linha 0239-0047 e identificar as feições sísmicas associadas à existência de hidratos de metano na bacia da Foz do Amazonas (**Figura 13** e **Figura 14**). A seguir, serão apresentadas a linha 0239-0047 com os atributos aplicados e o BSR mapeado.



**Figura 13:** Linha 0239-0047 não interpretada.

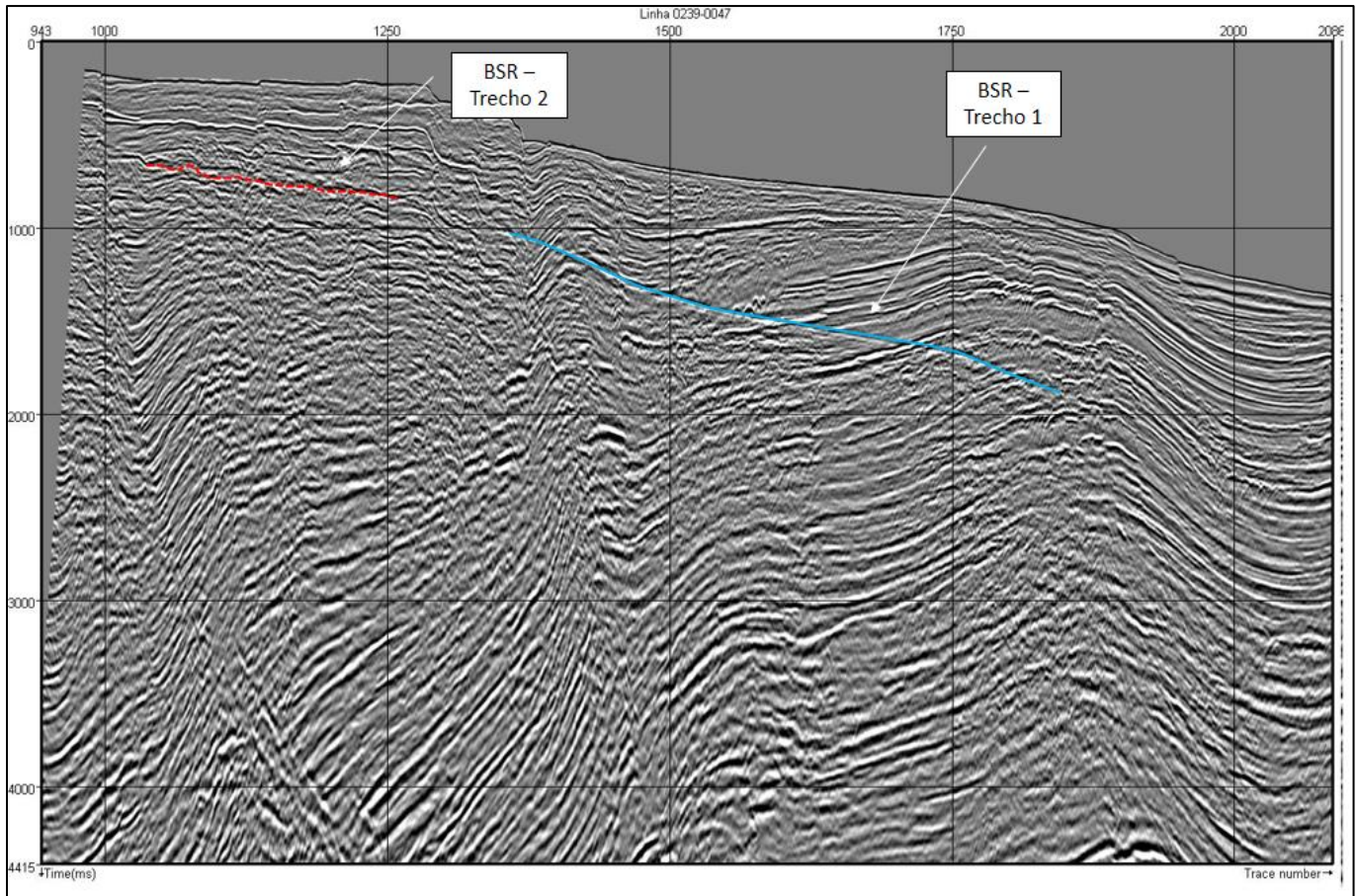


**Figura 14:** Linha 0239-0047 com os trechos do BSR interpretados em branco. A linha contínua representa o refletor BSR mais facilmente identificado, uma vez que ele trunca outros refletores sísmicos. A linha tracejada corresponde ao trecho em que há incerteza quanto à caracterização da feição BSR, uma vez que o BSR estaria paralelo a outros refletores.

A feição BSR quando corta os estratos que não são plano-paralelos é nítida e identificada facilmente. 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). Nesse caso, o uso de atributos sísmicos e a análise da amplitude sísmica tornam-se essenciais para mitigar essas incertezas e inferir a presença dos hidratos de metano. Para este projeto, a linha 0239-0047 foi analisada em dois trechos distintos (**Figura 15**): o trecho 1 corresponde à feição BSR que corta os estratos que não são plano-paralelos, evidenciando o BSR. Já o trecho 2 corresponde ao intervalo em que os



estratos são paralelos ao fundo marinho e a localização do BSR (ou até mesmo a presença dessa feição) é incerta.

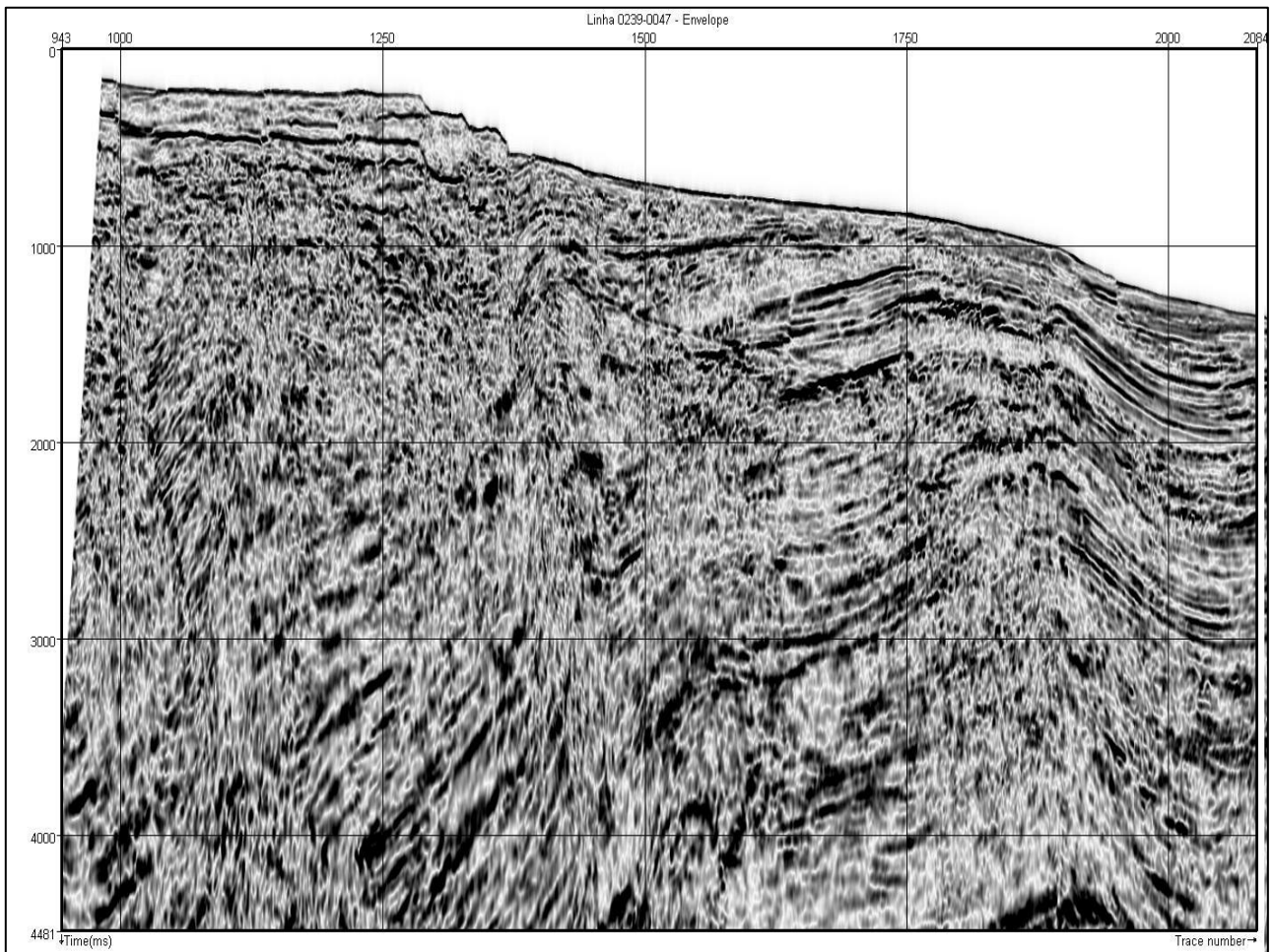


**Figura 15:** Linha 0239-0047 com os trechos em destaque. O trecho 1 corresponde ao intervalo em que o BSR é evidenciado, enquanto o trecho 2 corresponde ao intervalo em que há incerteza quanto à caracterização do refletor.

### 7.1 Aplicação de atributos sísmicos

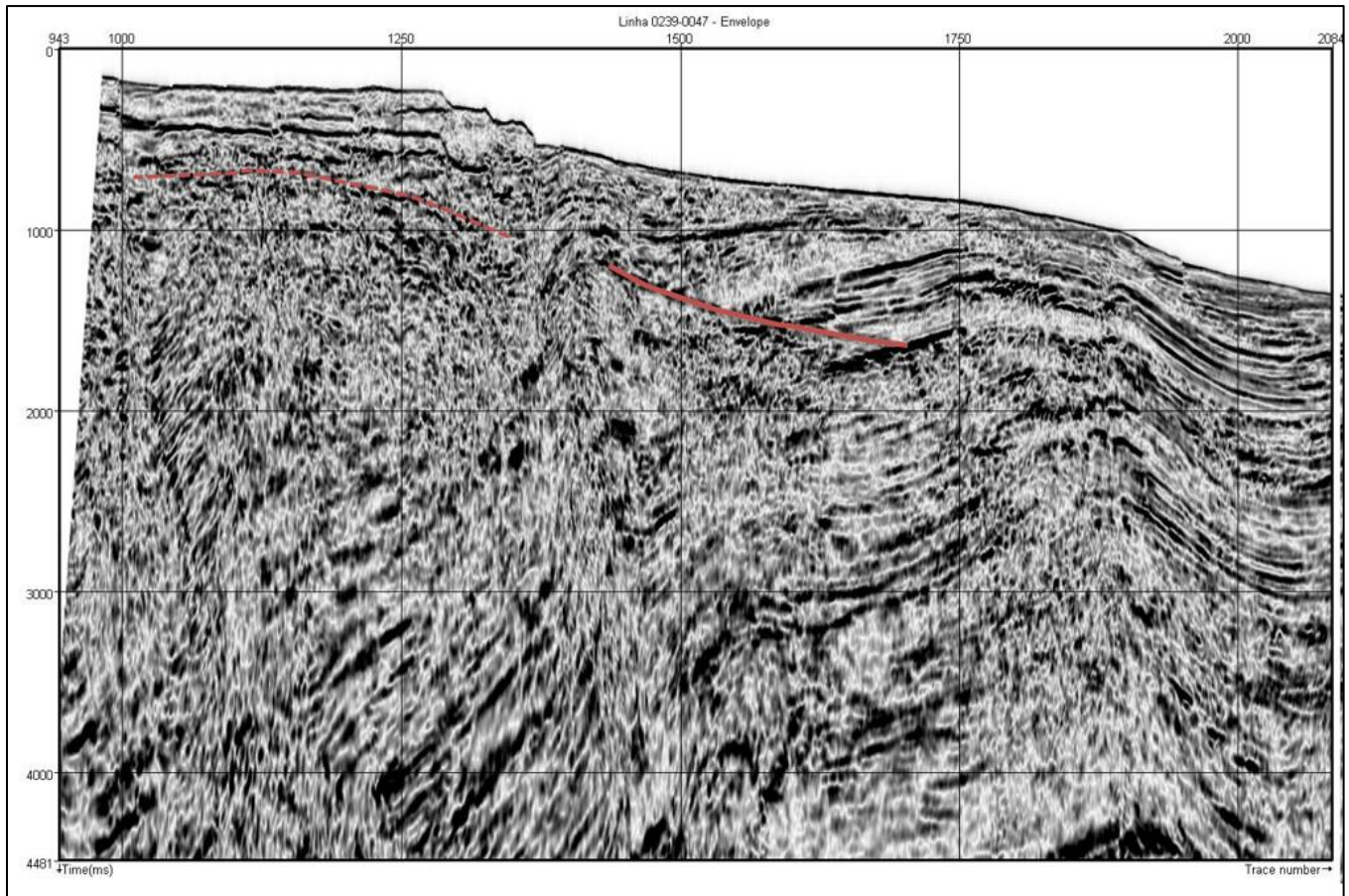
A feição BSR coincide com a base da zona de estabilidade dos hidratos de gás, marcando a interface entre a zona de estabilidade dos hidratos (com velocidade sísmica mais alta) e a camada com gás livre abaixo dessa curva de estabilidade (com velocidade mais baixa), o que gera um refletor com elevada polaridade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

O primeiro atributo sísmico aplicado na linha foi o envelope (ou amplitude instantânea). Segundo Taner (1992) e Chen (1997), ele funciona como um bom discriminante para mudanças litológicas e estratigráficas em reservatórios e acumulações de gás e fluidos. Como este atributo está diretamente relacionado ao contraste de impedância acústica, sua aplicação é muito significativa para a caracterização dos hidratos de metano. As **Figura 16** e **Figura 17** mostram a linha 0239-0047 com o envelope já empregado.



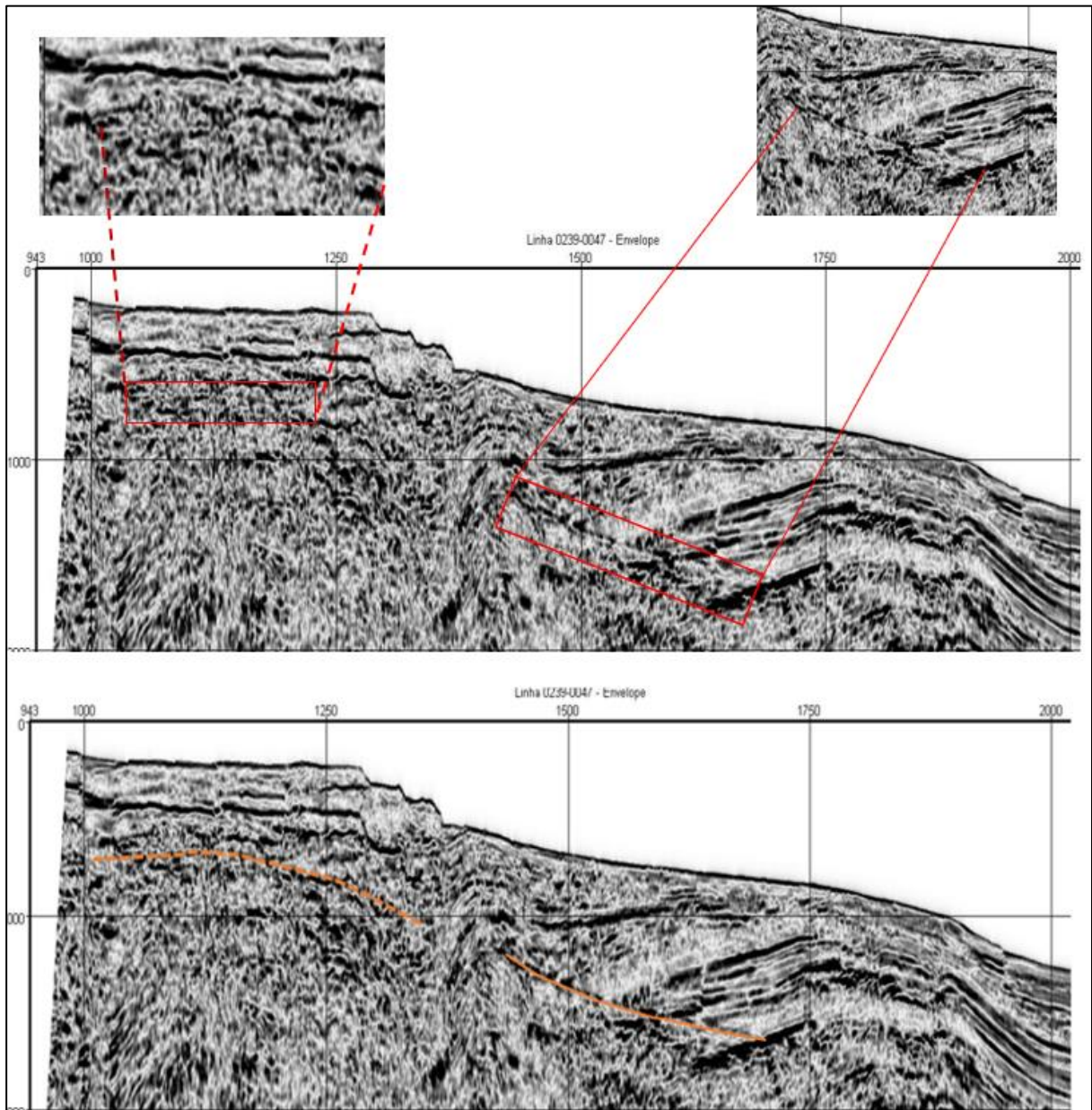
**Figura 16:** Linha 0239-0047 não interpretada com o atributo envelope aplicado.





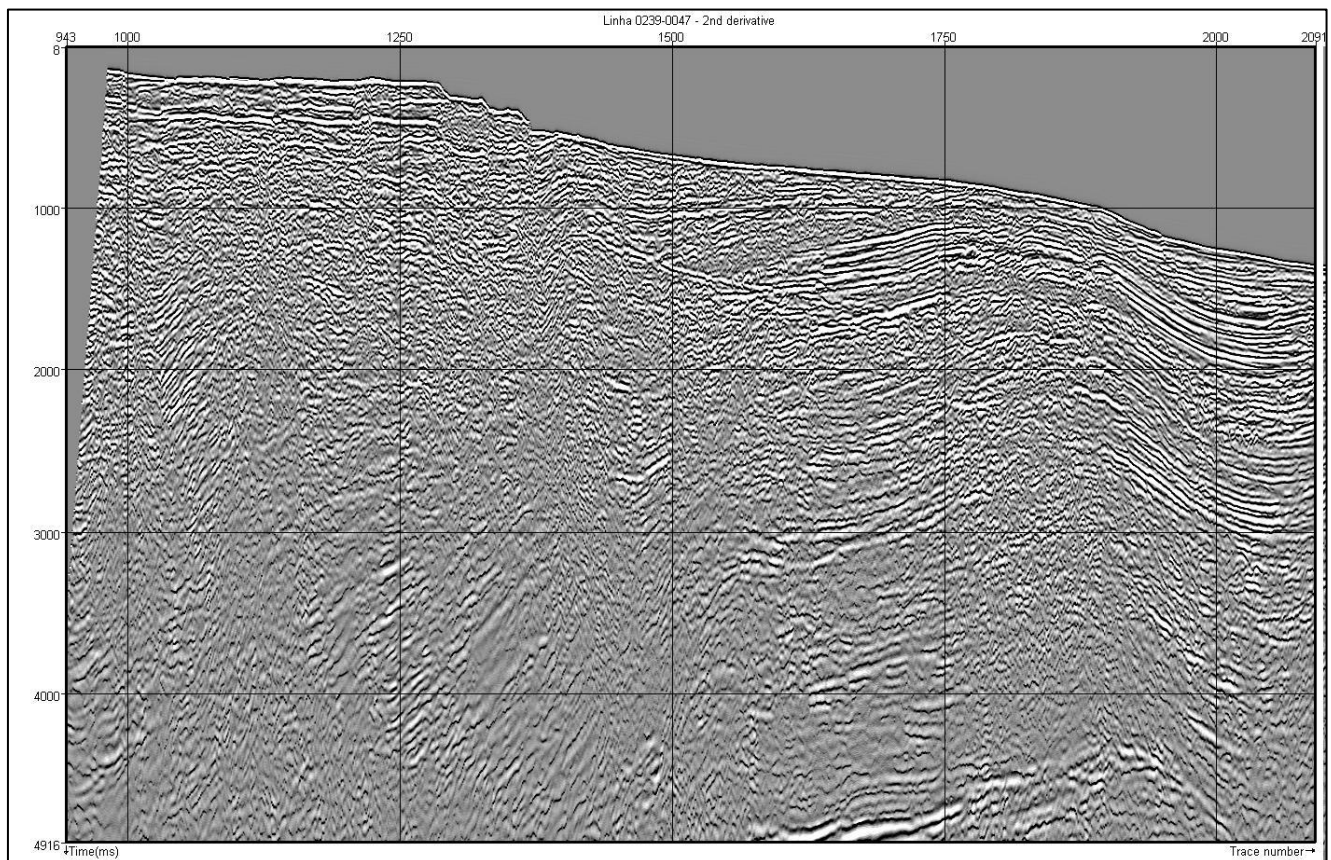
**Figura 17:** Atributo envelope aplicado na linha 0239-0047. A linha contínua alaranjada representa o BSR no trecho em que essa feição pode ser inferida mais facilmente (trecho 1). Já a linha tracejada representa o intervalo em que a identificação do BSR na sísmica é menos intuitiva (trecho 2).

O uso do atributo envelope facilitou a visualização e a identificação da feição BSR, principalmente no intervalo entre os números de traços 1430-1650 para o trecho 1 e 1000-1250 para o trecho 2. Abaixo, a **Figura 18** destaca esses refletores de interesse para ambos os trechos da seção sísmica.



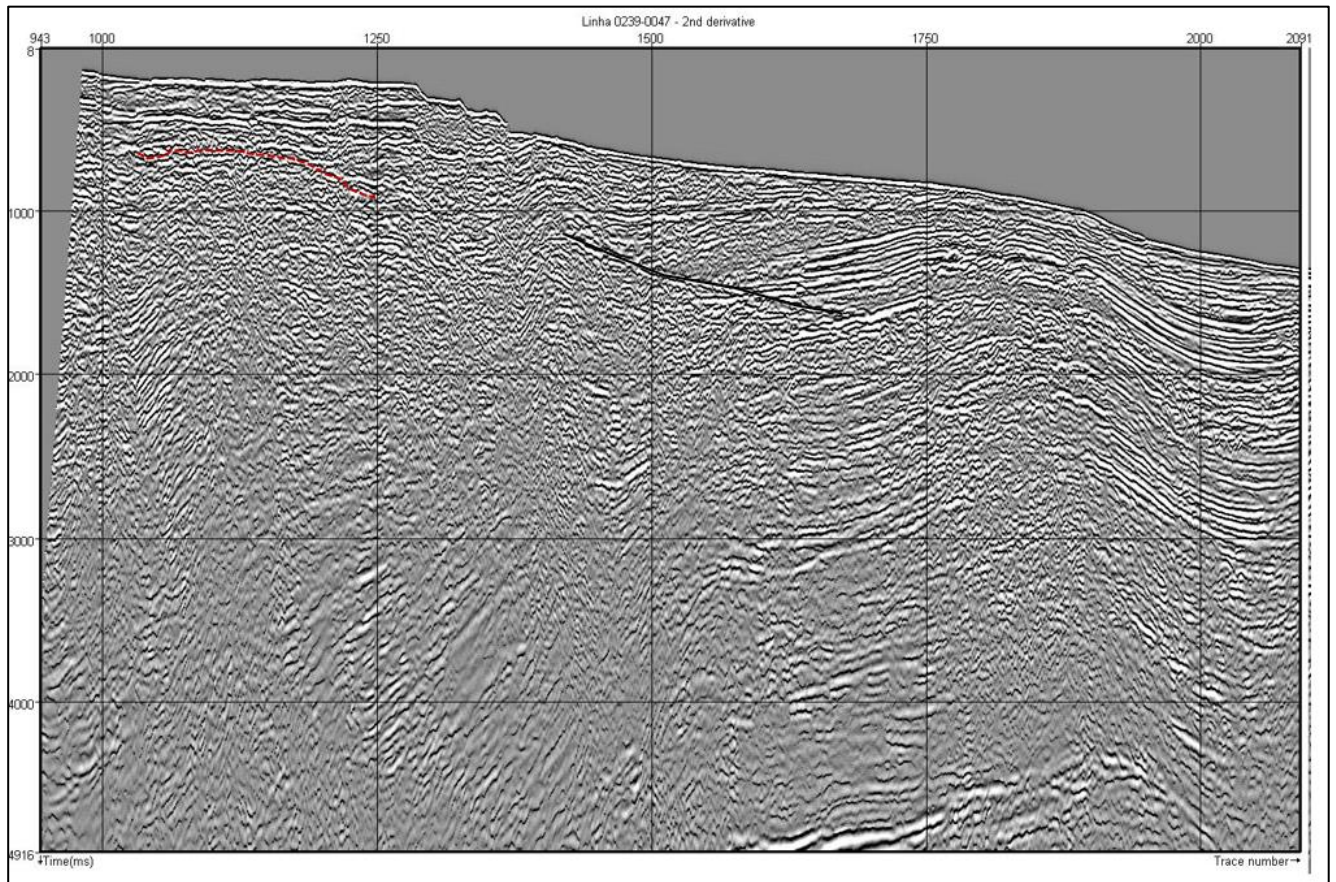
**Figura 18:** Linha 0239-0047 com o atributo envelope empregado. Em destaque, têm-se os prováveis BSRs do trecho 1 e do trecho 2.

O segundo atributo sísmico utilizado para inferir a presença dos hidratos de metano neste estudo foi a segunda derivada do envelope. Segundo Taner (1992), este atributo fornece uma boa representação da subsuperfície e destaca mudanças menos suaves de litologia. As **Figura 19** e **Figura 20** mostram a linha 0239-0047 com a segunda derivada do envelope aplicada e os possíveis trechos do BSR não interpretados e interpretados, respectivamente. A **Figura 21** destaca o BSR para ambos os trechos da linha.



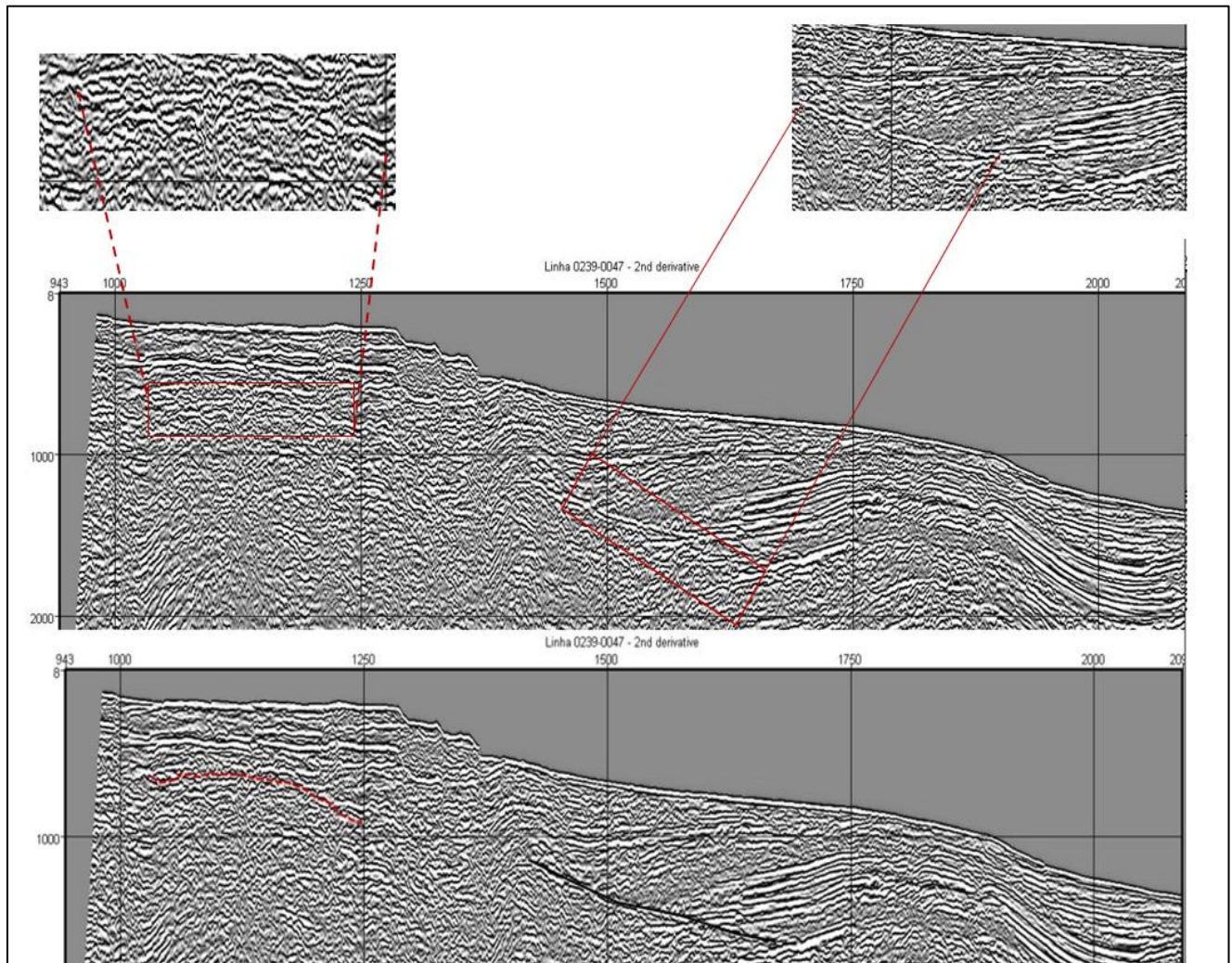
**Figura 19:** Linha 0239-0047 com o atributo segunda derivada do envelope aplicado.





**Figura 20:** Linha 0239-0047 com a segunda derivada do envelope. A linha contínua preta realça a feição BSR do trecho 1, enquanto a linha tracejada em vermelho destaca a localização do BSR no trecho 2.





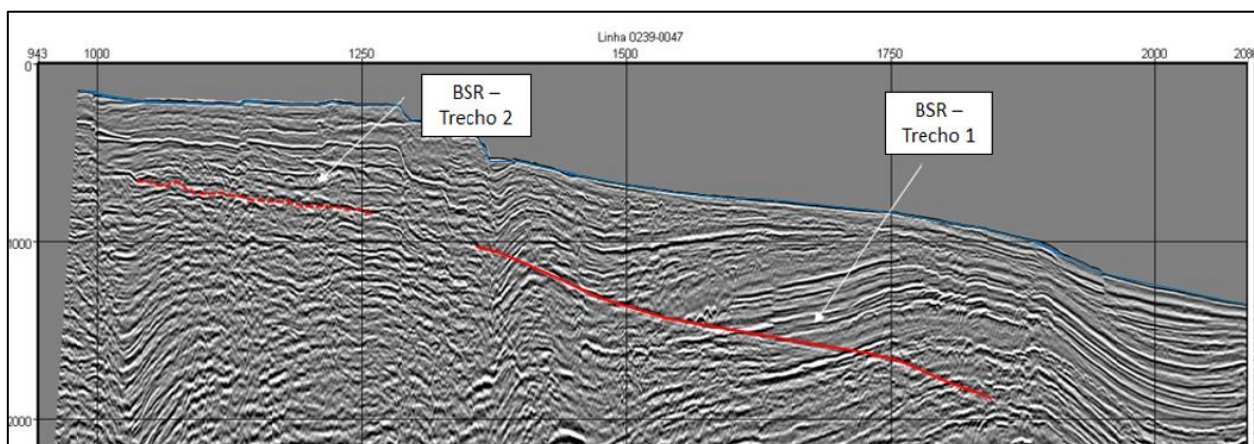
**Figura 21:** Linha 0239-0047 com o atributo segunda derivada do envelope aplicado. Em destaque, têm-se o provável BSR do trecho 1 (linha contínua) e do trecho 2 (linha tracejada).

O uso da segunda derivada do envelope facilitou a visualização do BSR em ambos os trechos na seção sísmica, ainda que o realce do refletor não tenha sido tão evidente quanto foi possível observar com o envelope empregado.

## 7.2 Comparação das amplitudes

Segundo Kvendolven (1993), o refletor sísmico que coincide com o limite inferior da zona de estabilidade dos hidratos de gás pode ser comumente 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 (BSRs) sejam negativas e grandes em módulo, com polaridades reversas aos coeficientes do fundo (Dillon *et al.*, 1996). De acordo com Hyndman & Spence (1992), a estimativa dos coeficientes de reflexão da feição BSR pode ser obtida através da comparação da amplitude do BSR com a amplitude de reflexão do fundo do mar. O coeficiente de reflexão do fundo marinho pode ser determinado através da impedância acústica dos sedimentos no fundo ou da amplitude relativa entre o fundo e suas múltiplas.

Para validar a localização das feições BSR na sísmica e inferir a presença de hidratos de metano associadas a essas feições, foram criadas duas planilhas com o objetivo de comparar as amplitudes sísmicas para os dois trechos da linha 0239-0047 em que se presumia a existência desses refletores sísmicos. A **Figura 22** mostra a seção sísmica com os dois trechos em destaque.



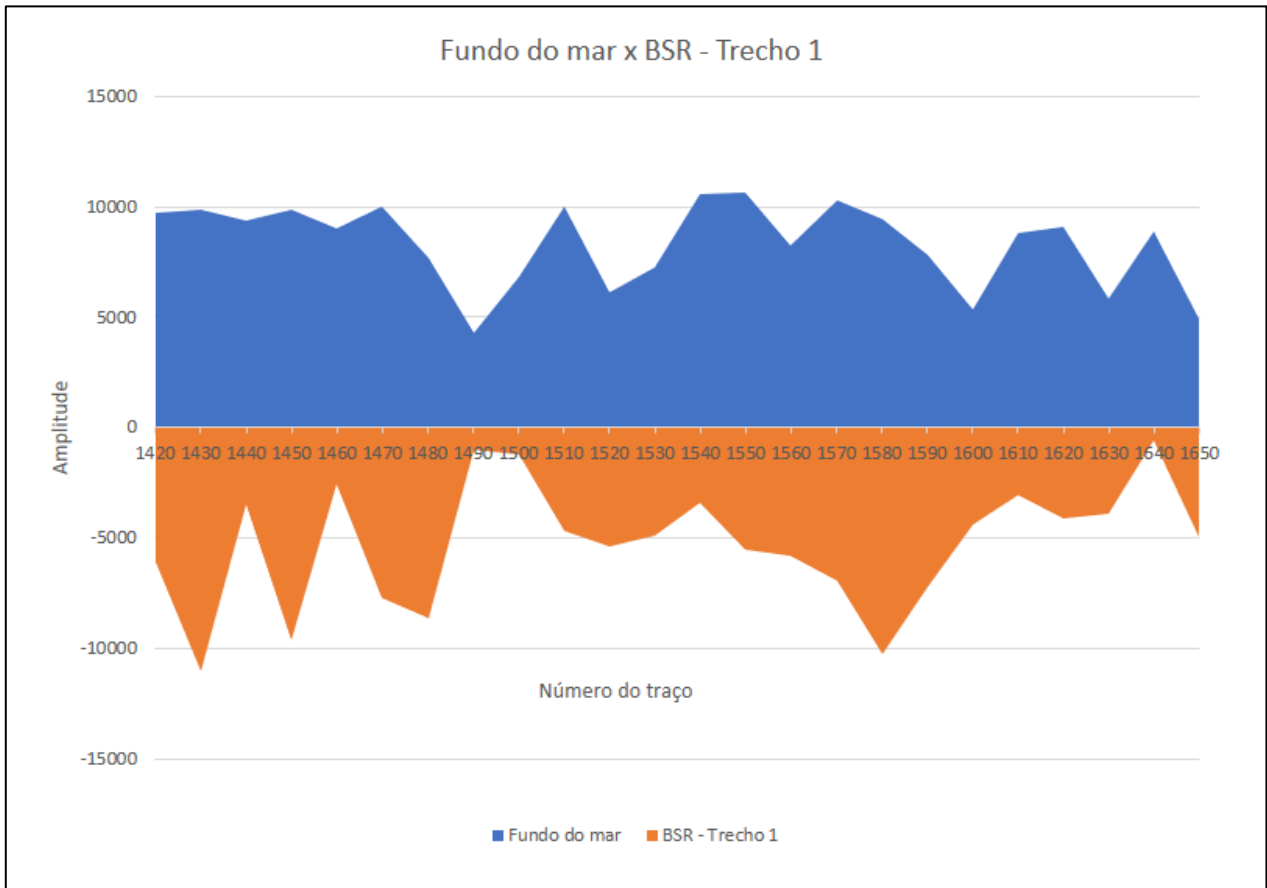
**Figura 22:** Linha 0239-0047 com os trechos em destaque. O trecho 1 corresponde ao intervalo em que o BSR é mais facilmente identificado porque corta os refletores não-paralelos, enquanto o trecho 2 corresponde ao intervalo em que há maior incerteza quanto à caracterização do mesmo.

A seguir, tem-se a **Figura 23** com a planilha que compara as amplitudes sísmicas do fundo do mar com as amplitudes do BSR do **trecho 1**.

Tempo duplo (ms) (Fundo do mar, BSR)	Trace number	Fundo do mar	BSR - Trecho 1
580, 1160	1420	9707,1484	-6053,0517
592, 1192	1430	9835,5507	-11051,17968
616, 1228	1440	9365,2109	-3487,0466
632, 1260	1450	9896,6718	-9625,53125
644, 1308	1460	9014,4101	-2520,1572
652, 1328	1470	10003,2851	-7679,289063
664, 1332	1480	7663,0781	-8587,9296
680, 1372	1490	4322,1875	-1033,5673
684, 1368	1500	6832,2968	-1242,23608
696, 1392	1510	9976,5664	-4648,1718
700, 1408	1520	6111,2851	-5409,992188
716, 1428	1530	7235,875	-4886,5664
720, 1444	1540	10545,3046	-3417,4604
728, 1460	1550	10620,4843	-5485,3046
732, 1472	1560	8262,6367	-5814,4453
744, 1492	1570	10311,24219	-6948,8828
748, 1500	1580	9418,7265	-10253,2968
752, 1508	1590	7797,5117	-7224,164
752, 1508	1600	5373,8125	-4374,0351
760, 1532	1610	8829,9687	-3077,1101
768, 1540	1620	9100,1289	-4074,6853
772, 1552	1630	5842,6289	-3895,0866
780, 1568	1640	8901,4101	-544,9833
780, 1572	1650	4936,4414	-4936,4375

**Figura 23:** Planilha comparativa entre as amplitudes do fundo do mar e da feição BSR no trecho 1. É possível observar a inversão da polaridade do sinal, apesar dessa inversão não ser modular.

A partir dessa planilha, foi criado um gráfico (**Figura 24**) onde é possível comparar o comportamento dessas amplitudes entre os números de traços de 1420 a 1650.



**Figura 24:** Comparação de amplitudes sísmicas: Fundo do mar e BSR - Trecho 1.

Através do gráfico acima, fica evidente que ocorre inversão de polaridades no sinal entre o fundo marinho (polaridade positiva) e a feição de BSR (polaridade negativa). Mesmo que essa inversão não seja em módulo, nota-se que há uma certa aproximação modular entre os valores dessas amplitudes (com exceção de alguns pontos), o que valida a identificação do BSR no trecho 1.

Como a amplitude do BSR é extremamente sensível às pequenas concentrações de gás, localizadas abaixo da zona de estabilidade dos hidratos (Holbrook, 2002), alguns autores sugerem que o BSR não seja aparentemente contínuo para determinadas frequências, formando uma série de reflexões fortes e paralelas ao fundo do mar, porém horizontalmente descontínuas (Dillon *et al.*, 1996). Isso poderia ser uma das explicações para esses pequenos intervalos em que os valores (em módulo) das amplitudes sísmicas entre o fundo marinho e o BSR são bem discrepantes. As

concentrações de hidratos, acima do BSR, e de gás livre, abaixo do mesmo, variam e fazem com que a intensidade do refletor varie localmente. Assim, o BSR será mais forte quanto maior for as saturações de hidratos e de gás livre, incrementando o contraste.

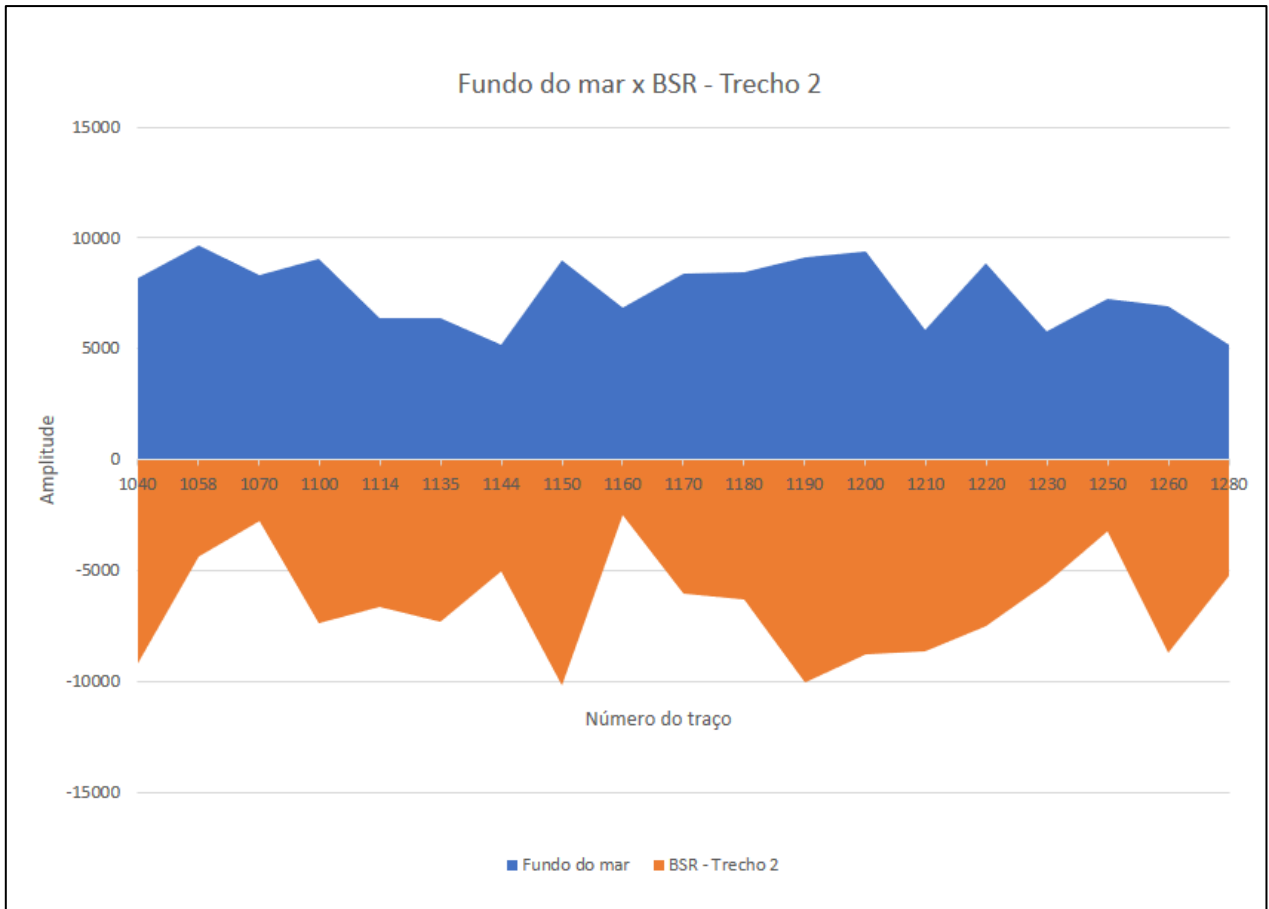
De maneira análoga ao trecho 1, para o **trecho 2** também foi criada uma planilha (**Figura 25**) com o objetivo de comparar o comportamento das amplitudes entre o fundo do mar e o BSR inferido.

Tempo duplo (ms) (Fundo do mar, BSR)	Trace number	Fundo do mar	BSR - Trecho 2
212, 680	1040	8212,5781	-9148,1875
212, 696	1058	9653,5429	-4344,09375
216, 688	1070	8324,2539	-2774,7525
224, 744	1100	9092,28125	-7387,4765
228, 740	1114	6383,996	-6607,996
228, 764	1135	6368,7343	-7308,3828
220, 768	1144	5155,0859	-5059,621
220, 780	1150	8964,6523	-10152,7382
220, 788	1160	6829,0507	-2493,1455
224, 796	1170	8377,3203	-6014,4882
232, 780	1180	8469,5664	-6305,121
232, 800	1190	9111,8998	-10032,289
232, 820	1200	9389,21875	-8744,8593
228, 808	1210	5862,7578	-8628,2109
216, 812	1220	8841,2265	-7535,13641
225, 832	1230	5797,4296	-5560,8007
236, 840	1250	7231,621	-3200,8808
232, 856	1260	6916,8867	-8710,15625
236, 868	1280	5217,6601	-5217,6601

**Figura 25:** Planilha comparativa entre as amplitudes do fundo do mar e da feição BSR no trecho 2. Como visto também no trecho 1, nota-se a inversão da polaridade do sinal.

Para comparar essas amplitudes no trecho 2, também foi criado um gráfico a partir desses dados (**Figura 26**).





**Figura 26:** Comparação de amplitudes sísmicas: Fundo do mar e BSR - Trecho 2.

Assim como no trecho 1, neste trecho também fica bastante nítida a reversão de polaridade no sinal entre a amplitude do fundo do mar e da feição de BSR. Ainda que esta inversão não seja modular, o gráfico da **Figura 26** comprova que há uma tendência de aproximação (em módulo) entre os valores dessas amplitudes para a maioria dos pontos nesse intervalo.

## 8 CONCLUSÕES

A integração de métodos geofísicos é valiosa para uma caracterização mais precisa da subsuperfície. Ainda que neste trabalho não tenha sido possível realizar a amarração de dados de poços com os dados de sísmica de reflexão 2D, as feições sísmicas ligadas à distribuição dos hidratos de gás podem ser identificadas através de diversas técnicas sísmicas, porque estas feições apresentam fortes reflexões (Hyndman & Spence, 1992).

Cada atributo sísmico apresenta suas próprias vantagens, desvantagens e limitações. A escolha do atributo utilizado depende da sua fundamentação matemática, das informações de interesse que podem ser obtidas dos dados sísmicos e do contexto geológico em que eles se demonstram mais úteis. É válido ressaltar, também, a importância da aplicação de mais de um atributo a fim de reduzir incertezas e evitar interpretações tendenciosas.

Esse trabalho teve como objetivo a utilização de atributos sísmicos para identificar as assinaturas na seção sísmica, associadas à existência de hidratos de metano na bacia da Foz do Amazonas. Assim, os atributos escolhidos para este projeto – Envelope e Segunda Derivada do Envelope – facilitaram a visualização do BSR na sísmica. Além disso, as tabelas e os gráficos 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. O uso dessas ferramentas em conjunto permitiu validar a identificação do BSR na linha 0239-0047 e inferir a presença dos hidratos de gás.

Sugere-se para futuros estudos na área a implementação de outras técnicas sísmicas complementares para o reconhecimento das feições de interesse, não apenas para delimitar as áreas de ocorrência dos hidratos de metano como também para estimar a espessura desses hidratos. Recomenda-se, também, a aquisição de dados de poço para que estes sejam amarrados aos dados sísmicos, assim fornecendo uma melhor interpretação e caracterização da subsuperfície.

## 9 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ARAÚJO, E. F. S.; SILVA, C. G.; REIS, A. T.; PEROVANO, R.; GORINI, C.; VENDEVILLE, B. C.; ALBUQUERQUE, N. C. Movimentos de massa multiescala na Bacia da Foz do Amazonas – Margem Equatorial Brasileira. **Revista Brasileira de Geofísica**, Vol 27, n. 3, p. 485–508, 2009.
- AYRES, A. N. Uso da Sísmica de Reflexão de Alta Resolução e da Sonografia na Exploração Mineral Submarina. **Revista Brasileira de Geofísica**, Vol. 18, n. 3, p. 241-256, 2000.
- BRANDÃO, J. A. S. L. & FEIJÓ, F. J. Bacia da Foz do Amazonas. **Boletim de Geociências da Petrobrás**. V. 8, p. 91 -99, 1994.
- BRUNO, G. **Argilocinese no Cone do Amazonas**. 1987. 103 f. Dissertação (Mestrado em Geologia) – Universidade Federal de Ouro Preto – Ouro Preto, MG, 1987.
- CARVALHO, G. C. R. de. **Interpretação sísmica e modelagem física do cone do Amazonas, Bacia da Foz do Amazonas, margem equatorial brasileira**. 2008. 119 p. Dissertação (Mestrado em Evolução Crustal e Recursos Naturais) – Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2008.
- CHEN, Quincy; SIDNEY, Steve. Seismic attribute technology for reservoir forecasting and monitoring. **The Leading Edge**, v. 16, n. 5, p. 445-448, 1997.
- CHONG, Z. R.; YANG, S. H. B.; BABU, P.; LINGA, P.; LI, X. S. Review of natural gas hydrates as an energy resource: Prospects and challenges. **Applied Energy**, v. 162, p. 1633-1652, 2016.
- CHOPRA, Satinder; MARFURT, Kurt J. Seismic attributes—A historical perspective. **Geophysics**, v. 70, n. 5, p. 3SO-28SO, 2005.
- CLENNELL, M. B. Hidrato de Gás Submarino: Natureza, Ocorrência e Perspectivas Para Exploração na Margem Continental Brasileira. **Revista Brasileira de Geofísica**. Vol. 18, n. 3, 2000.
- COBBOLD, P. R.; MOURGES, R.; Boyd, K. Mechanism of thin-skinned detachment in the Amazon Fan: assessing the importance of fluid overpressure and hydrocarbon generation. **Marine and Petroleum Geology**, v. 21, p. 1013-1025. 2004.
- DAMUTH, J. E.; KUMAR, N. Amazon Cone: Morphology, sediments, age e growth Pattern. **G.S.A Bulletin**. v. 86, p. 863 - 878, 1975.
- DA SILVA, R. J. P. **Colapso gravitacional e estruturação da seção marinha da bacia da Foz do Amazonas no contexto de múltiplos níveis de destacamento**. 2008. 101 f. Dissertação



(Mestrado no Departamento de Geologia) – Universidade Federal Fluminense Niterói – RJ, 2008.

DILLON, William P.; HUTCHINSON, Deborah R.; DRURY, Rebecca M. Seismic reflection profiles on the Blake Ridge near Sites 994, 995, and 997. In: **Proceedings of the Ocean Drilling Program, Initial Reports**. 1996. p. 47-56.

EDMONDS, B.; MOORWOOD, R.; SZCZEPANSKI, R. A Practical Model for the Effect of Salinity on Gas Hydrate Formation, SPE Paper, v. 35569, 1996.

FIGUEIREDO, J.J.P.; ZALÁN, P.V.; SOARES, E.F. Bacia da Foz do Amazonas. **B. Geoci. Petrobras**, Rio de Janeiro, v. 15, n. 2, p. 299-309, 2007.

FREIRE, A. F. M. **An integrated study on the gas hydrate area of Joetsu Basin, eastern margin of Japan Sea, using geophysical, geological and geochemical data**. 2010. 247 f. Tese (Doutorado) – The University of Tokyo, Graduate School of Frontier Sciences, 2010.

FREIRE, A. F. M. **Recursos Petrolíferos Não-Convencionais – Aula 09: Hidratos de Gás**. Niterói, RJ. 91 p. Notas de aula.

FREIRE, A.F.M.; MATSUMOTO, R.; SANTOS, L.A. Structural-stratigraphic control on the Umitaka Spur gas hydrates of Joetsu Basin in the eastern margin of the Japan Sea. **Marine and Petroleum Geology**, v. 28, p. 1967-1978, 2011.

FREIRE, A. F. M. 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 Petrobrás**. Maio de 2013.

GEHRMANN, R.; MULLER, C.; SCHIKOWSKY, P.; HENKE, T.; SCHNABEL, M.; BONNEMANN, C. Model-Based Identification of the Base of the Gas Hydrate Stability Zone in Multichannel Reflection Seismic Data, Offshore Costa Rica. **International Journal of Geophysics**, v. 2009, 12 p, 2009.

HOLBROOK, W. S. *et al.* Seismic detection of marine methane hydrate. **The Leading Edge**, v. 21, n. 7, p. 686-689, 2002.

HOVLAND, M.; JUDD, A.G. **Focus on North Sea Pockmarks**. In: Hovland, M. & Judd, A.G. (eds.). *Seabed Pockmarks and Seepages: Impact on Geology, Biology and the Marine Environment*. Graham & Trotman, London, UK. Cap. 2, p. 6-34, 1988.

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.

JOSHI, Anju K.; PANDEY, Laxmi; SAIN, Kalachand. Identification of BSR and estimation of gas hydrate from well-log data at NGHP-01-04A and 11A in the Krishna-Godavari Basin,

Eastern Indian Margin. In: **SEG Technical Program Expanded Abstracts 2017. Society of Exploration Geophysicists**, 2017. p. 3483-3487.

KATZMAN, R.; HOLBROOK, W.S.; PAULL, C.K. Combined vertical incidence and wide-angle seismic study of a gas hydrate zone, Blake Ridge, **Journal of Geophysical Research**. V. 99 (B9), p. 17975–17995, 1994.

KEAREY, P.; BROOKS, M.; HILL, I. **Geofísica de Exploração**. Oficina de Textos, 2009.

KVENDOLVEN, K. A. **A primer on the geologic occurrence of gas hydrate**. In: Henriot, J. P. and J. Mienert, eds., Gas hydrates: relevance to world margin stability and climate change: Geol. Soc. London, Special Publications, v. 137, p. 9, 1998.

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

LEE, M.W.; HUTCHINSON, D.R.; DILLON, W.P.; MILLER, J.J.; AGENA, W.F. & SWIFT, B.A. Method of estimating the amount of in-situ gas hydrates in deep marine sediments. **Marine Petroleum Geology**, v. 10, p. 493-506, 1993.

LORENSON, T. D.; KVENDOLVEN, K.A. A Worldwide Assessment of Coincidental Gas Hydrate and Petroleum Gas Occurrences, **AAPG Annual Convention Program with Abstracts**, v. 10, p. A120, 2001.

MAKOGON, Y. F. Natural gas hydrates—A promising source of energy. **Journal of Natural Gas Science and Engineering**, v. 2(1), p. 49-59, 2010.

MAKOGON, Y.F. **Perspectives for the development of Gas Hydrate deposits**. In: Fourth Canadian Permafrost Conference, Calgary, March 2-6, 1981.

MAKOGON, Y.F. Natural Gases in the Ocean and the Problems of Their Hydrates. In: VNIIEGasprom. **Express-Information**, N° 11, Moscow, p. 43, 1972.

MAKOGON, Y.F. Hydrate of Natural Gas NEDRA, Moscow. PennWell, Tulsa, 237 p., 1974.

MILLER, D.J.; KETZER J.M.; VIANA, A.R.; KOWSMANN, R.O.; FREIRE, A.F.M.; OREIRO, S.G.; AUGUSTIN, A.H.; LOUREGA, R.V.; RODRIGUES, L.F.; HEEMANN, R.; PREISSLER, A.G. Natural gas hydrates in the Rio Grande Cone (Brazil): A new province in the western South Atlantic. **Marine and Petroleum Geology**, v. 67, p.187-196, 2015.

MCCONNELL, D. R.; KENDALL, B. A. Images of the Base of Gas Hydrate Stability, Northwest Walker Ridge, Gulf of Mexico. **Offshore Technology Conference**. v. 10, 4043/14103-MS, 2002.

PASLEY, M.A.; SHEPHERD, D.B.; POCKNALL, D.T.; BOYD, K.P.; ANDRADE, V.; FIGUEIREDO, J.P. Sequence Stratigraphy and Basin Evolution of the Foz do Amazonas

Basin, Brazil. In **AAPG International Conference & Exhibition**, Cancun, Mexico, October 24- 27, 2004.

PAULL, C.K.; USSLER III, W.; BOROWSKI, W.S. Sources of methane to form marine gas hydrates, **Annals of New York Academy of Sciences**, v. 715, p. 392-409, 1994.

PINTAS, E. M. **Análise de Atributos AVO e Física de Rochas Aplicados na Identificação e Caracterização de Hidratos de Gás na Bacia de Pelotas**. 2011. 79 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Curso de Geofísica) - LAGEMAR, UFF, Rio de Janeiro, 2011.

PIPER, D. J. W.; PIRMEZ, C.; MANLEY, P.L.; LONG, D.; FOOLD, R. D.; NNORMARK, W.R.; e W. SHOWERS, W. Mass-transport deposits of the Amazon Fan. Proceedings of the Ocean Drilling Program, Scientific Results, v. 155, p. 109-146, 1997.

RIMINGTON, N.; CRAMP, A.; MORTON, A. Amazon Fan sands: implications for provenance. **Marine and Petroleum Geology**, v. 17, p. 267–284, 2000.

ROSA, M.L.C.C.; R.N., AYUP-ZOUAIAN, R.N.; BARBOZA, E.G. Utilização de Seções Sísmicas 2D na identificação de Zonas de Escapes de Fluidos. **Gravel**, Porto Alegre, n. 4, p. 109-118, 2006.

RUSSELL, Brian Henderson. **The application of multivariate statistics and neural networks to the prediction of reservoir parameters using seismic attributes**. 2004. 392 p. PhD Thesis, University of Calgary, Canada, 2004.

SHARMA, P.V. Environmental and Engineering Geophysics. Cambridge University Press. 475 pp, 1997.

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.

SINGH, S. C.; MINSHULL, T.A.; SPENCE, G.D. Velocity structure of a Gas Hydrate Reflector. **Science**, New York, v. 260, n.5105, p. 204-207, 1993.

SLOAN, E.D. Jr. (2003). Fundamental Principles and Applications of Natural Gas Hydrates. **Nature**, 426, p. 353-359, 2003.

SOARES A. V.Jr.; COSTA, J. B. S.; HASUI, Y. Evolução da Margem Atlântica Equatorial do Brasil: Três Fases Distensivas. **Geociências** (São Paulo), v. 27, p. 427-437, 2008.

TANER M. Turhan. Seismic attributes. CSEG. Vol 26 (9), p. 48 - 56, 2001.

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

TANER, M. Turhan., 1992. Attributes Revisited - Rock Solid Images. Houston, Texas (Revised Sep. 2000), P. 3 - 27.

TANER, M. Turhan; KOEHLER, Fulton; 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.

## 10 REFERÊNCIAS COMPLEMENTARES

BANCO DE DADOS DE EXPLORAÇÃO E PRODUÇÃO – BDEP WebMaps, ANP.  
<<http://app.anp.gov.br/webmaps/>>. Acesso em: 28 de junho de 2017.

SEG WIKI – Dictionary: Second Time Derivative of the trace envelope.  
<[http://wiki.seg.org/wiki/Dictionary:Second\\_time\\_derivative\\_of\\_the\\_trace\\_envelope](http://wiki.seg.org/wiki/Dictionary:Second_time_derivative_of_the_trace_envelope)>. Acesso em: 16 de outubro de 2017.