

**Universidade Federal Fluminense**  
**Instituto de Geociências**  
**Graduação Geofísica**

**Análise de Atributos Sísmicos Para Caracterização de Hidratos de Gás  
no Cone do Rio Grande**

**Caio de Souza Barros**

**Niterói, 2009**

**Universidade Federal Fluminense**  
**Instituto de Geociências**  
**Graduação Geofísica**

Trabalho de Conclusão de Curso

**Análise de Atributos Sísmicos Para Caracterização de Hidratos de Gás  
no Cone do Rio Grande**

Aluno: Caio de Souza Barros

Orientadores: Cleverson Guizan Silva & Rogério de Araújo Santos

**Niterói, 2009**

**Análise de Atributos Sísmicos Para Caracterização de Hidratos de Gás  
no Cone do Rio Grande**

**Caio de Souza Barros**

Trabalho de Conclusão de Curso II  
apresentado ao Curso de Graduação  
em Geofísica do Instituto de  
Geociências. Como requisito parcial  
para obtenção do grau de bacharel em  
geofísica.

Aprovada em 18 de Dezembro de 2009

**Banca Examinadora:**

---

**Prof. Dr. Cleverson Guizan Silva / Lagemar UFF – Orientador**

---

**Prof. MSc. Rogério de Araújo Santos / Petrobras – Orientador**

---

**Prof. Dr. Adalberto da Silva / Lagemar UFF**

---

**MSc. Bruno Mendes da Silva / PGS**

B277 Barros, Caio de Souza

Análise de atributos sísmicos para caracterização de hidratos de gás no Cone do Rio Grande / Caio de Souza Barros. – Niterói : [s.n.], 2009.

62 f.

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

1.Atributos sísmicos. 2.Hidratos de gás. 3.Cone do Rio Grande.

I.Título.

CDD 622.1592

*“A mente que se abre a uma nova idéia jamais voltará ao seu tamanho original.”*  
*Albert Einstein*

## **Agradecimentos**

Em primeiro lugar gostaria de agradecer aos meus pais Sandra Barros e Agnaldo Barros que são a base de tudo na minha vida e que eu tenho enorme orgulho e admiração, a minha irmã Juliana Barros, minha namorada Nathália Figueiredo e aos meus avós Tomáz Souza e Generosa Carneiro pelo apoio e incentivo. Em geral gostaria de agradecer a toda minha família que sempre acreditou no meu potencial. Gostaria de agradecer também aos meus orientadores Rogério Santos e Cleverson Guizan que me apoiaram e incentivaram transmitindo seus conhecimentos e me dando conselhos. A minha banca examinadora Bruno Silva e Adalberto da Silva pelas sugestões e críticas construtivas e a nossa coordenadora Eliane Alves que sempre batalhou para a evolução do Curso de Geofísica da UFF.

Um agradecimento especial a todos os meus amigos, entre eles: Thiago Pinotti, Miguel Redusino, Fernanda Viana, Carlos Jesus (Robinho), Juliana Souza, Marcus Vinicius (Becao), Neudson Magalhães, Rodrigo Ferro (Wally), Rodrigo Leandro (Robin), Felipe Nascimento (Biro), Pedro Vergara, Vitor Sá, Gustavo Vasconcellos (Custela), Stefane Salles, Lidice Cabral, Lis Rocha, Pedro Jonas (Geremias), Edinei, Felipe (Figura), Marina, Lívia Falcão, Renata Maia, Tiago Alcantara, Guilherme Jangelme, Ingrid Milagres, Vinicius Diniz, Lourdes de Matos, Felipe Cassau, Pedro Cassau, Ricardo Paysano, Dario Pinho, Roberto Marques, Rodrigo Braga, Thye Mattos, Alfredo Carlos. E aos meus técnicos Carlos Carvalho e Silvio Telles que sempre apoiaram e incentivaram meus estudos.

Muito Obrigado a todos.

## Sumário:

<b>Lista de Figuras</b> -----	I
<b>Lista de Gráficos</b> -----	II
<b>Lista de Tabelas</b> -----	II
<b>Resumo</b> -----	III
<b>Abstract</b> -----	IV
1 – Introdução -----	Pag. 1
2 – Objetivo -----	Pag. 2
3 – Hidratos de Gás -----	Pag. 3
3.1 – O que são? -----	Pag. 3
3.2 – Ambientes de Formação dos Hidratos de Gás-----	Pag. 4
3.3 – Detecção de Hidratos de Gás -----	Pag. 6
4 – Atributos Sísmicos -----	Pag. 10
4.1 – Classificação dos Atributos -----	Pag. 13
4.2 – Tipos de Atributo-----	Pag. 14
4.2.1 – Envelope -----	Pag. 15
4.2.2 – Fase Instantânea-----	Pag. 15
4.2.3 – Frequência Instantânea -----	Pag. 15
4.2.4 – Fator de Qualidade $Q$ Instantâneo -----	Pag. 16
5 – Área de Estudo -----	Pag. 19
5.1 – Bacia de Pelotas -----	Pag. 19
5.2 – Cone do Rio Grande -----	Pag. 22
6 – Metodologia e Material Utilizado -----	Pag. 24
7- Resultados e Discussão-----	Pag. 26
7.1 – Identificação de Hidratos de Gás no Cone do Rio Grande -----	Pag. 26
7.2 – Análise de Atributos Sísmicos -----	Pag. 35
7.2.1 – Fase Instantânea -----	Pag. 36
7.2.2 – Envelope -----	Pag. 39
7.2.3 – Fator de Qualidade $Q$ Instantâneo -----	Pag. 41
8 – Conclusão -----	Pag. 44
9 – Referências Bibliográficas -----	Pag. 46

## LISTA DE FIGURAS

- Figura 1: a) Visualização macroscópica dos hidratos de gás. b) Cristais de hidrato de gás. c) Forma cristalina de um clatrato de gás metano -----Pág. 3
- Figura 2: Formação de Hidratos de Gás nos interstícios dos sedimentos-----Pág. 5
- Figura 3: Exemplo de formação de hidratos de gás em ambiente marinho-----Pág. 6
- Figura 4: Sísmica caracterizando BSR paralelo ao fundo oceânico-----Pág. 7
- Figura 5: Evidência do BSR----- Pág. 7
- Figura 6: Exemplo da redução da amplitude causada pelo *blanking*----- Pág. 8
- Figura 7: Sísmica caracterizando *blanking*-----Pág. 9
- Figura 8: Exemplo do *blanking* associado ao BSR em um ambiente marinho-----Pág. 10
- Figura 9: Linha de tempo do desenvolvimento dos atributos sísmicos----- Pág. 10
- Figura 10: a) traço sísmico real, b) quadratura, c) fase instantânea, d) frequência instantânea, e) análise de um sinal analítico complexo-----Pág. 12
- Figura 11: Perfil de velocidade de ondas P -----Pág. 12
- Figura 12: Mapa batimétrico da Bacia de Pelotas -----Pág. 19
- Figura 13: Sugestão de um padrão para o desenvolvimento da inclinação da superfície do embasamento cristalino-----Pág. 22
- Figura 14: Mapa de posicionamento das linhas adquiridas-----Pág. 25
- Figura 15: Linha 0231-1340.1, interpretação do BSR-----Pág. 27
- Figura 16: Linha 0228-0312.5, interpretação do BSR-----Pág. 28
- Figura 17: Linha 0228-0313.6, interpretação do BSR-----Pág. 29
- Figura 18: Linha 0228-0311.4, interpretação do BSR-----Pág. 30
- Figura 19: Área de ocorrência dos hidratos de gás no Cone do Rio Grande-----Pág. 31
- Figura 20: Exemplo de formação do paleo BSR-----Pág. 34

Figura 21: Possível paleo BSR -----	Pág. 35
Figura 22: Linha 0228-313.6, comparação entre Amplitude x Fase Instantânea---	Pág. 37
Figura 23: Comparação entre Amplitude x Fase Instantânea -----	Pág. 38
Figura 24: Comparação entre Amplitude e Envelope-----	Pág. 39
Figura 25: Comparação entre Amplitude e Envelope (Linha 0228-313.6)-----	Pág. 40
Figura 26: Comparação entre Amplitude e Fator de Qualidade $Q$ -----	Pág. 41
Figura 27: Comparação entre sísmica convencional (amplitude) e aplicação do atributo sísmico Fator de Qualidade $Q$ (Linha 0228-312.5)-----	Pág. 42
Figura 28: Comparação entre sísmica convencional (amplitude) e aplicação do atributo sísmico Fator de Qualidade $Q$ (Linha 0228-311.4)-----	Pág. 43

## LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1: Linha 0228-311.4, correlação entre espessura dos hidratos x profundidade do fundo do mar-----	Pág. 32
Gráfico 2: Linha 0228-312.5, correlação entre espessura dos hidratos x profundidade do fundo do mar-----	Pág. 33
Gráfico 3: Linha 0228-313.6, correlação entre espessura dos hidratos x profundidade do fundo do mar-----	Pág. 33

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Diferentes tipos de estruturas cristalinas de gelo, Tipo I e II e seus respectivos compostos associados-----	Pág. 4
Tabela 2: Propriedades físicas dos hidratos de gás e do gelo comum-----	Pág. 4
Tabela 3: Medição do fator de qualidade $Q$ em laboratórios-----	Pág. 18

## RESUMO

A Bacia de Pelotas é a bacia precursora das demais bacias marginais brasileiras e abriga uma das maiores feições sedimentares do Brasil, o Cone do Rio Grande. O Cone do Rio Grande caracteriza-se por ser uma feição singular desenvolvida na porção sul da Bacia de Pelotas e destaca-se por uma volumosa cunha de natureza progradante depositada sobre o talude e sopé continentais. Dentre os objetos de estudo presentes nessa região, podemos citar a ocorrência já comprovada de hidratos de gás. Os hidratos de gás também conhecidos como *clatratos*, caracterizam-se como estruturas cristalinas compostas por moléculas de água (H<sub>2</sub>O) e de gases com peso molecular pequeno. Macroscopicamente o hidrato de gás assemelha-se ao gelo e caracteriza-se por uma alta velocidade sísmica intervalar; destaca-se por funcionar como selo para gases livres vindos de substratos inferiores, permitindo assim sua acumulação abaixo de sua zona de estabilidade. A principal forma de detecção em larga escala dos hidratos de gás é a sísmica de reflexão, aonde são analisados dois principais padrões sísmicos: o BSR (Bottom Simulating Reflection) e o *blanking* “blindagem”. No Cone do Rio Grande, às ocorrências dos hidratos de gás estão associadas principalmente ao BSR. O BSR caracteriza-se por ser um refletor paralelo ao fundo marinho com um coeficiente de reflexão negativo causado pelo contraste de impedância acústica entre a zona de estabilidade dos hidratos de gás (alta velocidade) e a camada de gás livre situada abaixo desta (baixa velocidade). Em algumas regiões, a identificação dos padrões sísmicos relacionados aos hidratos de gás não era clara, por isso foram utilizados atributos sísmicos para diminuir incertezas e suposições. A metodologia baseou-se na análise de perfis sísmicos na região do Cone do Rio Grande e no cálculo de atributos sísmicos. Os atributos de Fase Instantânea, Envelope e Fator de Qualidade  $Q$  Instantâneo, foram os atributos que melhor caracterizaram a ocorrência de hidratos de gás. O atributo sísmico de Fase Instantânea mostrou grande eficiência para visualização da continuidade lateral das camadas, foi eficiente na caracterização do *blanking* e para identificação de truncamentos. Nas regiões com sedimentos deformados por dobramentos a aplicação do atributo de Fase Instantânea foi de grande utilidade para identificação do BSR. O atributo de Envelope mostrou-se eficiente para a caracterização do BSR, tanto em regiões com sedimentos dobrados, como em regiões de sedimentação plana paralela, destacando o limite da zona de estabilidade dos hidratos de gás. Isso ocorre devido a sua relação direta com a energia instantânea total e a independência da fase, com isso foi possível destacar o contraste de impedância acústica entre a zona de estabilidade dos hidratos de gás e a zona de gás livre. A junção das propriedades petrofísicas, geológicas e sísmicas características da ocorrência de hidratos de gás, fornece os elementos necessários para que o atributo sísmico do Fator de Qualidade  $Q$  Instantâneo, se destaque como o melhor atributo sísmico para a caracterização de hidratos de gás. A utilização do atributo de Fator de Qualidade  $Q$  foi de grande utilidade para a redução de incertezas e suposições na identificação dos hidratos de gás, destacando claramente sua área de ocorrência. Com isso estimou-se uma área de ocorrência aproximada de 40.000 km<sup>2</sup>, estendendo-se em uma direção preferencial alongada NE-SW em uma lamina d'água que varia de 900 a 3000 metros.

**Palavra chave:** <sup>1</sup>Atributos Sísmicos, <sup>2</sup>Hidratos de Gás, <sup>3</sup>Cone do Rio Grande.

## ABSTRACT

The Pelotas basin is the precursor of other offshore Brazilian basins, and presents one of the hugest sedimentary features in Brazil, the Rio Grande Cone. The Rio Grande Cone is a singular feature developed in the Southern portion of the Pelotas Basin and its prograding wedge presents an outstanding volume of sediments over the continental slope and rise. Among the studies in this area there are many references proving the occurrence of gas hydrates. The gas hydrates also known as *clathrates* are crystalline structures composed by water molecules (H<sub>2</sub>O) and low molecular weight gases. Macroscopically the gas hydrate seems like ice and has high interval seismic velocity. It serves as seal for free gases migrating from lower sections, allowing in this sense accumulation of gases below the stability zone of the hydrates. The main way to detect gas hydrate in a large-scale is the seismic reflection, where there are considered two principal seismic patterns: the BSR (Bottom Simulating Reflection) and blanking. The BSR seismic feature is identified by a negative reflection parallel to the sea floor associated with the contrast of acoustic impedance between the gas hydrates stability zone (high velocity) and the free gas zone below the stability zone (low velocity). Currently in the Rio Grande Cone the occurrence of gas hydrates are associated with BSR presence, however, in some regions, the seismic evidences related to gas hydrates identification wasn't clear. Then the seismic attributes calculation was used to reduce uncertainties and assumptions. The methodology was based on analysis of seismic profiles and seismic attributes calculation. The attributes Instantaneous Phase, Envelope and Instantaneous Quality Factor Q, were the attributes that best characterized the gas hydrates occurrence. The Instantaneous Phase attribute showed great efficiency for viewing the lateral continuity of layers, was efficient on *blinking* characterization and truncations identifications. In regions with deformed sediments by folding, the instantaneous phase attribute application is very useful for BSR identification. The Envelope attribute is efficient to characterize the BSR in both regions; with folded sediments, and in regions of parallel flat sedimentation, highlighting the border of the stability of gas hydrates. That is possible because its direct relation to the total instantaneous power and phase independence, making it possible to highlight the contrast in acoustic impedance between the zone of stability of gas hydrates and free gas zone. The combination of petrophysical, geological and seismic characteristics of the gas hydrates occurrence, provides the necessary information to make the Instantaneous Quality Factor Q the best seismic attribute for the characterization of gas hydrates. The use of the Instantaneous Quality Factor Q is very useful to reduce uncertainties and assumptions in the identification of gas hydrates, clearly emphasizing its range. Thus an estimated area of gas hydrate occurrence of approximately 40,000 square kilometers was estimated, extending in an elongated parallel direction NE-SW in a water depth ranging from 900 to 3000 meters.

**Key Words:** <sup>1</sup>Seismic Attributes, <sup>2</sup>Gas hydrate, <sup>3</sup>Rio Grande Cone.

# 1- Introdução

As bacias da margem continental brasileira foram formadas pelos processos distensionais durante a ruptura continental no Neojurássico-Eocretáceo, ocasionando a fragmentação do Super continente Gondwana (Asmus, 1975). Dentro deste contexto, no extremo sul da margem continental brasileira, a Bacia de Pelotas desenvolveu-se como a precursora das demais bacias marginais brasileiras (Fontana, 1996). A Bacia de Pelotas situa-se entre as latitudes 28°S a 34°S, cobrindo uma área de 210.000 km<sup>2</sup> até a cota batimétrica de 2.000 m (Abreu, 1998). O Alto de Florianópolis separa a Bacia de Pelotas da Bacia de Santos no seu limite norte, sendo que o limite sul estende-se até o Uruguai (Fontana, 1996 & Gamboa et al., 1981).

Os Projetos REMAC e LEPLAC foram os pioneiros na utilização de dados geofísicos para uma melhor individualização das feições fisiográficas na região (Alves, 1977; Gomes et al., 1993), dentre essas feições destaca-se o Cone do Rio Grande. Gomes et al. (1993) detalharam tal feição sedimentar como sendo a mais proeminente da bacia, cuja espessura na região do depocentro chega a atingir até 12 km. De acordo com Basseto et al. (2000) o Cone do Rio Grande, assim como outras feições sedimentares da margem continental, apresentam uma morfologia ondulada gerada a partir de uma série de processos, como: dobras flexurais geradas pela carga sedimentar e reajustamento isostático, dobras e falhas normais e reversas causadas por forças compressivas e extensivas relacionadas à tectônica gravitacional de argilas, além de retrabalhamento por correntes de fundo (sediment waves). Dentre os principais estudos da região, o trabalho de Fontana, (1989) destacou a existência já comprovada de hidratos de gás.

Os hidratos de gás também conhecidos como *clatratos*, caracterizam-se como estruturas cristalinas compostas por moléculas de água (H<sub>2</sub>O) e de gases com peso molecular pequeno (Sloan, 1998). Sua formação é controlada por condições físico-químicas bem específicas, restringindo assim seu campo de ocorrência (Clennell, 2000). A principal forma de detecção em larga escala dos hidratos de gás é a sísmica de reflexão. Para essa identificação são analisadas duas principais características sísmicas: o BSR (Bottom Simulating Reflection) e o Blanking “blindagem” (Lee, M.W., 1993). A identificação do

BSR pode não ser muito clara devido à disposição estratigráfica local, se as camadas forem paralelas ao fundo oceânico suas características sísmicas ficam camufladas.

Fontana (1989) foi um dos primeiros autores a identificar as ocorrências de hidratos de gás na região do Cone do Rio Grande, destacando sua ocorrência em uma área alongada que abrange cerca de 40.000 a 50.000 km<sup>2</sup> em uma direção NE-SW sob lâmina d'água entre 500 a 3.500 m. Apresentando uma espessura média de 600m com a existência de gás livre abaixo da zona de estabilidade dos hidratos de gás, Sad et al. (1997) estima um potencial com volume aproximado de 135 bilhões de m<sup>3</sup> (4.77 TCF) de gás in place aprisionado na forma de hidrato de gás ou aproximadamente  $2.2 \times 10^{13}$  m<sup>3</sup> (782 TCF) de gás sob as condições normais de temperatura e pressão (CNTP).

Levando em consideração que os padrões sísmicos relacionados à ocorrência de hidratos de gás nem sempre são tão claros, nesse trabalho utilizaremos a análise de atributos sísmicos que caracterizem a ocorrência de hidratos de gás. Os atributos sísmicos procuram viabilizar a interpretação de dados sísmicos, extraíndo informações geológicas, estruturais e físicas da sub-superfície. Entre os atributos pós stack destacam-se: Impedância Acústica, Envelope, Frequência instantânea, Fase instantânea e Fator de Qualidade Q.

## **2- Objetivo**

O presente trabalho tem como objetivo geral mapear as ocorrências de hidratos de gás na Bacia de Pelotas utilizando dados sísmicos de reflexão. Como objetivos específicos serão analisadas as características sísmicas relacionadas à ocorrência de hidratos de gás, o BSR e o blanking. Utilizaremos também a análise de atributos sísmicos que caracterizem a ocorrência de hidratos de gás na bacia, relacionando-os com as propriedades físicas e geológicas da zona de estabilidade dos hidratos de gás e com possíveis reservatórios de gás livre que se encontram aprisionados pela camada de hidratos de gás. Com isso será possível identificar o atributo sísmico que melhor evidencia as ocorrências de hidratos de gás.

### 3- Hidratos de Gás

#### 3.1- O que são?

Os hidratos de gás, também conhecidos como *clatratos*, caracterizam-se como estruturas cristalinas compostas por moléculas de água (H<sub>2</sub>O) e por gases com peso molecular pequeno. O *clatrato* é composto por moléculas de água, associadas umas às outras por pontes de hidrogênio. Essas moléculas são responsáveis pela formação de uma estrutura cristalina que possibilita o aprisionamento de moléculas de gás, como metano e dióxido de carbono, no interior da estrutura (Sloan, 1998). Macroscopicamente os hidratos de gás assemelham-se a cristais de gelo (Figura 1).

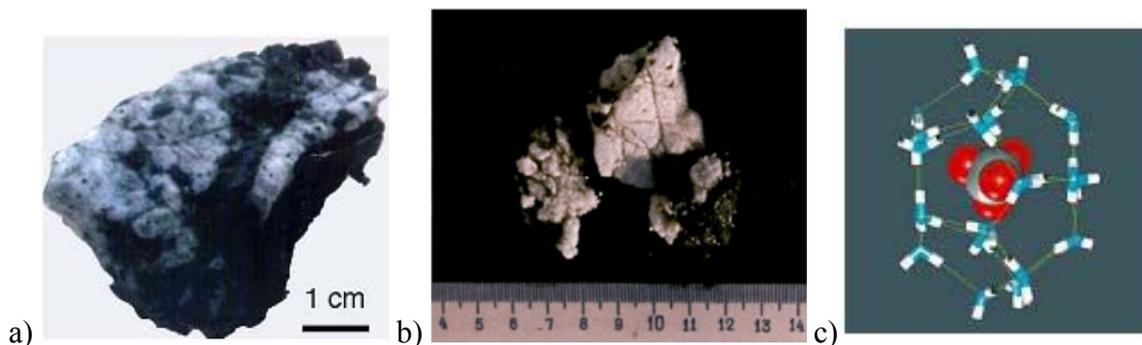


Figura 1 - (a) visualização macroscópica de uma ocorrência natural de HG de ambiente marinho (modificado de Tanaka, 2003) (b) Cristais de hidrato de gás recuperados de 300 m embaixo do fundo marinho em sedimentos finos da margem ativa de Costa Rica, durante Leg 170 do Ocean Drilling Program (adaptado de Clennell, 2000), (c) forma cristalina de um clatrato de gás metano (HG), em azul e branco, moléculas de água, e no centro, em vermelho e cinza, moléculas de metano (Tanaka, 2003 *apud* Freitas, 2002).

Mesmo não havendo ligações químicas entre o hospedeiro (estrutura de água) e o hóspede (molécula de gás), a estrutura do *clatrato* preserva-se estável, permitindo assim que as moléculas de água não saiam do seu estado sólido mesmo em temperaturas bem superiores a 0°C (zero graus Centígrados). Esse fato só ocorre se a pressão e a concentração de gases forem suficientemente altas (Clennell, 2000). Normalmente as estruturas cristalinas de gelo compõem um sistema hexagonal, porém, para o caso específico dos hidratos de gás assumem estruturas de cristais de gelo isométrico (cúbico). A estrutura

isométrica pode ser ainda identificada de outras duas formas: Tipo I e Tipo II (Tabela 1). A estrutura do Tipo I está associada a gases de origem biogênica, enquanto a do Tipo II tem como característica abrigar moléculas de hidrocarbonetos maiores, sendo assim normalmente está associada a gases de origem termogênica (Tanaka, 2003, Freitas, 1990).

**Sistema Cristalográfico da Molécula de Gelo: Isométrico (Cúbico)**

Tipo I	Tipo II
<ul style="list-style-type: none"> <li>• A molécula de gás encontra-se alojada no centro da estrutura</li> <li>• Principais Compostos:               <ul style="list-style-type: none"> <li>- Metano</li> <li>- Etano</li> <li>- Dióxido de carbono</li> <li>- Sulfeto de hidrogênio</li> </ul> </li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Esta estrutura consegue alojar moléculas maiores</li> <li>• Principais compostos:               <ul style="list-style-type: none"> <li>- Propano</li> <li>- /sobutano</li> <li>- Nbutano</li> </ul> </li> </ul> <p style="font-size: small; margin-top: 10px;">Obs: os dois primeiros podem ser encontrados sob forma de hidratos puros.</p>

Tabela 1- Diferentes tipos de estruturas cristalinas de gelo, Tipo I e II e seus respectivos compostos associados (Tanaka, 2003. baseado em Freitas, 1990).

A molécula hóspede mais comum nos hidratos de gás marinhos é o metano (CH<sub>4</sub>); hidrocarbonetos mais pesados como o CO<sub>2</sub> e o H<sub>2</sub>S normalmente ocorrem em proporções menores que 2% (Kvenvolden, 1993). De acordo com Clennell, (2000) enquanto o CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>S e o C<sub>2+</sub> servem para aumentar a temperatura de dissociação dos clatratos, a presença de sais dissolvidos na água diminui a condição de estabilidade dos *clatratos*.

<b>Propriedade</b>	<b>Gelo</b>	<b>Hidrato de Metano</b>
Densidade (kgm <sup>-3</sup> )	916	912
Módulo de incompressibilidade (Pa)	8.8 x 10 <sup>9</sup>	5.6 x 10 <sup>9</sup>
Módulo de cisalhamento (Pa)	3.9 x 10 <sup>9</sup>	2.4 x 10 <sup>9</sup>
Constante dielétrica (-)	94	58
Condutividade térmica W m <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup>	2.25	0.5
Entalpia de fusão (Jmol <sup>-1</sup> )	6000	55000

Tabela 2 - Propriedades físicas dos hidratos de gás e do gelo comum (Clennell, 2000).

### 3.2- Ambientes de Formação dos Hidratos de Gás

Os hidratos de gás são encontrados na natureza nos poros intersticiais dos sedimentos (Figura 2), em ambientes marinhos e terrestres, submetidos a baixas

temperaturas (Kvenvolden, 1993; Lorenson e Kvenvolden, 2001). Em ambientes terrestres os hidratos de gás restringem-se às regiões polares, normalmente associadas a permafrosts (horizontes de solos congelados).

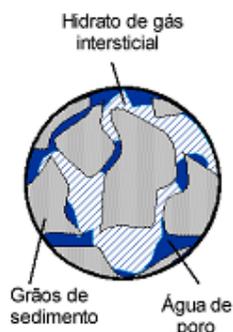


Figura 2 - Formação de Hidratos de Gás nos interstícios dos sedimentos (adaptado de Clennell, 2000).

Em ambientes marinhos podem ocorrer na plataforma continental ou em mar profundo, como em áreas de talude e elevação continental. Em zonas de fraturas e falhas, o gás pode percolar através dos sedimentos até o fundo marinho, gerando as exsudações de gás, nestas localidades são encontrados veios e nódulos dos clatratos em abundância (Ginsburg & Soloviev, 1997). As áreas de ocorrência dos hidratos de gás normalmente estendem-se desde o talude superior à elevação continental, em profundidades variando de 600 m a aproximadamente 3.000 m de lâmina d'água. De acordo com Clennell, (2000), a zona de estabilidade de hidratos de gás está limitada pela intersecção da curva de estabilidade do clatrato com a curva de temperatura dentro dos sedimentos marinhos (Figura 3).

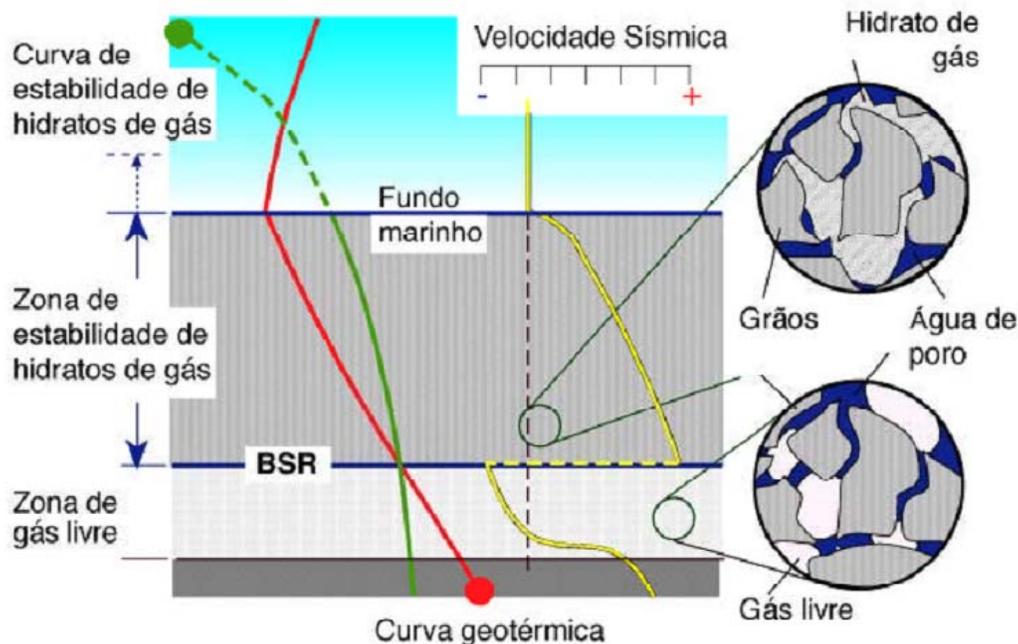


Figura 3 – Exemplo de formação de hidratos de gás em ambiente marinho (Clennell, 2000).  
 Destaque para o contraste de velocidade entre a zona de gás livre e a zona de estabilidade dos hidratos de gás.

### 3.3- Detecção de Hidratos de Gás

Os hidratos de gás são detectáveis por diversas maneiras, como por exemplo: amostragem direta (testemunhos, furos de sondagem e amostras de fundo) sísmica de reflexão e métodos geoeletricos. Normalmente os hidratos de gás são detectados de forma indireta, isso porque o estado sólido do clatrato é instável nas condições predominantes em superfície.

Para detecção de clatratos em testemunhos são utilizados dois principais métodos: medidas de temperatura e análises químicas (salinidades), com diluição do Cloro (Cl<sup>-</sup>). O método de medidas de temperatura leva em consideração que após a dissociação dos hidratos em condições de temperatura e pressão em superfície, as zonas que tenham liberado hidratos recentemente ainda registrarão temperaturas muito baixas, chegando a ser inferior a 0°C (zero grau Centígrado) (Paull et al., 1996). O outro método mais confiável, parte do princípio que durante a cristalização dos clatratos todos os sais são excluídos da estrutura e desta forma o mineral será constituído apenas de gás e água pura (Hesse & Harrison, 1981). Uma vez que os testemunhos estão em superfície os cristais de clatrato se

dissociam, a água doce é então liberada, diluindo o fluido original contido nos poros. Assim, a análise de salinidade, permite a identificação da profundidade de ocorrência de hidratos que se situam nas regiões (anomalias) com salinidades muito abaixo da esperada.

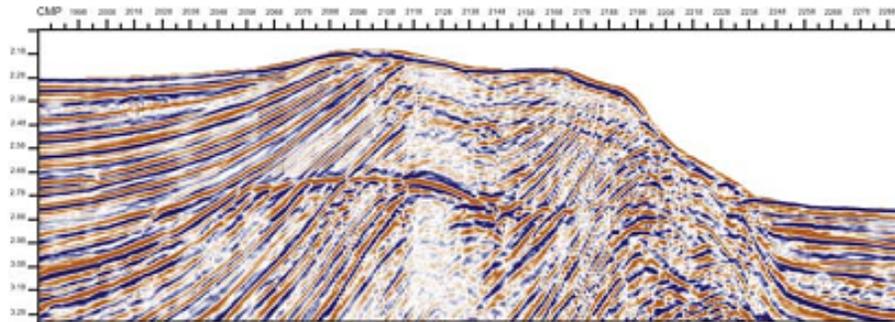


Figura 4 – Sísmica caracterizando BSR paralelo ao fundo oceânico (Tanaka, 2003).

A sísmica de reflexão em ambientes marinhos é a principal forma de detecção de hidratos de gás em larga escala. Os intervalos de sedimentos contendo hidratos de gás mostram em geral, uma alta resistividade, elevada velocidade  $V_p$ , alta velocidade  $V_s$ , baixa condutividade térmica e baixa constante dielétrica (Goldberg et al., 2000). Existem dois principais padrões de reflexão sísmica que são característicos da presença de hidratos de gás. São eles, BSR (Bottom Simulating Reflection) e o *blanking* (“clareamento”).

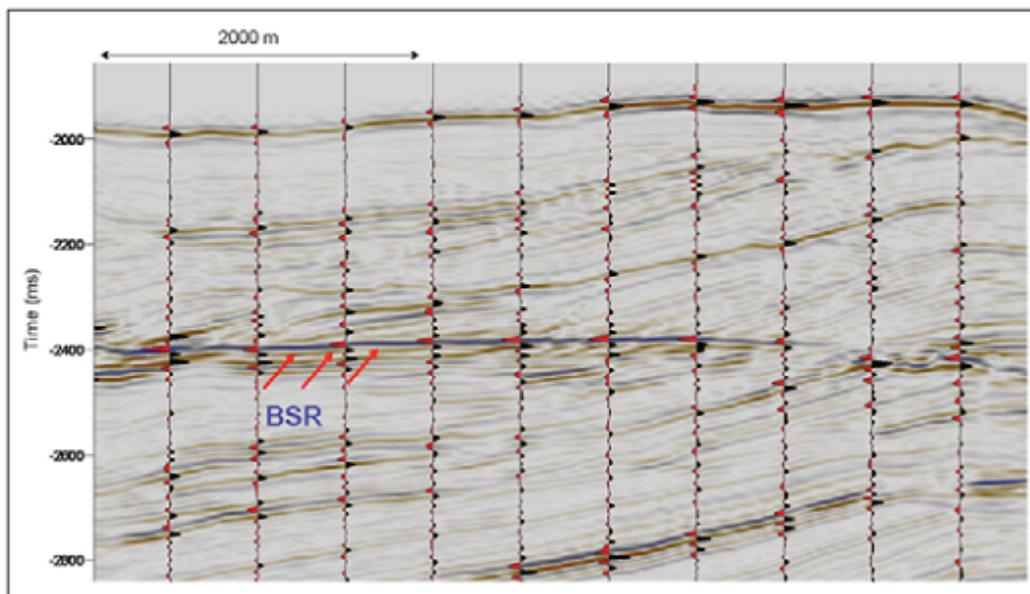


Figura 5 – Evidência do BSR cruzando a seção. Destaque para a polaridade invertida em relação ao fundo do mar (Legorreta, 2009).

O BSR caracteriza-se por um refletor paralelo ao fundo marinho, que contém ainda um alto valor de amplitude e a polaridade invertida em relação ao horizonte do fundo do mar, muitas vezes truncando outros refletores. Tinivella (2008) estimou uma velocidade de aproximadamente 2250 m/s para os hidratos de gás em sedimentos marinhos, e uma velocidade de aproximadamente 1660 m/s em sedimentos situados abaixo do BSR, provavelmente associados a sedimentos contendo gás livre. Esse grande contraste de velocidade é o responsável pela polaridade invertida do BSR em relação ao horizonte do fundo do mar. No horizonte do fundo do mar a velocidade varia de aproximadamente 1500 m/s (velocidade da água) para aproximadamente 1800 m/s (velocidade das primeiras camadas sedimentares), ou seja, o aumento da velocidade proporciona um coeficiente de reflexão positivo (devido ao contraste de impedância acústica). Enquanto isso, quando a onda sísmica passa pelo contraste de velocidade entre os hidratos de gás (2250 m/s) e o gás livre (1660 m/s), ocorre uma diminuição da velocidade sísmica, ocasionando assim um coeficiente de reflexão negativo. Sua detecção nem sempre é muito clara devido à disposição estratigráfica local, se os estratos forem paralelos ao fundo oceânico suas características ficam camufladas.

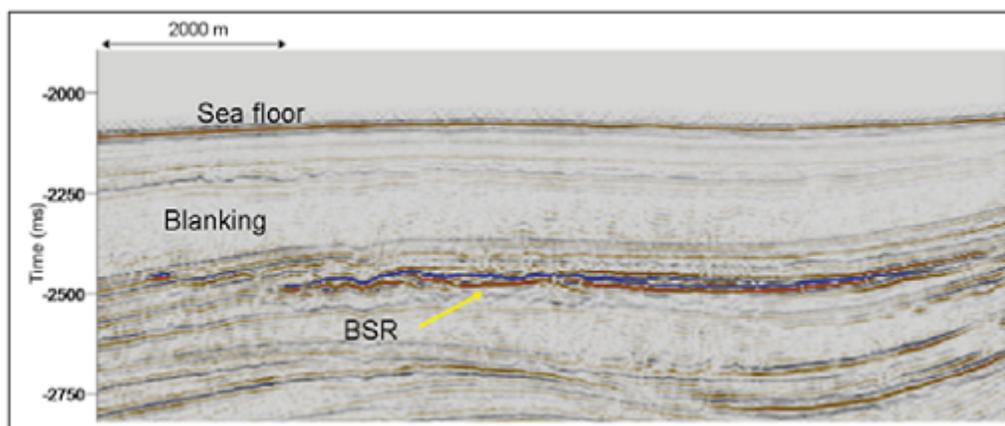


Figura 6 – Exemplo da redução da amplitude causada pelo blanking (Legorreta, 2009).

O *blanking* ou “blindagem” (Lee, M.W., 1993), destaca-se por ser uma outra característica sísmica que destaca a evidência de hidratos de gás. Os hidratos de gás em suas zonas de estabilidade muitas vezes causam a cimentação dos sedimentos aonde se situam, essa cimentação reduz os contrastes de impedância acústica entre as camadas com

texturas diferentes. A cimentação juntamente com os hidratos de gás imprime assim um aspecto “blindado”. Normalmente a ocorrência do *blanking* está associada à ocorrência do BSR, destacando assim o limite da zona de estabilidade dos hidratos de gás.

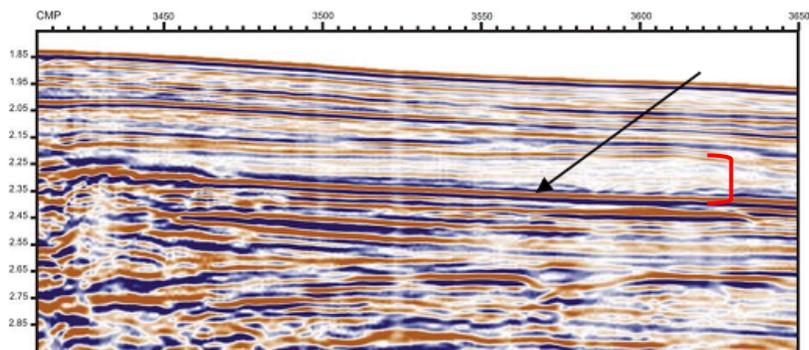


Figura 7 – Sísmica caracterizando *blanking* (colchete vermelho). Seta preta indica o BSR, base da zona de estabilidade dos hidratos de gás. (adaptado de Tanaka, 2003).

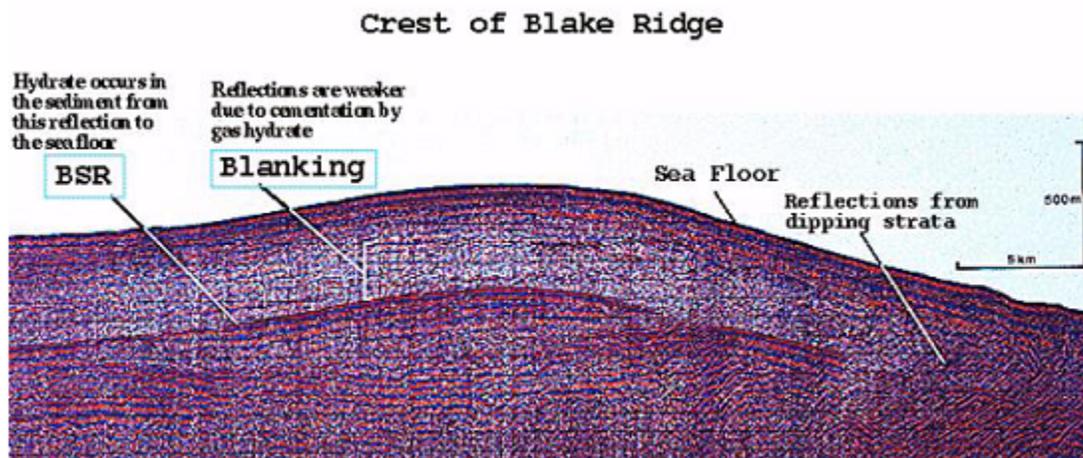


Figura 8 - Exemplo clássico do *blanking* associado ao BSR em um ambiente marinho, (<http://woodshole.er.usgs.gov/project-pages/hydrates>, 2000).

## 4- Atributos Sísmicos.

Os atributos sísmicos entraram no mundo da exploração com o intuito de viabilizar uma melhor interpretação de dados sísmicos, extraindo informações geológicas, estruturais e físicas da sub superfície. Taner (1992) destacou que atributos sísmicos caracterizam-se por serem todas as informações obtidas de um dado sísmico, seja por medidas diretas ou por experiências baseadas em raciocínio lógico, ou seja, uma medida quantitativa das características sísmicas de interesse (Chopra & Kurt, 2005). Iniciados por volta dos anos 60 os atributos sísmicos são agora uma das principais ferramentas utilizadas na interpretação sísmica e na caracterização de reservatórios. Entre os principais atributos destacam-se: Velocidade Intervalar, Impedância Acústica, Amplitude vs Offset (AVO), Envelope, Frequência, Fase e Fator de Qualidade Q.

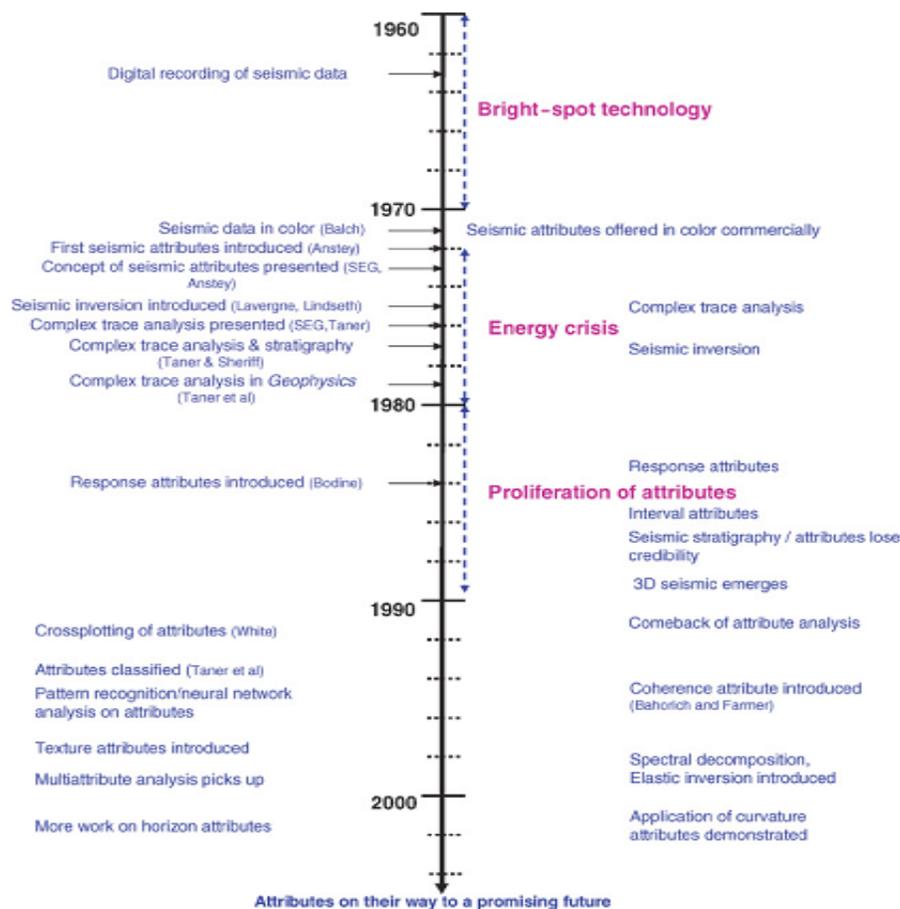


Figura 9 - Linha do tempo do desenvolvimento dos atributos sísmicos (Chopra & Kurt, 2005 *apud* Barnes, 1991).

O histórico dos atributos sísmicos começou por volta dos anos 1960 quando alguns geofísicos começaram a identificar reflexões mais fortes e algumas mudanças nas características sísmicas dos perfis analisados. Inicialmente acreditava-se que esses diferentes padrões eram fortes estrias e que não eram relacionados à geologia. Porém com a perfuração de poços foi possível de se relacionar à presença de gás, com essas fortes anomalias observadas nas seções sísmicas, com isso nasceu o conceito de *bright spot* (Chopra & Kurt, 2005). A gravação do sinal sísmico digital foi responsável direta pelo aumento da qualidade do dado sísmico, por volta de 1975 todos os dados sísmicos eram gravados digitalmente destacando assim a importância da preservação da amplitude sísmica. Balch (1971) destacou-se por ter sido a primeira publicação na GEOPHYSICS a mostrar dados sísmicos coloridos.

Taner e Sheriff (1977) descobriram uma técnica matemática para o cálculo de atributos e destacaram que a amplitude sísmica é tratada como a parte real de um sinal analítico complexo, e a parte imaginária seria obtida através da Transformada de Hilbert (Taner et al., 1979), a partir daí surgiram os chamados Atributos Instantâneos (Envelope, Fase, Frequência, etc). Os anos 70 tiveram outras importantes descobertas como a inversão de impedância acústica reportada por (Lavergne, 1975 & Lindseth, 1979). Os anos 80 caracterizam-se pela proliferação dos atributos sísmicos com o descobrimento de diversos atributos entre eles: cosseno da fase instantânea e da frequência dominante, amplitude média, *zero crossing frequency*, entre outros.

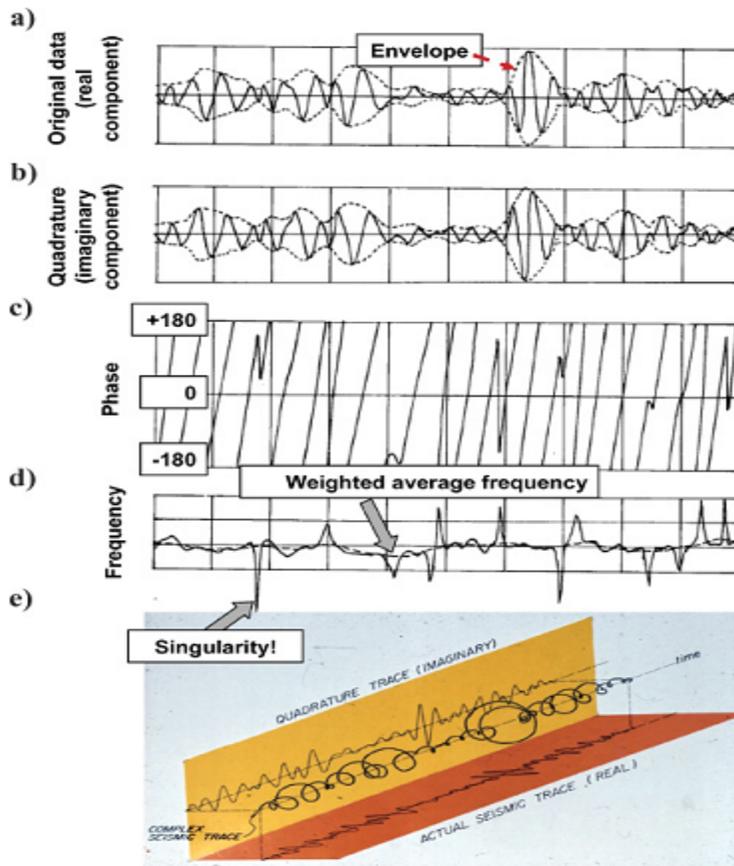


Figura 10 - a) traço sísmico real, b) quadratura, c) fase instantânea, d) frequência instantânea, e) análise de um sinal analítico complexo (Chopra & Kurt, 2005).

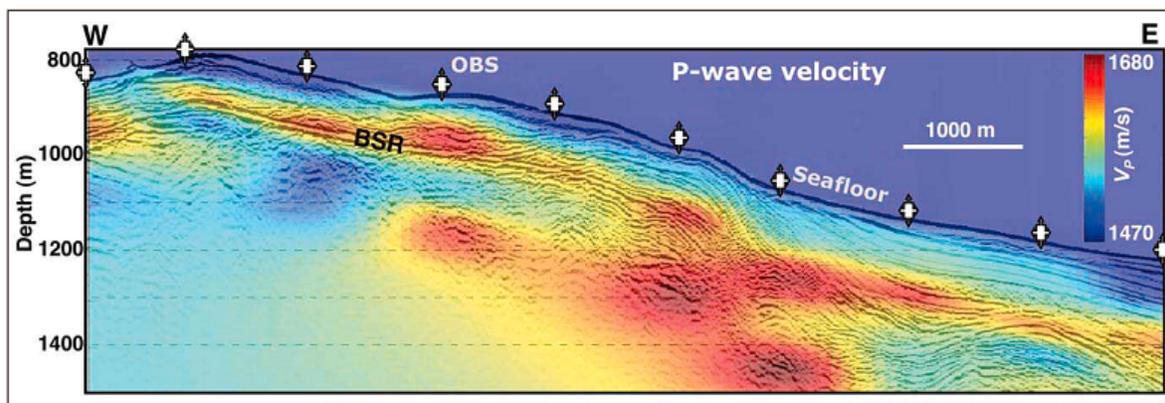


Figura 11 – Perfil de velocidade de ondas P derivado da análise de velocidades utilizando dados de OBS. Destaque para os altos valores de velocidade encontrados acima do BSR (Sugerindo Hidratos de gás), e para os baixos valores de velocidade encontrados abaixo do BSR (Sugerindo gás livre) (Dhananjay. et al., 2006).

## 4.1- Classificação dos Atributos

Nas últimas décadas diversos autores classificaram os atributos sísmicos em diferentes famílias, entre eles estão: Taner (1992), Taner et al., (1994), Brown (1996, 2004), Chen e Sidney (1997), e Liner et al. (2004). Nesse presente trabalho utilizaremos a classificação de Taner (1992) aonde ele classificou os atributos de acordo com a característica de cada um.

### Atributos Pré-Stack

Nesse tipo de atributo os dados de entrada são CDP (Common Depth Point), ou Image Gather Traces. Eles vão possuir informações relacionadas com direção (azimute) e afastamento fonte - receptor (*offsets*). Possuem como característica a geração de arquivos muito grandes por isso não são indicados para estudos iniciais (Taner, 1992).

### Atributos Pós-Stack

Devido ao processo de empilhamento (Stacking) ocorre a perda das informações relacionadas a *offsets* e a azimute. Os dados de entrada podem ser CDPs empilhados ou migrados. Importante ressaltar que a migração em tempo irá preservar as relações com o tempo, variações em tempo e com a frequência. Para migrações em profundidade a frequência é substituída por número de ondas, que é uma função da velocidade de propagação e frequência.

Uma outra classificação é baseada na relação do atributo com a geologia (Taner, 1992), entre eles: Atributos Físicos, Atributos Geométricos, Atributos Reflexivos e Atributos Transmissivos.

Atributos Físicos - Os atributos físicos devem ser extraídos a partir de parâmetros físicos de sub superfície, e então, relacionados as litologias. Por exemplo, a magnitude do traço envelope é proporcional ao contraste de impedância acústica, frequências relacionadas à espessura da camada, espalhamento da onda e absorção. Velocidades instantâneas e médias relacionadas às propriedades das rochas (densidade, compactação, etc.). Conseqüentemente esses atributos são mais utilizados para classificações litológicas e caracterização de reservatórios.

Atributos Geométricos - Os atributos geométricos descrevem relações espaciais e temporais de todos os outros atributos. Por exemplo, continuidade lateral medida por *semblance* é um bom indicador de descontinuidades. Camadas mergulhantes e curvadas nos dão informações deposicionais. Inicialmente os atributos geométricos foram desenvolvidos para ajudar com interpretações estratigráficas, porém hoje em dia são muito utilizados para caracterizar eventos deposicionais e litológicos.

A seguir iremos definir alguns principais atributos e mostrar suas possíveis relações com litologias, características de reservatórios e características deposicionais.

## 4.2- Tipos de Atributo

Para discorrer sobre os tipos de atributos que foram utilizados nesse trabalho primeiramente se deve compreender a análise de series temporais de uma função complexa. Taner e Sheriff (1977) foram um dos primeiros autores a relatarem a análise da função analítica complexa, então em Taner (1979) descreveu matematicamente a utilização da Transformada de Hilbert para o calculo da parte imaginaria de um sinal analítico complexo possibilitando assim, o cálculo dos primeiros atributos sísmicos instantâneos.

A análise do traço analítico complexo trata o traço sísmico  $f(t)$  como a parte real de um sinal analítico e  $g(t)$  como sendo a parte imaginaria. A parte imaginária do sinal analítico  $g(t)$  pode ser obtida a partir do sinal real  $f(t)$  através da Transformada de Hilbert. O componente imaginário  $g(t)$  é unicamente determinado de  $f(t)$  por uma das seguintes formas:

- 1) é determinado de  $f(t)$  por uma operação de convolução linear e
- 2) uma rotação de fase de  $f(t)$  se esta for uma função senoidal, isto é;

$$g(t) = A \sin(\omega t + \theta) \text{ se } f(t) = A \cos(\omega t + \theta) \text{ para todos os valores reais de } A \text{ e } \theta.$$

Essas condições determinam  $g(t)$  unicamente para qualquer  $f(t)$  que possa ser representada por uma serie de Fourier. Partindo da premissa que os traços real  $f(t)$  e imaginário  $g(t)$  podem ser expressos em termos de amplitudes  $A(t)$  e fase  $\theta(t)$  independentes do tempo, o traço complexo  $F(t)$  pode ser escrito como:

$$F(t) = f(t) + ig(t) = A(t)e^{i\theta(t)} \quad (1.0)$$

#### 4.2.1- Envelope

Sendo o traço analítico dado por:

$$F(t) = f(t) + ig(t) \quad (1.1)$$

onde:  $f(t)$  corresponde à parte real do dado sísmico gravado e  $g(t)$  corresponde à parte imaginária do traço.

Envelope é o módulo da função complexa:

$$E(t) = \sqrt{[f^2(t) + g^2(t)]} \quad (1.2)$$

$E(t)$  representa a energia instantânea total e a sua magnitude é de mesma ordem do traço de entrada. Ela varia aproximadamente entre zero e o valor de máxima amplitude do traço. Envelope é independente da fase e é relacionado diretamente com o contraste de impedância acústica, isso representa o contraste individual de cada interface. O atributo de envelope pode representar diversas características geológicas, entre elas: acumulações de gás, bright spots (pontos brilhantes, indicadores de hidrocarbonetos), limites de seqüências, efeito tuning (gerado pelo afinamento de camadas), discordâncias, mudanças laterais (indicando falhas) entre outros (Taner, 1992).

#### 4.2.2- Fase Instantânea

A fase instantânea é representada pelo argumento da função:

$$\theta(x,t) = \arctg\left[\frac{g(x,t)}{f(x,t)}\right] \quad (1.3)$$

As informações da fase são independentes da amplitude do traço, sendo relacionada somente com as características de propagação da frente de onda acústica. O atributo de fase é um atributo físico e pode ser uma ferramenta importante para identificar formas geométricas. Entre as características geológicas que se destacam com o atributo de fase estão: continuidade lateral, todos os eventos aparecem devido a não utilização de amplitude, evidencia descontinuidades e limites de seqüência.

#### 4.2.3- Freqüência Instantânea

A taxa de variação temporal da fase, gera a freqüência dependente do tempo e pode ser expressa pela equação abaixo:

$$\omega(t) = \frac{d\theta(t)}{dt} \quad (1.4)$$

Essa equação pode ser escrita como:

$$\omega(t) = \frac{d}{dt} \left( \arctg \left[ \frac{g(x,t)}{f(x,t)} \right] \right) \quad (1.5)$$

Que resulta em:

$$\omega(t) = \frac{f(t) \frac{dg(t)}{dt} - g(t) \frac{df(t)}{dt}}{f^2(t) + g^2(t)} \quad (1.6)$$

O atributo de frequência instantânea tem uma relação com a propagação da onda sísmica e com ambientes de deposição. Na interpretação é utilizado para correlação de caráter sísmico lateral, indicador de zonas de fraturas, indicador de espessuras de camadas e funciona como indicador de hidrocarbonetos devido a anomalias de baixa frequência.

#### 4.2.4- Fator de Qualidade $Q$ Instantâneo

A compreensão dos efeitos de atenuação da terra possui duas maiores motivações: A primeira é que as amplitudes das ondas sísmicas são reduzidas conforme tal onda se propaga através de um meio inelástico e essa redução geralmente é dependente da frequência, em segundo lugar as características de atenuação revelam muitas informações tais como litologias, estado físico e grau de saturação (Jonhston e Toksöz, 1981). Parte da energia da onda sísmica que se propaga pela terra é convertida em calor devido a forças friccionais que atuam sobre as partículas vibrantes.

A atenuação devido aos efeitos combinados da absorção e do espalhamento (scattering), varia exponencialmente com a distancia da fonte. O fator de atenuação  $\hat{a}(r)$  pode ser expresso por:

$$\hat{a}(r) = a_0 e^{-\alpha r} \quad (1.7)$$

onde  $a_0$  é a amplitude inicial,  $\alpha$  é o coeficiente de absorção e  $r$  é o caminho viajado pela onda. Bath (1974) descreveu a seguinte expressão:

$$\hat{a}(t) = e^{-\pi f t / Q} = e^{-\omega t / 2Q} \quad (1.8)$$

onde  $Q$  é o fator de qualidade, adimensional de um meio absorvente e  $t$  é o tempo total de transito da onda. Para relacionarmos os fatores de absorção  $\alpha$  e de qualidade  $Q$  podemos usar a seguinte equação:

$$\alpha = \frac{\omega}{2Qv} = \frac{\pi f}{Qv} \quad (1.9)$$

Como uma propriedade intrínseca da rocha,  $Q$  é a razão entre a energia armazenada e a energia dissipada. Johnston et. al., (1979), através de medidas de laboratório, destacaram que o fator de qualidade  $Q$  é inversamente proporcional a porosidade, afirmaram que quanto maior a pressão e compactação maior o fator de qualidade  $Q$ , a presença de fluidos também é um fator que afeta o fator de qualidade  $Q$ , aumentando a atenuação de acordo com o tipo e a quantidade de fluido presente na rocha.

Para rochas saturadas com água, congeladas, o fator de qualidade  $Q$  é considerado bastante alto comparado com rochas saturadas com água em temperatura ambiente (Spetzler e Anderson, 1968, *apud* Toksöz et. al., 1979). A informação do atributo sísmico fator de qualidade  $Q$ , é de grande importância para a detecção de hidratos de gás. Isso porque muitas vezes a ocorrência de hidratos serve como trapa para gases livres vindo de substratos inferiores, constituindo assim uma camada com um alto fator de qualidade  $Q$  seguida de um baixo fator de qualidade  $Q$  (sedimentos contendo gás livre). Gei e Carcione (2003) mostraram com modelos que a atenuação diminui ( $Q$  aumenta) com o aumento da saturação de hidratos de gás em sedimentos marinhos.

O fator de qualidade  $Q$  já foi determinado de diversas formas por diversos autores. Santos (1986) estimou valores de  $Q$  a partir de dados de VSP, Dasgupta e Clark (1998) compararam em gathers, a razão de decaimento de amplitude em dois níveis, Pride e Berryman (2003) trouxeram uma excelente visão geral de mecanismos de atenuação e normalmente o fator de qualidade  $Q$  vem sendo extraído utilizando o método de razão espectral. Barnes (1991) a partir de definições extraídas de Johnston e Toksöz (1981) sugeriu que o fator instantâneo de qualidade  $Q$  pode ser definido pela equação:

$$q(t) = -\pi \frac{\omega(t)}{\text{decay}(t)} \quad (2.0)$$

onde,  $q(t)$  é o fator instantâneo de qualidade  $Q$ ,  $\omega(t)$  é a frequência instantânea e  $\text{decay}(t)$  é o decaimento instantâneo que pode ser definido como a derivada do Envelope instantâneo

dividida pelo Envelope. O fator  $Q$  é um atributo físico com grande relação com porosidade, permeabilidade e fraturamento (Taner, 1992). Entretanto é importante ressaltar que a extração do fator de qualidade  $Q$  em dados sísmicos pós-stack não é totalmente segura devido a: distorção espectral causada pelo estiramento (stretch) da correção NMO (Normal Move Out) e influencia de ruídos e de múltiplas (Dasgupta e Clark, 1998).

Rock	$Q$	Frequency, Hz	Method
Quincy Granite (air dry)	125 166	$(.14-4.5) \times 10^3$	long resonance tors. resonance
Solenhofen Limestone (air dry)	112 188	$(3-15) \times 10^6$	P wave pulses S wave pulses
I-1 Limestone (air dry)	165	$(5-10) \times 10^6$	P wave pulses
Hunton Limestone (oven dry)	65	$(2.8-10.6) \times 10^3$	long. resonance
Amherst Sandstone (oven dry)	52	$(.930-12.8) \times 10^3$	long. resonance
Berea Sandstone (brine saturated)	10	$(.2-.8) \times 10^6$	P and S wave pulses
Navajo Sandstone (air dry)	21	50-120	flexural vibrations
(water saturated)	7	$(.2-.8) \times 10^6$	P and S wave pulses
Pierra Shale (in situ)	32 10	50-450	P wave in situ S wave in situ

Tabela 3 – Medição do fator de qualidade  $Q$  em laboratórios utilizando diferentes métodos em diferentes rochas (modificado de Johnston, 1979).

## 5- Área de Estudo

A Bacia de Pelotas situa-se no extremo sul da margem continental brasileira, limitando-se a norte com a Bacia de Santos, pela plataforma de Florianópolis, e a sul com as bacias da Margem Continental do Uruguai. A área da bacia compreende cerca de 250.000 km<sup>2</sup> (até a lâmina d'água de 3.000 m), 20 % dos quais estão situados em região de embasamento raso na região emersa e na plataforma continental.

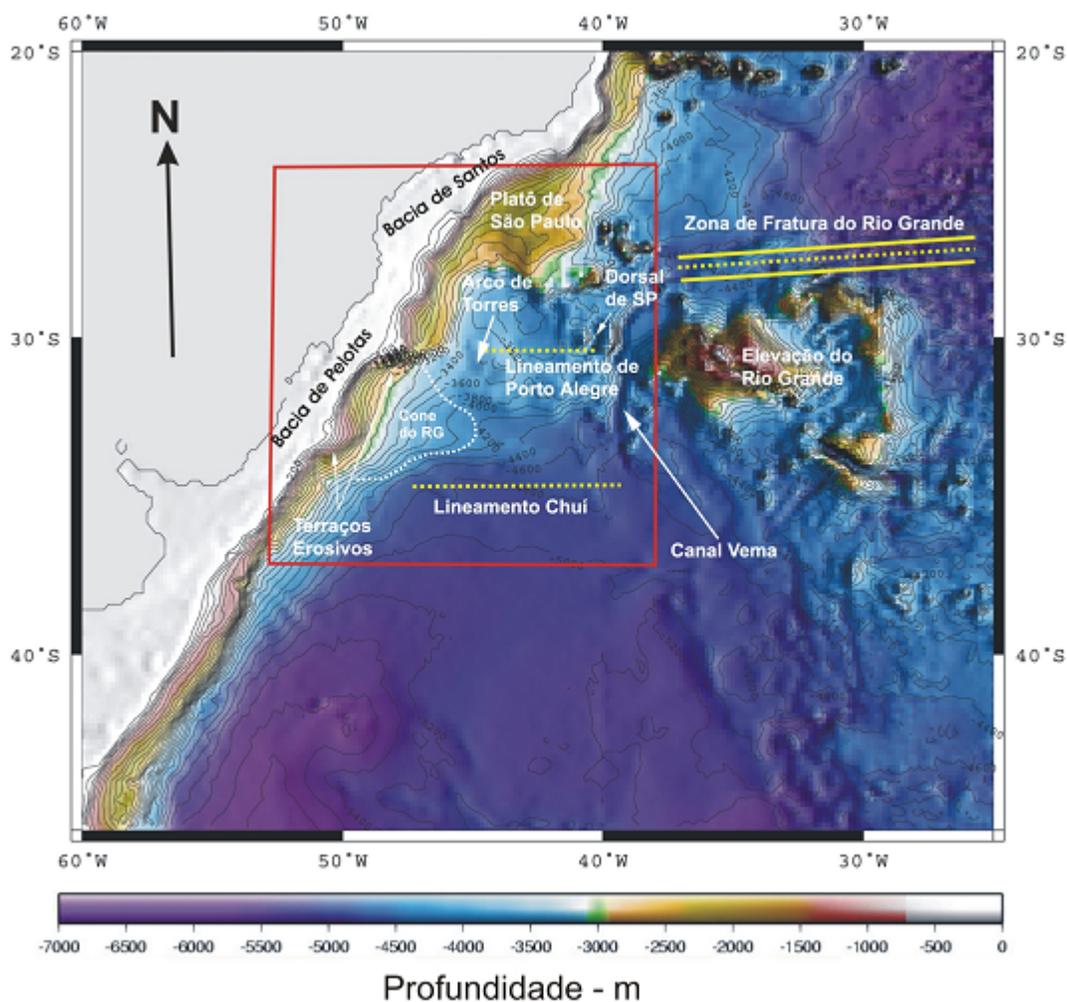


Figura 12 - Mapa batimétrico da Bacia de Pelotas e a localização das principais feições Fisiográficas. Batimetria ETOPO 2 (Mepen, M. 2008).

### 5.1- Bacia de Pelotas

A Bacia de Pelotas, como as demais bacias marginais brasileiras, é resultante do processo de estiramento litosférico gradativo que culminou com a separação do

supercontinente Gondwana, há aproximadamente 170 m.a durante o Jurássico Médio (Asmus, 1975 e 1982). Este processo de separação se desenvolveu inicialmente a partir do Atlântico Sul, se propagando progressivamente em direção ao norte. A implantação do rift na porção da margem da Bacia de Pelotas fragmentou rochas crustais e supracrustais de idade paleozóica e pré-cambriana, gerando falhas antitéticas predominantes na bacia (Asmus, 1975, 1982; Fontana, 1990, 1996). Abreu (1998) ainda identificou dois padrões distintos de deposição (1 e 2) de cunhas vulcânicas ao longo da bacia de Pelotas, igualmente identificáveis na Bacia Walvis: (1) na porção sul essas cunhas vulcânicas são menos acentuadas e estão associadas às falhas antitéticas, anteriormente descritas por Fontana (1996), caracterizando um embasamento mais profundo, se comparado à (2) porção norte onde as rochas vulcânicas são mais proeminentes, sem a presença de falhas antitéticas.

A partir destes eventos a taxa de subsidência ao longo da bacia torna-se diferenciada pelas porções, norte e sul. Assim, a subsidência local gerada pela carga crustal desses depósitos basálticos transmitiu a esses horizontes um mergulho crescente em direção a área fonte de vulcanismo. Estas estruturas se expressam sismicamente pelos chamados “Seaward Dipping Reflectors” (SDR) (Hinz, 1981). A expressão sísmica dos SDR é representada por refletores superpostos, que mergulham em direção ao mar, sendo localmente convexos na superfície, sem uma terminação identificável e que correspondem à extrusão vulcânica depositada sobre a crosta continental recém fragmentada. Supõe-se que o limite entre a crosta continental e oceânica esteja localizado próximo ao limite externo dos “Seaward Dipping Reflectors” (Hinz 1981; Mutter, 1985).

Uma das feições mais notáveis na Bacia de Pelotas são linhas de charneira (zonas de flexuras) que marcam um abrupto aumento do mergulho deposicional dos estratos no sentido mais profundo da bacia. As linhas marcam uma separação entre uma sub-bacia rasa e uma sub-bacia mais profunda (Alves, 1977). Asmus (1975) e Fontana (1996) acreditam que as linhas de charneiras foram formadas como consequência do intenso aporte sedimentar para dentro da bacia. Entre o Albo-Aptiano e o Mioceno (23.5 M.a), a Bacia de Pelotas experimentou a fase mais intensa de subsidência térmica, condicionando o processo de flexura. Assim, durante o Mioceno, as áreas que sofreram uma maior subsidência térmica e flexural permitiram o desenvolvimento de uma progradação sedimentar bastante

espessa, que constitui a feição sedimentar mais proeminente na área, o Cone do Rio Grande (Fontana, 1990). Para tentar explicar a formação destas linhas de flexura, Gonçalves et al. (1979, apud Asmus, 1983) desenvolveram um modelo (Figura 11). A validação deste modelo pode vir a explicar a presença de duas linhas de flexura presentes na porção sul da margem continental brasileira (Asmus, 1983). Uma mais afastada da linha de costa com idade Albo-aptiana, e outra mais rasa e próxima à linha de costa de idade Paleocênica.

De acordo com Dias et al. (1994) a evolução sedimentar da Bacia de Pelotas pode ser dividida em três principais megassequências. A megassequência pré-rifte, sin-rifte e pós-rifte. A megassequência pré-rifte corresponde a sedimentos e vulcânicas do Paleozóico e Mesozóico da Bacia do Paraná (Dias et al. 1994). A megassequência sinrifte (Neocomiano–Barremiano) constitui-se de conglomerados com fragmentos de basalto (Formação Cassino). A base dessa seqüência assenta-se sobre rochas vulcânicas (basaltos tholeiíticos, com datação de 124 Ma pelo método K-Ar, Dias et al. 1994), representadas pela Formação Imbituba. A megassequência pós-rifte, que representa a sedimentação marinha da bacia. Dias et al. (1994) dividiu a megassequência pós rifte em algumas principais seqüências (1, 2, 3, 4 e 5), são elas: 1) seqüência do Albiano/Aptiano, com sua porção superior coincidente com o topo da seção de calcários do Eo/Meso/Albiano (Formação Porto Belo); 2) seqüência do Cretáceo Superior, composta por sedimentos pelíticos, responsável pela deposição de areias na área do baixo de Mostardas e de margas e folhelhos na plataforma continental (Formação Atlântida); 3) seqüência do Cretáceo Superior–Terciário Inferior, constituída por folhelhos e delgadas camadas de arenitos; 4) seqüência do Eoceno/ Oligoceno Inferior, composta por clásticos na área do baixo de Mostardas e por folhelhos na plataforma (Formação Imbé); e 5) seqüência do Oligoceno Superior ao Recente, de caráter progradante e composição pelítica.

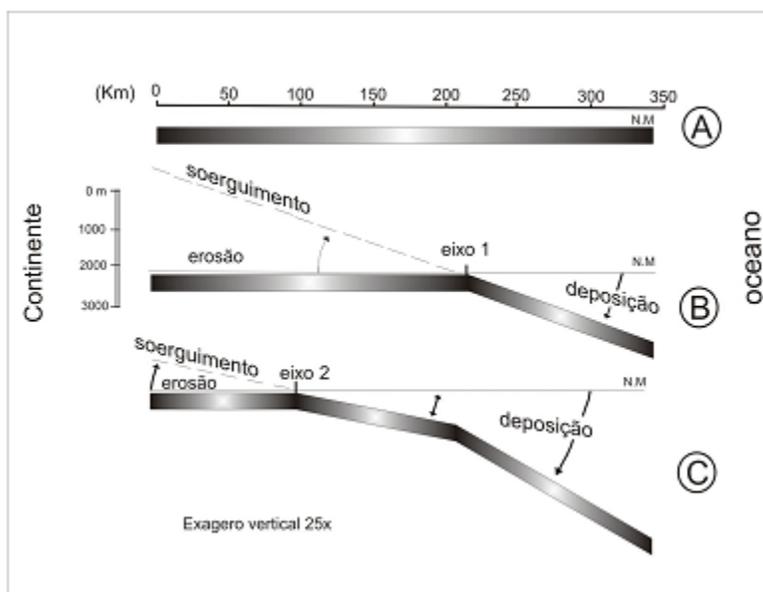


Figura 13 - O modelo sugere um padrão para o desenvolvimento da inclinação da superfície do embasamento cristalino e tenta explicar a origem das linhas de charneira na Bacia de Pelotas (Adaptado de Gonçalves et al. 1979, apud Asmus, 1983).

## 5.2- Cone do Rio Grande

O Cone do Rio Grande caracteriza-se por ser uma feição singular desenvolvida na porção sul da Bacia de Pelotas, aproximadamente entre as latitudes 31°30'S e 34°S. Apresentando uma espessura sedimentar que chega a ser superior a 12 Km, destaca-se por uma volumosa cunha de natureza progradante depositada sobre o talude e sopé continentais (Gomes et al., 1993). Bassetto et al. (2000) atribuem a origem desta feição a uma anômala sedimentação local (alta taxa de sedimentação) ocorrida a partir do Mioceno Superior, com depocentros de até 900 metros de espessura. Durante a etapa de deposição as maiores espessuras se desenvolveram na plataforma externa e talude superior, provocando efeitos deposicionais de progradação e empilhamento (Alves, 1977). Segundo Abreu (1998) o início da sedimentação siliciclástica correspondente a progradação do Cone do Rio Grande provavelmente teria se iniciado durante o Oligoceno, período anterior ao previamente mencionado por Alves (1977) e Fontana (1990, 1996).

Essa alta taxa de sedimentação gerou condições ideais para a preservação de matéria orgânica e a formação de gás biogênico, registrando-se notável ocorrência de hidratos de gás em profundidades que estão entre 100 e 1.000 m na coluna sedimentar, em batimetrias

de 500 a 3.500 m (Fontana, 1989; Fontana e Mussumeci, 1994; Sad et al. 1997). Destaca-se também uma faixa de dobramentos dos sedimentos terciários, mobilizados por empurrões com vergência para o mar (Fontana, 1989; Cainelli e Mohriak, 1998). Correa et al., (2005), falou sobre a influência das correntes de fundo no limite externo do Cone do Rio Grande, condicionando sua morfologia atual.

## **6- Metodologia e Material Utilizado**

O material utilizado consistiu de perfis sísmicos de reflexão pós-stack. Esses perfis foram adquiridos junto ao BDEP (Banco de Dados de Exploração e Produção) pelo LAGEMAR (Laboratório de Geologia e Geofísica Marinha), e consistem de diversos levantamentos diferentes situados na Bacia de Pelotas estendendo-se até a Bacia de Santos.

A metodologia teve como base a interpretação de características sísmicas que estão relacionadas à presença de hidratos de gás como o BSR e o blanking. Posteriormente foi feita uma análise e uma identificação dos atributos sísmicos que melhor caracterizam as propriedades sísmicas citadas. O software SMT Kingdom foi utilizado para a interpretação e mapeamento dos horizontes e, pela análise de alguns atributos sísmicos. Além da delimitação das áreas de ocorrência dos hidratos de gás na região do Cone do Rio Grande, parte da análise de atributos sísmicos, foi realizada no software OpendTect.

Os mapas batimétricos regionais serviram como suporte para visualização e melhor compreensão das associações realizadas entre a morfologia e as estruturas mapeadas. O mapa batimétrico do Atlântico Sul teve como principal objetivo situar a Bacia de Pelotas em um contexto regional, ressaltando assim as suas principais províncias fisiográficas e seus respectivos limites e teve como base de dados o ETOPO.

Os horizontes mapeados no SMT Kingdom (BSR e fundo do mar) foram exportados em coordenadas X, Y e Tempo (duplo). As informações de tempo foram utilizadas para a correlação entre profundidade da lâmina d'água e a espessura da zona de estabilidade dos hidratos de gás, onde foram gerados gráficos no programa Excel.

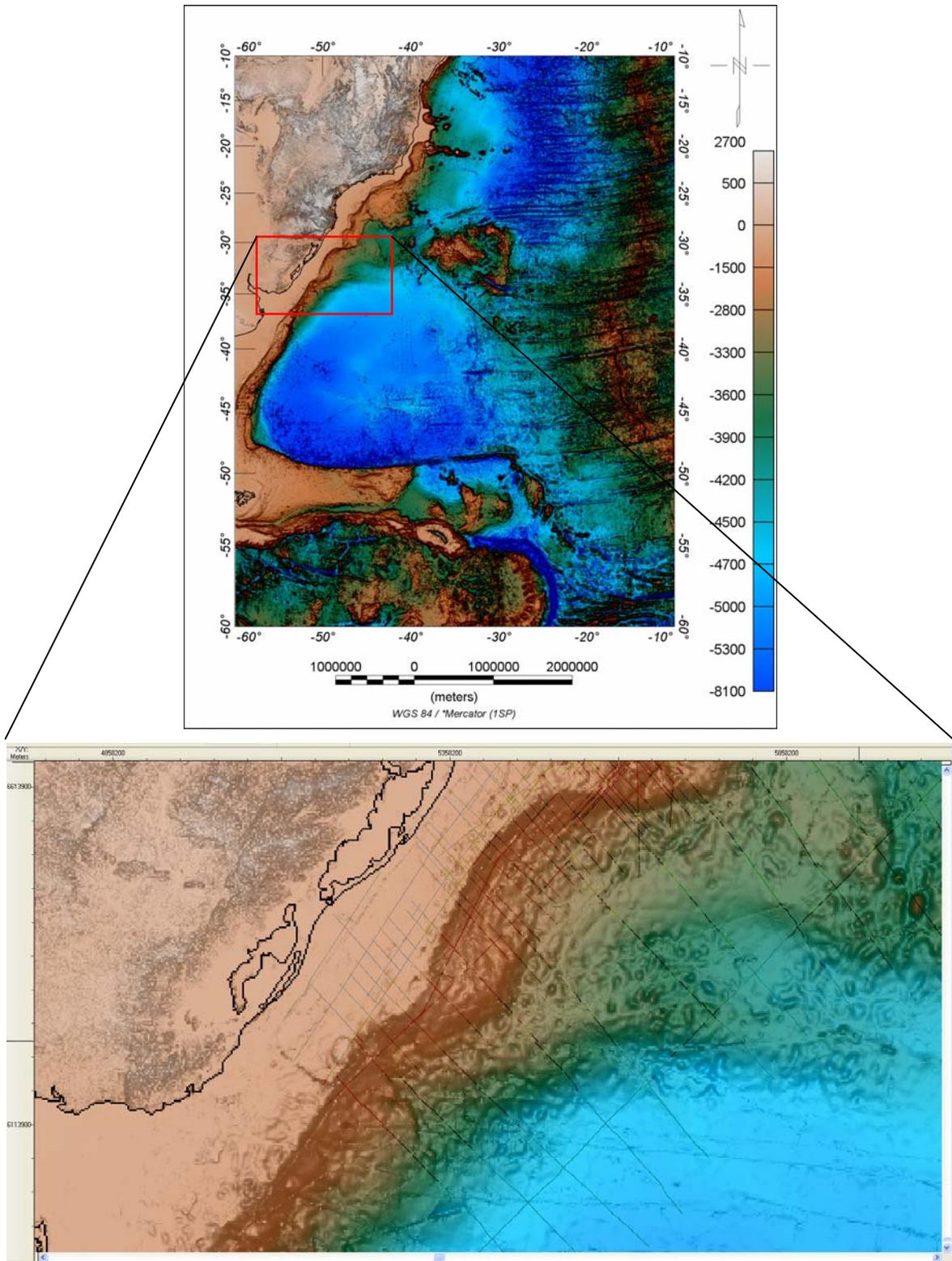


Figura 14 – Mapa de posicionamento das linhas adquiridas. (base de dados, ETOPO).

## **7- Resultados e Discussão**

### **7.1- Identificação de hidratos de gás no Cone do Rio Grande.**

A detecção de hidratos de gás na região do Cone do Rio Grande foi realizada a partir da interpretação de perfis sísmicos de reflexão, aonde a identificação dos padrões sísmicos (BSR, blanking) característicos de ocorrência de hidratos de gás, foram os principais objetivos. No caso do Cone do Rio Grande o padrão sísmico predominante no que diz respeito à detecção de hidratos de gás foi o BSR, o BSR foi encontrado em diversos perfis sísmicos que cruzavam a região do Cone do Rio Grande e, em alguns lugares, foi possível de se identificar a blindagem sísmica relacionada ao “blanking”.

A deformação das camadas sedimentares do Cone do Rio Grande, que ocasionou os grandes dobramentos (figura 16 e 17), facilitou a identificação do BSR em alguns perfis. Em determinadas regiões, como nas áreas mais profundas, a estratificação plano-paralela que acompanha o fundo do mar, dificulta a caracterização do BSR. Nessas regiões a análise de atributos sísmicos foi de grande utilidade para a caracterização dos hidratos gás. Abaixo demonstraremos alguns principais perfis interpretados. Os BSR's encontrados nos perfis sísmicos mapeados são bem contínuos, truncando diversos refletores e com uma característica inversão do sinal sísmico, bem acentuada, provavelmente relacionada à existência de gases livres trapeados abaixo da zona de estabilidade dos hidratos de gás.

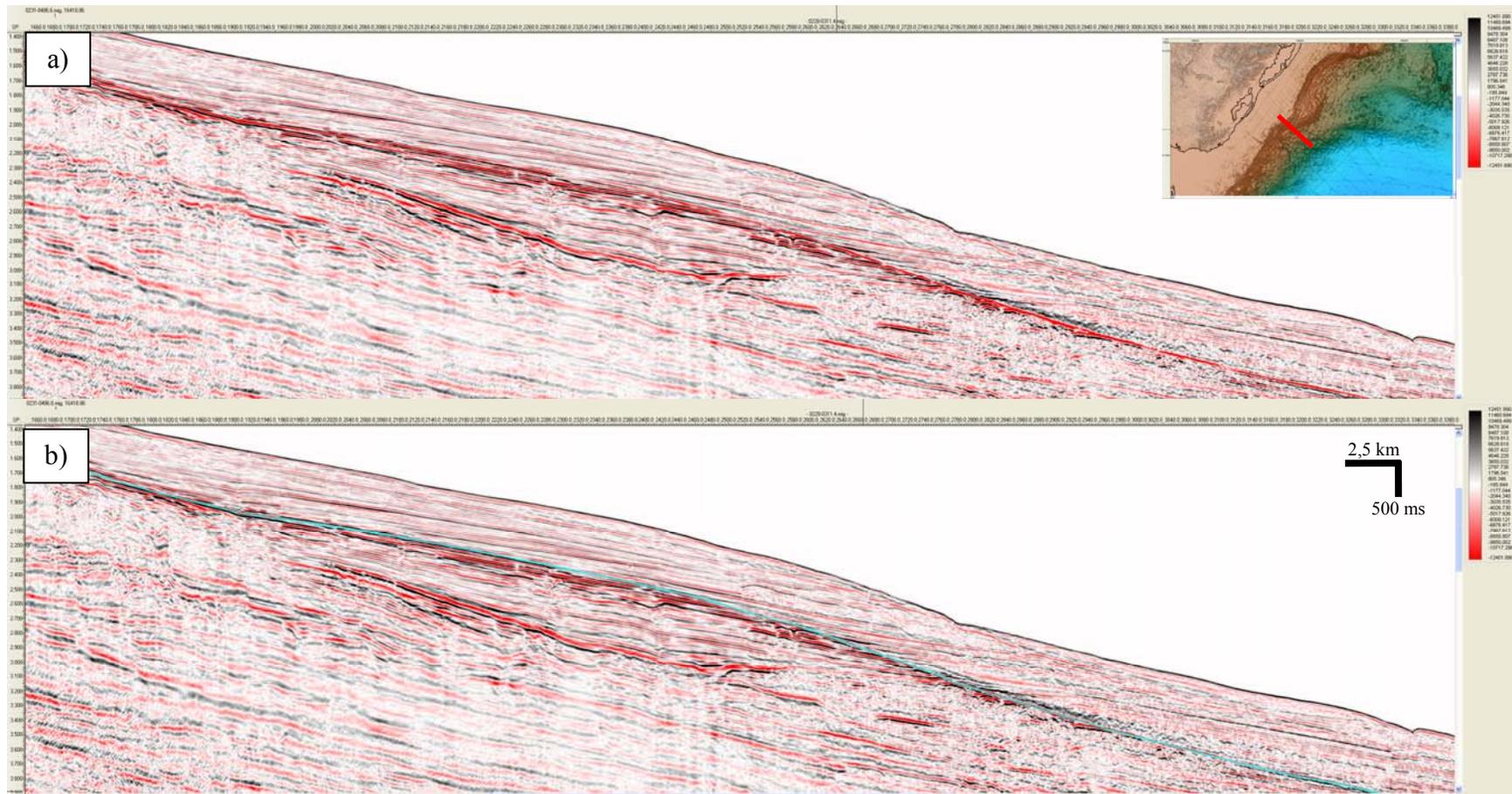


Figura 15: Linha 0231-1340, a) sem interpretação e b) figura interpretada. BSR destacado em azul.

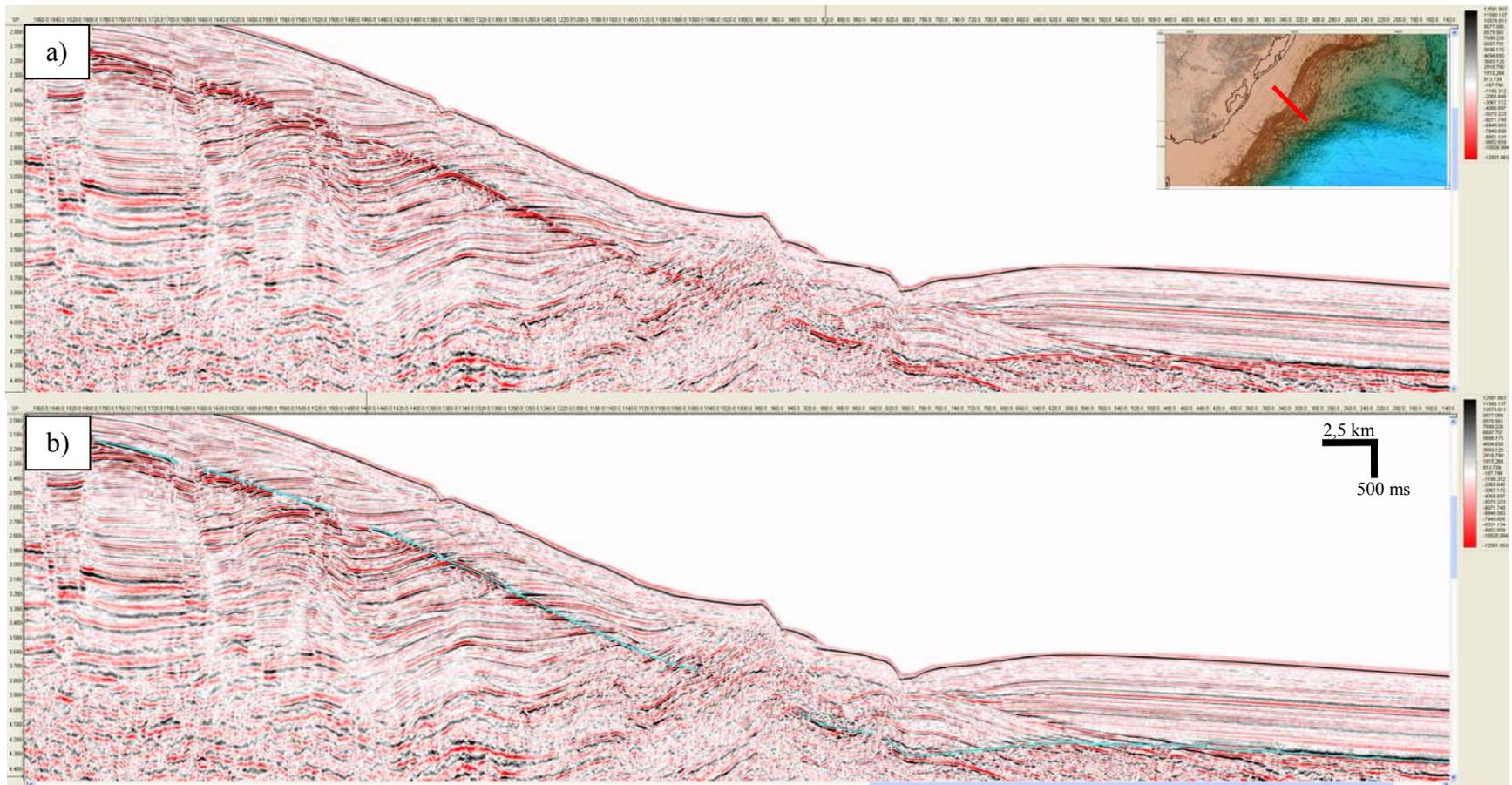


Figura 16: Linha 0228-0312, a) sem interpretação e b) figura interpretada. BSR destacado em azul.

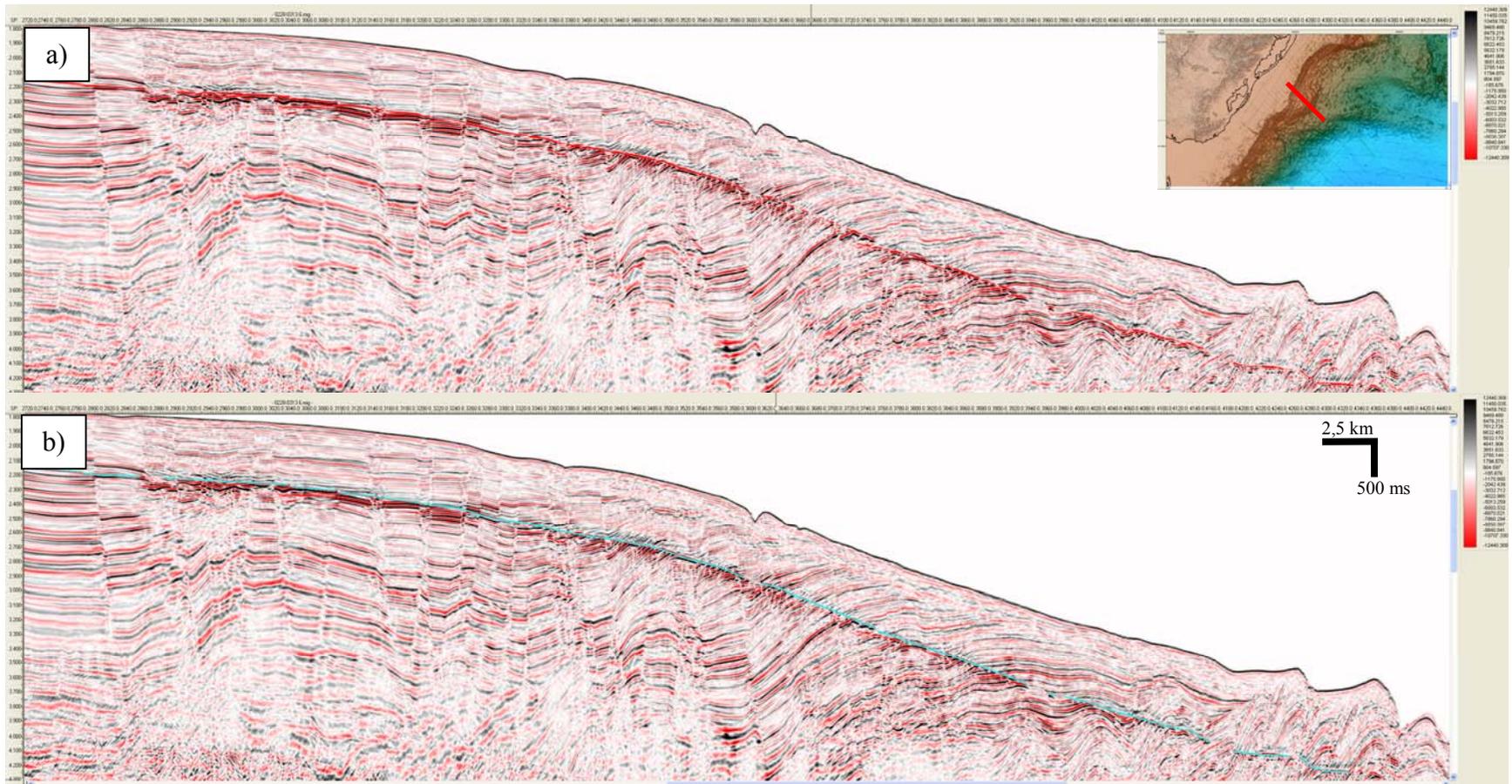


Figura 17: Linha 0228-0313, a) sem interpretação e b) figura interpretada. BSR destacado em azul.

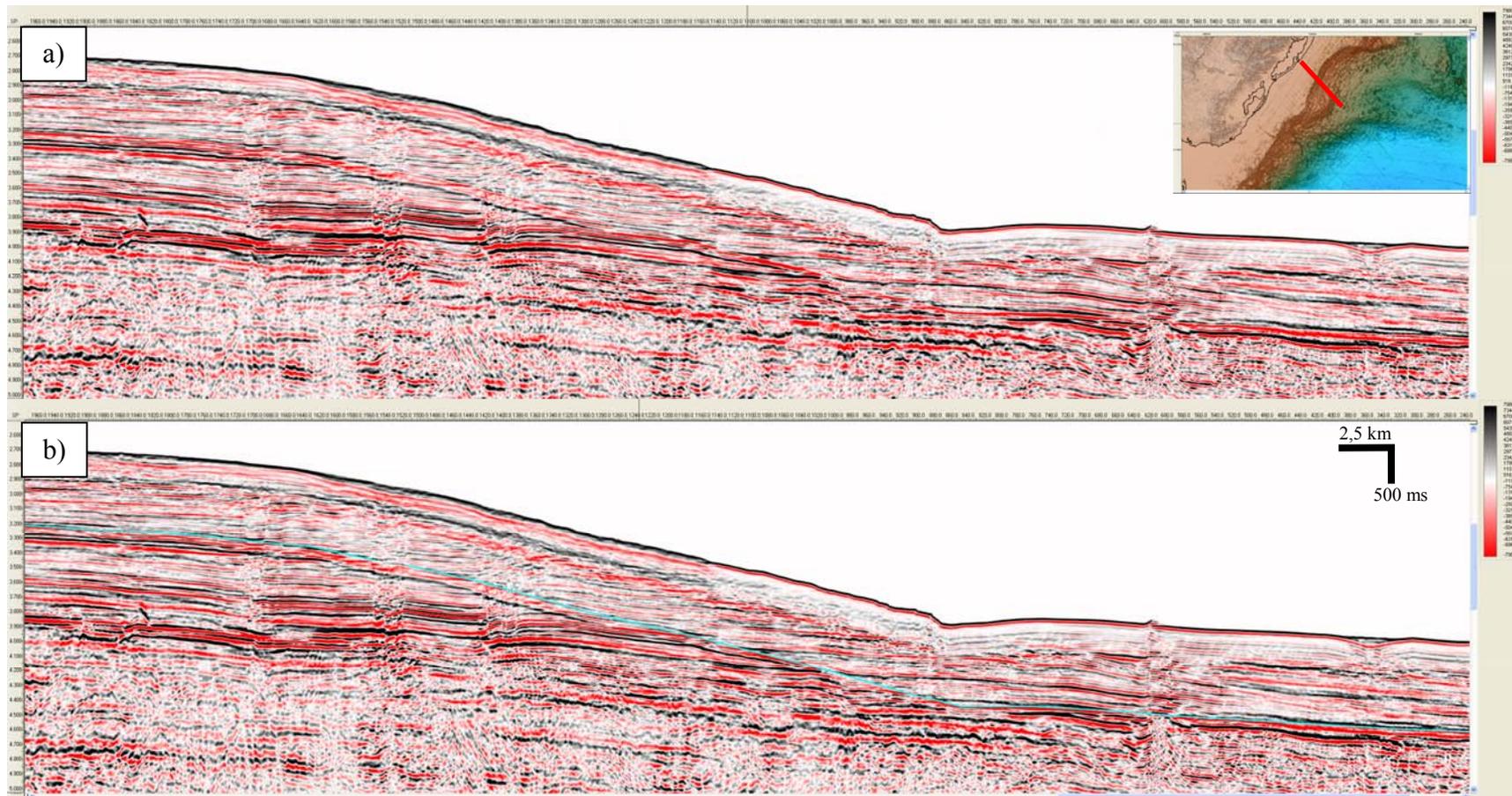


Figura 18: Linha 0228-0311, a) sem interpretação e b) figura interpretada. BSR destacado em azul.

Os característicos de BSR e blanking foram encontrados principalmente na região dos grandes dobramentos da camada sedimentar, estendendo-se em um intervalo de tempo que varia entre 1,25 e 4 segundos TWTT (Two Way Travel Time, Tempo Duplo) abaixo do fundo submarino. Assumindo um valor de 1.500 m/s para a velocidade de propagação da onda acústica na água, chegamos a um valor de profundidade de lâmina d'água que varia de 930 m até 3000 m aproximadamente, estendendo se por uma área alongada de direção preferencial NE-SW que varia em torno de 40.000 km<sup>2</sup> (Figura 19). Com isso estimamos um valor relativamente parecido com o que foi estipulado por Fontana (1989), onde foi estimado um intervalo de lâmina d'água que varia entre, 500 e 3.500 m e, uma área de ocorrência alongada de direção NE-SW variando de 40.000 a 50.000 km<sup>2</sup>.

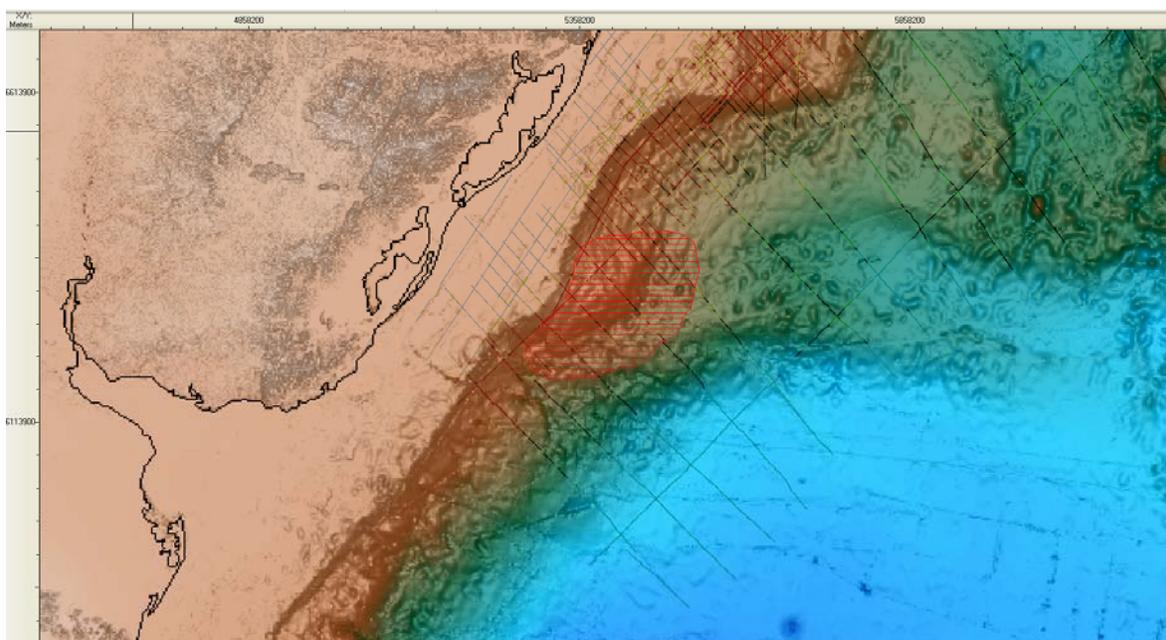


Figura 19: Mapa batimétrico destacando a área de ocorrência dos hidratos de gás no Cone do Rio Grande.

Na análise dos BSR's, em relação ao fundo do mar (Figuras 15, 16, 17 e 18), observa-se que à medida que a lâmina d'água aumenta, a espessura da zona de estabilidade dos hidratos de gás também aumenta. A partir dessa análise foram feitas correlações entre a lâmina d'água e a espessura estimada da zona de estabilidade dos hidratos de gás. Ao analisarmos os gráficos 1, 2 e 3 podemos observar que a zona de estabilidade dos hidratos de gás aumenta com o aumento da profundidade de lâmina d'água, isso se deve a um

aumento nas condições ideais para a acumulação de hidratos de gás, como por exemplo: aumento da pressão, diminuição da temperatura do fundo do mar entre outras..

Nas linhas 0228-312.5, 0228-313.6 (Figuras 16 e 17) e nos gráficos 2 e 3, nota-se que as espessuras das ocorrências de BSR são da ordem de 0.30s (TWTT) na parte rasa, e à medida que a profundidade de lâmina d'água aumenta chega à cerca de 0.60s (TWTT). Considerando valores de velocidade estimados por Tinivella, (2008) da ordem de 2250 m/s para os hidratos de gás, e considerando que a zona de estabilidade dos hidratos de gás inicia na base do BSR e termina próxima ao fundo do mar (Clennell, 2000). Obtêm-se valores de espessuras em torno de 340 m para as partes rasas e 680 m para as partes mais profundas. Recentes estudos sobre as propriedades e eficácia dos hidratos de gás como selantes para hidrocarbonetos que possam ocorrer abaixo da zona de estabilidade dos hidratos de gás (Graus et al., 1998), têm demonstrado que estes se tornam bastantes eficientes à medida que aumenta a coluna d'água. Como mostram os gráficos 1, 2 e 3 o aumento da coluna d'água está também associado um aumento da espessura da zona de estabilidade dos hidratos de gás.

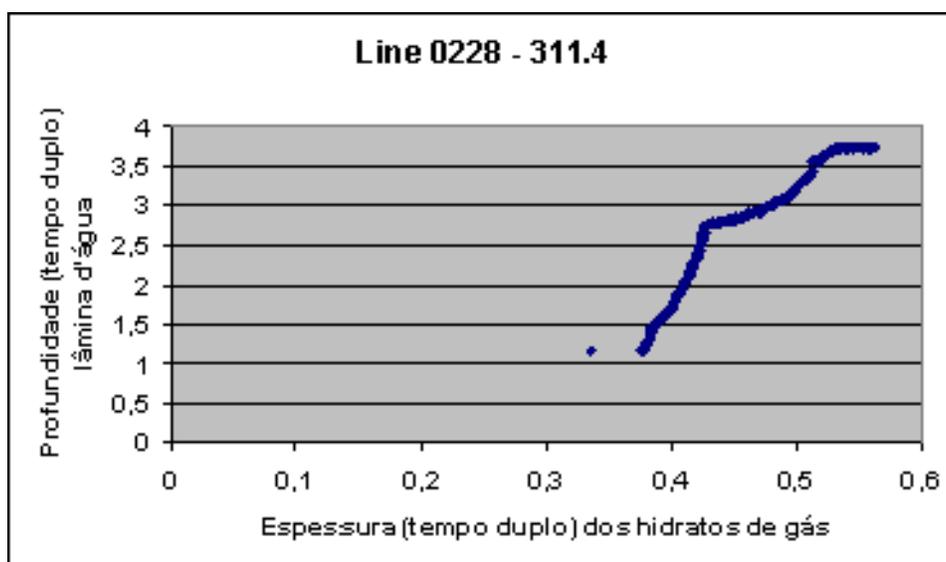


Gráfico 1: Correlação espessura dos hidratos x Profundidade do fundo do mar. Ambos em unidade de tempo duplo.

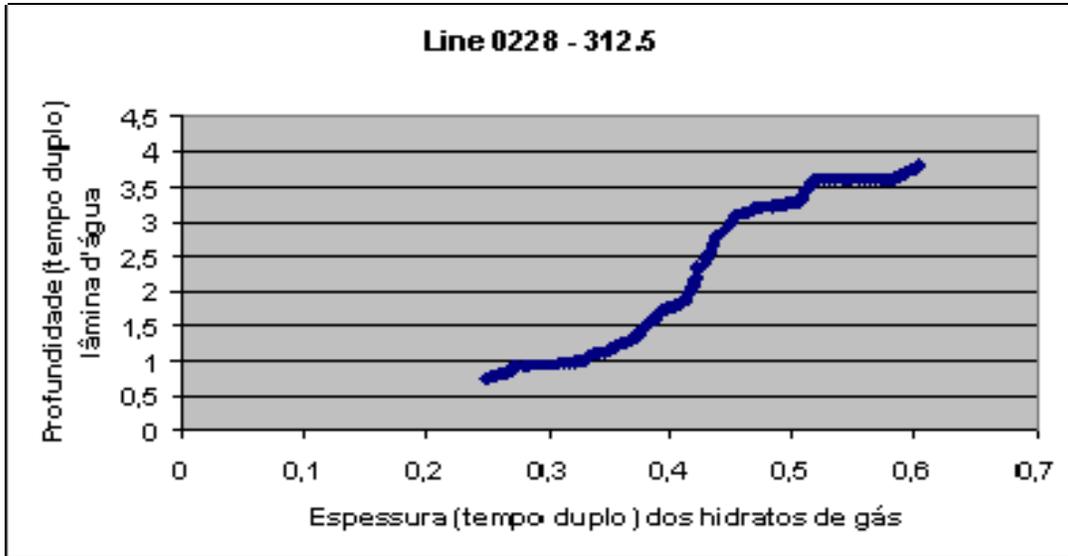


Gráfico 2: Correlação espessura dos hidratos x Profundidade do fundo do mar

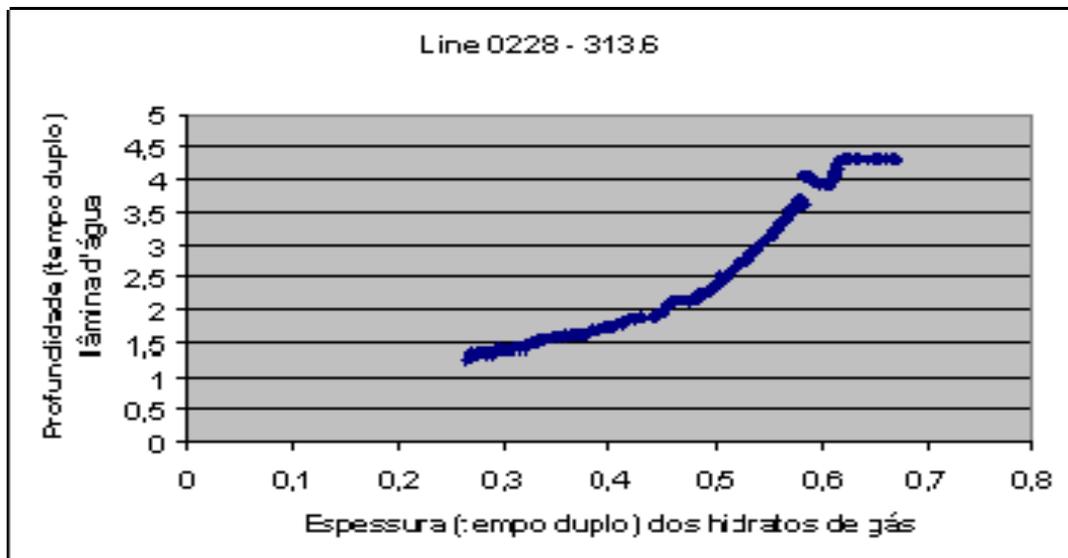


Gráfico 3: Correlação espessura dos hidratos x Profundidade do fundo do mar

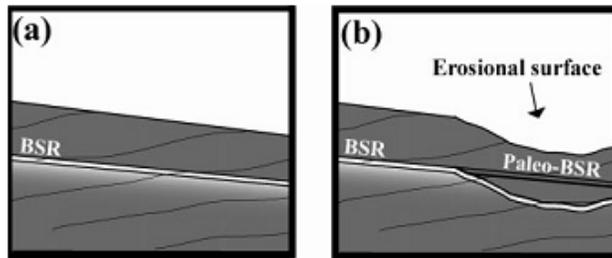


Figura 20: Exemplo de formação do paleo BSR (Matthew J. H. et. al., 2003).

A migração do limite da zona de estabilidade dos hidratos de gás pode acontecer por diversos fatores entre eles: mudanças de temperatura do fundo do mar, mudanças climáticas, variações do nível do mar, erosão ou sedimentação, e tectônica, entre outros (Bangs et al., 2005). Alguns autores (Bangs et al., 2005; Dhananjay. et al., 2006; Matthew J. H. et al., 2003) identificaram reflexões semelhantes aos BSR's e caracterizaram-nas como sendo um paleo BSR (figura 20), associados a antigos limites da zona de estabilidade dos hidratos de gás. Isto é possível porque o hidrato de gás tem como característica interferir diageneticamente nas propriedades dos sedimentos que o acomodam, normalmente por cimentação, gerando condições para a identificação do paleo BSR na sísmica, porque os sedimentos ainda estão cimentados (antigas zonas de estabilidade) o que lhes proporciona uma velocidade sísmica maior que a dos sedimentos normais e imprime ainda um aspecto selante, tornando assim possível a identificação do paleo BSR.

Em determinados perfis do Cone do Rio Grande foi possível observar a existência de um refletor paralelo e abaixo do BSR, que foi interpretado como indicações de paleo BSR's, associados provavelmente à antigas posições do nível do mar abaixo da atual (fig. 21), quando as condições de estabilidade dos hidratos ocorriam em níveis mais profundos no pacote sedimentar.

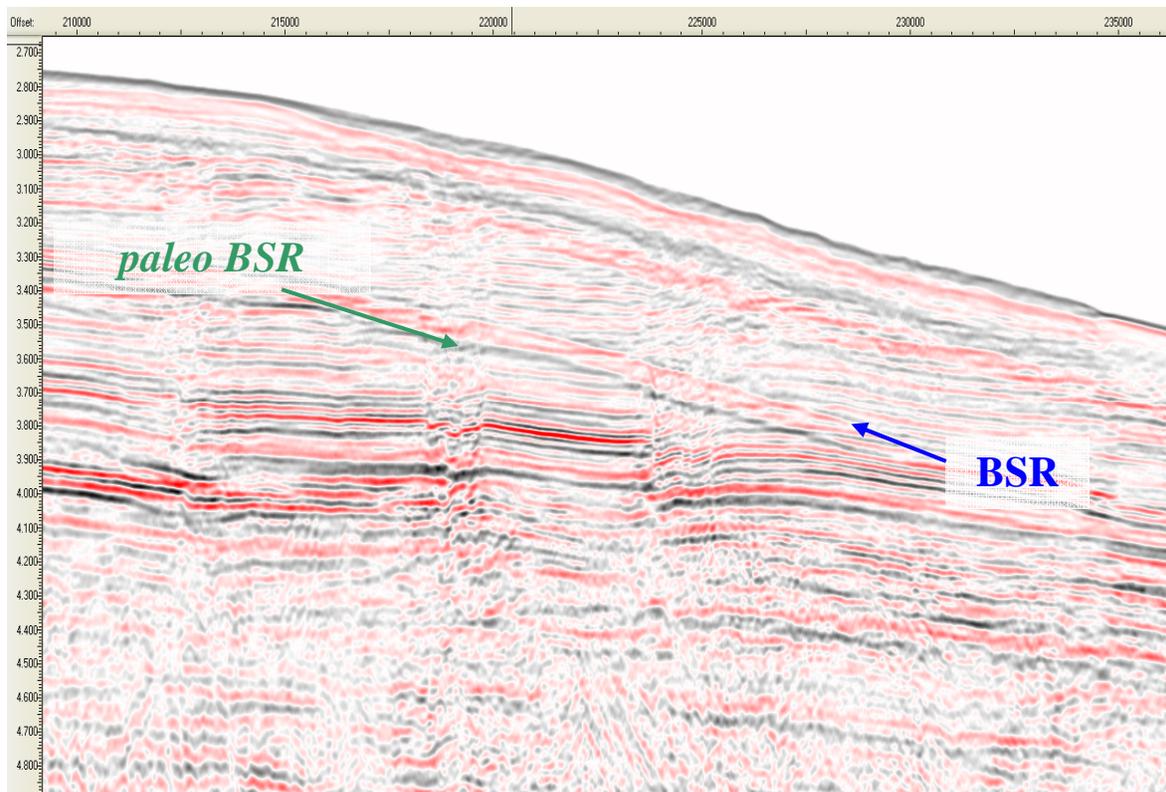


Figura 21 – Possível paleo BSR destacado pela seta verde, BSR indicado pela seta azul.

## 7.2- Análise de Atributos sísmicos

A análise de atributos sísmicos influenciou diretamente na delimitação das áreas de ocorrência dos hidratos de gás na região do Cone do Rio Grande. Em alguns perfis, a identificação dos padrões sísmicos relacionados à ocorrência de hidratos de gás, não eram facilmente identificáveis. Contudo, com a aplicação de determinados atributos sísmicos foi possível se diminuir incertezas e suposições. Para a determinação dos atributos que foram utilizados, alguns fatores foram levados em consideração, como por exemplo: as propriedades petrofísicas e geológicas dos sedimentos contendo hidratos de gás e, as propriedades sísmicas dos hidratos de gás.

Como propriedade petrofísica pode-se citar a semelhança com o gelo imprimindo uma característica bem sólida e compacta causada por cimentação. Como característica geológica, o aspecto selante causado pela zona de estabilidade dos hidratos de gás sobre possíveis gases livres provindos de substratos inferiores, é o principal aspecto. Como características sísmicas pode-se destacar: o grande contraste de impedância acústica entre a

zona de estabilidade dos hidratos de gás e os gases livres provindos de substratos inferiores, as altas velocidades sísmicas encontradas em sedimentos contendo hidratos de gás, o aspecto blindado relacionado ao blanking e o baixo valor de atenuação encontrado nos sedimentos contendo hidratos de gás. A seguir serão destacados os atributos que melhor caracterizaram a ocorrência de hidratos de gás no Cone do Rio Grande.

### **7.2.1- Fase Instantânea.**

O estudo sobre as propriedades petrofísicas das rochas foi de fundamental importância para a escolha do atributo de fase instantânea. Os hidratos de gás em suas zonas de estabilidade, muitas vezes causam a cimentação dos sedimentos aonde se situam. Essa cimentação reduz os contrastes de impedância acústica entre as camadas com texturas diferentes, imprimindo assim um aspecto blindado. O cálculo do atributo de fase instantânea possui a característica de ser independente da amplitude, como foi possível de observar no item 4.2.3. Esse fator foi a principal escolha do atributo de fase instantânea para a identificação de hidratos de gás no Cone do Rio Grande. Isso porque um dos principais padrões sísmicos relacionados à ocorrência de hidratos de gás é o blanking. Ao aplicar o atributo de fase instantânea, foi possível identificar as regiões aonde não se consegue identificar nenhuma reflexão, destacando assim uma possível zona de estabilidade de hidratos de gás. Nas regiões aonde as camadas sedimentares são deformadas, ou seja, não possuem uma estratificação plano-paralela, a utilização do atributo de fase instantânea foi de grande utilidade destacando a continuidade lateral do BSR, e os truncamentos entre a sedimentação deformada por dobramentos e o BSR.

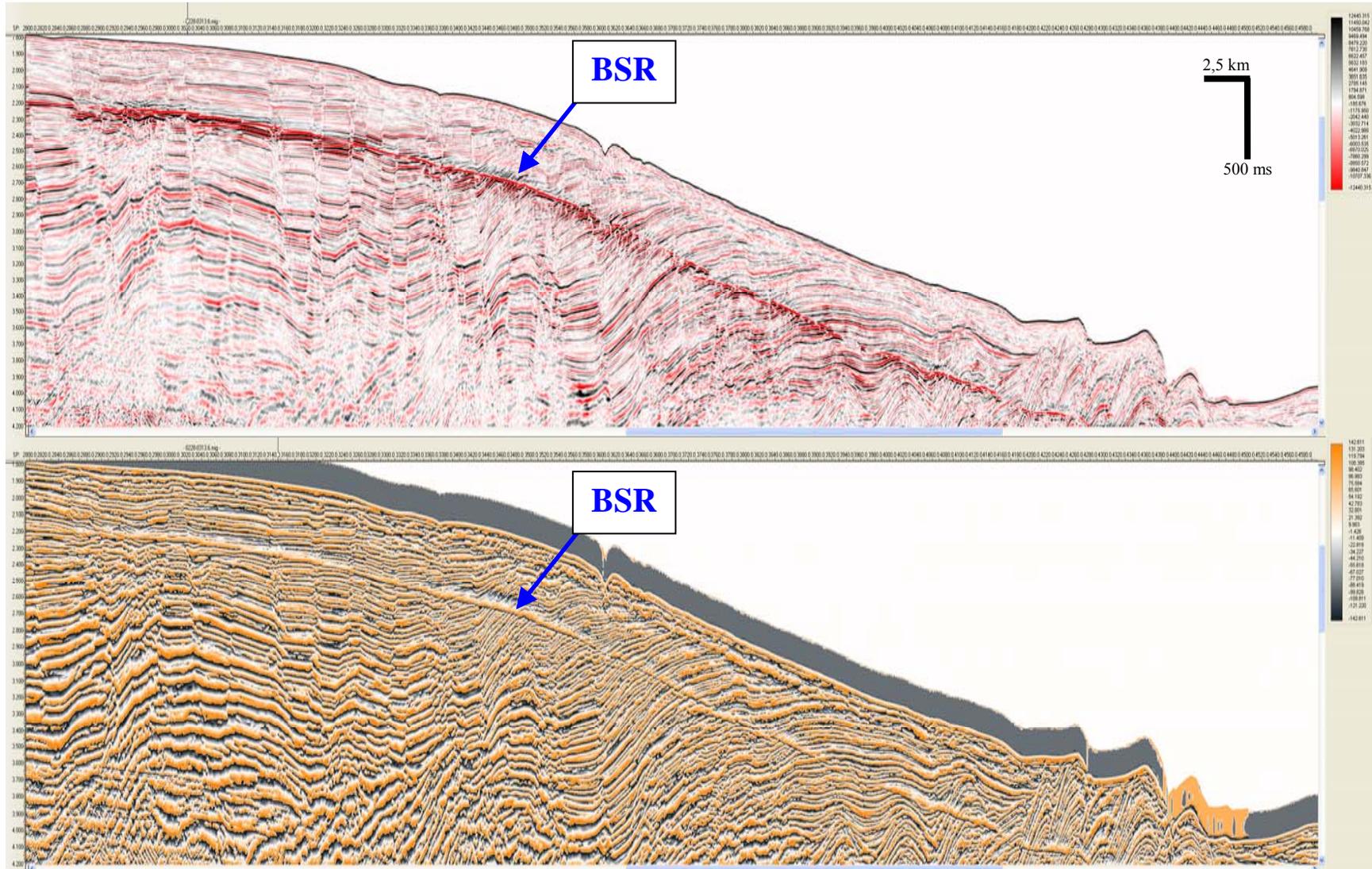


Figura 22: Linha 0228-313.6. Comparação entre Amplitude x Fase Instantânea. BSR destacado pela seta azul.

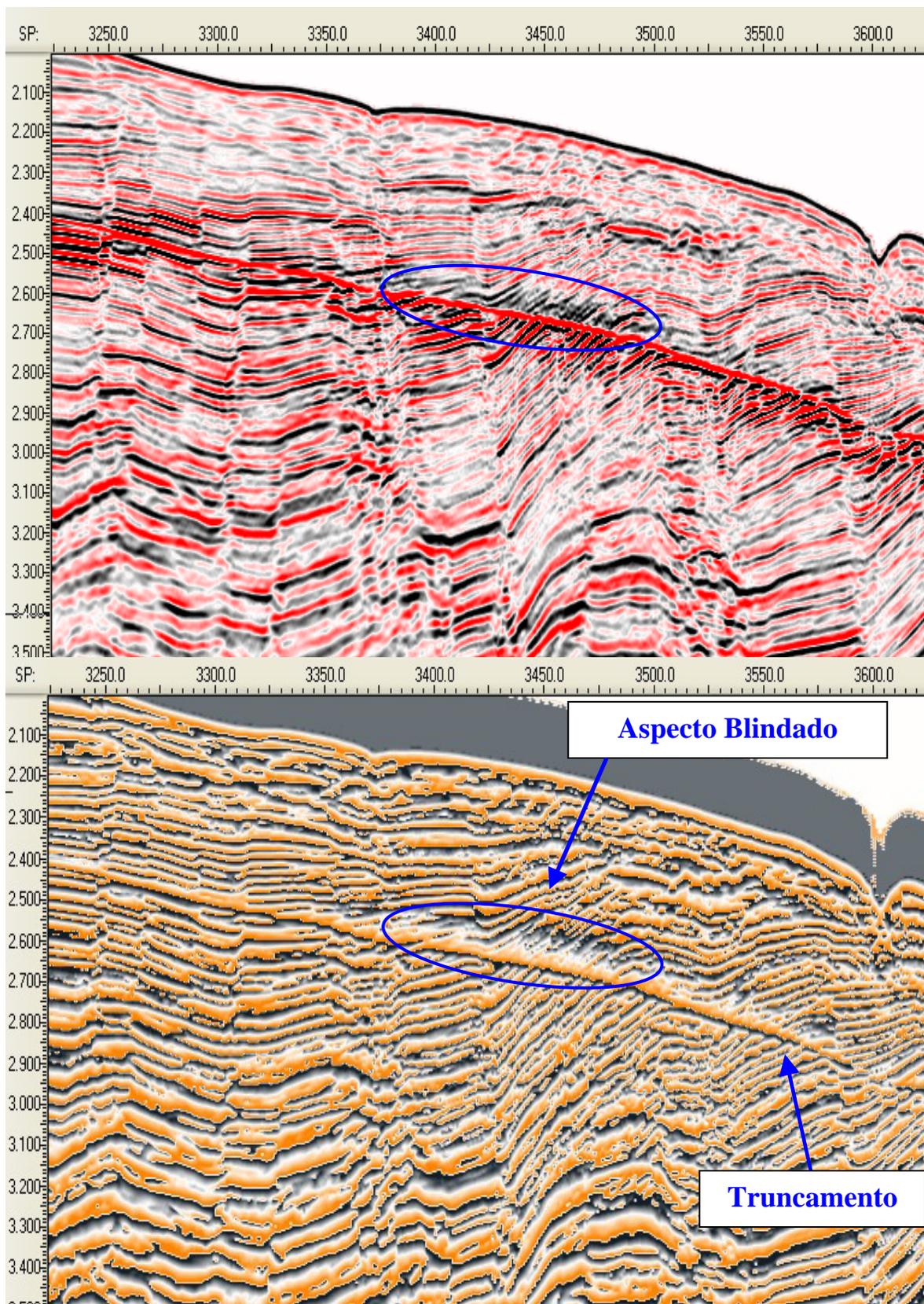


Figura 23: Comparação entre Amplitude x Fase Instantânea. Destaque para o aspecto blindado e o truncamento entre o BSR e os sedimentos deformados por dobramentos.

### 7.2.2- Envelope.

O atributo sísmico de envelope tem como característica representar a energia instantânea total e possui uma relação direta com o contraste de impedância acústica, representando o contraste individual de cada interface. Esses fatores foram os responsáveis pela escolha do atributo sísmico de envelope para a caracterização de hidratos de gás. Analisando as propriedades geológicas da zona de estabilidade dos hidratos de gás é possível observar que esta zona de estabilidade funciona como um selante para gases livres provindos de substratos inferiores.

Estima-se que a zona de estabilidade dos hidratos de gás possui uma velocidade aproximada de 2250 m/s, e que os sedimentos abaixo dessa zona de estabilidade, provavelmente associados a gases livres, possuem uma velocidade aproximada de 1660 m/s (Tinivella, 2008). Neste caso, espera-se que o atributo sísmico de envelope possa destacar o alto contraste de impedância acústica entre a zona de estabilidade dos hidratos de gás e os gases livres trapeados abaixo dessa zona de estabilidade, evidenciando assim o BSR.

Com isso o atributo sísmico de envelope se torna uma excelente ferramenta para a identificação de hidratos de gás. Na figura 24 e 25 é possível observar como o atributo de envelope enfatiza a presença do BSR.

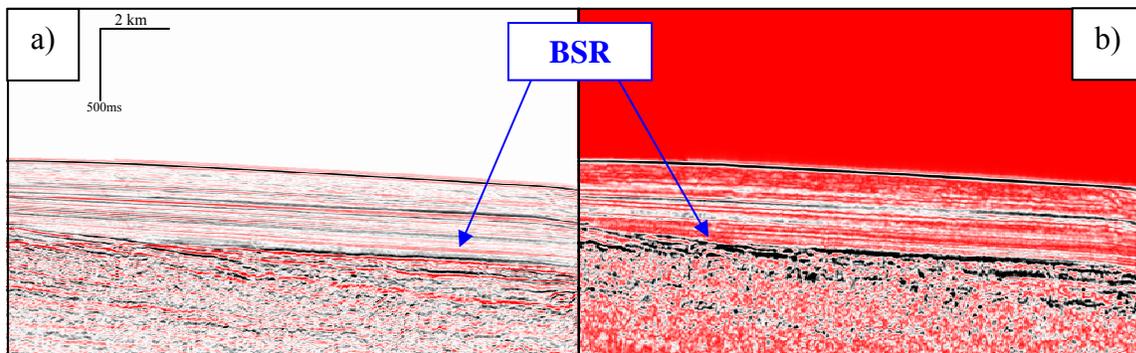


Figura 24: Comparação entre a) Amplitude e b) Envelope. BSR indicado pelas setas azuis.

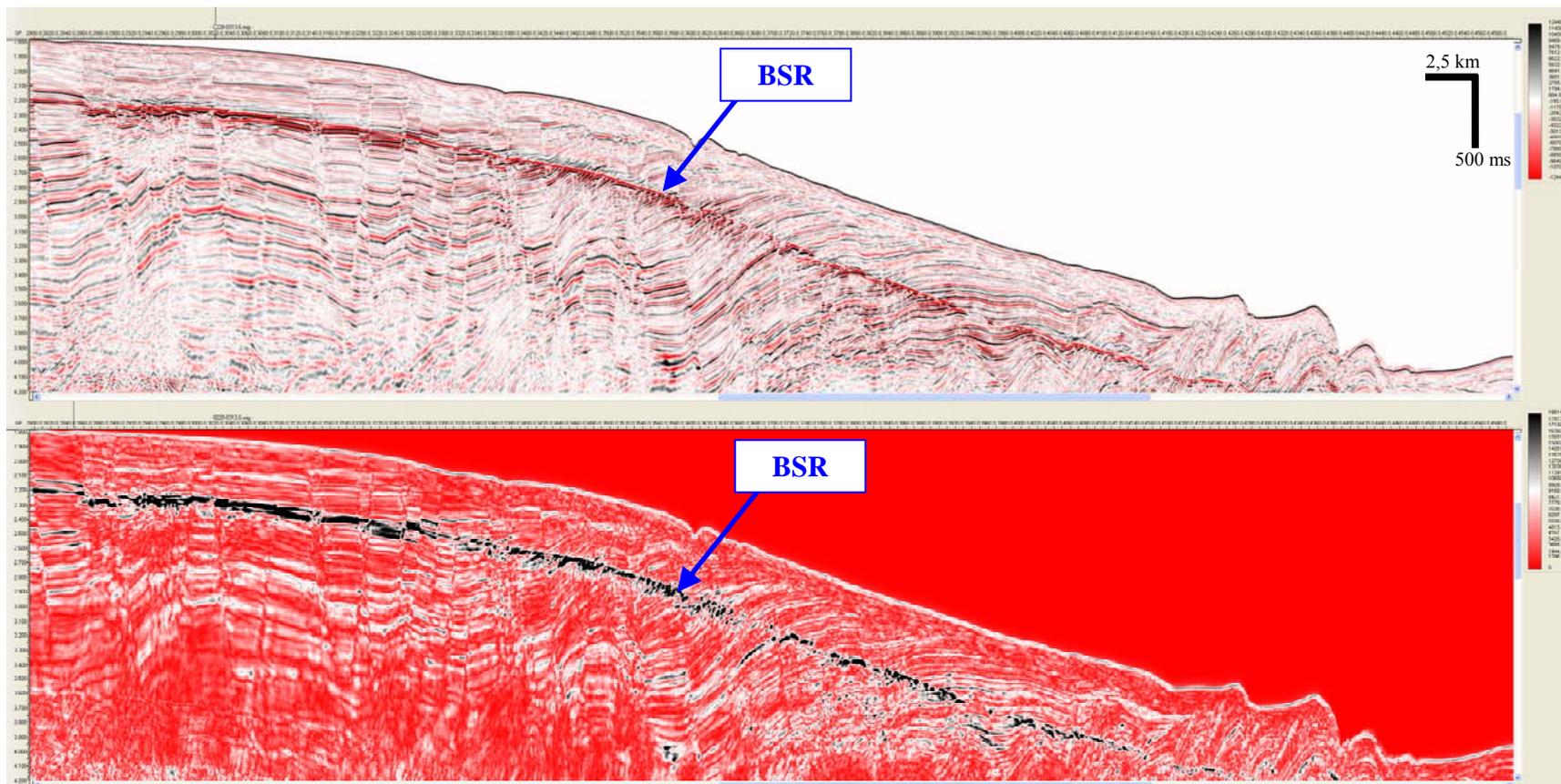


Figura 25: Linha 0228-313.6, comparação entre Amplitude e Envelope. Observar o BSR destacado pelo atributo de envelope.

### 7.2.3- Fator de Qualidade $Q$ Instantâneo.

Os efeitos de atenuação de ondas acústicas da terra podem trazer informações importantes para a compreensão de litologias, estado físico e grau de saturação. A escolha do atributo sísmico do fator de qualidade  $Q$  instantâneo teve como base as propriedades petrofísicas, geológicas e sísmicas dos sedimentos contendo hidratos de gás. Os hidratos de gás são macroscopicamente similares ao gelo, com uma forma compacta e com uma baixa porosidade. Johnston et. al, (1979) destacaram que quanto menor a porosidade, maior será o fator de qualidade  $Q$ . Como foi descrito por Gei e Carcione, (2003) o aumento da saturação de hidratos de gás, corresponde a um aumento nos valores de fator de qualidade  $Q$ .

Sabe-se que geologicamente a zona de estabilidade dos hidratos de gás funciona como selante (baixa porosidade e permeabilidade), e muitas vezes acumula gases livres em sua base (alta porosidade e grau de saturação). A junção dessas propriedades (petrofísicas, geológicas e sísmicas), características da ocorrência de hidratos de gás fornece os elementos necessários para que o atributo sísmico do fator de qualidade  $Q$ , se destaque como o melhor atributo sísmico para a caracterização de hidratos de gás. Na figura 26 é possível observar a facilidade na identificação do BSR utilizando o fator de qualidade  $Q$ . Ao observar as figuras 26 e 27 pode-se identificar claramente o limite da zona de estabilidade dos hidratos de gás. Os valores de  $Q$  encontrados sobre as anomalias relacionadas aos hidratos de gás chegam a ser 200 vezes maiores do que os valores fora das anomalias. É importante ressaltar que os valores estimados pelo cálculo do fator  $Q$  em dados pós-stack, não são muito precisos devido à distorção espectral causada pelo estiramento (stretch) da correção NMO (Normal Move Out), e a influência de ruídos e múltiplas (Dasgupta e Clark, 1998).

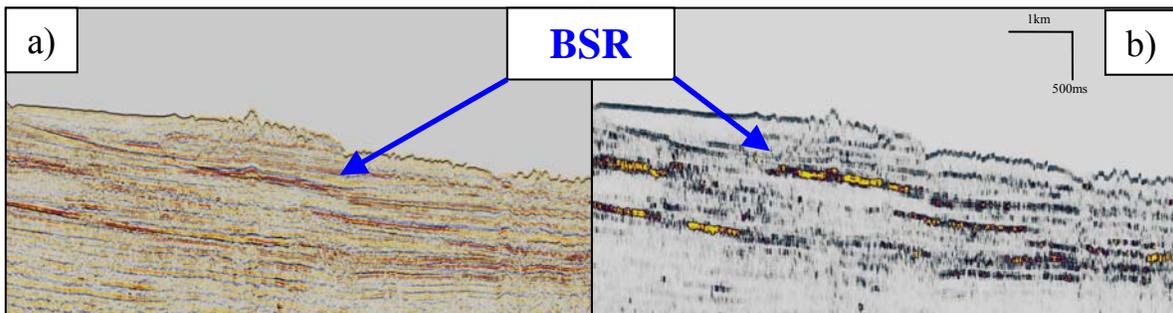


Figura 26: Comparação entre, a) Amplitude e, b) Fator de Qualidade  $Q$ . Destaque para uma melhor identificação do BSR no atributo sísmico, b) Fator de qualidade  $Q$ .

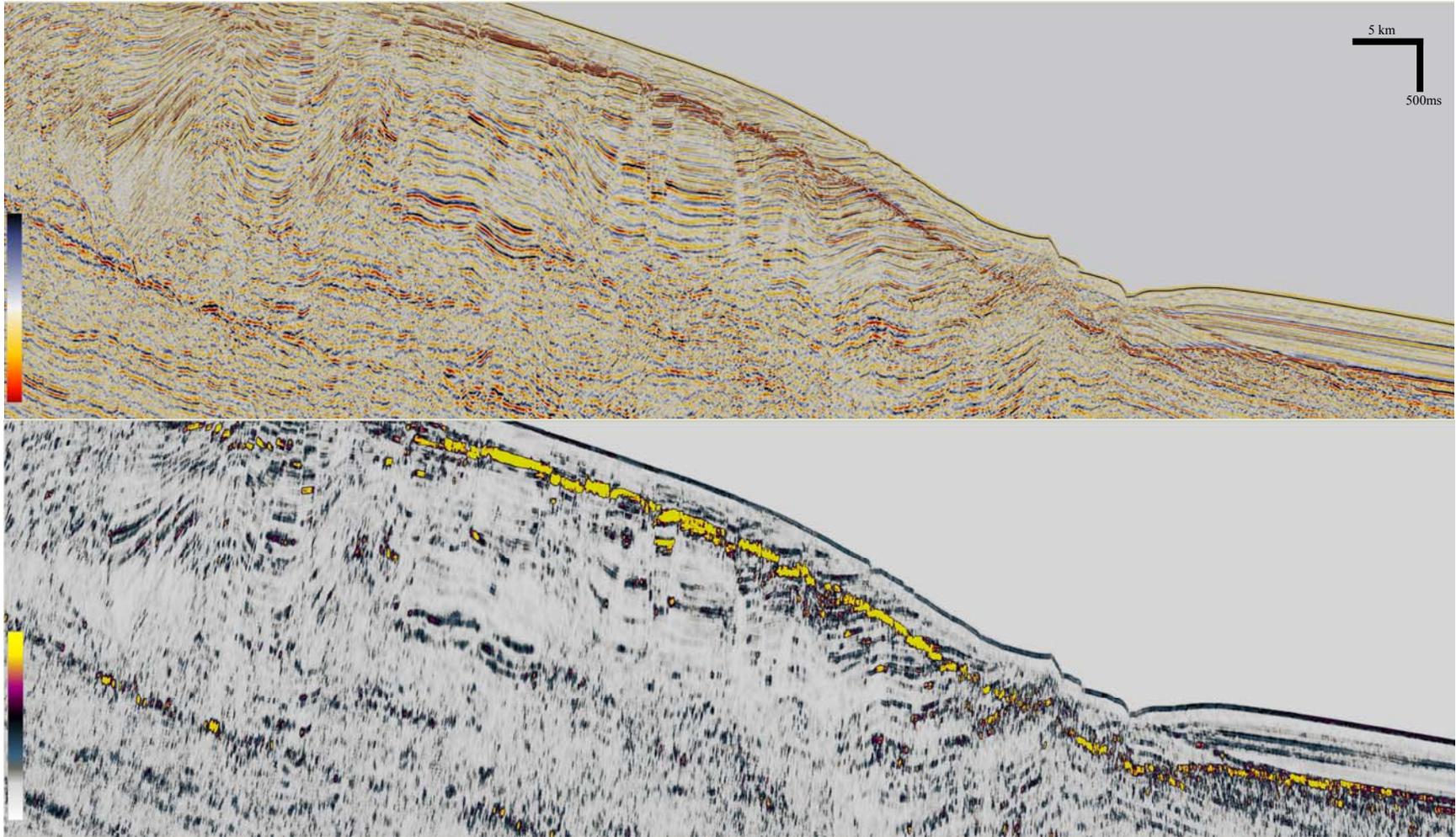


Figura 27: Linha 0228-312.5. Comparação entre sísmica convencional (amplitude) e aplicação do atributo sísmico fator de qualidade Q.

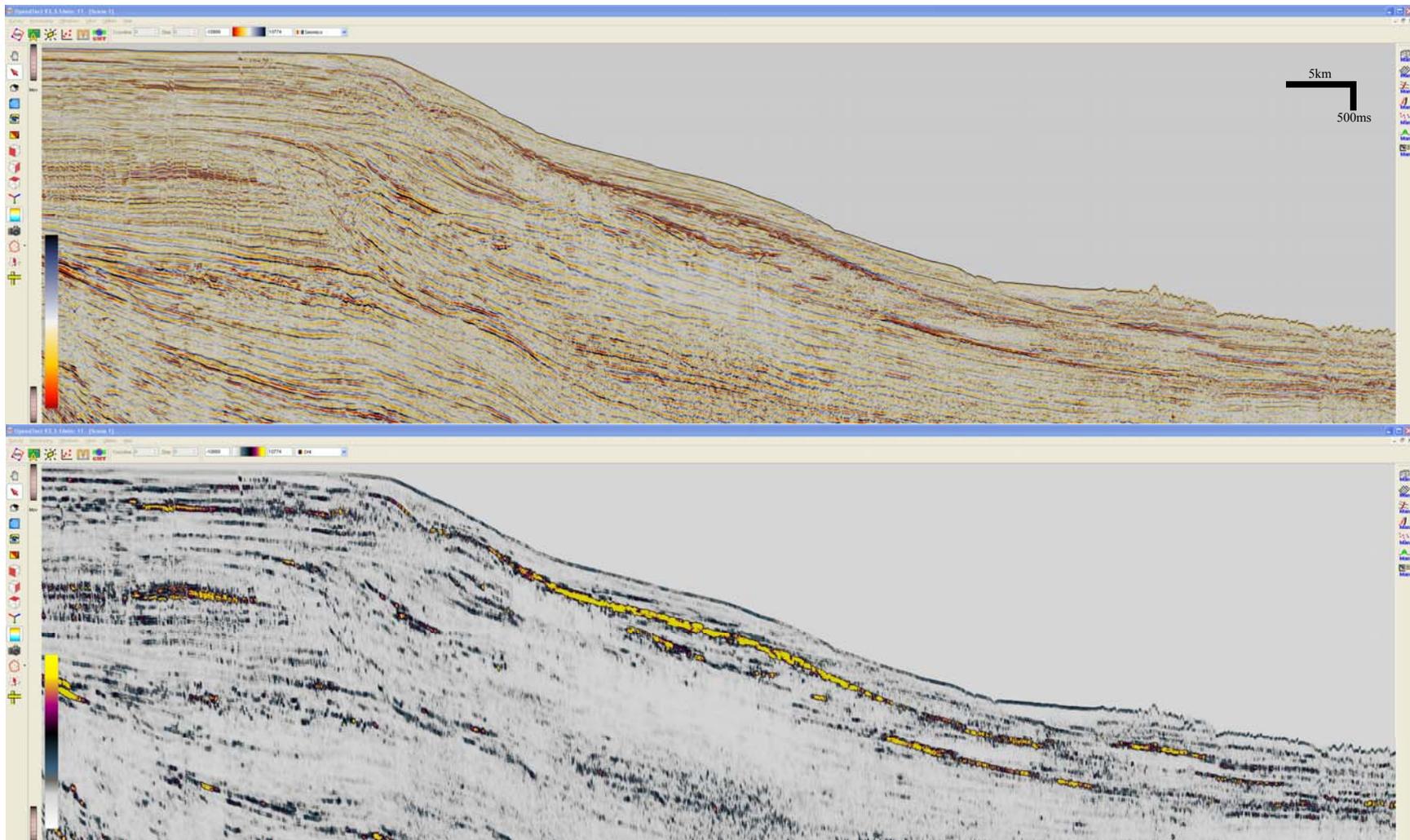


Figura 28: Linha 0228-311.4. Comparação entre sísmica convencional (amplitude) e aplicação do atributo sísmico fator de qualidade Q.

## 8- Conclusão

Na interpretação dos perfis sísmicos obtidos, o BSR foi o principal padrão sísmico relacionado à ocorrência de hidratos de gás encontrado na região do Cone do Rio Grande. Em alguns perfis, foi possível identificar o aspecto blindado relacionado ao blanking. Estima-se que a zona de estabilidade dos hidratos de gás ocorre em uma profundidade de lâmina d'água que varia de 930 a 3.000 m, se estendendo por uma área de direção alongada NE-SW, de aproximadamente 40.000 km<sup>2</sup>. Esse valor aproxima-se do valor estimado por Fontana, (1989) aonde, a lâmina d'água varia de 500 a 3.500 m em uma área total que varia de 40.000 a 50.000 km<sup>2</sup>. A utilização de gráficos, correlacionando a profundidade de lâmina d'água com a espessura aproximada dos hidratos de gás e a análise dos perfis sísmicos, mostrou que a zona de estabilidade dos hidratos de gás aumenta à medida que a lâmina d'água aumenta. Esse fator provavelmente está relacionado ao aumento das condições necessárias para a acumulação de hidratos de gás, como por exemplo: aumento da pressão e diminuição da temperatura do fundo do mar.

A utilização dos atributos sísmicos foi de grande utilidade para a caracterização e delimitação da área de ocorrência dos hidratos de gás, diminuindo incertezas e suposições na identificação dos mesmos. Isso porque em algumas regiões, a identificação dos padrões sísmicos relacionados aos hidratos de gás não era clara. Os atributos de Fase Instantânea, Envelope e Fator de Qualidade  $Q$  instantâneo, foram os atributos que melhor evidenciaram a ocorrência de hidratos de gás na área de estudo. A aplicação do atributo sísmico de Fase Instantânea possibilitou a identificação dos hidratos de gás nas regiões onde não se consegue identificar nenhuma reflexão (*blanking*), destacando uma possível concentração de hidratos de gás. O atributo sísmico de Envelope representa a energia instantânea total e possui uma relação direta com o contraste de impedância acústica. O atributo de envelope permite um melhor destaque para o contraste de impedância acústica entre a zona de estabilidade dos hidratos de gás e os gases livres trapeados abaixo dessa. O atributo sísmico do Fator de Qualidade  $Q$  Instantâneo mostrou-se o melhor atributo sísmico pós stack para a caracterização de hidratos de gás. Isso porque o fator de qualidade  $Q$  destaca os principais elementos petrofísicos, sísmicos e geológicos; característicos da ocorrência de hidratos de gás, como por exemplo: a baixa porosidade e permeabilidade causada por cimentação.

## 9- Referências Bibliográficas.

- Abreu, V.S. 1998. Geologic Evolution of Conjugate Volcanic Passive Margins: Pelotas Basin (Brazil) and Offshore Namíbia (Africa): Implication for Global sea-Level Changes. Tese de Doutorado - Rice University, Houston, Texas.USA. 354p.
- Alves, E.C. 1977. Estrutura Rasa do Talude e Sopé da Margem Continental do Rio Grande do Sul e Uruguai. Dissertação de Mestrado. UFRGS, 74p.
- Asmus, H.E. 1975. Controle estrutural da deposição mesozóica nas bacias da margem continental brasileira. *Revista Brasileira de Geociências*, 5 (3): 160-175.
- Asmus, H.E. 1982. Significado geotectônico das feições estruturais das bacias marginais brasileiras e áreas adjacentes. In: SBG, Congresso Brasileiro de Geologia, 32, Salvador-BA, Anais 4:1547-1557.
- Asmus, H.E., 1983. A Bacia de Pelotas no Esquema Evolutivo da Margem Continental Brasileira. In: Atas do I Simpósio sul-Brasileiro de Geologia, Porto Alegre-RS. pp.245- 253.
- Balch, A.H., 1971, Color sonograms:Anew dimension in seismic data interpretation: *Geophysics*, 36, 1074–1098.
- Bangs, N.L., Musgrave, R.J., and Tréhu, A.M., 2005. Upward shifts in the South Hydrate Ridge gas hydrate stability zone following post-glacial warming offshore Oregon. *J. Geophys. Res.*, 110:B03102.
- Barnes, A.E., 1991, Instantaneous frequency and amplitude at the envelope peak of a constant-phase wavelet: *Geophysics*, 56, 1058-1060.

- Basseto, M.; Alkimin F.F.; Szatimari, P.; & Mohriak W. 2000. The ocean segment of the southern Brazilian margin: morpho-structural domains and their tectonic significance. In: Mohriak, W. and Talwani, M., eds. Atlantic rifts and continental margins. Geophysical Monograph 115. American Geophysical Union.
- Bath, M., 1974. Spectral Analysis In Geophysics, Elsevier, Amsterdam.
- Brown, A. R., 1996, Seismic attributes and their classifications: The Leading Edge, 15, 1090.
- Brown, A. R., 2004, Interpretation of three-dimensional seismic data, 6<sup>th</sup> ed.: American Association of Petroleum Geologists Memoir 42.
- Cainelli, C. & Mohriak, W. U., 1998. Geology of Atlantic Eastern Brazilian basins. 1998. In: AAPG, International Conference & Exhibition Short Course – Brazilian Geology Part II, Rio de Janeiro, Brazil, 67p.
- Chen, Q., and S. Sidney, 1997, Seismic attribute technology for reservoir forecasting and monitoring: The Leading Edge, 16, 445–456.
- Chopra, S. & Kurt J. M., 2005, Seismic attributes — A historical perspective. Geophysics, Vol. 70, no. 5 (September-October 2005); Pag. 13SO.
- Clennell, M. B., 2000. Hidrato de Gás Submarino: Natureza, Ocorrência e Perspectivas Para Exploração na Margem Continental Brasileira. Revista Brasileira de Geofísica, Vol. 18(3), 2000.
- Correa, T. B. S.; Silva, C. G. & Reis, A. T., 2005. Space-Time Evolution of the Marine Depocenters at the Pelotas Basin, Southern Brazilian Continental Margin. Expanded Abstract from IX International Congress of the Brazilian Geophysical Society.
- Consentino, L., 2001, Integrated reservoir studies: Editions Technip.

- Dasgupta R, Clark RA (1998) Estimation of Q from surface seismic reflection data. *Geophysics* 63:2120–2128.
- Dhananjay K., Mrinal K. S., Nathan L. B., 2006. Seismic characteristics of gas hydrates at Hydrate Ridge, offshore Oregon, University of Texas at Austin, USA May 2006 The Leading Edge.
- Dias, J. L.; Sad, A. R. E.; Latgé, M. A. L.; Silveira, D. P., 1994. Bacia de Pelotas: estado da arte e perspectivas exploratórias. In: Petrobras, Seminário de Interpretação Exploratória, 2, Rio de Janeiro, Anais, 270-275.
- Fontana, R.L., 1989. Evidências Geofísicas da Presença de Hidratos de gás na Bacia de Pelotas – Brazil. Primeiro Congresso da Sociedade Brasileira de Geofísica, Rio de Janeiro, vol. 1, p. 234 – 248.
- Fontana, R.L., 1990. Desenvolvimento Termomecânico da Bacia de Pelotas e Parte Sul da plataforma de Florianópolis. In: Origem e evolução de Bacias sedimentares. PETROBRAS. p.377-400.
- Fontana, R. L. & Mussumeci, A., 1994. Hydrates offshore Brazil. *Annals of the New York Academy of Sciences*, International Conference on natural gas hydrates, 715:106-113.
- Fontana, R.L. 1996. Geotectônica e Sismoestratigrafia da Bacia de Pelotas e Plataforma de Florianópolis. Tese de Doutorado. UFRGS. Porto Alegre, RS. 214p.
- Freitas, A. M. V., 1990. Estudo da Formação de Hidrato de Gás. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Dissertação de Mestrado - COPPE.
- Freitas, A. M. V. & Lobao, A. C., 2002. Hydrate blockages in flowlines and subsea equipment in Campos Basin. 34<sup>th</sup> Offshore Technology Conference, Houston, Texas.

- Gamboa, L.A.P & Rabinowitz, P.D. 1981. The Rio Grande Fracture Zone in the Western south Atlantic and its Tectonic Implications. *Earth and Planetary Science Letters*, 52: 410-418.
- Gei D., Carcione J.M., 2003. Acoustic properties of sediments saturated with gas hydrates, free gas and water, *Geophys. Prospect.* 51 (2003) 141–157.
- Ginsburg, G.D. & Soloiev, V., 1997. Methane migration within the submarine gas- hydrate stability zone under deep-water conditions: *Mar. Geol.*, 137: 49-57.
- Goldberg, D. S., Collett, T. S. & Hyndman, R.D., 2000. Ground truth: in-situ properties of hydrate. In: *Natural gas Hydrate in Oceanic and Permafrost Environments* (Max.M.D., ed.), Kluwer, Dordrecht, 295-309.
- Gomes, P.O; Severino, M.C.G; Gomes, B.S. 1993. Projeto LEPLAC: Interpretação Integrada dos dados Geofísicos do Prospecto LEPLAC-IV Margem Continental Brasileira. In: *Anais do 3º Congresso Internacional da sociedade Brasileira de Geofísica. Rio de Janeiro (Brasil) v.2, p.1275-1280.*
- Gonçalves, A.; Oliveira, M. A. M.; Motta, S. O., 1979. Geologia da plataforma continental sul brasileira. *Boletim Técnico da Petrobras*, 22:157-174.
- Hesse, R., & Harrison, W.E., 1981. Gas hydrates (clathrates) causing pore-water freshening and oxygen isotope fractionation in deep water sedimentary sections of terrigenous continental margins, *Earth Planet. Sci. Lett.*, 55: 603-613
- Hinz, K., 1981. A hypothesis on terrestrial catastrophes- Wedges of very thick oceanward dipping layers beneath passive continental margins – Their origin and Paleoenvironmental significance. *Geologisches Jahrbuch, Reihe E*, 22: 5-28.
- Johnston, D.H., Toksöz, M.N., A. Timur, 1979 - Attenuation of seismic waves in dry and saturated rocks: II. Mechanisms. *Geophysics*, Vol. 31, no. 4; P. 691-71.

- Johnston, D.H. & Toksoz, M.N., 1981, Definitions and terminology, in Toksoz, M.N. and Johnston, D.H., Eds., Seismic Wave Attenuation: Society of Exploration Geophysics, Geophysics Reprint Series no. 2, 1-5.
- Kvenvolden, K.A., 1993. Gas hydrates-geological perspective and global change: Rev. Geophys., v. 31, p. 173-187.
- Lavergne, M., 1975, Pseudo-diagraphics de Vitesse en offshore profonde: Geophysical Prospecting, 23, 695–711.
- Lee M.W., Hutchinson D.R., Dillon W.P., Miller J.J., Agena W.F. & Swift B.A., 1993. Method of estimating the amount of in-situ gas hydrates in deep marine sediments. Mar. Pet. Geol., 10: 493-506.
- Legorreta, F. J. R., 2009. Seismic evidence and geological distinctiveness related to gas hydrates in Mexico. The Leading Edge 28, p. 714 - 717.
- Lindseth, R. O., 1979, Synthetic sonic logs—A process for stratigraphic interpretation: Geophysics: 44, 3–26.
- Liner, C., C.-F. Li, A. Gersztenkorn, and J. Smythe, 2004, SPICE: A new general seismic attribute: 72nd Annual International Meeting, SEG, Expanded Abstracts, 433–436.
- Lorenson, T. D., and K. A. Kvenvolden, 2001, A Worldwide Assessment of Coincidental Gas Hydrate and Petroleum Gas Occurrences, 2001 AAPG Annual Convention Program with Abstracts, v. 10: Tulsa, AAPG, p. A120.
- Matthew J. Hornbach, W. Steven Holbrook, Andrew R. Gorman, Kara L. Hackwith, Daniel Lizarralde, and Ingo Pecher, 2003. Direct seismic detection of methane hydrate on the Blake Ridge Geophysics, vol. 68, no. 1 (January - February 2003); P. 92–100, 9 figs., 1 table. 10.1190/1.1543196.

- Mepen, M. 2008. Evolução Sedimentar da Porção Mediana e Distal da Bacia de Pelotas – Niterói, Tese (Mestrado em Geologia Marinha e Geofísica) – Universidade Federal Fluminense.
- Mutter, J. C., 1985. Seaward dipping Reflectors and the Continental-Ocean Boundary at Passive Continental Margins. *Tectonophysics*, 114: 117-131.
- Paull, C. K., Matsumoto, R., Wallace, P. J., and Shipboard Scientific Party, 1996, Site 997: Proceedings of the Ocean Drilling Program, Scientific Results, 164, 296.
- Pride, S. R. & Berryman J. G., 2003. Linear dynamics of double-porosity dual-permeability materials I. Governing equations and acoustic attenuations. *Phys Rev E* 68:036603
- Sad, A. R. E.; Silveira, D.P.; & Machado, M.A.P., 1997. Hidratos de gás marinhos: a mega ocorrência da bacia de Pelotas/Brasil. 5º Congresso Internacional da Sociedade Brasileira de Geofísica, São Paulo, Boletim de Resumos Expandidos, v.1, p.71 – 74.
- Santos, R. A., 1986. Perfil Sísmico Vertical: Separação de Campos de Onda e Obtenção do Fator Q. Salvador, Dissertação de Mestrado. Universidade Federal da Bahia.
- Sloan, E.D., 1998. Clathrate hydrates of natural gas: 2nd edition. Marcel Dekker, New York. 436 pp.
- Spetzler, H., and Anderson, D. L., 1968, The effect of. Temperature and partial melting on velocity and attenuation in a simple binary system: *J. Geophysics. Res.*, Vol. 73, P. 6051-6080.
- Tanaka, M. D., 2003 – Reconhecimento das Ocorrências de hidratos de gás no Cone do Amazonas – Niterói, Dissertação de Mestrado em Geologia e Geofísica Marinha – Universidade Federal Fluminense.

Taner, M. T., and R. E. Sheriff, 1977, Application of amplitude, frequency, and other attributes to stratigraphic and hydrocarbon de-termination, in C. E. Payton, ed., Applications to hydrocarbon exploration: American Association of Petroleum Geologists Memoir 26, 301–327.

Taner, M. T., F. Koehler, and R. E. Sheriff, 1979, Complex seismic trace analysis: Geophysics, 44, 1041–1063.

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

Taner, M. T., J. S. Schuelke, R. O’Doherty, and E. Baysal, 1994, Seismic attributes revisited: 64th Annual International Meeting, SEG, Expanded Abstracts, 1104–1106.

Tinivella, U., M. F. Loreto, F. Accaino, 2008. Regional versus Detailed Velocity Analysis to Quantify Hydrate and Free Gas in Marine Sediments: The South Shetland Margin Case Study. Proceedings of the 6<sup>th</sup> International Conference on Gas Hydrates (ICGH 2008), Vancouver, British Columbia Canada, July 6 – 10, 2008.

Toksöz M.N., Johnston D.H., A. Timur, 1979 - Attenuation of seismic waves in dry and saturated rocks: I. Laboratory measurements. Geophysics. vol. 41, no. 4; P. 681-6130.

Site:

<http://woodshole.er.usgs.gov/project-pages/hydrates> (Visitado em 20 de Junho de 2009).