



**UNIVERSIDADE FEDERAL FLUMINENSE**

**INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS**

**DEPARTAMENTO DE GEOLOGIA E GEOFÍSICA MARINHA**

**CURSO DE GRADUAÇÃO EM GEOFÍSICA**

**Utilização de atributos sísmicos para interpretação da Plataforma  
Finmark**

**VICTOR DE SOUZA SANTOS**

**Niterói**

**2017**

**VICTOR DE SOUZA SANTOS**

**Utilização de atributos sísmicos para interpretação da Plataforma  
Finmark**

Trabalho apresentado como requisito parcial para  
obtenção do título de Bacharel em Geofísica pela  
Universidade Federal Fluminense, sob orientação do  
Prof. Dr. Rogério de Araújo Santos.

**Niterói**

**2017**

FACULDADE DE GEOFÍSICA DA UNIVERSIDADE FEDERAL  
FLUMINENSE  
CURSO DE GEOFÍSICA

**VICTOR DE SOUZA SANTOS**

**Utilização de atributos sísmicos para interpretação da Plataforma  
Finmark**

Trabalho apresentado como requisito parcial para  
obtenção do título de Bacharel em Geofísica pela  
Universidade Federal Fluminense, sob orientação do  
Prof. Dr. Rogério de Araújo Santos.

Niterói, 11 de Dezembro de 2017.

**Banca Examinadora:**

---

Prof. Dr. Rogério de Araújo Santos – Universidade  
Federal Fluminense (UFF) / LAGEMAR

---

Prof. Dr. Eliane da Costa Alves – Universidade  
Federal Fluminense (UFF) / LAGEMAR

---

Prof. Dr. Antônio Fernando Menezes Freire – Universidade  
Federal Fluminense (UFF) / LAGEMAR

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço imensamente aos meus pais, que me serviram de exemplo para sempre seguir em frente, em especial a minha mãe, Elaine pela perseverança e resiliência nos momentos mais necessários, por sua imensa fé e suas orações.

A minha amada esposa, Juliana que esteve do meu lado nesta caminhada árdua e longa.

Ao meu Avô, Otávio, pela inspiração para se aventurar por onde não conhecemos e pelos ensinamentos de como viver uma vida mais alegre.

A Ximena, amiga que esteve presente em um dos momentos mais difíceis de minha vida.

Aos professores e alunos do instituto de geociências da UFF, sem o qual um homem do mar não poderia ter se formado.

Agradeço a empresa dGB Earth Sciences B.V. pela disponibilização do software e aos desenvolvedores do OpendTect® por esta excelente ferramenta.

Agradeço a AAPG pela cessão dos dados para fins unicamente acadêmicos.

## RESUMO

Este trabalho proporcionou uma melhor visualização da sísmica 3D ao utilizar importantes atributos sísmicos fornecendo delimitações otimizadas de refletores e realçando o delineamento dos carbonatos da formação Bjarmeland. A Plataforma Finmark, localizada no mar de Barents, é alvo de estudos a décadas por geocientistas Russos e Ocidentais, em uma região de delimitação controversa no oceano Ártico, boa parte disso devido ao seu potencial para hidrocarbonetos. Embora estudos sísmicos já tenham sido realizados, tais como o que gerou os dados utilizados no presente trabalho, fornecidos pela AAPG somente para atividades acadêmicas, o advento de novas tecnologias tais como o uso de atributos sísmicos, aliados a uma capacidade computacional, muito mais avançada, permite analisar os dados pré-existentes e melhorar a visualização dos refletores, indicando com maior precisão sua localização e delimitando melhor as feições de áreas com maior interesse econômico, tais como os reservatórios de carbonatos em formatos de *mounds* sísmicos. Considerando que qualquer levantamento sísmico demanda vultuosos investimentos, o reprocessamento ou reinterpretção de tais dados podem fornecer informações muito valiosas utilizando menos recursos financeiros.

***Palavras-Chave:*** Finmark; atributos sísmicos; interpretação.

## **ABSTRACT**

This work led to a better visualization of the 3D seismic due the utilization of important seismic attributes that provided enhanced boundaries of the reflectors and the shape of the limestones in Bjarmeland formation. Located in the Barents Sea, the Finmark platform have been stage to several studies conducted by Russian and Western geoscientists, set in region of controvert delimitation in the Arctic Ocean, many of that due to his hydrocarbon potential. Thought seismic studies have already been realized, such as the one that generate de data used in this present work, provided by AAPG, the upcoming of new technologies such as seismic attributes and a better computational power creates the possibility to analyze the pre-existent data and enhance the reflectors visualization, setting it's location more precisely and bounding features with more economic interest, such as the hydrocarbon reservoirs of limestone in shape of seismic mounds. Whereas any seismic survey is much more expensive compared to the reprocessing and reinterpretation of the data, the use of attributes and reinterpretation can improve the knowledge of the region with a lowest financial expense.

***Key-Words:*** *Finmark; Seismic Attributes; Interpretation.*

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1: Metodologia de trabalho para uso de atributos sísmicos na otimização de uma interpretação geológica .....	11
Figura 2: Mapa do Sul do Mar de Barents, observe a linha sísmica interpretada por Stemmerik na Plataforma Finnmark em azul claro e para a área onde se concentram os estudos em azul escuro, ambas na área superior direita da figura. (modificado de Stemmerik, 2000.).....	12
Figura 3: Devoniano, note a latitude do mar a sudoeste da “Sibéria”. (Scotese, 1998, www.scotese.com).....	14
Figura 4: Seção sísmica do nordeste da Plataforma Finnmark. Stemmerik, L. 2000. ....	15
Figura 5: Carbonífero tardio, note como a área indicado na figura 4 se deslocou para norte, indicando um ambiente deposicional mais frio. (Scotese, 1998, www.scotese.com). ....	16
Figura 6: Fim do Permiano, mar restrito pode ser visualizado a oeste da "Sibéria", indicando um regime deposicional ainda mais frio. (Scotese, 1998, www.scotese.com). ....	18
Figura 7: Sequências SS1 a SS5 conforme descritas pelos autores correlacionadas com a carta estratigráfica. (Samuelsberg et al 2003). ....	19
Figura 8: Exemplos de variações laterais em ondas sísmicas: (a) pouca variação lateral, plana ou flat. (b) uma sinclinal. (c) Forma de onda com variação lateral, indicativo de mudanças laterais ou impedância ou espessura. (d) forma de onda com variação rápida associada com três canais. (Chopra, S. e Marfurt, K. J., 2007). ....	23
Figura 9: Refletores das fácies sísmicas descritas anteriormente (Taner et al., 1979).....	27
Figura 10: Localização dos dados coletados na Plataforma Finnmark, bloco em azul na parte superior direita. (Rafaelsen et al. 2003). ....	28
Figura 11: Corte transversal na direção SW-NE indica a localização da seção onde os atributos serão calculados e mostrados abaixo. ....	29
Figura 12: Refletores com assinatura caótica, indicados na área destacada em vermelho, o corte transversal foi referenciado na figura 11. ....	30
Figura 13: Atributo com uso da transformada de Hilbert aplicado no corte transversal da Figura 11, pode melhorar a visualização dos refletores de baixa amplitude indicados pelo círculo vermelho e da falha do hemigraben na área sul indicado pela reta vermelha. ....	31
Figura 14: Atributo textura aplicado no corte no eixo Z em 2748 ms TWT, enquanto a parte inferior esquerda apresenta uma feição mais homogênea, que poderia sugerir o embasamento, a parte superior direita apresenta uma intercalação de feições, que poderia sugerir a presença de sedimentos. ....	32
Figura 15: Atributo textura aplicado no corte transversal da Figura 11, note que a parte sul apresenta uma energia bem maior de resposta, e que a parte norte apresenta uma menor densidade de energia, sugerindo um embasamento mais raso a Sul. ....	33
Figura 16: Corte no eixo Z do atributo textura em 3800 ms TWT, atente para a maior densidade de energia retornando na parte inferior direita da figura, região sudeste. ....	34
Figura 17: Transformada de Hilbert aplicada no corte transversal indicado na Figura 11, note o aumento na espessura TWT da camada entre norte e sul indicada pelas dois pares de setas vermelhas acima. ....	35
Figura 18: Corte transversal indicado na Figura 11, o refletor de alta diferença de impedância sugere limite inferior de SS3 no Kasimoviano indicado em verde. ....	37

Figura 19: Corte no eixo Z aplicado no atributo de textura em 2200 ms TWT. Note a posição dos <i>mounds</i> sísmicos. ....	38
Figura 20: Corte no eixo Z aplicado no atributo de textura em 2256 ms TWT, note que os <i>mounds</i> sísmicos se deslocam em direção ao norte da Plataforma quando observamos uma secção mais “profunda”, o que sugere transgressão marinha. ....	39
Figura 21: O atributo textura aplicado em corte do eixo Z em 2256 ms TWT, note consegue representar muito bem os <i>mounds</i> sísmicos, estas estruturas sugerem a presença de <i>build-ups</i> carbonáticos. ....	40
Figura 22: Corte no eixo Z em 2256 ms TWT no atributo similaridade, note como os <i>mounds</i> sísmicos são melhor delineados.....	42
Figura 23: Grande barreira de corais em Queensland, Austrália. Fonte google maps. ....	43
Figura 24: Corte transversal indicado na Figura 11, note os <i>mounds</i> sísmicos bem desenvolvidas destacados no círculo em vermelho. ....	44
Figura 25: Corte no eixo Z em 2180 milissegundos no atributo transformada de Hilbert. Observar como as cores mais quentes preenchem o que parecem ser as áreas mais baixas por entre os <i>mounds</i> sísmicos. ....	45
Figura 26: Corte no eixo Z em 2100 ms TWT no atributo textura, observe como a região em cores mais quentes indicadas no mapa se distribuem ao longo do que parece ser a quebra da Plataforma. ....	46
Figura 27: Corte no eixo Z em 2000 ms TWT no atributo textura, observe o recuo em direção ao sul da região em cores mais quentes indicadas no mapa em relação a Figura 26. As formas da cores quentes sugerem canais de sedimentação e um leque submarino. ....	47

## LISTA DE EQUAÇÕES

<i>Equação 1: Transformada de Hilbert</i> .....	22
<i>Equação 2: Cálculo de Similaridade a partir de dois segmentos de wavelets (X e Y)</i> .....	24
<i>Equação 3: Valor normalizado da homogeneidade calculado em torno dos itens <math>a_{ij}</math> de uma matriz.</i> ....	26

## SUMÁRIO

### **1 INTRODUÇÃO 9**

### **2 METODOLOGIA DE ESTUDO 10**

### **3 ÁREA DE ESTUDO: PLATAFORMA FINMARK, MAR DE BARENTS. 12**

#### **3.1 EVOLUÇÃO GEOLÓGICA DA PLATAFORMA FINMARK. 13**

### **4 ATRIBUTOS SÍSMICOS E FÁCIES SÍSMICAS 21**

#### **4.1 ATRIBUTOS FÍSICOS 21**

##### **4.1.1 A TRANSFORMADA DE HILBERT 21**

#### **4.2 ATRIBUTOS GEOMÉTRICOS 22**

##### **4.2.1 ATRIBUTOS DE COERÊNCIA 22**

##### **4.2.2 SIMILARIDADE 23**

##### **4.2.3 TEXTURA 24**

##### **4.2.3.1 Homogeneidade 25**

#### **4.3 FÁCIES EM SEQUÊNCIAS SÍSMICAS 26**

### **5 ESTRATIGRAFIA DE FINMARK E SUAS FÁCIES SÍSMICAS 27**

#### **5.1 SEQUÊNCIA SÍSMICA SS1 29**

#### **5.2 SEQUÊNCIA SÍSMICA SS2 35**

#### **5.3 SEQUÊNCIA SÍSMICA SS3 37**

#### **5.4 SEQUÊNCIA SÍSMICA SS4 41**

#### **5.5 SEQUÊNCIA SÍSMICA SS5 43**

### **6 RESULTADOS 48**

### **7 CONCLUSÕES 50**

### **REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS 51**

## 1 INTRODUÇÃO

Atributos sísmicos fazem parte de tecnologias que têm se mostrado muito úteis no auxílio à interpretação geofísica que, aliada a um melhor *hardware* computacional, podem se mostrar um ótimo investimento de pesquisa para retrabalhar dados preexistentes, extraindo novas informações que não puderam ser observadas nos trabalhos da época do levantamento sísmico inicial.

Este estudo procura mostrar como tais tecnologias podem melhorar a resolução de refletores gerando maior precisão nas fácies definidas, bem como visualizar feições deposicionais com maiores detalhes.

O local escolhido para utilização destas tecnologias foi a Plataforma Finmark, no mar de Barents, em águas norueguesas, região do oceano Ártico bastante disputada devido ao seu potencial para hidrocarbonetos. A área, que foi estudada com maior dedicação numa época de grande tensão política (Guerra Fria), situa-se entre a Rússia, Noruega, Dinamarca, Canadá e Estados Unidos.

Um dos grandes problemas enfrentados na interpretação geofísica é lidar de forma indireta com um dado remoto e trabalhado por equações de muitas variáveis, o que geralmente admite uma grande quantidade de interpretações redundantes ou impróprias.

A transformada de Hilbert é muito aplicada para atributos sísmicos e serve para destacar refletores localizados em áreas com uma assinatura sísmica caótica, sendo extremamente eficiente para delimitar feições sísmicas associadas, interpretativamente, a carbonatos e a sedimentos siliciclásticos.

Atributos como Similaridade e Homogeneidade se mostraram excelentes para diferenciar fácies sísmicas em superfícies, podendo-se associar feições sísmicas a estruturas, tais como *mounds*, analisadas na região estudada por Stemmerik (2000). Grande quantidade de refletores neste estudo pôde ser melhor delineada através do uso destes atributos, em especial aqueles de baixa amplitude. A partir do uso de diferentes paletas de cores e ajustando a intensidade, pode-se definir estruturas que sugerem o delineamento do embasamento.

O atributo Textura é muito aplicado na interpretação sísmica, tipicamente para a análise de fácies sísmicas. Este atributo representou muito bem a região de *mounds* sísmicos,

estruturas sísmicas que sugerem estruturas carbonáticas. Ele foi utilizado neste estudo para visualizar estruturas que sugerem a acomodação de clásticos ao redor de altos estruturais e padrões vistos em borda de plataforma, uma das estruturas identificadas se assemelha fortemente a um leque submarino e pode ser vista na figura 27.

Similaridade, que expressa matematicamente a semelhança entre um ou mais traços sísmicos, quando aplicado na região de *mounds* resultou em uma série de estruturas semelhantes à formações de corais em altos estruturais, paleo-regiões com maior incidência de luz

Atributos sísmicos foram utilizados como auxílio à interpretação, em conjunto com com conhecimentos a priori da geologia local e estudos de sísmica anteriores, que fornecem a base necessária para realizar as análises sísmicas e tornar o resultado mais confiável.

## **2 METODOLOGIA DE ESTUDO**

O objetivo do estudo sísmico realizado é o de fornecer mais informações e esclarecimentos às análises da estratigrafia da Plataforma Finmark, gerando uma representação mais precisa dos refletores e inferindo mais hipóteses a respeito da geologia descrita em trabalhos anteriores. Foram utilizados atributos sísmicos descritos no capítulo 4 gerados a partir do software OpendTect 6.0®, da empresa dGB Earth Sciences B.V., disponível nos laboratórios da UFF.

Além da disciplina de Interpretação Sísmica 3D, oferecida pela UFF, os tutoriais no site da empresa possibilitaram um entendimento mais direcionado aos objetivos do presente trabalho, sempre que possível os atributos foram descritos em suas bases gerais. No entanto, foram utilizadas algumas ferramentas específicas deste software, nas quais a descrição foi direcionada à ferramenta em si.

A metodologia de trabalho pode ser descrita pela Figura 1, iniciando-se por uma revisão da literatura sobre as descrições geológicas melhor delineadas e corroboradas com o uso de atributos sísmicos, o que conferiu um maior grau de certeza nas interpretações.

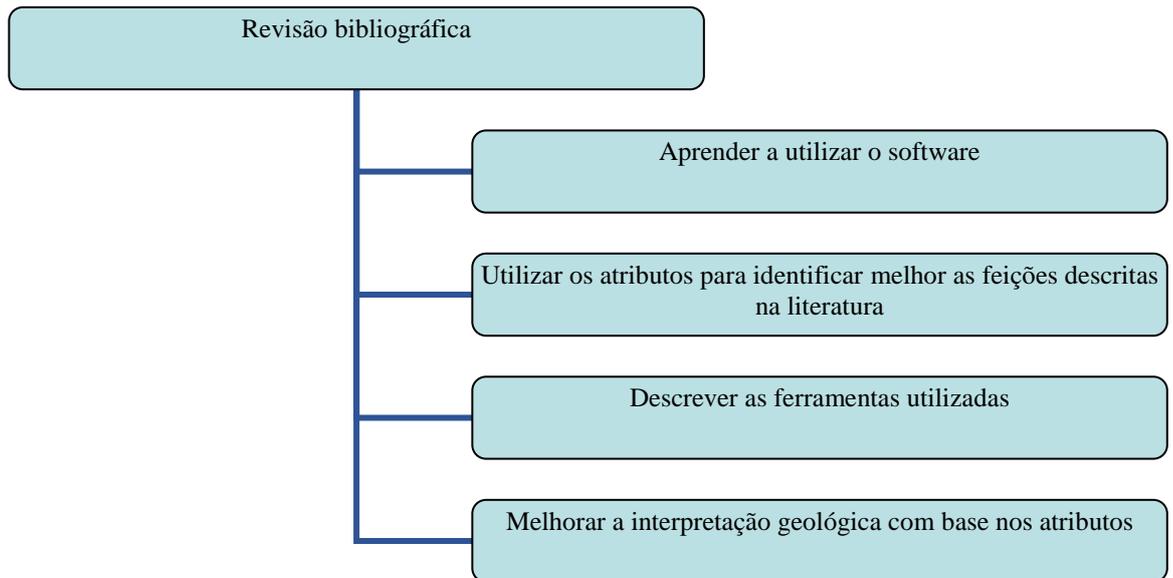


Figura 1: Metodologia de trabalho para uso de atributos sísmicos na otimização de uma interpretação geológica.

### 3 ÁREA DE ESTUDO: PLATAFORMA FINMARK, MAR DE BARENTS.

O Mar de Barents, onde está situada a Plataforma Finmark é um complexo mosaico de bacias e plataformas continentais. Investigações geofísicas começaram durante os anos 70 e a primeira perfuração *offshore* ocorreu no início dos anos 80.

Em águas norueguesas, a perfuração encontrou cerca de 200 a 300 milhões de metros cúbicos de gás, com indícios de óleo. A maioria das reservas encontradas em arenitos Jurássicos.

Os problemas na exploração incluem predominância de gás sobre o óleo e vazamento de hidrocarbonetos de armadilhas geológicas, devido a intensa erosão da Plataforma de Finmark no Mar de Barents que se estabeleceu no Cenozóico. (Stemmerik, 2000).

A área da Plataforma Finmark da qual os dados foram disponibilizados pela AAPG está destacada em vermelho na Figura 2, nas proximidades do paralelo 72° norte e do meridiano 30 graus leste.

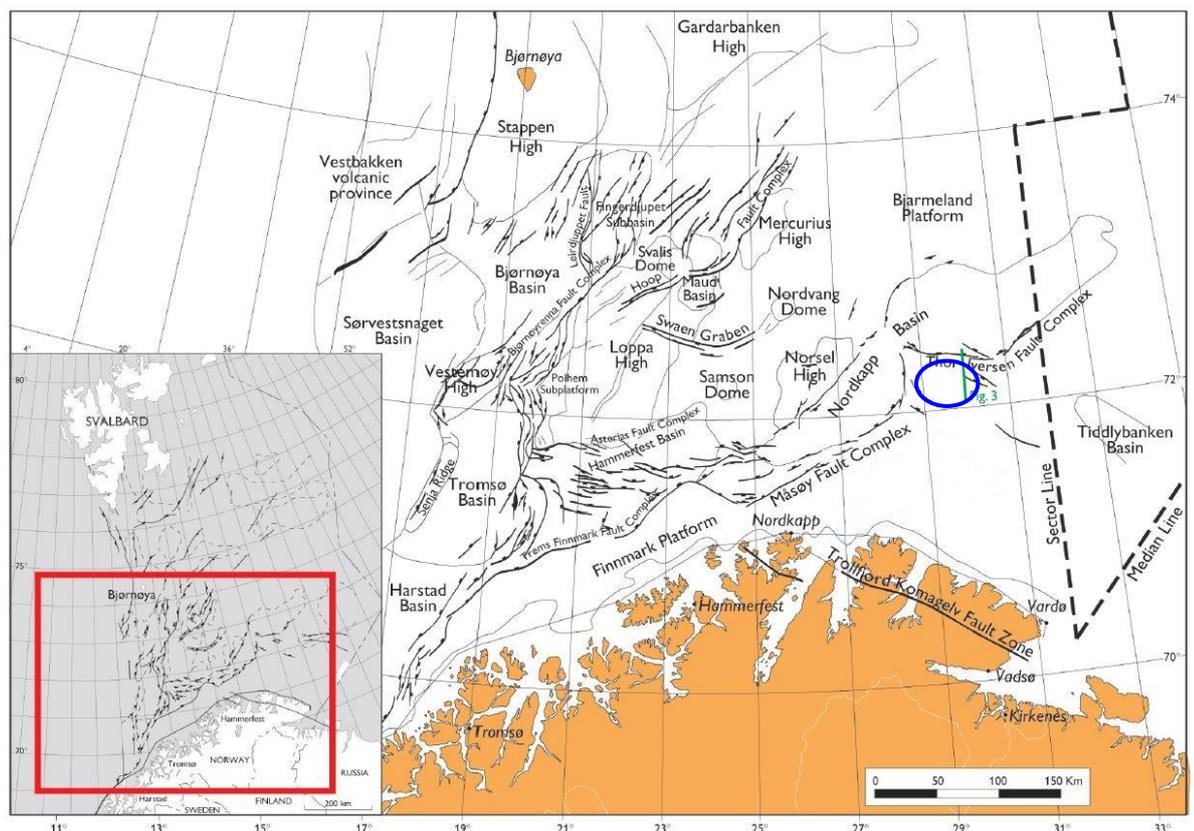


Figura 2: Mapa do Sul do Mar de Barents, observe a linha sísmica interpretada por Stemmerik na Plataforma Finmark em azul claro e para a área onde se concentram os estudos em azul escuro, ambas na área superior direita da figura. (modificado de Stemmerik, 2000.)

Os esforços de exploração da época (1994) focaram em áreas como a Plataforma Finnmark, a Bacia Nordkapp, a margem oeste e a área entre 74°30'N e Spitsbergen. Acumulações de óleo foram descobertas em águas Russas a partir da Bacia de Timan-Pechora. Os maiores achados localizam-se nos campos de gás de Stokmanovskaya, porém suas dificuldades logísticas, baixo preço do gás e distância de mercados potenciais, e períodos de perfuração restritos devido as severas condições ambientais, as tornaram antieconômicas por um tempo considerável. (Doré, et. al. Beauchamp 1994; Stemmerik 2000).

Durante a fase inicial de exploração, ocorreu a descoberta de reservas petrolíferas que deu início a tensões internacionais na região, em um mundo dividido à época entre ocidente e oriente. A histórica “Guerra Fria” foi sentida nessa região através de disputas de demarcação das águas e locais de exploração entre a Noruega e a União Soviética.

Muito embora a Dinamarca, Canadá e Estados Unidos também tenham reivindicado a região, a proximidade das reservas junto à Noruega a transformou em um dos atores principais nesta disputa.

As sucessões estratigráficas interpretadas a seguir refletem a complexa interação de *rift*, flutuações de nível do mar com grande duração e mudança climática devido à deriva para norte do supercontinente Pangeia.

### 3.1 EVOLUÇÃO GEOLÓGICA DA PLATAFORMA FINMARK.

A Plataforma Finnmark forma um segmento reativado estável da parte sul do mar de Barents, circundado a sul pelas terras da Noruega, pelas bacias de Nordkapp e Hammerfest ao norte e pelo campo de falhas de Rigsvassøi-Loppa a oeste (Figura. 2; Gabrielsen et al. 1990).

O embasamento pré-Devoniano foi afetado por dois eventos compressionais muito importantes na região. O primeiro é a orogenia Baikaliana no Pré-cambriano tardio que resultou nas estruturas orientadas na direção NW-SE ao longo da margem oriental norte do escudo Báltico. O segundo evento, ocorrido a 390 Ma, é a formação das *Caledonides* que estão orientadas em NW-SE e situadas ao sul da atual Noruega, conforme mostrada na Figura 3. A maioria das falhas extensionais do Devoniano tardio ao Carbonífero inferior está orientada na direção NE-SW e acredita-se que sejam uma reativação das estruturas de embasamento.

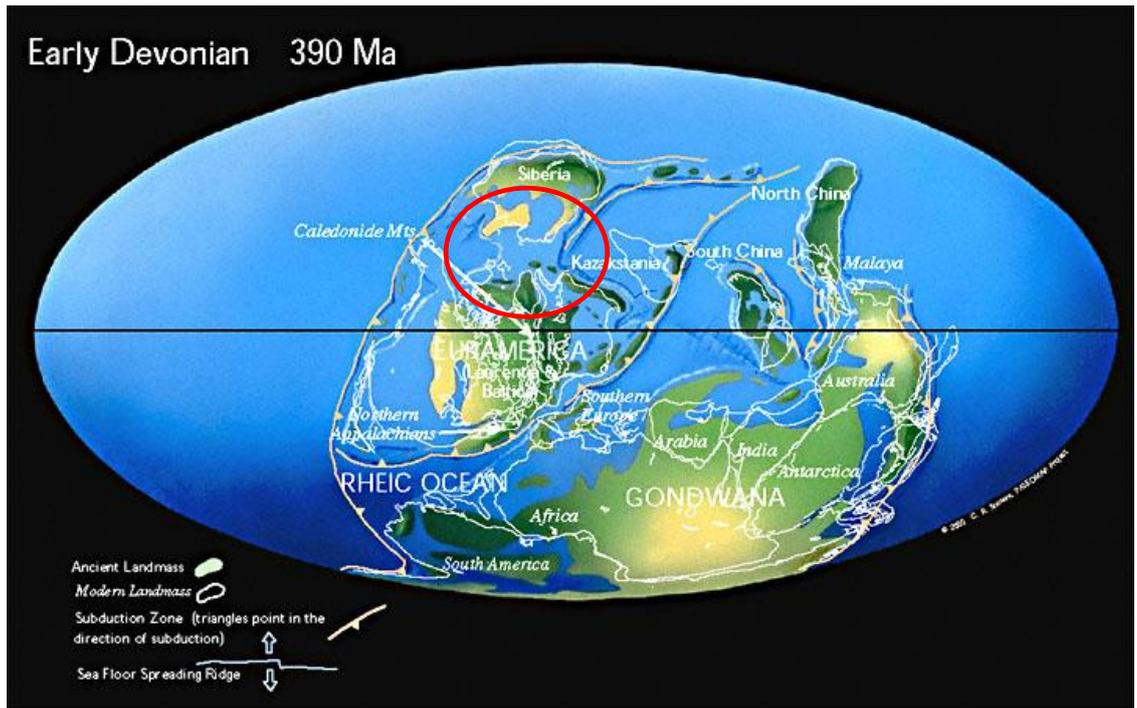


Figura 3: Devoniano, note a latitude do mar a sudoeste da “Sibéria”. (Scotese, 1998, [www.scotese.com](http://www.scotese.com)).

A topografia do *rift* basal esteve em *onlap* durante o Carbonífero médio e superior enquanto o nível do mar começa a subir e a área sofreu uma transgressão gradual. A última sucessão carbonífera e permiana foi depositada durante um período de calma tectônica e a Plataforma subsidiou de forma relativamente uniforme.

A Plataforma foi de alguma maneira modificada por movimentos posteriores no Jurássico ao longo das falhas pré-existentes. A inclinação para o norte vista da Plataforma é o resultado da elevação diferencial no Paleógeno. O limite sul da Plataforma no Paleozoico tardio não é conhecido devido a um evento posterior de dobramento e erosão, embora os padrões das fácies indiquem claramente que a Plataforma se estendeu na direção sul, a partir da linha de costa atual para incluir as partes mais ao norte do território Norueguês.

A análise sísmica da estratigrafia da Plataforma Finmark feita por Stemmerik (2000) ilustrada na Figura 4 mostra que, durante a maior parte do Paleozoico tardio, a Plataforma formou um elemento estrutural relativamente estável, caracterizado por uma subsidência diferencial de sul para norte.

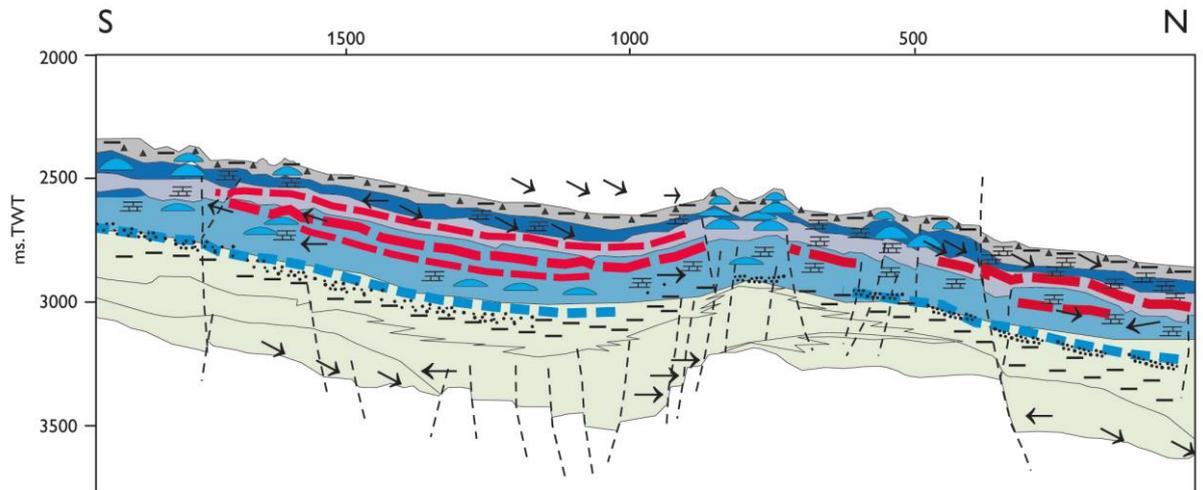


Figura 4: Seção sísmica indicada na Figura 2, Plataforma Finmark (Stemmerik, 2000).

Os dados sísmicos mostram que durante os primeiros estágios de deposição, no Carbonífero inferior, as partes sul e central da Plataforma fizeram parte de uma bacia (*low-lying*) de baixa subsidência, fluvial e tropical úmida e uma planície deltaica com abundantes depósitos de carvão. Nas áreas a norte e leste, há 306 Ma, a bacia marítima passou a ser dominada por siliciclásticos, como visto na Figura 5, modificada de Scotese (1998).

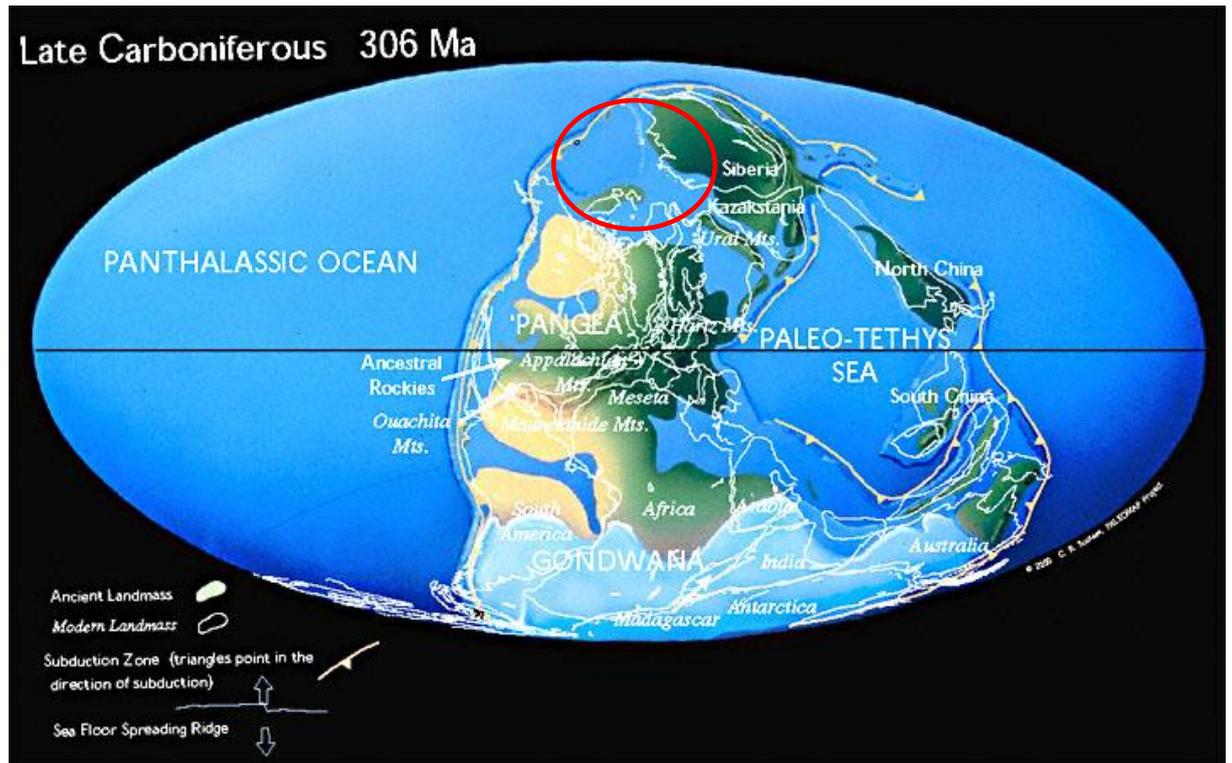


Figura 5: Carbonífero tardio, note como a área indicado na figura 4 se deslocou para norte, indicando um ambiente deposicional mais frio. (Scotese, 1998, [www.scotese.com](http://www.scotese.com)).

No Carbonífero, a Plataforma se caracterizou por marcantes variações no estilo estrutural de sudoeste a nordeste. A parte nordeste da Plataforma mostra pouca evidência de movimentos estruturais sin-deposicionais e teve uma subsidência aparentemente uniforme. Em contraste, a parte a sudoeste é dividida em um número de hemi-grábens orientados ao longo de falhas NW-SE, comparados aos presentes na parte ocidental no mar de Barents que pertence a Noruega.

A Plataforma foi afetada por um soerguimento regional no carbonífero médio comparável aquele visto em outros lugares do oceano Atlântico Norte e Ártico (et. al. Steel, 1984; Stemmerik et al. 1991). Após o soerguimento da região, ocorreu erosão e sedimentação durante o Bashkiriano em hemi-grábens localizados onde siliciclásticos *sin-rift* foram depositados em um ambiente árido de leques aluviais. A área sofreu uma transgressão gradual durante o final do Bashkiriano-Kasimoviano.

No período Moscoviano tardio, os altos estruturais também foram submersos e a Plataforma se tornou parte de uma plataforma continental com orientação Leste-Oeste estendendo-se do Canadá ao Ártico Russo. Os dados sísmicos indicam pouca diferenciação lateral nos ambientes deposicionais durante as primeiras fases da deposição marinha.

O mais notável é a presença de sub-bacias preenchidas com evaporitos. Dados de poços mostraram a mudança de uma deposição de siliciclásticos misturados com carbonatos para uma deposição puramente carbonática, muito provavelmente durante o acontecimento da transgressão marinha e submersão das áreas fontes siliciclásticas.

As sequências sísmicas de 1 a 5, mapeadas por Stemmerick (2000), SS1 a SS5, discutidas adiante, mostram um espessamento das sucessões de sul para norte (Figura 4), refletindo a subsidência diferencial da Plataforma durante o paleozoico tardio. A sequência inferior, correspondendo ao grupo Billefjorden no Carbonífero inferior, indicando um ambiente deposicional que vai de fluvial a marinho raso durante o processo de *rift* ativo.

Separa-se da sequência logo acima por uma grande inconformidade, a SS2 se correlaciona com o grupo inferior Gipsdalen que foi depositado durante a segunda fase do *rift* e mostra pronunciadas variações de espessura ao longo da Plataforma.

A SS3 representa a parte superior do grupo Gipsdalen. Análises de fácies sísmicas mostram a presença de complexos de build-ups carbonáticos a longo da margem norte da Plataforma durante este intervalo de tempo.

A SS4 correlaciona-se grosseiramente ao grupo Bjarmeland. Durante este estágio, o sistema carbonático foi uma imensa plataforma em águas geladas e temperadas com abundantes build-ups de briozoários ao longo da margem norte da bacia. Gradualmente esfriando e se a aprofundando na Plataforma, marcada por um aumento nos depósitos ricos em Chert na SS5.

A evolução da Plataforma, no geral reflete uma deriva em direção ao norte do supercontinente Pangeia durante o Paleozoico tardio. A Sucessão, estratigraficamente é mais completa que as sucessões Spitsbergen e Bjørnøya, e dá uma visão mais detalhada das mudanças deposicionais em relação a mudança de paleolatidade.

A figura 6 mostra uma modificação de Scotese (1998) para o Permiano tardio (225 Ma) na área estudada, que representa o final do movimento latitudinal de 25° do Pangeia, em direção norte, mudando a posição da parte sul do mar de Barents de uma latitude de aproximadamente 20°N (Latitude atual de Cancun, no mar do Caribe) no final do Devoniano e início do Carbonífero para aproximadamente 45° N (Latitude atual de Toronto, no Canadá) no fim do Permiano. (E.G. Golonka & Ford 2000).

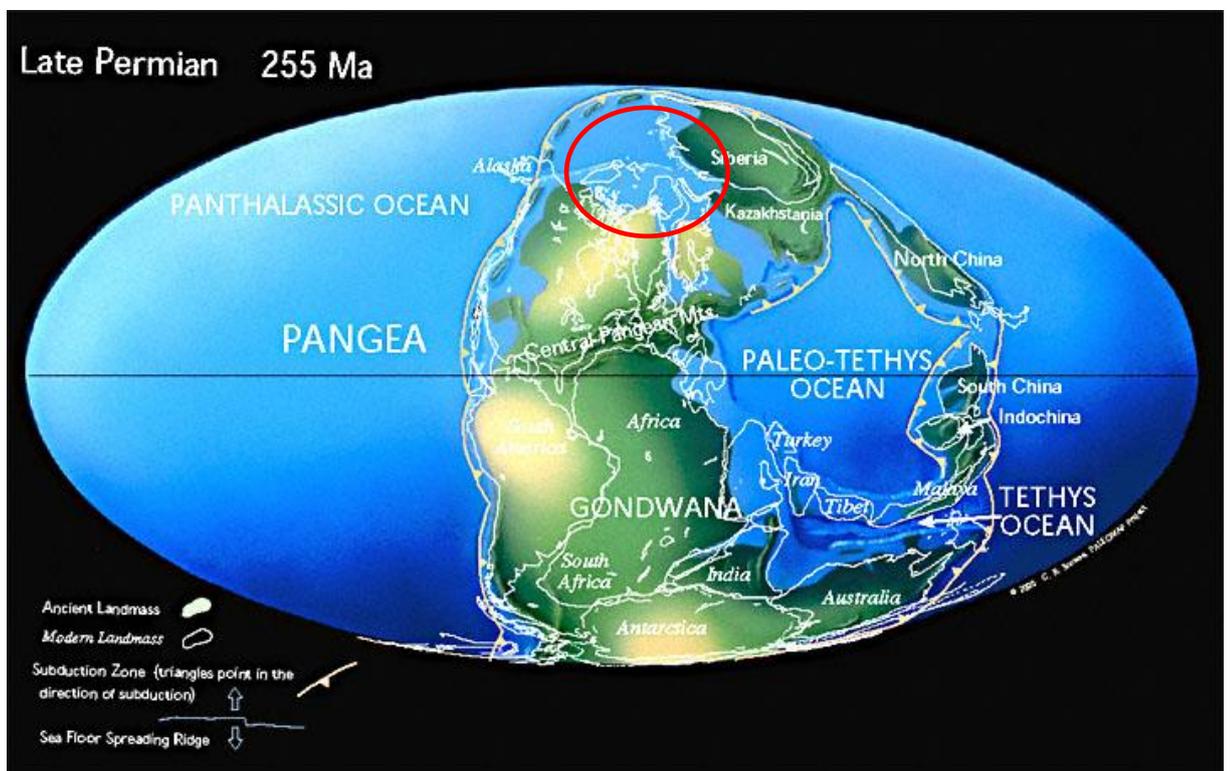


Figura 6: Fim do Permiano, mar restrito pode ser visualizado a oeste da "Sibéria", indicando um regime de deposição ainda mais frio. (Scotese, 1998, [www.scotese.com](http://www.scotese.com)).

Esta mudança na posição de latitude afetou as condições deposicionais ao longo da entidade da Plataforma orientada de leste para oeste, do ártico do Canadá na banda ocidental ao ártico da Rússia (Beauchamp 1994; Stemmerik 2000).

No mar de Barents da Noruega, a mudança paleolatitudinal se reflete na estratigrafia dos quatro grupos do Paleozoico superior, mostrando quatro estágios diferentes de condições paleoclimáticas ilustrados na carta estratigráfica na Figura 7.

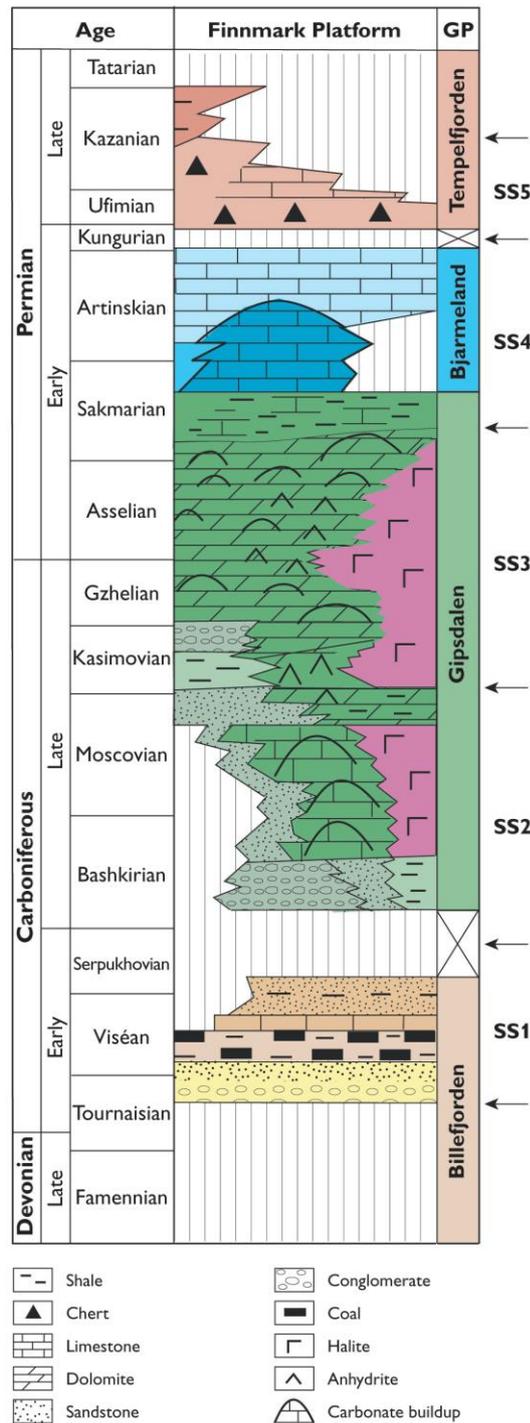


Figura 7: Sequências SS1 a SS5 conforme descritas por Stemmerik (2000) correlacionadas com a carta estratigráfica. (Samuelsberg et al 2003).

O grupo Billefjorden no Carbonífero inferior consiste de sedimentos depositados em um paleoclima úmido variando de tropical a subtropical. O grupo Gipsdalen, inclui sedimentos depositados sob um ambiente quente e seco, os sedimentos do grupo Bjarmeland refletem uma deposição em condições mais úmidas e temperadas e finalmente os sedimentos do grupo Tempelfjorden foram depositados em um ambiente mais frio descritos em Stemmerik, (2000) e Larssem et al. (2002).

As cinco sequências sísmicas mapeadas baseados em Stemmerik (2000) na Plataforma Finmark. A parte inferior destas sequências sísmicas corresponde a siliciclásticos *sin-rift* da formação Ugle que são sobrepostos por uma mistura de carbonatos e siliciclastos da formação Falk, onde a sequência sísmica 3 corresponde à Formação Ørn descrita em Larssem et al. (2002, *in press*).

Ao final da seqüência SS2, Gzheliano inferior, a Plataforma se tornou uma grande área com águas quentes e paleoclima variando de tropical a subtropical, com alguns *build-ups* carbonáticos espalhados. A Plataforma se tornou mais diferenciada durante o período de tempo da seqüência SS3. Pequenos *build-ups* carbonáticos ocorrem dispersos no sul Plataforma, e nas áreas com maior taxa de subsidência, ao norte, eles formaram grandes complexos. A transição da bacia Nordkapp dominada por evaporitos é marcada nos dados sísmicos por reflexões de alta amplitude causada pelos evaporitos em *onlap* na margem da Plataforma.

As condições deposicionais e a arquitetura da Plataforma de Finmark passaram por mudanças significativas durante o Permiano médio. As sismofácies durante a seqüência SS4 mostram uma gradual mudança de Plataforma subtropical de águas quentes para um clima temperado de águas frias durante o período Sakmariano.

O aumento nos tamanhos dos *build-ups* carbonáticos, de grande interesse devido ao potencial para reservatórios de petróleo se desenvolveram ao longo da margem norte da Plataforma. As sismofácies de interior de Plataforma indicam uma subsidência significativa de toda a Plataforma durante o Permiano médio e tardio. Dados sísmicos mostram que os *build-ups* carbonáticos não estão presentes nas áreas sul e central da Plataforma, e tornaram-se restritos a um estreito cinturão ao longo da margem norte.

Os *build-ups* da seqüência SS4 tornaram-se submersos e seus locais de deposição se moveram para sul, estabelecendo-se na área central da Plataforma (Bruce & Toomey 1993). A maior parte da Plataforma acumulou *cherts* espiculíticos de águas relativamente profundas. Gradualmente, durante o final do Permiano, a sedimentação mudou, tornando-se dominada

por siliciclásticos. A mudança de *chert* para cascalho começou na parte mais profunda e mais ao norte da Plataforma.

## 4 ATRIBUTOS SÍSMICOS E FÁCIES SÍSMICAS

Atributo sísmico é uma medida matemática obtida a partir de dados sísmicos que procura melhorar a definição visual ou quantificação do alvo em subsuperfície que se deseja interpretar. Ele será mais indicado para determinada aplicação tanto quanto será a qualidade do dado, a sua sensibilidade à geologia local ou à propriedade de subsuperfície de interesse, tais como os conteúdos de fluidos, ambiente deposicional e estruturas geológicas analisadas.

O estudo e a aplicação de atributos são atividades importantes e em expansão, devido ao seu grande potencial como ferramentas na interpretação de dados sísmicos e que indiquem caminhos para melhores compreensões geológicas de um ambiente analisado.

Tradicionalmente, pode-se considerar atributos sísmicos distribuídos em dois grandes grupos: físicos e geométricos. Dentre estes grupos, foram selecionados alguns atributos para auxiliar na interpretação das feições geológicas da Plataforma Finmark.

### 4.1 Atributos Físicos

Atributos físicos são calculados baseado na transformada de Hilbert utilizando parâmetros de propagação de onda e de litologia envolvidas e são divididos em atributos instantâneos e de envelope.

Atributos instantâneos são computados amostra por amostra e indicam possíveis e contínuas mudanças das amplitudes e/ou fases ao longo do tempo e do espaço.

Atributos de envelope representam as características da *wavelet* e seu espectro de amplitude.

#### 4.1.1 A transformada de Hilbert

A transformada de Hilbert (descrito na Equação 1) possui um papel muito importante no processamento de sinais, sendo usada em sistemas de comunicação, sistemas de radar e imageamento médico. É uma poderosa ferramenta analítica que facilita a interpretação de sinais em termos de modulação de amplitude e frequência.

A transformada gera uma mudança de fase de  $90^\circ$  no sinal de entrada. Logo, se fornecermos uma função cosseno para sinal de entrada nós obteremos uma função seno na

saída. Enquanto numa transformada de Fourier nós mudamos o domínio da função do tempo para a frequência, na transformada de Hilbert o domínio continua o mesmo (Singh, 2014)

$$x^{\wedge}(t) = \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{x(\tau)}{t-\tau} d\tau$$

Equação 1: Transformada de Hilbert

Onde  $x^{\wedge}(t)$  é a transformada de Hilbert de  $x(t)$ .

No presente trabalho, foi usada a transformada de Hilbert para criar uma imagem mais consistente e facilitar a interpretação de horizontes, calculando a transformada de Hilbert da amplitude RMS em uma janela de [-4;+4] ms, (janela padrão do software que gerou melhor resposta), gerando um atributo nomeado no software de *Pseudo-relief* que gera uma representação de aspecto topográfico, onde o intérprete pode ter a sensação de olhar para um afloramento.

## 4.2 Atributos geométricos

Os Atributos geométricos calculam valores e relações entre dois ou mais traços sísmicos, medindo diferenças e relações nas respostas entre os refletores sísmicos e retornando um cálculo regional do sismograma.

Esta variedade de atributos permite fazer avaliações sobre continuidade lateral dos traços sísmicos, fornecendo técnicas para interpretar volumes em subsuperfície de forma mais ampla, ao destacar regiões do sismograma com as características buscadas.

### 4.2.1 Atributos de coerência

O atributo de coerência é uma medida de similaridade entre traços ou formas de onda. Quando vistos em uma seção processada, a forma de onda sísmica é a resposta de uma *wavelet* sísmica em convolução com a geologia da subsuperfície.

Esta resposta muda em termos de amplitude, frequência e fase, contraste de impedância acústica e da espessura das camadas acima e abaixo da interface de reflexão da

onda. A impedância acústica, por sua vez, é afetada pela litologia, porosidade, tipo de fluido e camadas de subsuperfície.

Devido as mudanças nos contrastes de impedância das rochas ao longo de uma interface entre dois estratos, as formas de onda mudam lateralmente em uma seção processada, uma vez que tais contrastes modificam a assinatura das ondas, como visto na Figura 8 (Chopra et. al., 2007).

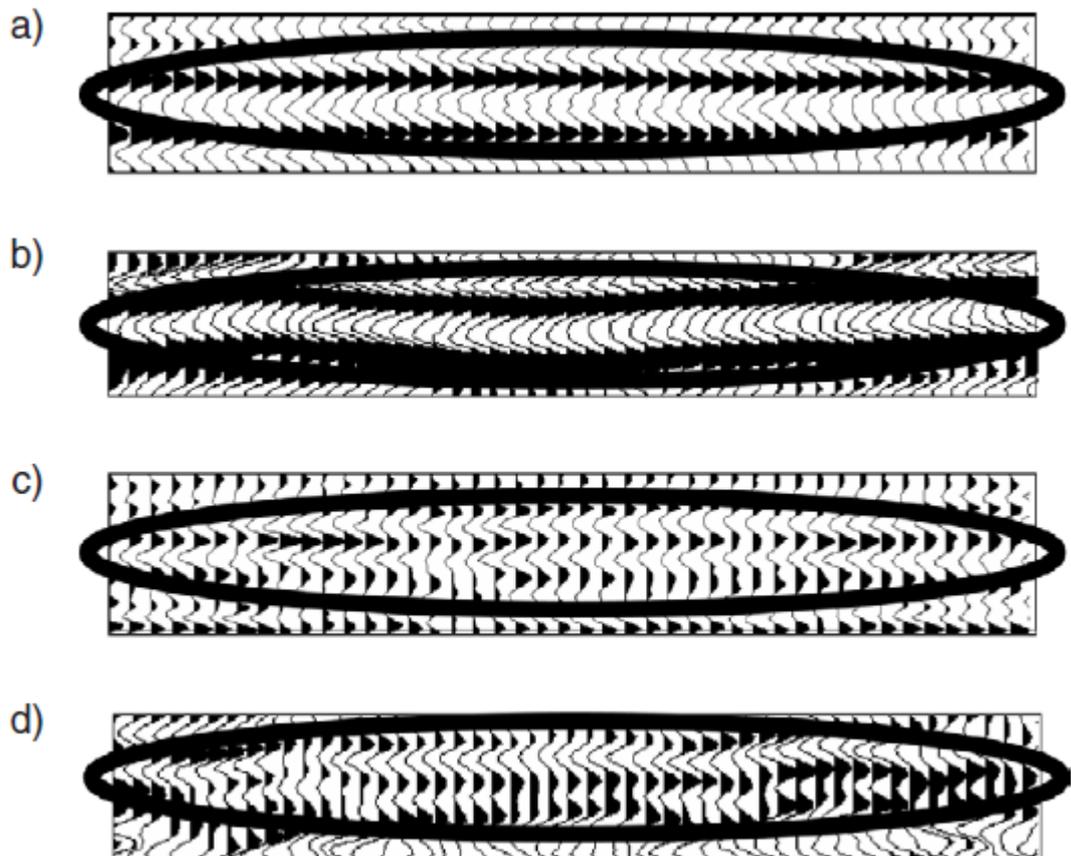


Figura 8: Exemplos de variações laterais em ondas sísmicas: (a) pouca variação lateral, plana ou *flat*. (b) uma sinclinal. (c) Forma de onda com variação lateral, indicativo de mudanças laterais ou impedância ou espessura. (d) forma de onda com variação rápida associada. (Chopra et. al., 2007).

#### 4.2.2 Similaridade

Similaridade é um atributo de coerência que calcula o quanto dois ou mais segmentos de *wavelets* sísmicos são similares. Enquanto uma similaridade de valor 1 indica que dois

segmentos são completamente idênticos entre si, uma similaridade de valor 0 expressa que os traços não têm nenhuma similaridade ( Equação 2).

No software utilizado, OpendTect ®, o atributo aplicado tenta buscar primeiramente a melhor direção em que os segmentos apresentam semelhanças, e então utilizando este primeiro resultado busca semelhanças entre segmentos nesta direção preferencial.

As amostras dos traços sísmicos são consideradas como componentes vetoriais e a similaridade é calculada em termos de distância neste espaço vetorial. O valor retornado é definido como 1 menos a distância Euclidiana entre estes vetores, normalizada pelo comprimento dos vetores.

$$sim = 1 - \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^N (X_i - Y_i)^2}}{\sqrt{\sum_{i=1}^N X_i^2} + \sqrt{\sum_{i=1}^N Y_i^2}}$$

Equação 2: Cálculo de Similaridade a partir de dois segmentos de *wavelets* (X e Y)

Onde **sim** é o valor da similaridade buscada, **X** e **Y** são os vetores, **N** é o número de amostras e o comprimento do vetor é tomado como sendo sua norma L2.

#### 4.2.3 Textura

O atributo de Textura é oriundo do processamento de imagem e é desenvolvido para capturar a rugosidade ou suavidade de uma imagem. A resposta do atributo é calculada em duas etapas: primeiro uma matriz GLCM é calculada para uma área (ou volume) em torno do ponto de cálculo. Posteriormente obtém-se o valor de uma propriedade estatística de tal matriz.

GLCM é uma matriz 2D que calcula com que frequência os valores dos vizinhos A e B aparecem em uma imagem. Pode-se entender a GLCM como uma matriz de dimensões N x N que calcula a resposta em amplitude da posição de referência nas colunas e as amplitudes das posições vizinhas sequencialmente. N é o tamanho de todos os valores que os dados podem possuir.

Num trabalho hipotético onde um conjunto de dados de amplitudes pode assumir apenas os valores 0, 1, 2 ou 3 (nesse caso teríamos uma matriz GLCM 4 x 4). Num primeiro passo a matriz será preenchida com os valores de amplitude entre 0 e 3, com um espaço para cada elemento.

O algoritmo compara a amplitude de uma determinada célula com a de seus elementos vizinhos diretos e retorna como valor de resposta apenas o valor da célula com maior ocorrência, os valores deste primeiro algoritmo serão multiplicados pelos valores de amplitude sísmica encontrados nos dados originais numa multiplicação ponderada, pelo que poderíamos encarar como fatores de probabilidade, desta forma, podemos aumentar a ocorrência de “anomalias nos valores” e melhorar sua visualização, já que terão uma maior participação no resultado final.

A matriz torna-se simétrica quando comparam-se os vizinhos em ambas as direções e da seguinte forma: referência versus vizinho e vizinho versus referência, normalizada ao se dividir pelo número total de ocorrências. A matriz normalizada GLCM é um tipo de matriz de probabilidade que informa o quão provável é achar pares de amplitudes vizinhas na área em torno no ponto de cálculo.

O atributo de textura utilizado neste trabalho foi calculado em dados redimensionados linearmente para 4 bits (com valores indo de 0 a 15; GLCM 16x16). O software utilizado poderia trabalhar com números maiores de bits, porém o tempo de simulação necessário se tornou muito alto. Uma das formas de cálculo é a homogeneidade, como visto na Equação 3.

#### 4.2.3.1 Homogeneidade

No atributo Homogeneidade, os pesos pelos quais a matriz GLCM de probabilidades são multiplicados, aumentam linearmente com a distância da diagonal (ao longo dos quais os valores dos vizinhos são iguais).

$$\text{Homogeneity} = \sum_{i,j=0}^{N-1} \frac{P_{i,j}}{1 + (i - j)^2}$$

Equação 3: Valor normalizado da homogeneidade calculado em torno dos itens  $a_{ij}$  de uma matriz.

### 4.3 Fácies em sequências sísmicas

Fácies sísmicas, assim como suas semelhantes lito e biofácies em estratigrafia que representam um pacote de sedimentos com determinado tipo de rocha ou aparição de alguns tipos de fósseis delimitando uma biozona, representam um pacote sísmico onde visualmente ou através de atributos podemos reconhecer características singulares que os distingam de outro pacote qualquer. Elas permitem inferir diferenças litológicas, petrofísicas e estruturais através de mudanças no sinal sísmico, em função de variações de densidade e/ou velocidade em diferentes estratos rochosos através das mudanças no contraste de impedância que são controlados pelas mesmas variáveis.

Refletores sísmicos podem delimitar zonas falhadas, dobradas ou estruturalmente mais complexas e fornecer um ótimo indicativo dos regimes de esforços que determinada unidade sísmica sofreu.

Outro aspecto importante na análise de fácies sísmicas diz respeito às terminações de refletores de eventos sísmicos podem indicar fronteiras de sequências sísmicas e incluem truncamento, *toplap*, *onlap*, *downlap* e concordância (Qin et al., 2012 e CHOPRA e MARFURT, 2008, Taner et al., 1979).

*Onlap* ocorre durante uma transgressão marinha, com sedimentos sendo depositados em uma linha de costa em subsidência ou no momento de sua erosão. Em contraste, o *downlap* ocorre quando a linha de costa prograda para as partes mais profundas da bacia, com os sedimentos sendo depositados sobre um leito marinho mais antigo.

*Toplap* ocorre quando refletores em mergulho tocam a base de um refletor fortemente horizontalizado, esta superfície se mostra como uma terminação superior, resultada de não deposição ou erosão.

Truncamento ocorre quando existe uma reflexão que represente uma série de camadas erodidas e recobertas por uma outra fácies sísmica diferente. A concordância é a simples deposição de camadas paralelas entre si, com as mais novas sobre as mais antigas. Segue uma representação na Figura 9.

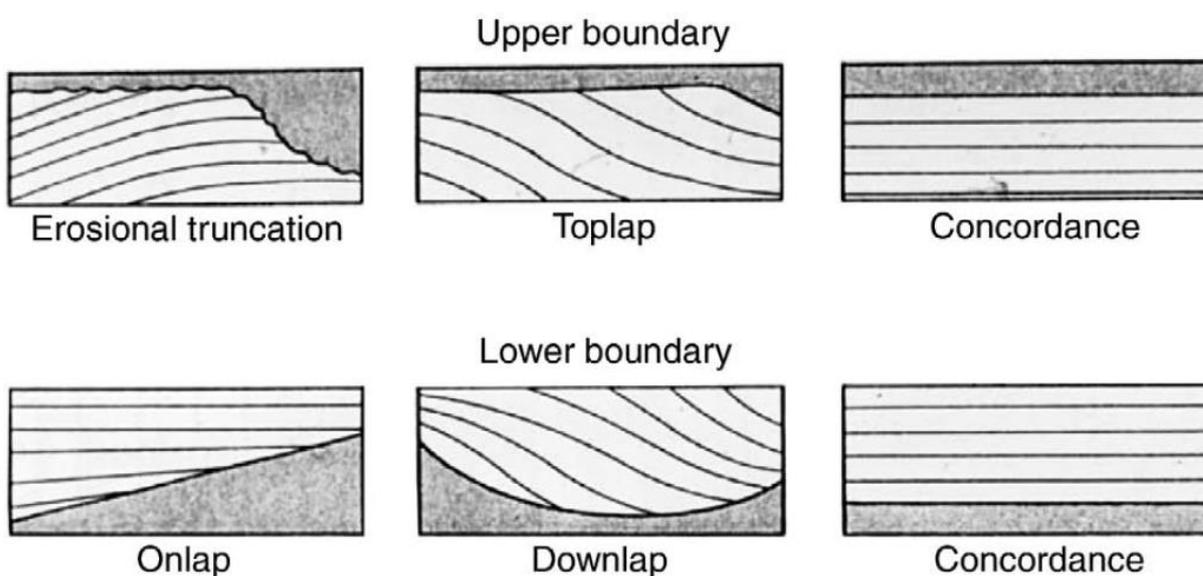


Figura 9: Refletores das fácies sísmicas descritas anteriormente (Taner et al., 1979).

## 5 Estratigrafia de Finmark e suas fácies sísmicas

Cinco seqüências sísmicas do Paleozoico Superior, conforme definidos por Stemmerik (2000) foram mapeadas na Plataforma Finmark, a partir dos conceitos de sismoestratigrafia e terminações de refletores mostrados na Figura 9. As análises realizadas nestas seqüências foram separadas de forma a tratar as cinco individualmente e assim facilitar o estudo.

Entre cada uma dessas cinco seqüências observam-se grandes variações nos paleoclimas, nos ambientes deposicionais, nas energias de deposição presentes em cada um de seus paleoambientes que variaram grandemente com a deriva tectônica em direção ao norte.

Em algumas seqüências são percebidos ainda movimentos eustáticos sindeposicionais. As mudanças no nível do mar, em concomitância com a deriva para norte, causou grandes alterações nas estruturas sedimentares, que puderam ser melhores classificadas ao separarmos o estudo nestas cinco seqüências.

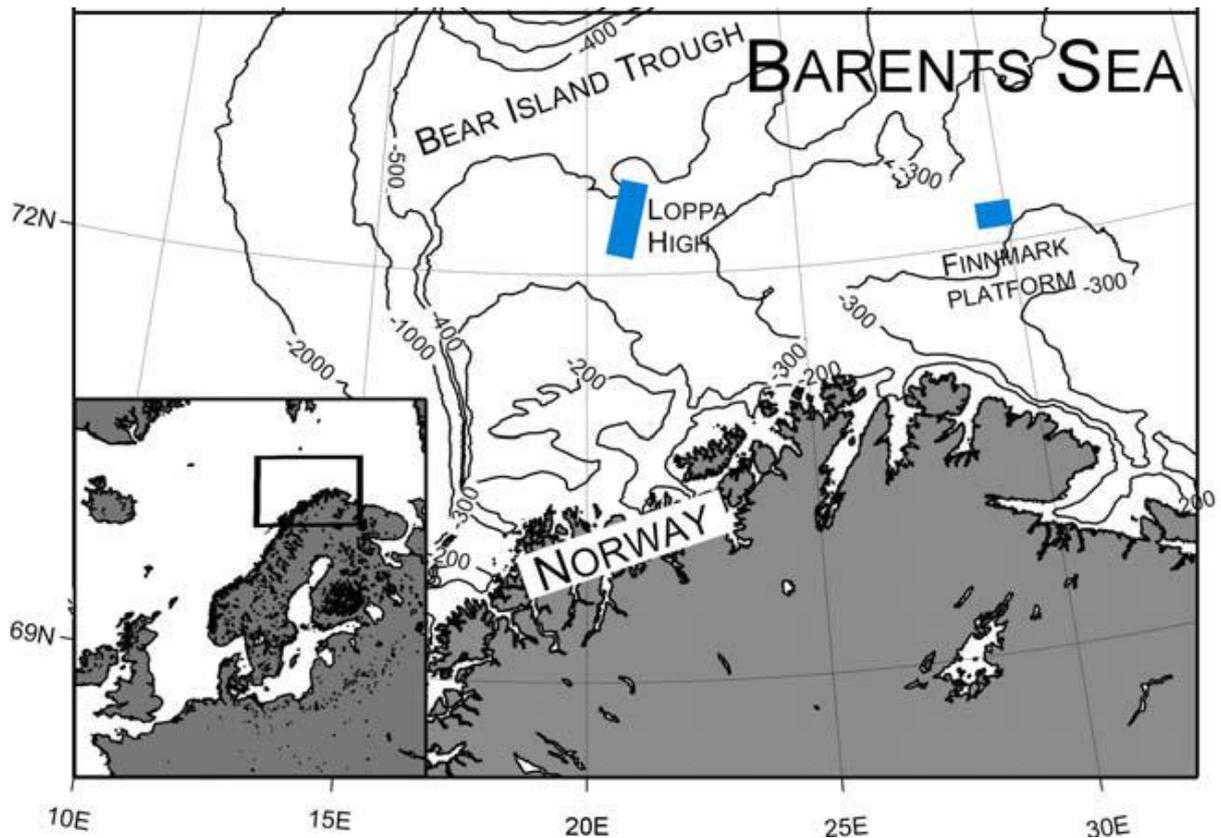


Figura 10: Localização dos dados coletados na Plataforma Finnmark, bloco em azul na parte superior direita. (Rafaelsen et al., 2003).

A seguir, analisa-se imagens sísmicas associadas às cinco sequencias de Stemmerik (2000), a partir de cortes transversais, conforme mostrados na Figura 11, que correspondem em todas as análises à mesma *inline*, com azimuth  $51,14^\circ$ , enquanto os cortes realizados no eixo Z, que correspondem ao tempo duplo sísmico (TWT), serão descritos sempre com sua cota em milissegundos indicada na legenda.

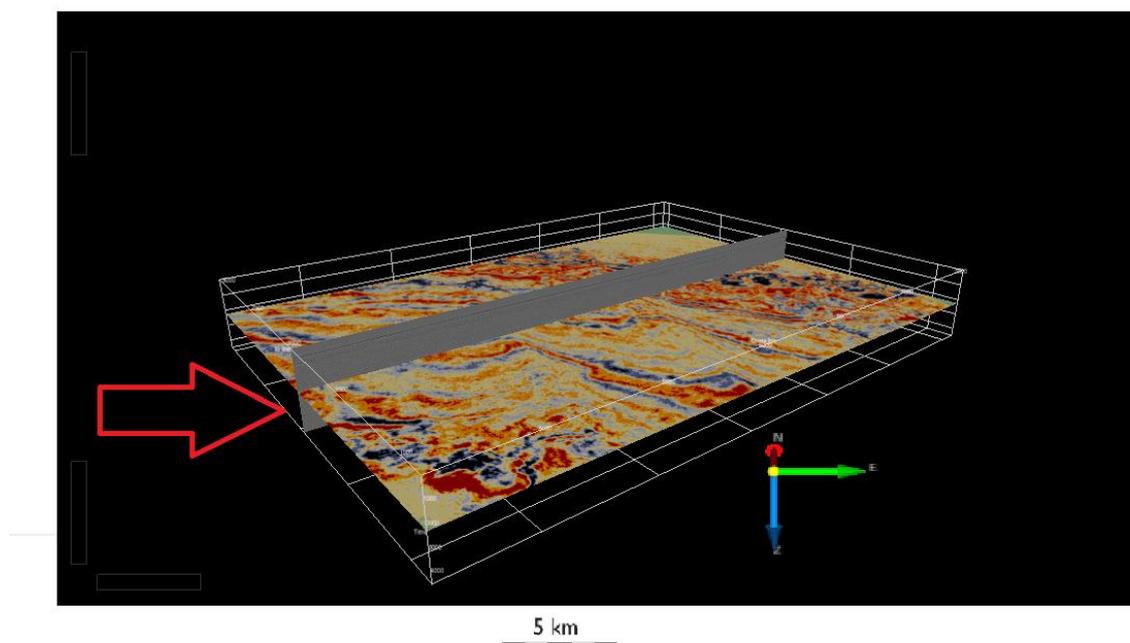


Figura 11: Corte transversal na direção SW-NE indica a localização da seção onde os atributos foram calculados e mostrados adiante.

## 5.1 Sequência sísmica SS1

A sequência SS1 pode ser correlacionada ao grupo Billefjorden no Carbonífero Inferior. Ela está diretamente acima do embasamento com uma amplitude altamente variável em seu contato. O refletor base da sequência termina em onlap sobre a reflexão do embasamento, ou localmente em *downlap* por refletores internos SS1. A espessura do SS1 aumenta de sul para norte e alcança 450 milissegundos TWT na parte norte da Plataforma como visto na Figura 12.

Não foi possível determinar se este aumento em TWT é devido a uma maior espessura do grupo Billefjorden ou devido à presença de rochas sedimentares mais antigas ao norte. A parte sudoeste da Plataforma Finnmark é caracterizada por um extenso desenvolvimento de uma bacia tipo hemi-gráben, e a sequência se adelgaça ou desaparece localmente nestes altos do embasamento. Não há presença de hemi-gráben na parte norte da Plataforma.

Internamente a SS1 é caracterizada por uma assinatura sísmica caótica (área destacada em vermelho na Figura 12), com refletores de baixa amplitude na parte inferior. Os refletores

internos se encontram falhados, com deslocamentos verticais de até 100ms TWT em alguns locais. A parte central da sequência é caracterizada por refletores de boa continuidade e de baixa a média amplitudes.

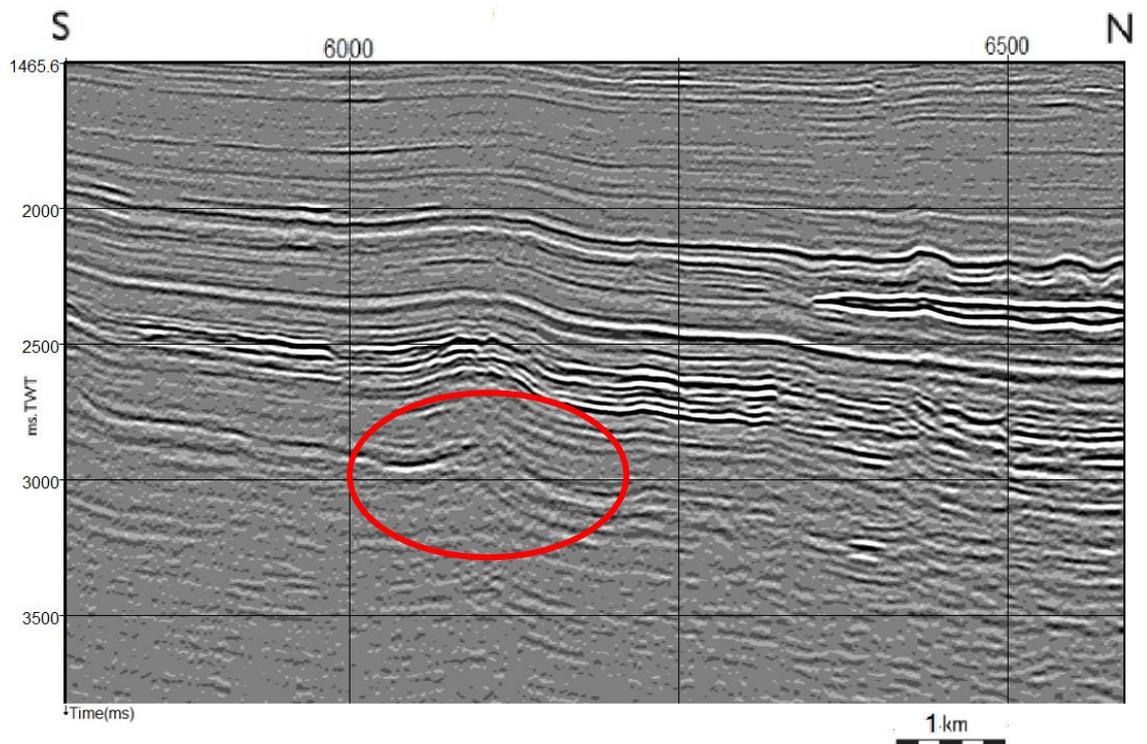


Figura 12: Refletores com assinatura caótica, indicados na área destacada em vermelho, o corte transversal foi referenciado na Figura 11.

Os refletores presentes nesta assinatura caótica podem ser melhor visualizados quando se aplica a transformada de Hilbert, que facilita a visualização dos hemi-grábens da área sul ao destacar bem suas feições, além de melhorar a visualização dos refletores de baixa amplitude na parte central da Figura 13 em comparação com a imagem mostrada na Figura 12.

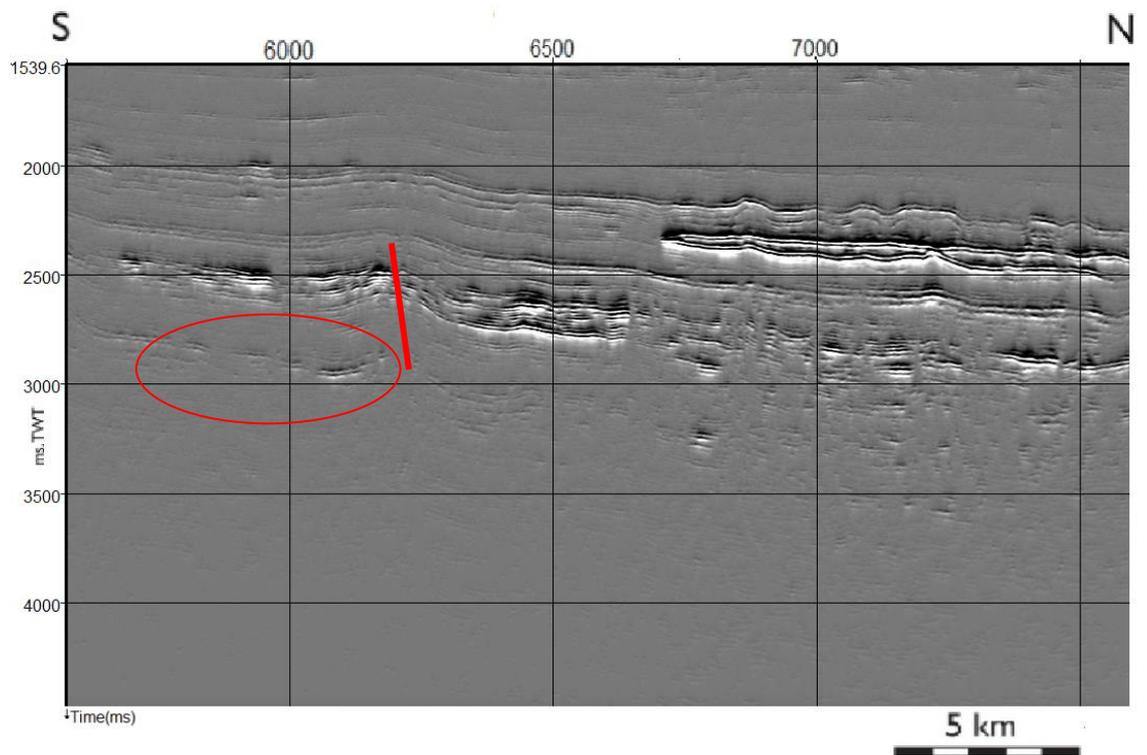


Figura 13: Atributo com uso da transformada de Hilbert na mesma seção mostrada na Figura 12, melhorando a visualização dos refletores de baixa amplitude indicados pelo círculo vermelho e da falha do hemi-gráben na área sul indicado pela reta vermelha.

A base da seqüência SS1 representa uma inconformidade principal entre as rochas do embasamento e os sedimentos pós caledonianos. Na Figura 14 pode-se observar que o atributo Textura apresenta uma alternância que sugere a presença dos sedimentos pós caledonianos. Os sedimentos acima da inconformidade são do Carbonífero inferior, datados por poços nos trabalhos de Bugge et al. (1995) e Larssen et al (2002).

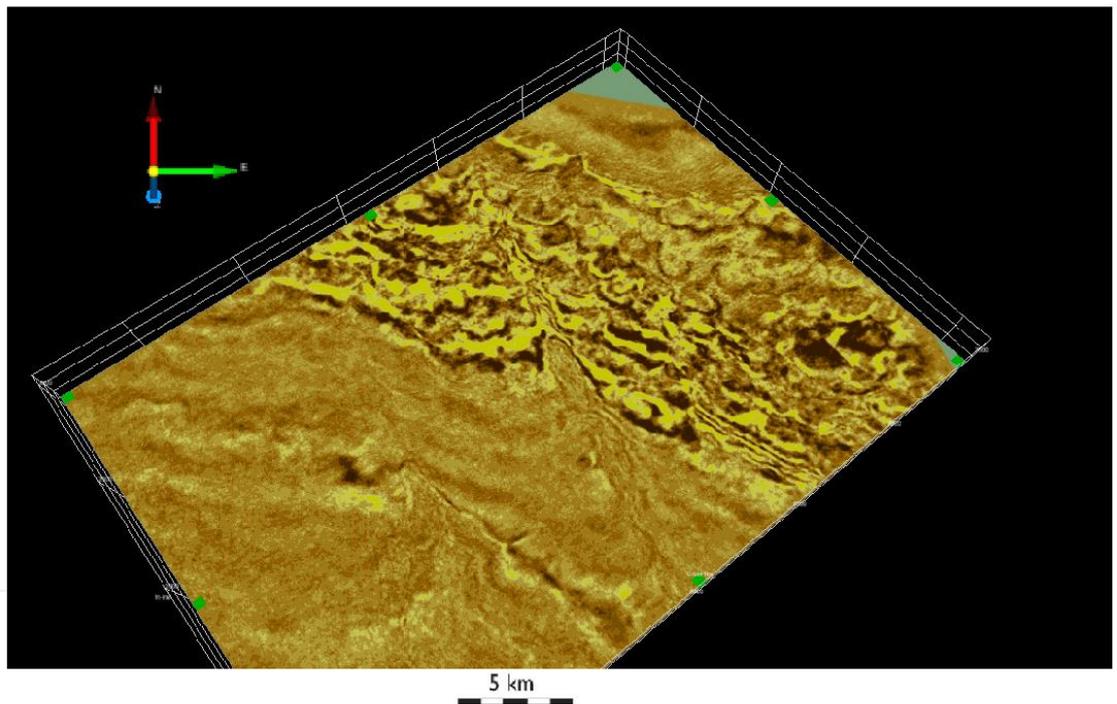


Figura 14: Atributo Textura aplicado no corte no eixo Z em 2748 ms TWT, enquanto a parte inferior esquerda apresenta uma feição mais homogênea, que sugere o embasamento. A parte superior direita mostra uma intercalação de feições, que sugere a presença de sedimentos.

Nota-se uma resposta bem interessante ao aplicar o atributo textura em zonas mais próximas ao embasamento, na Figura 15 percebe-se que, aplicando uma paleta de cores com variação entre 0 e 1, que busca fornecer uma sugestão de energia de retorno, as localidades mais a sul da plataforma Finmark apresentam cores mais sólidas, enquanto que as áreas mais a sul apresentam cores mais esmaecidas.

Esta diferença na coloração e na densidade dos pixels mais sólidos pode sugerir uma maior energia de retorno nas áreas mais a sul, o que por sua vez pode sugerir a influência das rochas do embasamento, conferindo maiores contrastes de impedância acústica entre si e as rochas sedimentares sobrepostas, o que aumentaria o coeficiente de reflexão e por conseguinte aumentaria a quantidade e energia refletida.

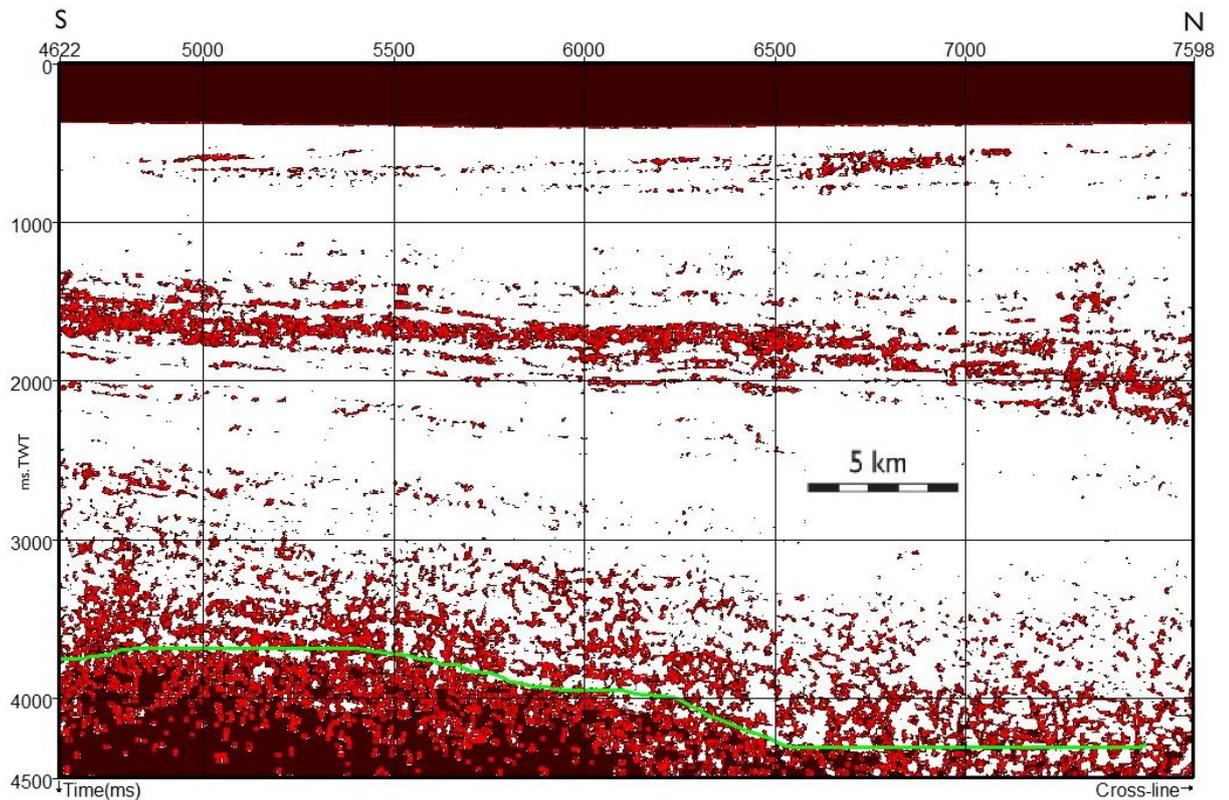


Figura 15: Atributo Textura aplicado no corte transversal da Figura 11, note que a parte sul apresenta uma energia bem maior de resposta, e que a parte norte apresenta uma menor densidade de energia, sugerindo um embasamento mais raso a sul.

Os dados de poços dos trabalhos de Bugge et al. (1995) e Larssen et al. (2002) nos fornecem melhores informações sobre situações em altos estruturais ou nas áreas a sul, não informando a idade dos sedimentos depositados nos arredores mais baixos e mais a norte são desconhecidos, porém podemos inferir que estão presentes sedimentos mais antigos já que o grupo Billefjorden estende-se ao Devoniano tardio, nos grupos Spitsbergen e Bjørnøva.

Os dados sísmicos mostram que vários altos do embasamento criados por falhamentos existiram durante os estágios iniciais de deposição na área sudoeste da Plataforma. Tais formações não foram encontradas nas áreas nordeste da bacia, indicando uma mudança no estilo estrutural em direção a leste.

O atributo de textura mostrado na Figura 15 sugere um contorno do embasamento, indicando inclusive sua maior profundidade na direção norte, como as rochas do embasamento apresentam um maior retorno de energia muito maior, podemos inferir melhor sua localização com auxílio da imagem mostrada na Figura 16.

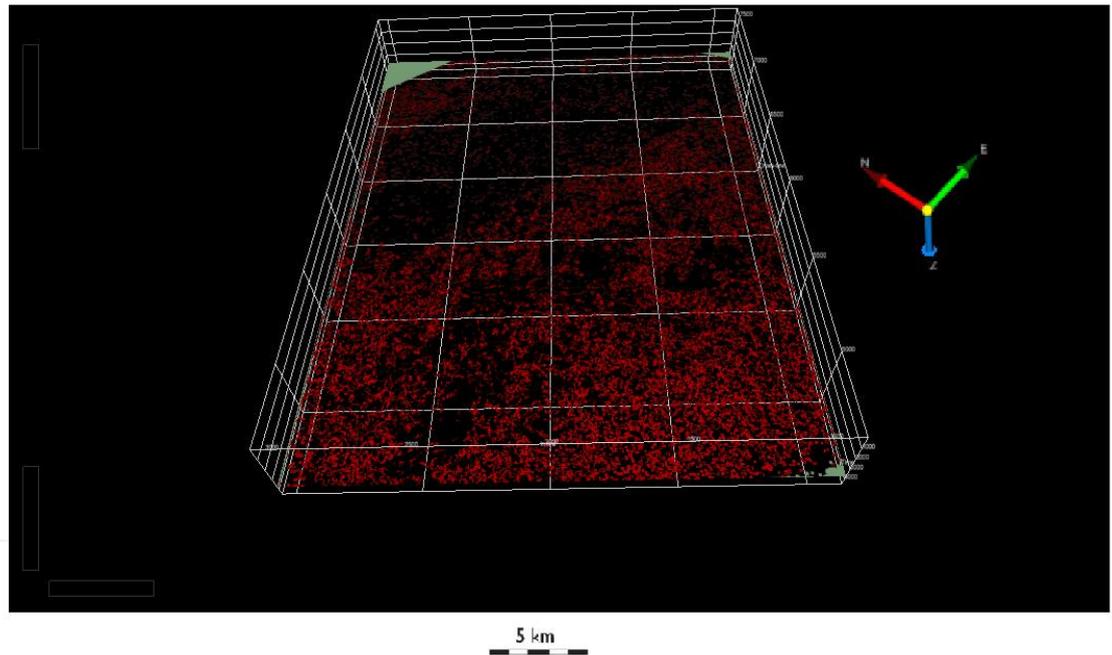


Figura 16: Corte no eixo Z do atributo textura em 3800 ms TWT, atente para a maior densidade de energia retornando na parte inferior direita da figura, região sudeste.

Os altos se comportaram como áreas fontes locais como indicadas pelos lobos progradantes que os circundam. Longe dos altos, os sedimentos passam gradualmente para pacotes de sedimentos mais homogêneos, caracterizados por fracos refletores internos, (Stemmerik, 2000). A parte mediana e superior da sequência mostra uma gradual mudança nas faces sísmicas em direção a um arranjo mais próximo de uma bacia.

Sucessões de *Coal-Bearing* (sedimentos com capacidade de gerar carvão mineral ou que já contém carvão mineral), sísmicamente caracterizadas como contínuas, refletores de média amplitude estão distribuídos na parte sudoeste da Plataforma, porém desaparecem em direção a nordeste. As grandes feições sigmoidais nesta parte da Plataforma sugerem progradação marinha e a presença de uma linha de costa em direção a norte.

## 5.2 Sequência sísmica SS2

A sequência SS2 pode ser correlacionada com a parte do grupo Gipsdalen. Corresponde as unidades sísmicas, Bashkiriano, carbonífero médio e Kasimoviano-Gzheliano de Bugge et al. (1995). A sequência apresenta uma espessura de pouco menos que 40ms TWT sobre os altos do embasamento localizados a sul, indo para cerca de 150 ms de TWT no limite norte da Plataforma Finmark, como indicado na Figura 17. A sequência mostra pronunciadas variações de espessuras ao longo das falhas vistas nos refletores, sugerindo uma atividade tectônica sin-deposicional.

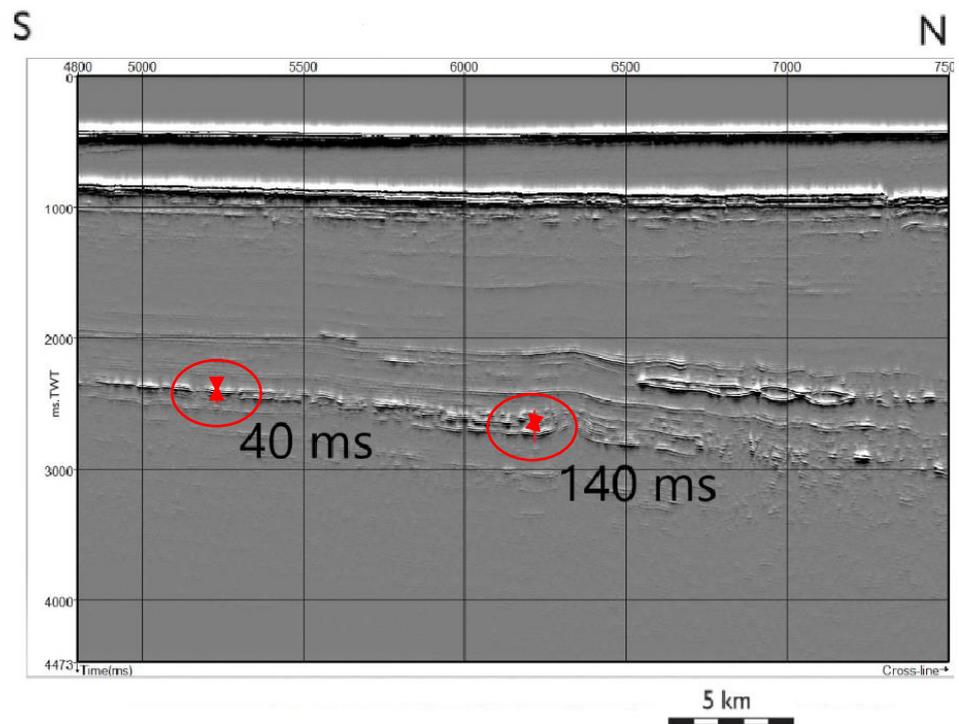


Figura 17: Transformada de Hilbert aplicada no corte transversal indicado na Figura 11, note o aumento na espessura TWT da camada entre norte e sul indicada pelas duas pares de setas vermelhas acima.

O contorno da base é determinado utilizando o dado sísmico, através de seu refletor de alta amplitude e com grande continuidade na parte sul da Plataforma, porém este refletor perde força e amplitude em direção ao norte. Localmente, as reflexões internas se mostram em *onlap* enquanto os contornos inferiores estão em *downlap*.

Internamente, o SS2 é caracterizado por refletores subparalelos de média a alta amplitude, com uma continuidade de qualidade média na porção sul da Plataforma. Surgem

pequenos *mounds* sísmicos na parte norte da Plataforma. Na parte oriental da Finmark, os *mounds* sísmicos são geralmente localizados sobre altos estruturais e os baixos estruturais que os circundam são caracterizados por refletores subparalelos de alta amplitude.

A base do SS2 representa uma desconformidade entre o carbonífero inferior, principalmente sedimentos não marinhos e o carbonífero superior, em sua maioria sedimentos marinhos rasos. Os sedimentos que recobrem a desconformidade têm idade Bashkiriana, (Bugge et al. 1995; Ehrenberg et al. 1998).

O refletor basal representa uma mudança dos depósitos de baixa densidade e baixa velocidade dos siliciclásticos de granulometria fina para maiores densidades dos arenitos com maiores velocidades. A parte inferior da sequência marinha é dominada siliciclásticos marinhos rasos misturados com almofadas de carbonatos de baixo teor de anidrita em baixos estruturais.

A sequência gradualmente se torna dominada por carbonatos ao seguir para cotas mais altas e a combinação de dados sísmicos e de poços indicam que a Plataforma Finmark fez parte de uma plataforma continental carbonática de águas rasas dominadas por deposições cíclicas de ambientes de maré rasos e profundos (e.g. Stemmerik et al. 1995; Ehrenberg et al. 1998).

A Plataforma foi repetidamente exposta durante as quedas glacio-eustáticas do nível do mar, que apresentaram uma alta frequência em suas variações no nível do mar onde evaporitos foram depositados em pequenas bacias intra-plataforma durante os estágios iniciais das elevações do nível do mar. Durante estes estágios, os *build-ups* carbonáticos eram raros; eles parecem ter se restringido à parte norte, área mais profunda e com maior taxa de subsidência na plataforma, onde pequenos *build-ups* carbonáticos são vistos sobre altos estruturais.

### 5.3 Sequência sísmica SS3

A sequência SS3 se correlaciona com as unidades sísmicas Gzhelian e Asselian, Bugge et al. (1995). A sequência aumenta gradualmente em espessura de 30 ms TWT na área sul da Plataforma para mais de 180 ms TWT na área norte da Plataforma Finmark. Não existem variações significativas de espessura em tornos das falhas, sugerindo uma deposição durante um período tectônico quiescente.

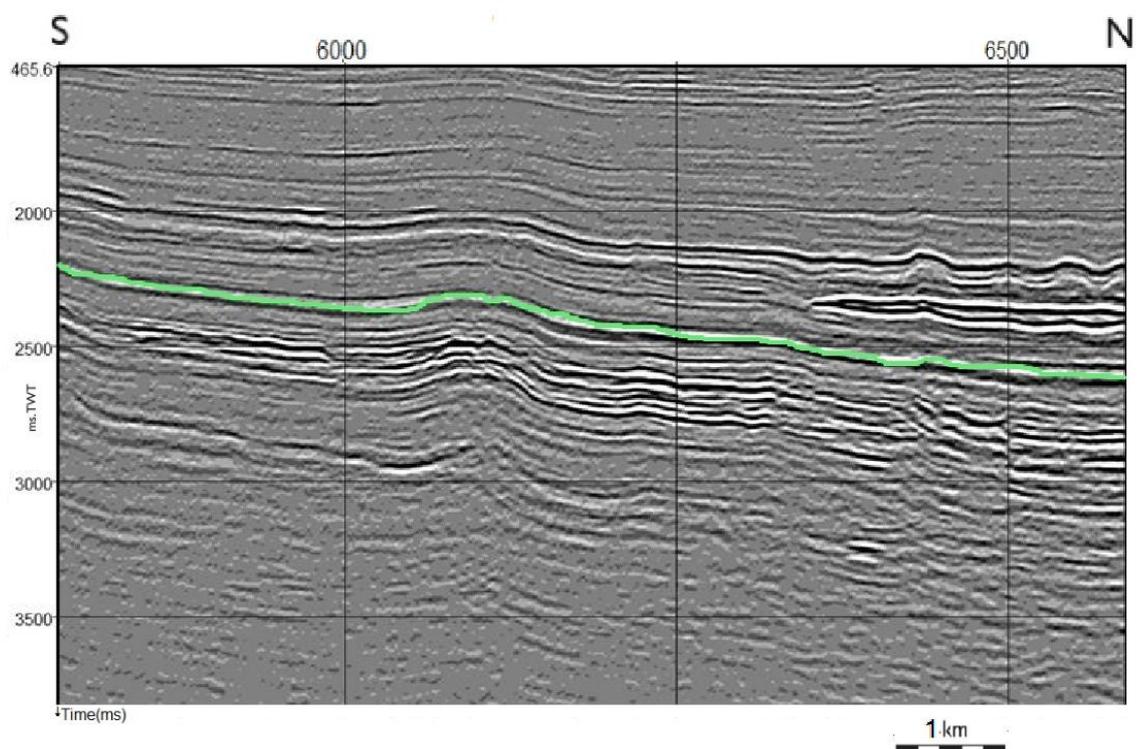


Figura 18: Corte transversal indicado na Figura 11, o refletor de alta diferença de impedância sugere limite inferior de SS3 no Kasimoviano indicado em verde.

A fronteira inferior da SS3 indicada em verde na figura 18 é interpretada sísmicamente no início de uma calha. É difícil rastrear tal sequência a partir das áreas ao sul e ao norte da Plataforma de Finmark devido a uma combinação de perda de qualidade sísmica e de amplitude. A camada superior pode ser correlacionada a um alagamento regional de grande importância com aproximadamente 30ms TWT abaixo do topo do grupo Gipsdalen. Está é a base de L-6 no trabalho de Ehrenberg et al. (1998).

Refletores internos que aparecem em *downlap* localmente parecem atuar como fronteiras basais. Internamente, SS3 é caracterizada por reflexões de baixa a média amplitude na parte sul da Plataforma Finmark. Pequenos *mounds* sísmicos, de 20 a 40 ms de espessura TWT; são circundados por reflexões paralelas e mais contínuas. No extremo norte da Plataforma, a parte superior da sequência consiste em uma unidade lateralmente restrita, caracterizada por reflexões sub-paralelas a levemente divergentes, reflexões de alta amplitude e alta continuidade cortadas por pequenas falhas.

Esta unidade tem características de limites superior e inferior nos *mounds*, resultando em uma espessura desigual. As reflexões de alta amplitude em *onlap* em direção a uma margem de plataforma continental, desaparecem ao sul, Figuras 19, 20 e 21.

Os *mounds* sísmicos podem ser vistos na figura 19 em uma região que assemelha-se muito a uma paleo-linha de costa, reforçada também pela sua direção noroeste-sudeste, o atributo de textura nos fornece uma boa sugestão de possíveis altos estruturais, os mesmos altos em que se formaram os *build-ups* carbonáticos, de alto interesse, devido a sua possível ação como reservatórios de hidrocarbonetos.

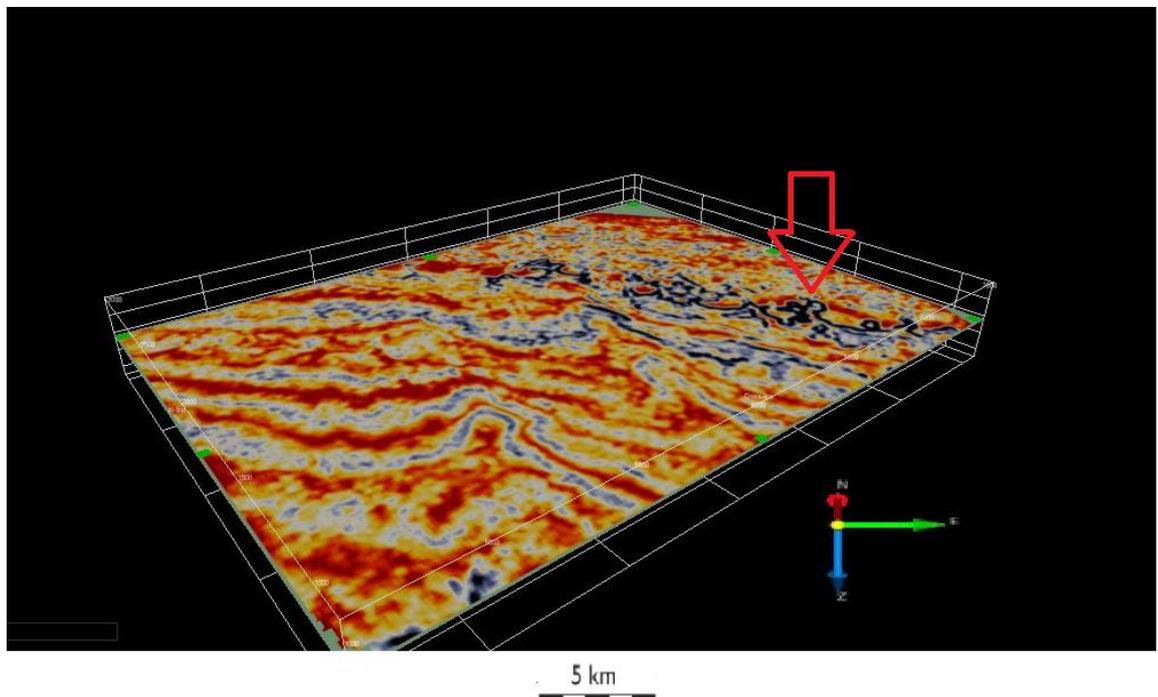


Figura 19: Corte no eixo Z aplicado no atributo de textura em 2200 ms TWT. Note a posição dos *mounds* sísmicos.

Os *mounds* sísmicos vistos na figura 19 em um *timeslice* de 2200 ms parecem se deslocar para norte quando comparados com seus semelhantes em um *timeslice* mais profundo de 2256 ms na figura 20, este possível deslocamento parece sugerir uma transgressão marinha ocorrida nesta zona.

Este dado têm importância impar neste estudo, pois as zonas mais prováveis para o aparecimento de reservatórios de petróleo, que seriam os *build-ups* carbonáticos sobre estes *mounds* sísmicos demonstram um decaimento para nordeste, informação esta que é de vital importância na hora de se alocar os poços para a exploração dos reservatórios

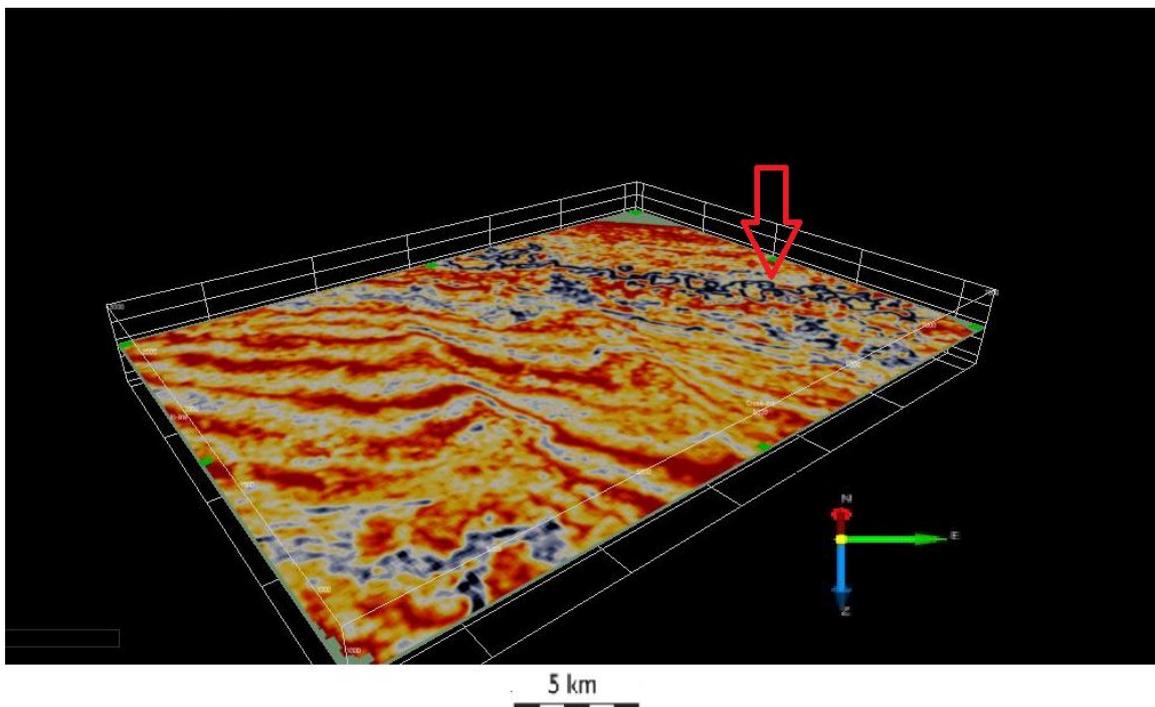


Figura 20: Corte no eixo Z aplicado no atributo de textura em 2256 ms TWT, note que as posições dos *mounds* sísmicos se deslocam em direção ao norte da Plataforma quando observamos uma secção mais profunda, o que sugere transgressão marinha.

Os refletores internos mostram que os *build-ups* carbonáticos tornaram-se mais abundantes e se desenvolveram sobre uma área geográfica mais ampla durante a época do SS3. Os *build-ups* são pequenos, normalmente sutis em escala na parte sul da Plataforma, (Bugge et al. 1995; Stemmerik et al. 1995; Ehrenberg et al. 1998).

A figura 21, feita a partir de um zoom da área superior direita da figura 20 nos permite observar melhor as feições dos *mounds* sísmicos que possivelmente contêm os *build-ups* carbonáticos com potencial para reservatórios.

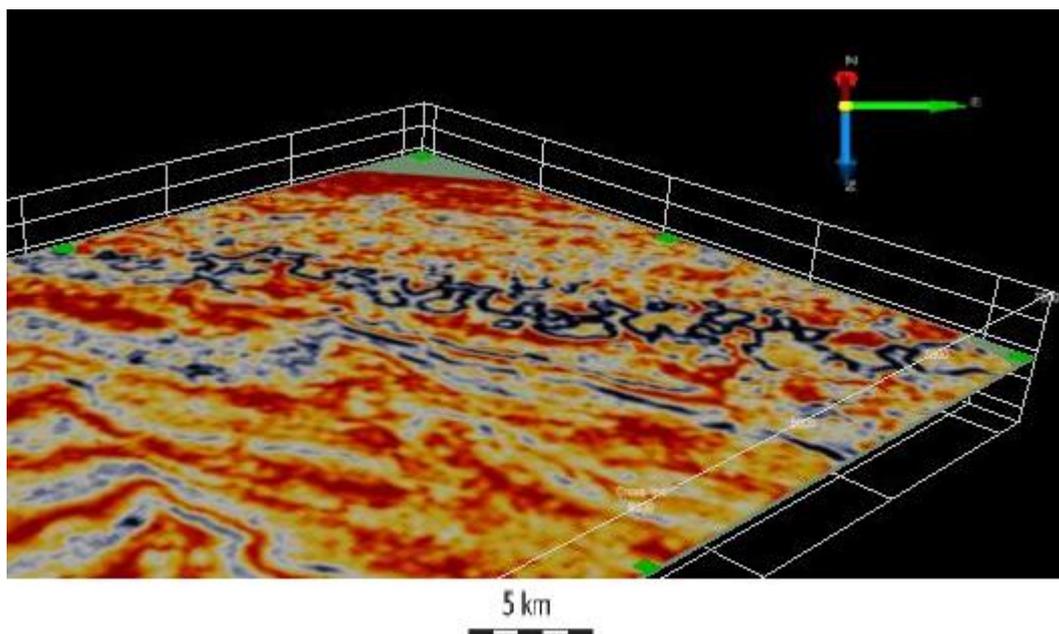


Figura 21: O atributo textura aplicado em corte do eixo Z em 2256 ms TWT, note consegue representar muito bem os *mounds* sísmicos, estas estruturas sugerem a presença de *build-ups* carbonáticos.

Em direção ao norte, os *build-ups* se tornam maiores que 40 ms TWT, o que sugere maiores taxas de deposição. Os *build-ups* são dominados por *Algae* e *Palaeoaplysina*, e acredita-se como bons parâmetros indicar a mudança de águas tropicais para subtropicais segundo Stemmerik (2000). Eles são cercados por carbonatos de regiões sub-maré tanto profundas quanto rasas, geralmente são ricos em foraminíferos.

Nos perfis e amostras de poço a unidade SS3 descritos por (Bugge et al. 1995) mostra o mesmo padrão cíclico tal qual o visto nos sedimentos SS2, sequência imediatamente inferior, bem como grandes partes da Plataforma provavelmente tiveram exposição subaérea durante as quedas do nível do mar provocadas pela eustática e pela glaciação.

Aparentemente, a parte norte da Plataforma ficou submersa por maiores períodos, e durante os níveis de mar baixo espessas sucessões de sedimentos evaporíticos foram

depositados. Os refletores são observados como lateralmente restritos e de alta amplitude em *onlap* na margem da Plataforma. Avançando para sul, os evaporitos são mais limitados e mais confinados a pequenos baixios intra-plataforma.

#### 5.4 Sequência sísmica SS4

A sequência sísmica 4, inclui a parte superior do grupo Gipsdalen (L6 de Ehrenberg et al. 1998) e o grupo Bjarmeland de Larssen et al. (2002). Correspondendo à unidade sísmica Artinskiano-Sakmariano de Bugge et al (1995) A sequência reflete uma fase separada do desenvolvimento da Plataforma. A sequência, localmente tem espessuras maiores que 150 ms na parte norte da Plataforma.

O limite inferior é interpretado como estando no início de uma calha. É representado por uma reflexão de média amplitude e média continuidade. Reflete uma mudança de um dolomito mais poroso para uma calcita relativamente menos porosa. Na parte norte da Plataforma, reflexões internas na SS4 entram em *downlap* nas fronteiras localmente, enquanto o *onlap* é mais comum em direção ao sul.

A sequência sísmica 4 é caracterizada por uma assinatura semitransparente. Refletores internos, quando presentes, são subparalelos e de amplitude baixa a média, com continuidade média. Na parte norte da Plataforma, mounds sísmicos de até 150ms são comuns. Eles são caracterizados por reflexões internas, sigmoidais de larga escala. As fácies de colinas “*mounds*” formam estruturas poligonais, canais formados por uma “serra” ou mais raramente grandes e contínuas ravinas ao longo da margem norte ( Nilsen et al. 1993; Bruce & Toomey 1993). É comum que estas formações reflitam o formato da topografia abaixo.

As colinas foram inicialmente amostradas na Plataforma Finmark e posteriormente em outros locais do mar de Barents (Blendinger et al. 1997; Stemmerik et al. 1999). Elas são, em sua maioria, formadas por núcleos cimentados e granulados (*cementstones* e *grainstones*) de Bryozoan-Tubiphytes (Blendinger et al. 1997).

As Figuras 22 e 23 nos remetem a conhecida afirmação: “o presente é a chave para o passado”, nos fornecendo uma bela visualização de estruturas de coral semelhantes a belas formações atuais na Austrália, essas estruturas, sofrendo processos semelhantes podem nos indicar como seriam os possíveis reservatórios nesta área.

A figura 22, feita a partir da aplicação do atributo similaridade nos fornece um ótimo delineamento estrutural dos *mounds* sísmicos, é importante ressaltar suas semelhanças com feições de corais modernas. Visto que os trabalhos de Bugge et al. (1995) e Larssen et al (2002) relatam a descoberta de carbonatos nestes *mounds* sísmicos, a hipótese de que as feições sejam os *build-ups* carbonáticos se torna bem forte e sugere que estas feições poderiam ter sido formações de corais como as vistas na figura 23.

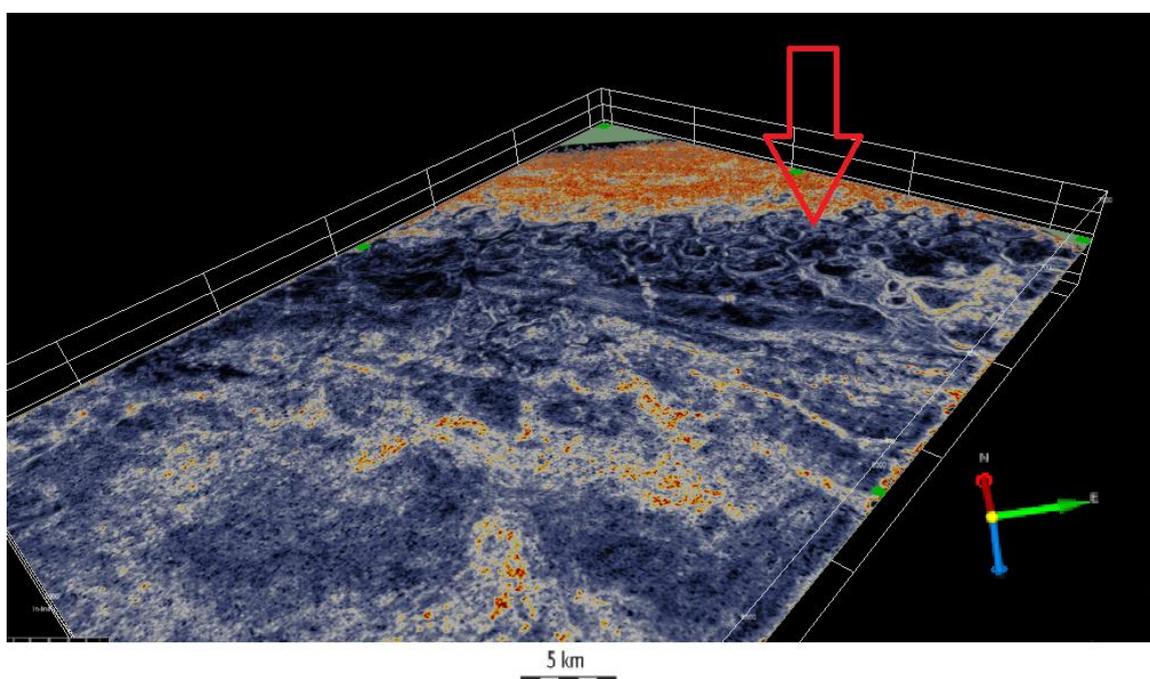


Figura 22: Corte no eixo Z em 2256 ms TWT no atributo similaridade, note como os *mounds* sísmicos são melhor delineados.

A figura 23 que mostra formações modernas de corais em Queensland na Austrália apresenta formações de corais que se assemelham muito as feições vistas na figura 22, segundo Bugge et al. (1995) e Larssen et al (2002) foram encontradas formações de carbonatos nos alto estruturais, o que ajuda a defender a possibilidade de que feições coralinas são as responsáveis pelos *mounds*.



Figura 23: Grande barreira de corais em Queensland, Austrália. Fonte *Google Maps*. (23/01/2018)

A sucessão semitransparente dominante na área sul e central da Plataforma consiste em *packstones* e *grainstones* de *bryozoan-crinoid* (Bugge et al. 1995; Ehrenberg et al. 1998). As fácies deposicionais indicam uma mudança pronunciada na sedimentação durante os períodos geológicos em SS4.

A parte inferior da sequência, que corresponde ao topo do grupo Gipsdalen, reflete uma deposição em águas quentes, com Plataforma relativamente profunda. A parte restante da sequência, correspondendo ao grupo Bjarmeland, foi depositada em uma Plataforma de águas frias e temperadas (Stemmerik 1997).

## 5.5 Sequência sísmica SS5

A sequência SS5 pode ser correlacionada com o grupo Tempelfjorden no Permiano superior. A sequência sísmica tem uma espessura de cerca de 20 ms TWT na área norte da Plataforma e localmente mais do que 110 ms TWT em áreas a sul onde as colinas sísmicas são bem desenvolvidas, conforme mostrado na Figura 20.

A fronteira inferior é interpretada como o início do pico de dados sísmicos. Tem alta amplitude e uma continuidade de alta a média que pode ser visualizada na Figura 24. O topo da sequência é uma reflexão com um pico de alta amplitude.

Esta reflexão mostra variações significativas na amplitude e continuidade na região. Perda de amplitude e continuidade reduzida é comumente observado em direção aos baixios intra-placa, e nestas áreas a característica de alta amplitude de reflexão da camada superior parece estar estratigraficamente mais baixo que em qualquer outro lugar na Plataforma. Os estratos superiores estão em *onlap* e *downlap* ante o refletor superior em SS5.

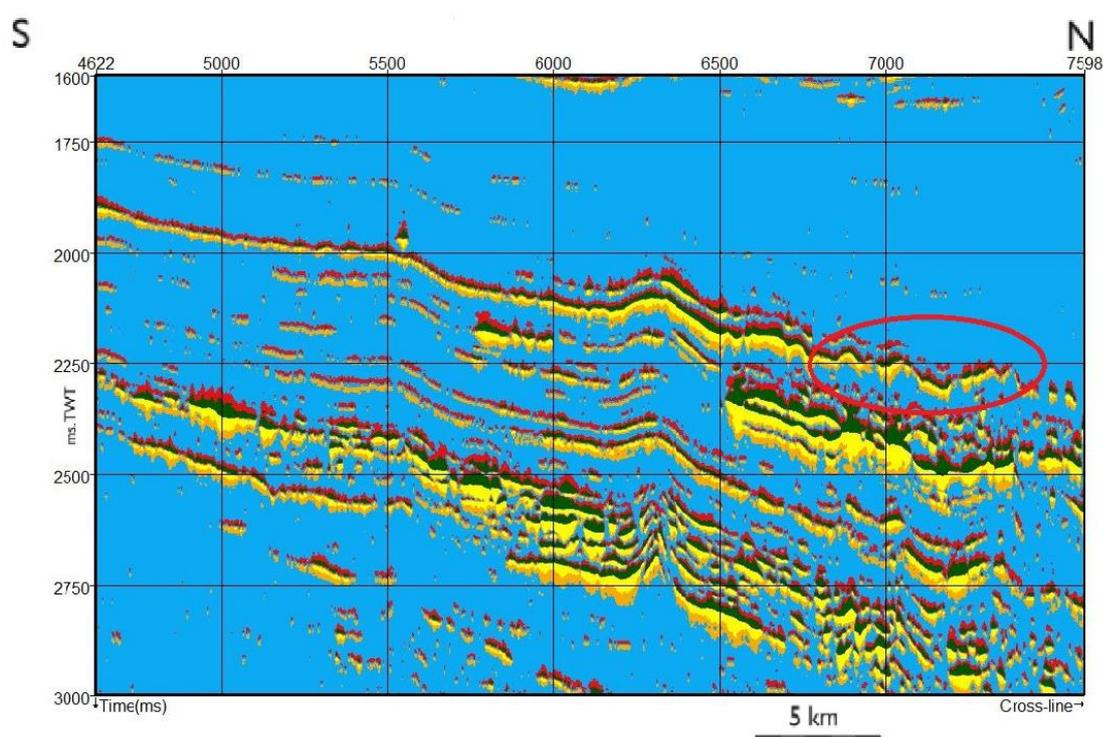


Figura 24: Corte transversal indicado na Figura 11, note os mounds sísmicos bem desenvolvidas destacados no círculo em vermelho.

Internamente, SS5 é caracterizada por refletores contínuos e subparalelos, com amplitudes de média a alta nas áreas sem colinas. As colinas são caracterizadas por reflexões caóticas. A geometria das colinas pode ser melhor mapeada nos dados sísmicos 3D, figura 25. Amostras de poços nas colinas mostram que elas consistem de calcário espiculítico rico em echnodermos e de Bryozoários, (Blendinger et al. 1997; Stemmerik et al. 1999). Fora das áreas de colinas, a sucessão consiste principalmente de *chert* espiculítico.

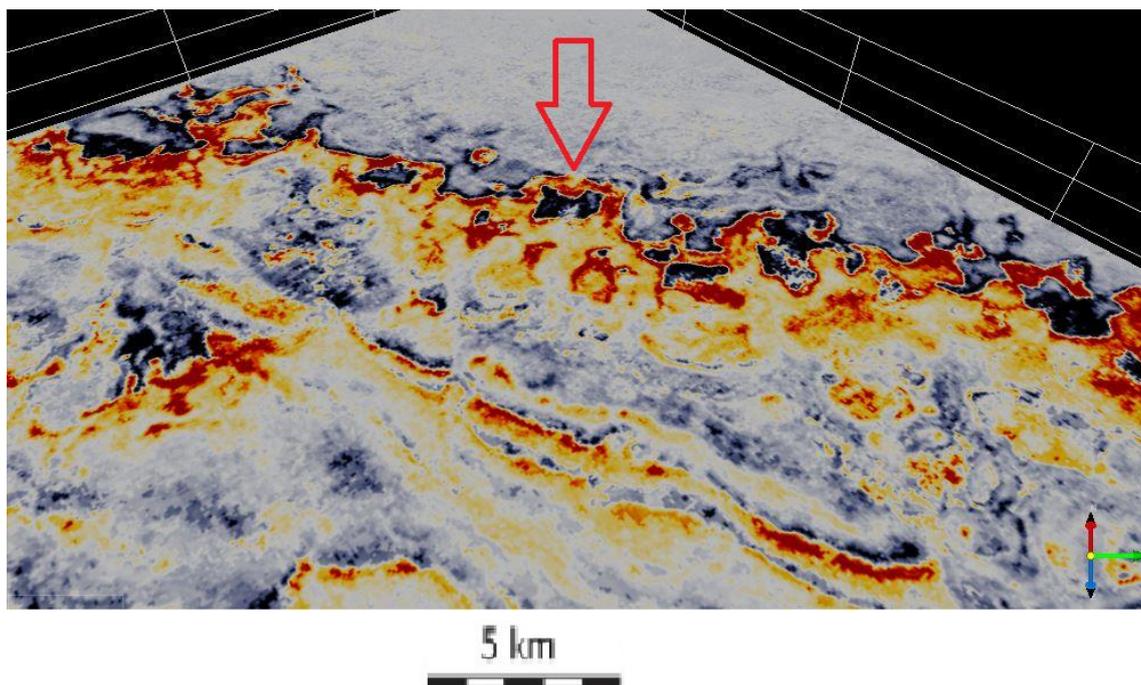


Figura 25: Corte no eixo Z em 2180 milissegundos no atributo transformada de Hilbert. Observar como as cores mais quentes preenchem o que parecem ser as áreas mais baixas por entre os *mounds* sísmicos.

O topo da sequência SS5 coincide com uma mudança do *chert* e dos carbonatos com *chert* para cascalhos siliciclásticos (Larssen et al. 2002). Numa escala regional esta transição é diacrônica, começando nos baixios da parte inferior e média da sequência, atingindo gradualmente cotas mais altas da Plataforma.

A geometria dos estratos dos sedimentos que as recobrem (*downlap* e *onlap*) sugerem que eles foram depositados durante um período de subida do nível do mar e o espaço de acomodação era criado a taxas maiores, expostas nas Figuras 25 e 26. A rápida subsidência deu fim à produção de carbonato, criando uma fronteira que se assemelha a uma inconformidade (cf. Kendall & Schlager 1981).

A figura 26 apresenta feições muito semelhantes a sedimentos siliciclásticos se depositando sobre um ambiente de plataforma continental, observando as cores mais quentes podemos ver feições que se depositam em torno dos altos estruturais e que se assemelham estruturas deposicionais que se assemelham a canais que desembocam em depocentros maiores ao longo de um eixo oeste-leste na Plataforma de Finmark.

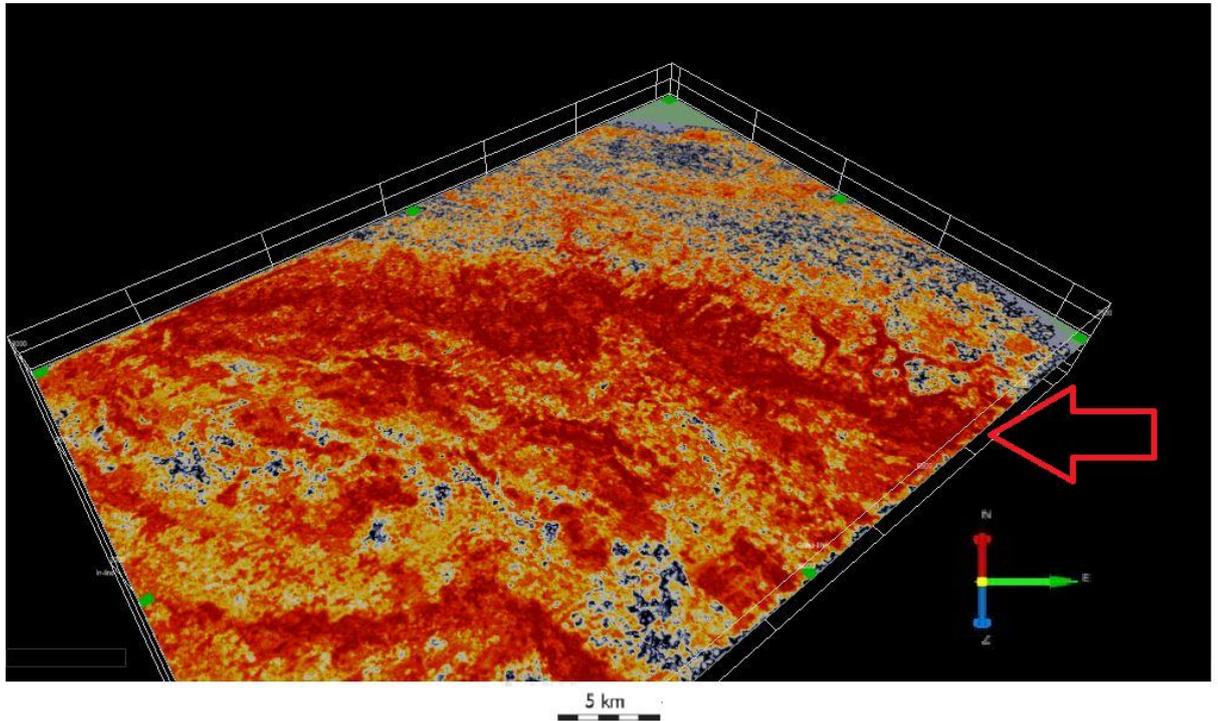


Figura 26: Corte no eixo Z em 2100 ms TWT no atributo textura, observe como a região em cores mais quentes indicadas no mapa se distribuem ao longo do que parece ser a quebra da Plataforma.

A figura 27 também apresenta feições muito semelhantes a sedimentos siliciclásticos com ênfase em uma estrutura semelhante a leque submarino na parte leste da Plataforma de Finmark que se interpõe entre os altos estruturais, de forma semelhante à figura 26 acima, podemos ver também as áreas com cores mais quentes formando depocentros ao longo de um eixo oeste-leste alimentados por canais seguindo as mesmas orientações da figura 26.

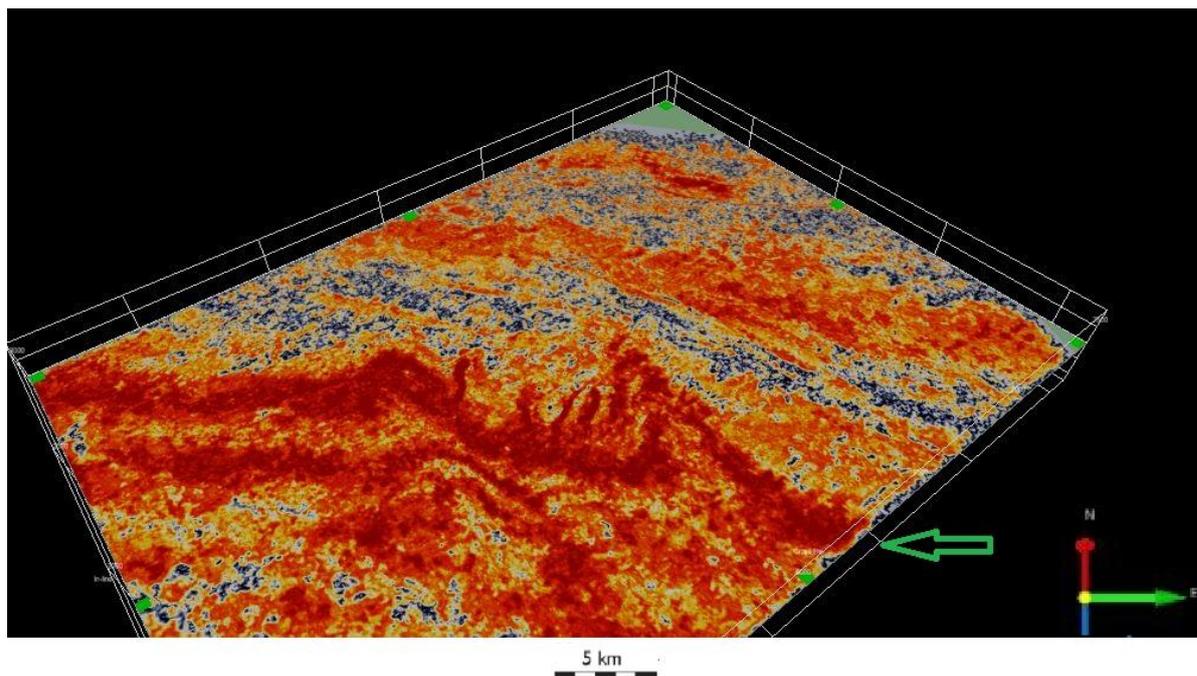


Figura 27: Corte no eixo Z em 2000 ms TWT no atributo textura, observe o recuo em direção ao sul da região em cores mais quentes indicadas no mapa em relação a Figura 26. As formas das cores quentes sugerem canais de sedimentação e um leque submarino.

## **6 Resultados**

A aplicação de atributos sísmicos permitiu a visualização de toda uma sorte de feições sísmicas que não puderam ser observadas ao se aplicar apenas alguma análise clássica de amplitudes sísmicas, gerando a possibilidade de ressaltar feições e detalhes ao se escolher entre um ou outro atributo, mostrando-se tecnologias eficientes.

A transformada de Hilbert foi eficaz na análise de seção sísmica para identificar refletores em áreas onde a sísmica apresentava refletores de padrão caótico, tornando mais fácil a identificação de possíveis falhas e estruturas geológicas descritas na literatura, tais como o hemi-grábem presente na região (Stemmerik 2000).

Embora a transformada de Hilbert não mostre uma definição de possíveis estruturas com tanta qualidade ao se observar os cortes de superfícies sísmicas 3D no eixo Z, ela pode indicar áreas com preenchimento ao redor dos *mounds* sísmicos, demarcando regiões com supostos baixios ao redor destes *mounds*. Importante ressaltar o padrão adquirido por este preenchimento, que sugere sedimentos siliciclásticos.

O atributo de textura mostrou de grande valia quando aplicado em áreas reconhecidas na literatura como embasamento. Ao se aplicar tal atributo combinado com uma paleta de cores gradual em seções sísmicas, pode-se perceber que a os padrões de reflexão mostram uma densidade bem maior em áreas onde o embasamento estaria presente.

O atributo textura mostrou de forma bem eficaz as estruturas de *mounds* sísmicos que segundo os trabalhos de Bugge et al. (1995) e Larssen et al (2002) foram reconhecidos como estruturas carbonáticas, de importância ímpar devido seu potencial para reservatórios de hidrocarbonetos. Foi possível inferir um caminhamento destes *mounds* através da comparação de diferentes *timeslices*, o que também mostra uma grande aplicação do método na alocação de poços produtores, ao indicar as direções de continuidade de estruturas num eixo vertical. Tal atributo mostrou também feições que em diversos momentos seguiam um modelo de subsidência diferencial que já havia sido citado nos trabalhos de Stemmerik (2000), estas feições se revelaram através do caminhamento dos *mounds* sísmicos e de uma possível deposição de siliciclásticos sugerida pelo mesmo atributo nas figuras 26 e 27.

Os possíveis sedimentos siliciclásticos observados na sequência sísmica SS5 podem ser vistos ao redor de altos estruturais e formando depocentros ao redor do que seria a quebra da plataforma continental num eixo oeste-leste, estas feições sísmicas, incluindo uma possível estrutura semelhante a leque submarino, fazem lembrar fortemente as estruturas de deposição de silicilásticos, o que ressalta as várias funcionalidades do atributo textura.

O atributo similaridade foi aquele que melhor conseguiu delinear os *mounds* sísmicos dentre todos os atributos utilizados neste trabalho. As feições tão bem delineadas no atributo fazem lembrar em muito as estruturas de corais modernos, demonstrando as grandes capacidades deste atributo, visto que rochas carbonáticas coralinas foram encontradas na região por poços citados no trabalho de Bugge et al. (1995) e Larssen et al (2002).

## **7 Conclusões**

A aplicação de atributos sísmicos adicionou maior confiabilidade e uma melhor visualização dos eventos ocorridos na Plataforma Finmark. Estas ferramentas facilitam grandemente o trabalho do intérprete, ao fornecer visualizações que tanto ressaltam pontos deixados em aberto pela sísmica, com a adição de diversas propriedades calculadas a partir dos próprios dados, quanto permitiram que se corroborassem afirmações anteriores dos autores.

As feições encontradas no atributo da transformada de Hilbert se assemelham bastante às estruturas descritas nos trabalhos de Bugge et al. 1995 e Stemmerik et. al. (1999) principalmente o em relação da região do hemi-gráben. As cores mais quentes vistas em regiões de possíveis depocentros nas superfícies sísmicas 3D ressaltam a distribuição de sedimentos no entorno de altos estruturais.

Os *mounds* sísmicos vistos nos atributos de Similaridade e Textura lembram as estruturas de corais presentes ambientes sedimentares modernos, com os corais se formando sobre as regiões de altos estruturais, onde recebem mais luz e podem se desenvolver melhor, tais *mounds* poderiam indicar os carbonatos descritos em Stemmerik. et. al. (1999).

Navegando pelas superfícies sísmicas 3D na região dos *mounds* sísmicos no atributo de textura pode-se inferir como os *mounds* migram para noroeste acompanhando a subsidência da Plataforma, sugerindo que os bancos de corais acompanharam a subsidência da Plataforma, possivelmente se estabelecendo na região com maior incidência de luz, conforme a Plataforma subsidia.

O atributo de textura aplicado na região da sequência SS5 apresenta feições muito similares aquelas formadas por sedimentos siliciclásticos, com estruturas semelhantes a canais em torno de altos estruturais desembocando em depocentros que seguem um a direção oeste-leste, apresentando até mesmo uma feição de leque submarino.

A depender da paleta de cores utilizada no atributo de textura é possível observar uma alternância em determinadas regiões que sugerem padrões de sedimentação com alternância de sedimentos siliciclásticos, o atributo textura revelou-se um excelente atributo para estruturas de siliciclásticos e também para a identificação de altos estruturais.

## **REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

Blendinger, W., Bowlin, B., Zijp, F.R., Darke, G., Ekroll, M. 1997. Carbonate buildup flank deposits: an example from the Permian (Barents Sea, northern Norway) challenges classical facies models. *Sedimentary Geology* 112, 89-103.

Beauchamp, B. 1994. Permian climatic cooling in the Canadian Arctic. In: Klein, G.D. (ed) *Pangea; paleoclimate, tectonics, and sedimentation during accretion, zenith and breakup of a supercontinent*. Special Paper Geological Society of America 288, 229-246. Bugge, T., Mangerud, G., Elvebakk, G., Mørk, A., Nilsson, I., Fanavoll, S. & Vigran, J.O. (1995). The Upper Palaeozoic succession on the Finnmark Platform, Barents Sea. *Norwegian Journal of Geology* 75, 3-30.

Chopra, S. e Marfurt, K. J., 2007, reimpressão de 2008. *Seismic Attributes for Prospect Identification and Reservoir Characterization*. SEG Geophysical Developments Series.

Ehrenberg, S.N., Nielsen, E.B., Svånå, T.A. & Stemmerik, L. 1998. Depositional evolution of the Finnmark carbonate platform, Barents Sea: results from wells 7128/6-1 and 7128/4-1. *Norwegian Journal of Geology* 78, 185-224.

FOX, Robert W.; MCDONALD, Alan T. – “Introdução á Mecânica dos Fluidos”. 4º edição, Ed. Guanabara Koogan.

Golonka, J. & Ford, D. 2000. Pangean (Late Carboniferous–Middle Jurassic) paleoenvironment and lithofacies. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* 161, 1-34.

Larssen, G.B., Elvebakk, G., Henriksen, L.B., Kristensen, S.-E., Nilsson, I., Samuelsberg, T.J., Svånå, T.A., Stemmerik, L. & Worsley, D. 2002. Upper Palaeozoic lithostratigraphy of the Southern Norwegian Barents Sea. Norwegian Petroleum Directorate Bulletin 9.

[www.npd.no](http://www.npd.no).

PRICE, Stephen M.; Smith, Donald R. Sources and remedies of high-frequency piping vibration and noise. Proceedings of the 28th Turbomachinery Symposium. The Turbomachinery Laboratory, Texas A&M University, Houston, TX, September, 1999.

Rafaelsen, B.; Elvebakk, G; Hunt, D.; Andreassen, K.; randem, T. 2003. Automated 3D seismic facies mapping of Upper Paleozoic carbonates in the southwestern Norwegian Barents Sea.

Singh, A. 2014: Survey Paper on Hilbert Transform With its Applications in Signal Processing (IJCSIT) International Journal of Computer Science and Information Technologies, Vol. 5 (3), 2014, 3880-3882.

Samuelsberg, T.J., Elvebakk, G. & Stemmerik, L. 2003. Late Palaeozoic evolution of the Finnmark Platform, southern Norwegian Barents Sea. Norwegian Journal of Geology, vol. 83, pp. 351-362. ISSN 029-196X.

Stemmerik, L., Nilsson, I. & Elvebakk, G. 1995. Gzelian-Asselian depositional sequences in the western Barents Sea and North Greenland. In: Steel, R.J., Felt, V.L., Johannessen, E.P. & Mathieu, C. (Eds) Sequence Stratigraphy on the Northwest European Margin, 529-544. Norwegian Petroleum Society Special Publication, 5.

Stemmerik, L., Elvebakk, G. & Worsley, D. 1999. Upper Palaeozoic carbonate reservoirs on the Norwegian Arctic Shelf: delineation of reservoir models with application to the Loppa High. *Petroleum Geoscience* 5, 173-187.

Stemmerik, L. 2000. Late Palaeozoic evolution of the North Atlantic margin of Pangea. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* 161, 95-126.

Taner, M.T., Koehler, F. and Sheriff, R. [1979] Complex seismic trace analysis. *Geophysics*, 44 (6), 1041–1063.

