UNIVERSIDADE FEDERAL FLUMINENSE

INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

DEPARTAMENTO DE GEOLOGIA E GEOFÍSICA MARINHA

CURSO DE GRADUAÇÃO EM GEOFÍSICA

Aplicação de atributos sísmicos na interpretação regional de falhas em *Viking Graben*, Mar do Norte

NATHALIA LADEIRA CASADO

Niterói

2016

NATHALIA LADEIRA CASADO

Aplicação de atributos sísmicos na interpretação regional de falhas em *Viking Graben*, Mar do Norte

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

2016

FACULDADE DE GEOFÍSICA DA UNIVERSIDADE FEDERAL FLUMINENSE

CURSO DE GEOFÍSICA

NATHALIA LADEIRA CASADO

Aplicação de atributos sísmicos na interpretação regional de falhas em *Viking Graben*, Mar do Norte

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, 3 de Agosto de 2016.

Banca Examinadora:

_____

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

_____

Prof. Dr. André Luiz Ferrari – Universidade Federal Fluminense (UFF) / LAGEMAR

_____

Prof. Dr. Marco Antônio Cetale Santos – Universidade Federal Fluminense (UFF) / LAGEMAR

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a meu pai, Plinio, minha mãe, Carmen, aos meus irmãos, Priscila e Maurício e aos meus sobrinhos, Elisa, Hugo e Benício, que estiveram sempre presentes me apoiando e me incentivando a vencer essa etapa da minha vida. A minha família sempre foi a minha inspiração.

Agradeço imensamente a todos os professores do curso de Geofísica da Universidade Federal Fluminense, em especial ao meu orientador o Prof. Dr. Rogério de Araújo Santos por ser tão gentil e atencioso durante toda a minha graduação.

Agradeço a todos os meus colegas da turma de 2010 do curso de Geofísica da Universidade Federal Fluminense que sempre estiveram comigo nos momentos mais difíceis, que sempre me apoiaram e me incentivaram.

Obrigado também à ANP por ter sido de fundamental importância na minha formação como Geofísica. Agradeço em especial ao Rodrigo Morelatto e ao André Ferreira da SDB/ANP, pela oportunidade de estágio e por terem me proporcionado um aprendizado constante.

Agradeço à AAPG por terem cedidos os dados, utilizados nesse trabalho, à Universidade Federal Fluminense, e por permitirem que sejam usados para trabalhos acadêmicos. Agradeço às empresas Schlumberger e à IHS por proporcionarem que os alunos da UFF tenham acesso a seus softwares.

Por último deixo um importante agradecimento a instituição CNPq por ter me dado a oportunidade de participar do programa Ciências sem Fronteiras, essa experiência foi de fundamental importância no meu crescimento acadêmico e pessoal.

RESUMO

O presente estudo tem como objetivo utilizar atributos sísmicos na interpretação de falhas regionais do sistema rifte de *Viking Graben* na bacia Norte do Mar do Norte. Atributo sísmico é uma medida derivada do dado sísmico a fim de melhorar a interpretação sísmica. Combinações ou não de atributos podem ser usadas para realçar propriedades no dado, a escolha de um atributo depende do dado e o que quer ser realçado. Os atributos de variância e curvatura foram os escolhidos para auxiliar a interpretação de falhas da área estudada. Com o uso do atributo de variância é possível ter um rápido entendimento e conhecimento das orientações das falhas. Integrando a interpretação de diferentes cortes horizontais de tempo é possível transferir as falhas interpretadas através de atributos para a sísmica convencional. Pode-se através dessa metodologia identificar as principais falhas da área.

Palavras-chave: Atributo sísmico, falhas, curvatura, variância.

ABSTRACT

The main objective of the present study was the seismic interpretation of regional faults of the rifting system of Northern North Sea Basin using seismic attributes. Attribute is a measurement derived from seismic data in order to improve seismic interpretation. Single or combinations of attributes are used to highlight given properties in seismic data, the choice of an attribute depends on the data set and what is wanted to highlight. It was chosen variance and curvature attributes to help on the interpretation of faults in the area studied. Utilizing variance attribute it was possible to have a quickly understanding and knowledge of fault orientations. Integrating the interpretation of time-slices it's possible to transfer faults interpreted in variance time-slices to the conventional seismic data. It can be implied from this methodology the main faults of the area.

Keywords: Seismic Attributes, faults, curvature, variance.

Lista de Figuras

Figura 1 - Mapa de localização da área de estudo.....**3**

Figura 2 - Fluxograma das principais etapas do trabalho.....**4**

Figura 3 - Ilustração da transição da configuração tectônica de rifte para *sag*.....**5**

Figura 4 - Resumo esquemático da evolução tectono-sedimentar do Mar do Norte.....**6**

Figura 5 - Litoestratigrafia do Mar do Norte e suas áreas.....**7**

Figura 6 - Ilustração da paleogeografia do Mar do Norte, mostrando o orógeno Caledoniano e orógeno Varisco.....**11**

Figura 7 - Reconstrução paleogeográfica da área do Mar do Norte e placas circundantes durante a fase Kimmerian.....**12**

Figura 8 - Principais estruturas do Mar do Norte e áreas adjacentes resultando dos eventos de rifteamento do Permiano-Triássico e Jurássico.....**13**

Figura 9 - Visão regional e subdivisão interna no sistema rifte do norte do Mar do Norte.....**14**

Figura 10 - Cortes horizontais através de (a) volume sísmico, (b) volume de variância e (c) volume de variância sobreposto ao volume sísmico, do dado 3D do Norte do Mar do Norte.....**17**

Figura 11 - Exemplos de variações laterais na forma do traço sísmico.....1**8**

Figura 12 - Cortes horizontais do cubo de Variância.....**19**

Figura 13 - Janela 3D do software Petrel mostrando a integração do mapeamento em cortes com a seção sísmica.....**20**

Figura 14 - Perfis interpretados A-A` e B-B'.....**21**

Figura 15 - Convenção de sinal para curvatura (2D) estrutural nos dados sísmicos.....**22**

Figura 16 - Geometria de algumas superfícies dobradas e sua relação com a curvatura.....**23**

Figura 17 - Esquema mostrando a resposta da curvatura em uma falha normal.....**24**

Figura 18 - Atributo de curvatura extraído da superfície da Formação Draupne.....**25**

Figura 19 - Atributo sensitivo a falhas, em que o rejeito vertical é medido em termos da onda sísmica.....**26**

Figura 20 - Seção A-A’ interpretada.....**28**

Figura 21 - Perfil A-A' com o horizonte do topo da Formação Draupne horizontalizado.....**29**

Figura 22 - Visualização 3D e em mapa das falhas regionais.....**29**

Figura 23 - Mapa estrutural TWT das superfícies.....**30**

Figura 24 - Interpretação das principais falhas da área estudada.....**31**

Figura 25 - Visualização 3D dos mapas de corte horizontal de curvatura cortado pela seção sísmica vertical A-A.....**32**

Figura 26 - Seção sísmica vertical A-A’ cortado pelo mapa do atributo sísmico variância extraído da superfície Draupne.....**33**

Lista de tabelas

Tabela1 - Categorias de atributos sísmicos e seus correspondentes tipos e usos interpretativos; em destaque os principais atributos geométricos usados para a interpretação de falhas.....**16**

Sumário

1. Introdução 1
2. Objetivo 2
3. Justificativa do tema 2
4. Localização da área de estudo e dados utilizados 2
5. Etapas do Trabalho 4
6. Evolução Tectono-Sedimentar do Norte da Bacia do Mar do Norte 5
6.1. Evolução durante o período Pré-Permiano 7
6.2. Evolução durante o período Permiano-Triássico inferior 8
6.3. Evolução durante o período Triássico Médio - JurássicoMédio 8
6.4. Evolução durante o período Jurássico Médio-Cretáceo Inferior 9
6.5. Evolução durante o período Cretáceo ao Terciário 10
7. Arcabouço Estrutural e história geológica de Viking Graben 10
7.1. Período Pré-Permiano 10
7.2. Fase Rifte do Permiano-Triássico 11
7.3. Fase Pré-Rifte do Jurássico Inferior ao Médio 12
7.4. Fase Rifte do Jurássico Médio ao Cretáceo Inferior 13
7.5. Fases Tectônicas do Cretáceo ao Terciário 14
8. Metodologia de Trabalho 14
8.1. Interpretação de falhas auxiliada por atributos sísmicos 15
8.1.1. Atributos Geométricos 15
8.1.2. Atributos Volumétricos 22
8.2. Aspecto de Falhas em Atributos Geométricos e Volumétricos 27
9. Interpretação Sísmica Regional 28
10. Resultados e Discussões 31
11. Conclusões 34

12. Referências Bibliográfica 36

1. Introdução

Atributo sísmico é qualquer medição do dado sísmico que melhore visualmente ou quantifique as características sísmicas interessantes para interpretação. Os diferentes atributos auxiliam na interpretação de falhas e canais, no reconhecimento dos ambientes deposicionais, e a solucionar a história de deformação estrutural mais rápido.

Segundo CHOPRA e MARFURT (2007), análise de atributos sismicos são de grande importância na interpretação sísmica desde 1930 quando a primeira seção sísmica foi apresentada por geofísicos. Desde dessa época, mais de 50 atributos de dado sísmico foram obtidos e mais tipos de atributos foram descobertos com o avanço da tecnologia. Atributos são comumente usados por pesquisadores e interpretes para detectar e melhorar a visualização de falhas e fraturas. Atributos de similaridade e curvatura são comuns para detecção de descontinuidades nos traços.

A interpretação de falhas em algumas bacias pode ser desafiadora, o uso dos atributos sísmicos no fluxo de interpretação pode aumentar a legitimidade da interpretação e otimizar o tempo da execução do fluxo. Nesse estudo foram aplicados atributos geométricos para auxiliar na interpretação de falhas normais, com orientação em sua maioria N-S, do rifte do Jurássico de uma bacia estruturalmente complexa como a bacia Norte do Mar do Norte. O principal elemento estrutural dessa bacia e abordado neste trabalho é o *Viking Graben*, cujas margens se estendem ao norte para o *Sogn Graben*, onde se localiza a área do estudo aqui apresentado. O desenvolvimento geológico do *Viking Graben* começou com uma fase de rifte e subsidência termal durante o Permiano-Triássico, mas a principal fase de estruturação desse sistema de *graben* se deu durante o episódio de afinamento crustal do Jurássico Superior. Segundo ODINSEN, *et al.*, (2000), análises estruturais mostram que a Bacia do Mar do Norte é cortada por uma série de grandes falhas normais com geometrias diferentes entre si, sendo posteriormente preenchida por sedimentos pós-rifte (fase *sag*) do Cretáceo e do Cenozoico resultando no desenvolvimento de numerosas “cozinhas de hidrocarbonetos”.

1.1. Objetivo

O principal objetivo desse trabalho é a interpretação sísmica e análise de atributos sísmicos para detecção de falhas regionais do sistema rifte do Jurássico na área do Viking Grabén na bacia Norte do Mar do Norte. Como objetivos específicos, têm-se: (1) Aplicação e análise de atributos sísmicos para o mapeamento das falhas; (2) Mapeamento dos horizontes mais relevantes (Topo Formação *Statfjord*, Topo do Grupo *Dunlin*, Topo do Grupo *Brent*, Topo da Formação *Heather* e Topo da Formação *Draupne*); (3) Análise estrutural da área.

1.2. Justificativa do tema

O objetivo genérico de uma interpretação sísmica é extrair todas as informações geológicas possíveis do dado. Com os avanços tecnológicos e da capacidade computacional, ocorreram muitas melhorias nos métodos de interpretação, aumentando a qualidade e a quantidade dos dados.

Levantamentos sísmicos regionais tendem a recobrir áreas com centenas de quilômetros de área. Compilar todos esses dados para construir um modelo estrutural regional, demanda um importante tempo operacional. Uma maneira de se otimizar esse tempo e ter uma rápida visualização das estruturas da área é o uso de atributos sísmicos. Eles podem destacar estruturas e ajudar a correlacioná-las ao longo da interpretação. Segundo VAIL *et al.* (1977) a maneira convencional de iniciar a interpretação sísmica é identificando as principais falhas, em seguida as principais descontinuidades. Interpretar falhas em uma seção sísmica pode ser tão desafiador quanto correlacioná-las ao longo do cubo. O uso de atributos sísmicos presta grande ajuda nessa questão.

1.3. Localização da área de estudo e dados utilizados

A área de estudo localiza-se na bacia Norte do Mar do Norte (*Northern North Sea*), limitada a norte pela bacia de *Moore*, a oeste pela bacia de *East Shetland Plataform* e a sudeste pelas bacias do *Central Graben* e *Norwegian-Danish.* O dado de sísmica 3D cobre todo o bloco 35/8 e pequena parte dos blocos adjacentes do Mar do Norte, os três poços utilizados no trabalho também estão dentro dessa área (Figura 1). Esses dados foram disponibilizados pela AAPG (*American Association of Petroleum Geologists*) ao grupo IBA

(*Imperial Barrel Award*) da UFF em 2014 apenas para uso restrito de desenvolvimento acadêmico.

O dado sísmico 3D em TWT estudado é composto por 2889 linhas (*inlines*) na direção E-W, com agrupamento entre si de 25 m, e 2144 linhas (*crosslines*) na direção N-S, apresentando espaçamento de 25 m entre si, totalizando uma área de aproximadamente 975 Km^2. Além do cubo sísmico 3D foram utilizados 3 poços (35/8-1, 35/8-2, 35/8-3), que contém informações de topos das formações, alguns perfis geofísicos como raios-gama, densidade, sônico, neutrão, e tabelas tempo profundidade.

O Mar do Norte é a quarta maior província de hidrocarbonetos da Terra. Enormes campos de óleo e gás podem ser achados em seu sistema rifte, existe nesse bloco dois campos em produção, o campo de *Vega North* e *Vega Central*, eles foram descobertos em 1980 e 1982 respectivamente pela empresa Gulf Exploration, porém sua produção só começou em 2010. Hoje em dia são operados pela empresa Wintershall Norge AS, depois de terem comprado os campos da empresa *Statoil* em 2015.

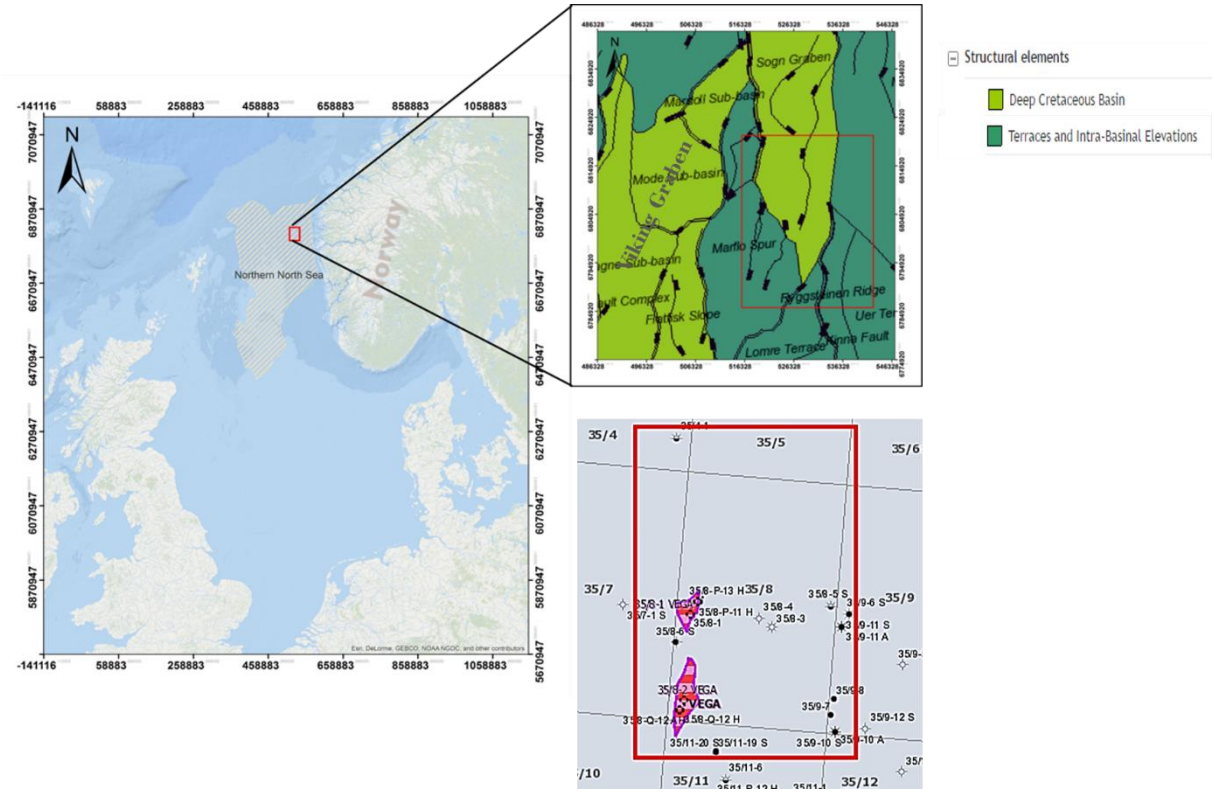

Figura 1 - Mapa de localização da área de estudo. Os dados utilizados se limitam ao retângulo vermelho.

1.4. Etapas do Trabalho

O desenvolvimento do Projeto Final II pode ser dividido em três etapas principais de trabalho, nas quais podem ser visualizadas no fluxograma da figura 2.

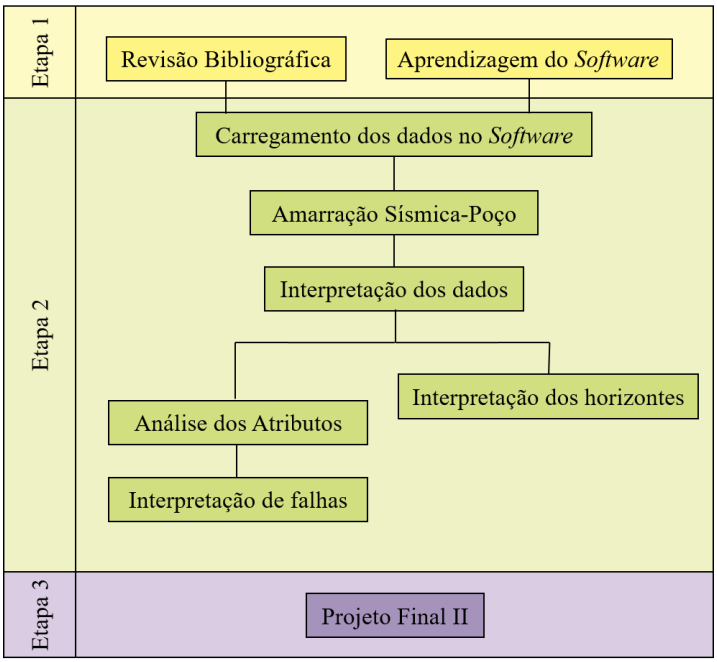

Figura 2 - Fluxograma das principais etapas do trabalho

A etapa 1 teve como objetivo principal a revisão bibliográfica da geologia regional e também uma etapa de aprendizagem do *software* Petrel desenvolvido pela Schlumberger, aplicado na etapa 2. A etapa 2 consistiu no carregamento da sísmica 3D e dos perfis *.las* dos três poços, em seguida foi criado o sismograma sintético e feita a amarração tempo-profundidade dos poços deixando os dados prontos para a interpretação.

Foram calculados os atributos sísmicos de variância e curvatura para todo o cubo sísmico. Assim, foi feita análise dos atributos que auxiliou na interpretação das falhas regionais. Em seguida, foram interpretados os principais horizontes para caracterização do sistema rifte (Formação *Statfjord*, Grupo Dunlin, Grupo *Brent*, Formação *Heather* e a Formação *Draupne*), utilizando como marcadores, os topos das formações nos poços e estendendo-os para as linhas sísmicas. A etapa 3 integrou os resultados para a conclusão do trabalho.

2. Evolução Tectono-Sedimentar do Norte da Bacia do Mar do Norte

Segundo a classificação de *Robertson Tellus Sedimentary Basins of the World Map*, disponível no site da AAPG (http://www.datapages.com/gis-map-publishing-program/gis-open-files/), a bacia Norte do Mar do Norte se desenvolveu se desenvolveu em um antigo rifte no qual o movimento de tração cessou. Tectonicamente, trata-se de uma bacia do tipo aulacógeno (rifte abortado) coberta por uma bacia com uma fase de subsidência térmica (sag), devido ao resfriamento da crosta continental ou oceânica (MIDDLETON, 1989).

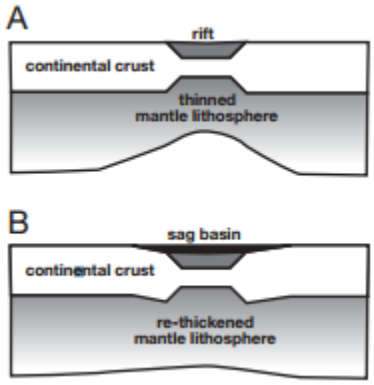

Figura 3 – Ilustração da transição da configuração tectônica de rifte para *sag* (SELLEY, 2010).

O Mar do Norte foi sujeito a períodos de estiramento crustal que começou no Devoniano com a distensão da espessa crosta formada durante o orógeno caledoniano. No Devoniano Superior ocorreu o orógeno Varisco, que deu origem ao supercontinente Pangeia, seguido da fase tectônica Kimmeriana do Permiano que culminou na fase rifte da Bacia. A bacia foi sujeita a subsequentes fases distensivas durante o Permiano-Triássico e Jurássico Superior que foram seguidas de um estágio de subsidência termal (FALEIDE, et al., 2010). Durante o principal evento do afinamento crustal no Jurássico Superior a principal estrutura rifte do Mar do Norte foi formada, o *Viking Graben*. As estruturas nessa área são caracterizadas por blocos falhados com bacias sedimentares em meio-*grabens* assimétricos associados com a distensão litosférica e o afinamento crustal (FALEIDE, et al., 2010). Um resumo esquemático do desenvolvimento tectono-sedimentar da Bacia do Mar do Norte é mostrado na Figura 4, ele mostra como as principais fases afetaram os depósitos sedimentares de cada período. A Figura 5 apresenta a classificação litoestratigráfica dos depósitos Bacia do Mar do Norte.

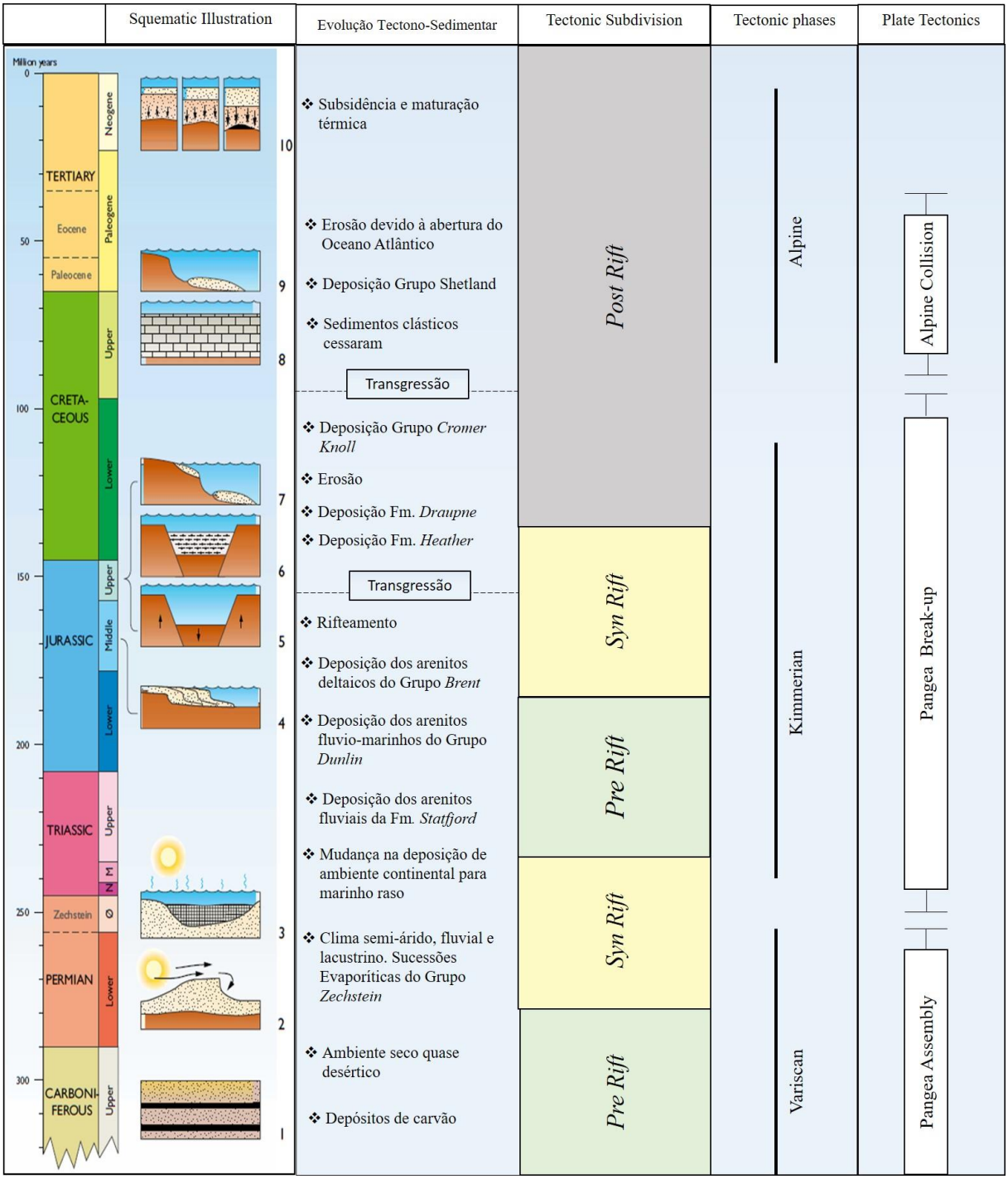

Figura 4 - Resumo esquemático da evolução tectono-sedimentar do Mar do Norte. Modificado de SORENSEN (1996).

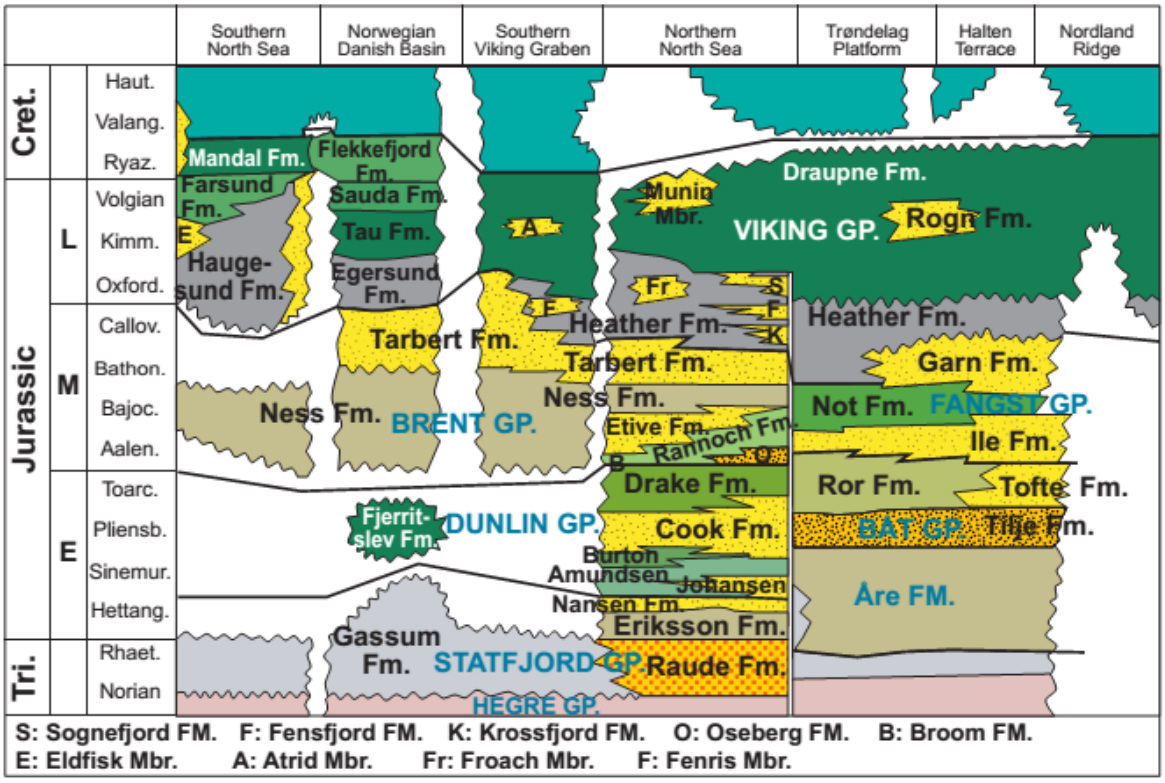

Figura 5 - Litoestratigrafia do Mar do Norte e suas áreas (GRADSTEIN, et al., 2004).

2.1. Evolução durante o período Pré-Permiano

De acordo com FALEIDE et al. (2010), espesso pacote de sedimentos continentais, conhecidos como "*red beds*", foram depositados durante o Devoniano em resposta ao colapso do Caledonides. Os arenitos do Devoniano a oeste da Noruega são metamorfoseados e não devem ser rochas reservatórios, mas eles são de certa forma mais porosos no Sul da Inglaterra.

Seguindo o clima seco que prevaleceu durante o Devoniano no Mar do Norte, o período Carbonífero se tornou gradualmente mais húmido. O noroeste da Europa se moveu em direção ao norte partindo do cinturão árido do hemisfério sul para o cinturão húmido da região equatorial. Isso proporcionou a base para os depósitos de carvão (FALEIDE, et al., 2010).

2.2. Evolução durante o período Permiano-Triássico inferior

Segundo RAVNAS et al. (2000) os depósitos do Permo-Triássico são pouco encontrados no norte do Mar do Norte eé composto de leitos aluviais vermelhos (leques aluviais e arenitos fluviais e lamimitos de planície aluvial) e lamitos lacustres. As variações climáticas, a partir de um ambiente seco quase desértico no Permiano às condições mais úmidas, mas ainda semiárido, fluvial e lacustrino no início do Triássico, também são susceptíveis de ter influenciado na arquitetura sedimentar da bacia.

Devido a distensão causada pela quebra da Pangeia, a partir do final do Permiano, arenitos vermelhos e rochas vulcânicas locais (Grupo Rotliegend) acumularam no norte da Bacia do Permiano. O Permiano inferior foi inundado pelo mar, porém como o clima continuou quente e seco, sucessões evaporíticas foram depositadas formando o Grupo Zechstein.

2.3. Evolução durante o período Triássico Médio - JurássicoMédio

A transição do Triássico para o Jurássico aproximadamente coincide com a mudança na deposição de ambiente continental (fluvial) para marinho raso (FALEIDE et al., 2010). No norte do Mar do Norte arenitos fluviais-marinhos de idade Jurássica Inferior (Formações *Lunde* e *Statfjord*) foram depositados no *Viking Graben*. Esses formam importantes rochas reservatórios em alguns campos de petróleo na área (Snorre fiel) (ADDA, 2012).

Baseado nas cunhas de grande escala estruturadas desde leste até o oeste do norte do Mar do Norte, RAVNAS et al. (2000) sugere que o Triássico Médio - Jurássico Médio foi caracterizado por marcadas variações na subsidência bacinal e no suprimento de sedimentos. O aumento da subsidência bacinal resultou no afogamento da planície aluvial da Formação *Statjford* e no estabelecimento de condições marinhas, o "Mar de *Dunlin*" (RAVNAS et al., 2000). Os arenitos e finos folhelhos marinhos do Grupo *Dunlin* sucedem a Formação *Statfjord*.O reservatório mais importante a norte do Mar do Norte, o Grupo Brent, está acima estratigraficamente do Grupo *Dunlin* (ADDA, 2012).

A seção inferior do Grupo Brent é composta de arenitos micáceos com granodecrescência ascendente das Formações *Etive* e *Rannoch*. Este arenito foi depositado em um delta que drenava a parte central do Mar do Norte, em direção à enseada marítima ao norte, entre as plataformas de *Shetland* e Horda. A seção média, Formação *Ness* (Grupo

Brent), representa um depósito de fácies fluvial-deltaica com canal, areia *crevasse*, lagunar e carvão. A parte mais superior, a Formação *Tarbert*, compreende arenitos bem selecionados formados por retrabalhamento de depósitos deltaicos, representando uma transgressão marinha.

Como os depósitos do Triássico Médio- Jurássico Médio diferem em muitos aspectos dos típicos depósitos de pós ou pré-rifte, RAVNAS et al. (2000) sugere que tais sucessões devam ser referidas como inter-rifte, já STEWART et al. (1992) adotou a nomenclatura como pré-rifte.

2.4. Evolução durante o período Jurássico Médio-Cretáceo Inferior

No Jurássico tardio o fraturamento normal ao longo do *Viking Graben* ocasionou na rotação dos blocos do embasamento e dos sedimentos que os recobriam. RAVNAS et al., (2000) sugerem que ocorreram três sequências transgressiva-regressivas, pacotes de arenito-argilito-arenito, podem ser resultado do estilo de falhamento rotacional. Os topos dos blocos fraturados foram expostos à erosão, removendo sedimentos do Jurássico Inferior – Jurássico Médio e até mesmo do Triássico Superior.

Em contraste com os depósitos sin-rifite do Permiano – Triássico inferior, os sedimentos de preenchimento da bacia no Jurássico médio-Cretáceo inferior são essencialmente de ambiente marinho. A transgressão do Jurássico tardio (Oxfordiana) cobriu o *Viking Graben* com uma espessa camada de sedimentos argilososricos em matéria orgânica da Formação *Heather*, enquanto que os clásticos grosseiros (areias) foram depositados como turbiditos e em deltas ao longo das margens da bacia (FALEIDE et al., 2010). Esses sedimentos argilosos formam o Grupo Viking (ADDA 2012). A parte mais superior desse grupo, a Formação *Kimmeridge Clay* é transgressiva e comumente possui espessura de centenas de metros com ricas rochas geradoras que também são chamadas de Formação *Draupne*, elas são as principais rochas geradoras de petróleo no Mar do Norte (FALEIDE et al., 2010).

O rifte do Jurássico resultou em blocos falhados contendo rochas reservatórios, arenitos do Jurássico médio e inferior (arenitos do Grupo *Brent* e Formação *Statjford*). Pequenos deltas também foram desenvolvidos ao longo do rifte assim como arenitos de mar profundo (FALEIDE et al., 2010).

2.5. Evolução durante o período Cretáceo ao Terciário

A última fase de rifte e erosão de blocos de falha erguidos no Jurássico superior-Cretáceo inferior foi seguido por um aumento significativo do nível do mar no Mar do Norte. Posteriormente, os sedimentos do Cretáceo foram depositados em discordância com os sedimentos do Jurássico superior do Mar do Norte. Esta grande discordância entre o Jurássico e Cretáceo é chamado de Base Cretaceous Unconformity (BCU).

No Mar do Norte, os depósitos do Cretáceo Inferior compreendem argilitosmarinhos raso, folhelhos calcários e algumas areias. Estes pertencem ao Grupo*Cromer Knoll*. O nível do mar atingiu o seu máximo no Cretáceo superior e sedimentos clásticos cessaram. Algas planctônicas carbonáticas então dominaram a sedimentação. O Cretáceo Superior compreende argilitos e menores calcários intercalados do Grupo *Shetland* (ADDA, 2012).

Atividade tectônica relacionada à abertura do nordeste do Oceano Atlântico resultou em movimentos verticais, que afetaram a arquitetura sedimentar no Cenozóico (FALEIDE et al., 2010). No Paleoceno superior e Eoceno inferior, o soerguimento (erosão) da Plataforma de *Shetland* fez com que ela se tornasse uma fonte de sedimentos para os principais centros de deposição.

Sedimentos vulcanoclásticos também foram depositados regionalmente no Mar do Norte, como o resultado do vulcanismo relacionado a abertura do Oceano Atlântico. Esses vulcanoclásticos formaram argilitos ricos em esmectita do Eoceno-Oligoceno. A Progradação na área da Escócia/*Shetland* foi principalmente a partir da *Shetland Plataform* no Eoceno com a maioria do desenvolvimento do depocentro no *Viking Graben* (FALEIDE et al., 2010). A subsidência nessa época criou condições termais para a maturação da matéria orgânica.

3. Arcabouço Estrutural e história geológica de *Viking Graben*

3.1. Período Pré-Permiano

Como mencionado anteriormente, a história do Pré-Permiano no Mar do Norte foi dominada por dois principais ciclos de sedimentação, o orógeno Caledoniano e o orógeno Varisco (ZERVOS, 1986). Antes desses orógenos, o Mar do Norte era separado em fragmentos continentais nas margens dos oceanos Paleozoicos *Iapetus* e *Tornquist* (Figura 6).

Figura 6 - Ilustração da paleogeografia do Mar do Norte, mostrando o Orógeno Caledoniano e Orógeno Varisco.

O Caledoniano foi o resultado da colisão entre as placas Laurentia, Báltica e Avalonia durante o Carbonífero. Esse orógeno foi um dos primeiros orógenos que eventualmente resultaria na formação do supercontinente Pangea. A fase Variscana iniciou-se no Devoniano Superior até o fim do Permiano. Nessa fase, uma gigante cadeia de montanha surgiu entre o Gondwana e a Laurásia que teve como resultado a formação do novo supercontinente Pangea (HAROLD, 2010).

3.2. Fase Rifte do Permiano-Triássico

A fase de rifte do Perminao-Triássico ao norte do Mar do Norte é caracterizada por falhas N-S que formaram estruturas meio *grabens*. Segundo RAVNAS et al. (2000), a bacia do Permiano-Triássico inferior se estende a oeste desde a costa da Noruega e inclui a Plataforma East Shetland e da bacia East Shetland. As principais falhas do Permiano-Triássico no Mar do Norte têm direção N-S, sugerindo a direção da distensão sendo leste-oeste. Essa fase distensiva pode ser associada ao relaxamento da estrutura do Variscano causada por subsidência termal após a colisão do orógeno (STEWART et al., 1992). O Mar do Norte, como um todo, pode ser considerado como possuindo uma longa história tectônica distensiva, interrompida pela compressão Variscana, desde o Devoniano até o Jurássico Inferior (STEWART et al., 1992).

No fim do Triássico o início da fase tectônica Kimmeriana (Figura 7) acentuou o desenvolvimento do rifte e um sistema rifte de 1000 km de comprimento se desenvolveu ao norte, o *Viking Graben*. A fase Kimmeriana marcou o início do rompimento do continente Pangea e a criação da configuração continental que é conhecida hoje em dia (HAROLD, 2010).

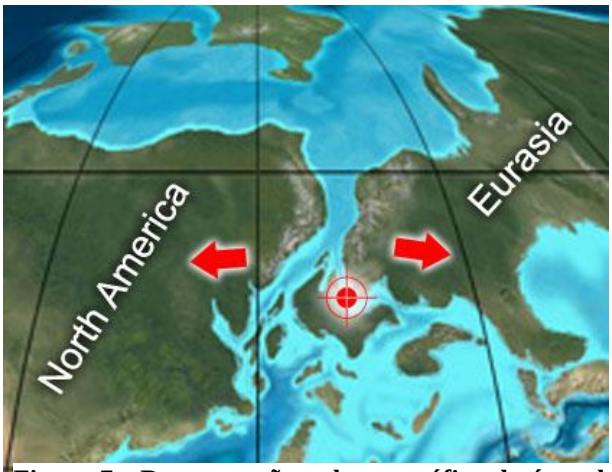

Figura 7 - Reconstrução paleogeográfica da área do Mar do Norte e placas circundantes durante a fase Kimmerian. As setas vermelhas representam os movimentos gerais placa enquanto o ponto vermelho mostra a localização do que viria a ser o do Mar do Norte.

3.3. Fase Pré-Rifte do Jurássico Inferior ao Médio

É geralmente atribuída às sucessões do Jurássico Inferior ao Médio o status de fase pré-rifte, seguindo a fase de subsidência termal do Triássico. FOSSEN et al. (2000), sugerem a ocorrência de um soerguimento (com erosão) devido a uma grande pluma mantélica na parte central do *Viking Graben* durante o Aaleniano, esse evento acabou abruptamente com a subsidência termal.

As variações na taxa de subsidência da bacia e acompanhadas variações de suprimento de sedimentos controlaram a ocorrência de cinco grandes fases regressivo-transgressivas. Assume-se que as altas taxas de subsidência datam do Carniano Superior-Noriano inferior, Rhetiano Superior, Sinemuriano Médio, Toarciano Inferior e possivelmente o Pliesbachiano Superior (RAVNAS et al., 2000).

3.4. Fase Rifte do Jurássico Médio ao Cretáceo Inferior

A fase deformacional mais significante do Mar do Norte começou no Jurássico médio quando a distensão crustal produziu uma junção tríplice de três riftes distintos (ZERVOS, 1986). O braço esquerdo da junção formou a bacia *Moray Firth*, enquanto que os braços nortes e suis formaram os *grabens Viking* e Central, respectivamente (Figura 8).

Durante o clímax da fase rifte, no Jurássico superior, os movimentos tectônicos eram concentrados somente em algumas falhas ao longo das margens da bacia (ODINSEN et al., 2000). Como resultado o relevo interno do *graben* se tornou mais nítido de acordo com o desenvolvimento da topografia do sistema *graben*, com plataformas, sub-plataformas, altas plataformas marginais, como pode ser notado na Figura 9.

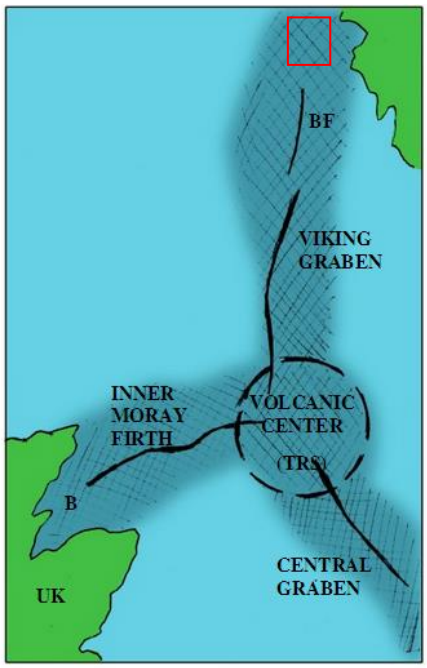

Figura 8 - Principais estruturas do Mar do Norte e áreas adjacentes resultando dos eventos de rifte do Permiano-Triássico e Jurássico. O retângulo vermelho representa a localização aproximada da área de estudo. Modificado de ADDA (2012).

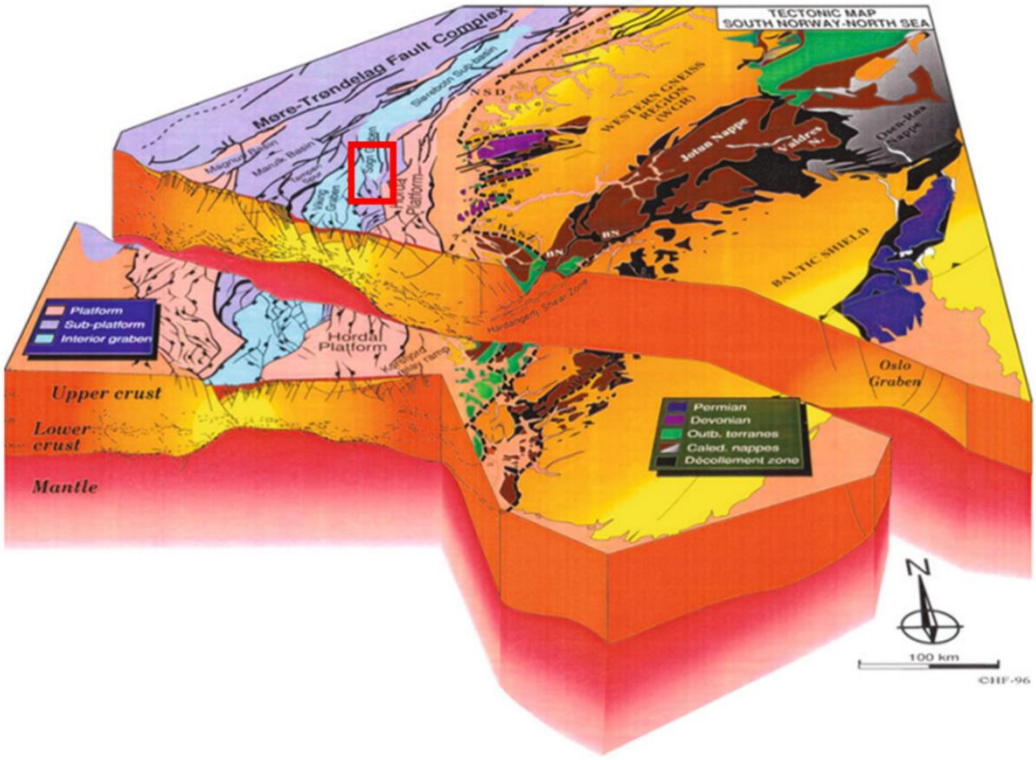

Figura 9 - Visão regional e subdivisão interna no sistema rifte do norte do Mar do Norte, o retângulo vermelho marca a localização da área de estudo. Modificado de FOSSEN et al. (2000).

3.5. Fases Tectônicas do Cretáceo ao Terciário

No Cretáceo Superior começou uma nova fase tectônica, a fase Alpina. Essa fase ainda está ativa. Durante essa fase uma subsidência termal afetou o norte da Bacia do Mar do Norte, ODISEN et al. (2000) acredita que esse evento tem relação com a abertura do Atlântico Norte no Terciário.

Durante o Cretáceo Superior a maior parte do Mar do Norte estava coberta por um mar raso. Na área do *Viking Graben* a subsidência atingiu profundidades de mais de 1200 m até o começo do Terciário quando essa subsidência cessou. Os sedimentos, depositados durantes essa fase, preencheram completamente as estruturas do rifte.

4. Metodologia de Trabalho

O trabalho foi realizado a partir do fluxograma da Figura 2 sendo dividido em três etapas. A primeira etapa consistiu da revisão bibliográfica da geologia do Mar do Norte e do

aprendizado do programa utilizado, a segunda etapa compreende o carregamento e análise da sísmica 3D.

O programa escolhido para carregar a sísmica e gerar os atributos foi o software Petrel da Schlumberger. O dado sísmico 3D foi carregado assim como os poços disponíveis. Em seguida foi feita a amarração poço sísmica. A partir daí os atributos de variância e curvatura foram gerados para todo o cubo. Após a análise das falhas utilizando os atributos pode-se então começar a interpretação regional dos horizontes de interesse. Os dados foram carregados também no software Kingdom da IHS, inclusive as falhas e os horizontes mapeados no Petrel, os mapas de superfície dos horizontes foram gerados nesse software. A terceira etapa consiste na integração dos resultados para conclusão do trabalho.

4.1. Interpretação de falhas auxiliada por atributos sísmicos

Atributo sísmico é qualquer propriedade do dado sísmico que pode ser medido, como amplitude, *dip* (mergulho), fase, frequência e polaridade. Atributos sísmicos revelam estruturas, relações, e padrões no dado sísmico que talvez não fosse possível serem notados antes (CHOPRA e MARFURT, 2007). Atributos podem ser calculados de dados pré-empilhamento ou dados pós-empilhamento, antes ou depois da migração em tempo. Atributos pós-empilhamento são uma abordagem mais manejável, do sinal sísmico, para se observar grandes quantidades de dados e se ter um reconhecimento inicial.

4.1.1. Atributos Geométricos

Atributo Geométrico é uma classificação de atributos sísmicos de acordo com a relação do traço com a geologia, eles medem a mudança no formato do refletor ou morfologia. Atributos geométricos permitem aos interpretes rápida visualização e mapeamento de sistemas de falhas, rotação de blocos falhados, fechamento *four-way*, diápiros de sal e lama. Os atributos volumétricos são atributos calculados usando mais de um traço sísmico, o que proporciona informações quantitativas das variações laterais no dado sísmico. Atributos volumétricos de Coerência e Curvatura são os atributos que serão usados nesse estudo, eles são descritos na literatura como os principais atributos que contribuem para uma maior compreensão do processo deformacional (Tabela 1).

Tabela 1 - Categorias de atributos sísmicos e seus correspondentes tipos e usos interpretativos; em destaque os principais atributos geométricos usados para a interpretação de falhas. Modificado de RODEN, et al.(2015).

Categoria	Tipo	Uso Interpretativo
Atributos Instantâneos	*Reflection Strength,* Fase Instantânea, Frequência Instantânea, Quadratura, Q Instantâneo	Contraste De Literatura, Continuação De Camada, Porosidade, Indicadores Diretos de Hidrocarbonetos, Estratigrafia, Espessura
Atributos Geométricos	Coerência (*Semblance E Eigen-based), Curvatura*	Falhas, Fraturas, Dobramentos, Anisotropia, Campos de Estresse Regionais
Atributos que acentuam amplitude	Amplitude RMS, Impedância Acústica Relativa, *Sweetness,* Energia Média	Porosidade, Variações Estratigráficas e Litológicas, Indicadores Diretos de Hidrocarbonetos
Atributos AVO	*Intercept*, Gradiente, Derivadas *Intercept*/Gradiente, Fator de Fluido, *Lambda-Um-Rho*, *Far-Near*, *(Far-Near)Far*	Fluido nos poros, litologia, Indicadores Diretos de Hidrocarbonetos
Atributos de Inversão Sísmica	Inversão Colorida, *Sparse Spike,* Impedância Elástica, Impedância Elástica Estendida, Simulação de Inversão Pré Empilhamento, Inversão Estocástica	Litologia, Porosidade, Efeitos dos fluidos
Decomposição Espectral	Transformada Continua de Onda, Busca de Correspondência, Busca Exponencial	Espessura Da Camada, Variações Estratigráficas

Esses atributos permitem uma extensão espontânea e eficaz de planos de interpretação convencionais já estabelecidos na indústria, e comumente usados com cortes horizontais (*time-slices*) através de volumes de amplitude sísmica e mapas computados de horizontes mapeados. A interpretação de falhas em *time-slices* do volume sísmico com atributo calculado é mais eficaz do que o mapeamento em *time-slices* convencionais (amplitude).

Na Figura 10a, pode-se ter noção de algumas falhas principais na área de estudo; contudo, é difícil identificar falhas adicionais ao corte horizontal de amplitude, já que a maioria das falhas são paralelas ao *strike*. O corte do atributo variância correspondente na Figura 10b não só mostra falhas adicionais, mas também dá maior destaque às principais falhas da área. Sobrepondo o corte de variância ao correspondente do corte de amplitude (Figura 10c) tem-se uma assistência na compreensão da expressão sísmica das falhas. Repetindo-se essa sobreposição, é possível transferir as falhas para o volume sísmico convencional (Figura 10c). Pode-se fazer isso tanto criando mapas para diferentes horizontes e falhas, como associando as falhas ao volume sísmico. Em seguida, pode-se utilizar a visualização 3D para se definir a distribuição dos planos de falha no volume 3D. Nesse trabalho, inicialmente transferiu-se a interpretação das falhas em cortes dos volumes de atributos calculados para o volume sísmico através da visualização 3D e, em seguida, mapeou-se os horizontes, tal como foi descrito no fluxo de tarefas da Figura 2.

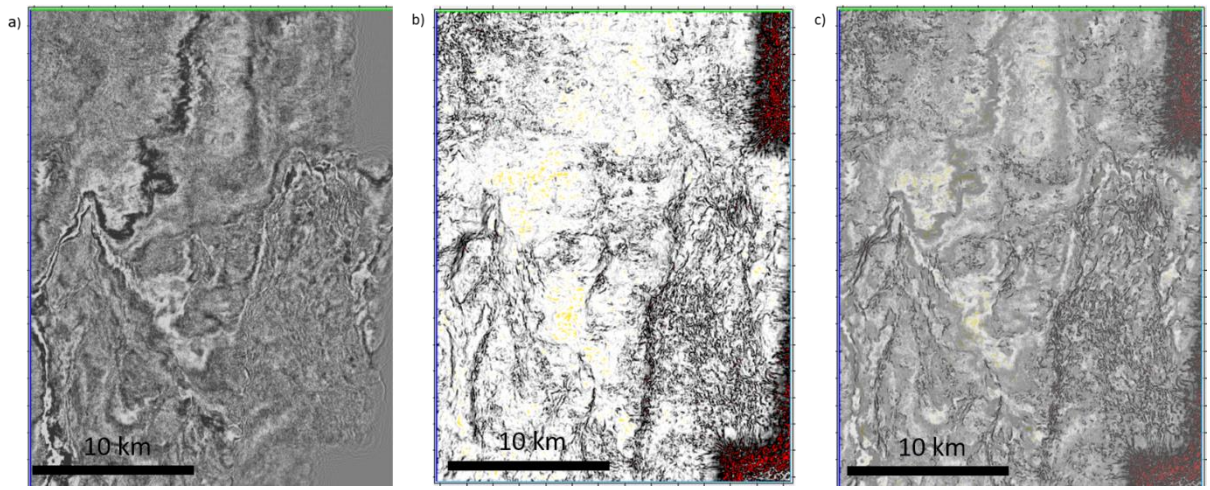

Figura 10 - Cortes horizontais através de (a) volume sísmico, (b) volume de variância e (c) volume de variância sobreposto ao volume sísmico, do dado 3D do Norte do Mar do Norte.

4.1.1.1. Variância (Método Semblance para o cálculo da coerência)

Variância sísmica é uma forma de atributo de coerência que expressa o quanto dois ou mais traços são similares entre si. Um traço sísmico pode ser considerado, simplificadamente, como sendo a soma das respostas de convoluções pontuais de uma onda sísmica com a geologia da sub-superfície. Cada amostra de um traço sísmico pode ser traduzida como a soma espacial de reflexões pontuais que variam em termos de amplitude, frequência e fase da onda, e que depende, também simplificadamente, dos contrastes de impedância acústicas entre dois pontos de camadas consideradas em um determinado modelo geológico, acima e abaixo do ponto de reflexão considerado (SANTOS, 2014). Estendendo-se espacialmente esse conceito, ter-se-ia então, a construção de reflexões para modelos de camadas geológicas (Figura 11). Consequentemente, a forma do traço sísmico difere lateralmente, ou seja, mudanças laterais bruscas nos contrastes de impedâncias pontuais resultam em mudanças na forma do traço. Essas mudanças abruptas nos traços sísmicos podem indicar, entre outros fatores geológicos, falhas e fraturas em rochas sedimentares. As falhas terão valores de coerência baixos e de variância altos.

Os métodos mais comuns para o cálculo de coerência são o *crosscorrelation*, *semblance* e *eigenstructure.* No *software* Petrel da empresa Schlumberger, que foi utilizado para o cálculo dos atributos geométricos, o atributo coerência é chamado de Variância. Variância é uma medida estatística do dado ao redor da média, o cubo de Variância é um

atributo de coerência matematicamente equivalente ao 1D *Semblance* (CHOPRA e

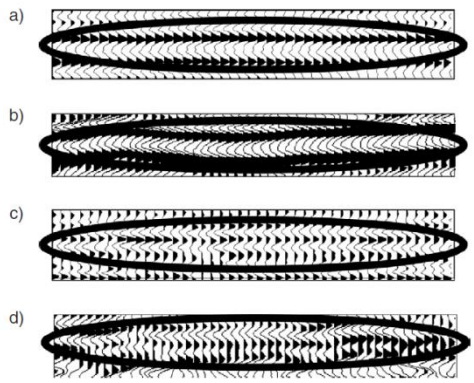

Figura 11 – Exemplos de variações laterais na forma do traço sísmico: (a) horizontal, sem variação lateral, ou coerente, dos traços sísmicos, (b) um sinclinal, sem variação lateral, ou coerente, dos traços sísmicos (c) traços sísmicos variando lateralmente, indicando mudanças na impedância ou espessura, e (d) traços sísmicos variando lateralmente rapidamente, associado a três canais (CHOPRA e MARFURT, 2007).

MARFURT, 2007).

No presente estudo o atributo de Variância foi o primeiro a ser gerado. Foram usados os cortes de horizontes do cubo de variância para se ter uma visão geral das falhas. Esses tempos cortam as falhas do Jurássico e foram definidos como bons para se obter uma visão em mapa. Quando comparado ao corte de horizonte de amplitude, nos mesmos tempos, pode-se notar uma grande diferença em relação à visualização das falhas (Figura 10).

O primeiro passo da interpretação das falhas foi feito usando os cortes de horizonte do cubo de variância. A Figura 12, mostra os cortes de t=2972 ms e t= 3132 ms interpretados. Os valores mais altos de variância indicados por cores mais escuras, podem ser interpretados como falhas. As setas bancas apontam para falhas que podem ser correlacionadas nos dois cortes e que são de extrema importância para o sistema *horst-graben* presente.

O fluxo seguido para esse tipo de interpretação foi o de primeiramente marcar as principais falhas em diferentes tempos e depois transferir essa interpretação para o dado sísmico convencional através do uso simultâneo da janela 3D (Figura 13).

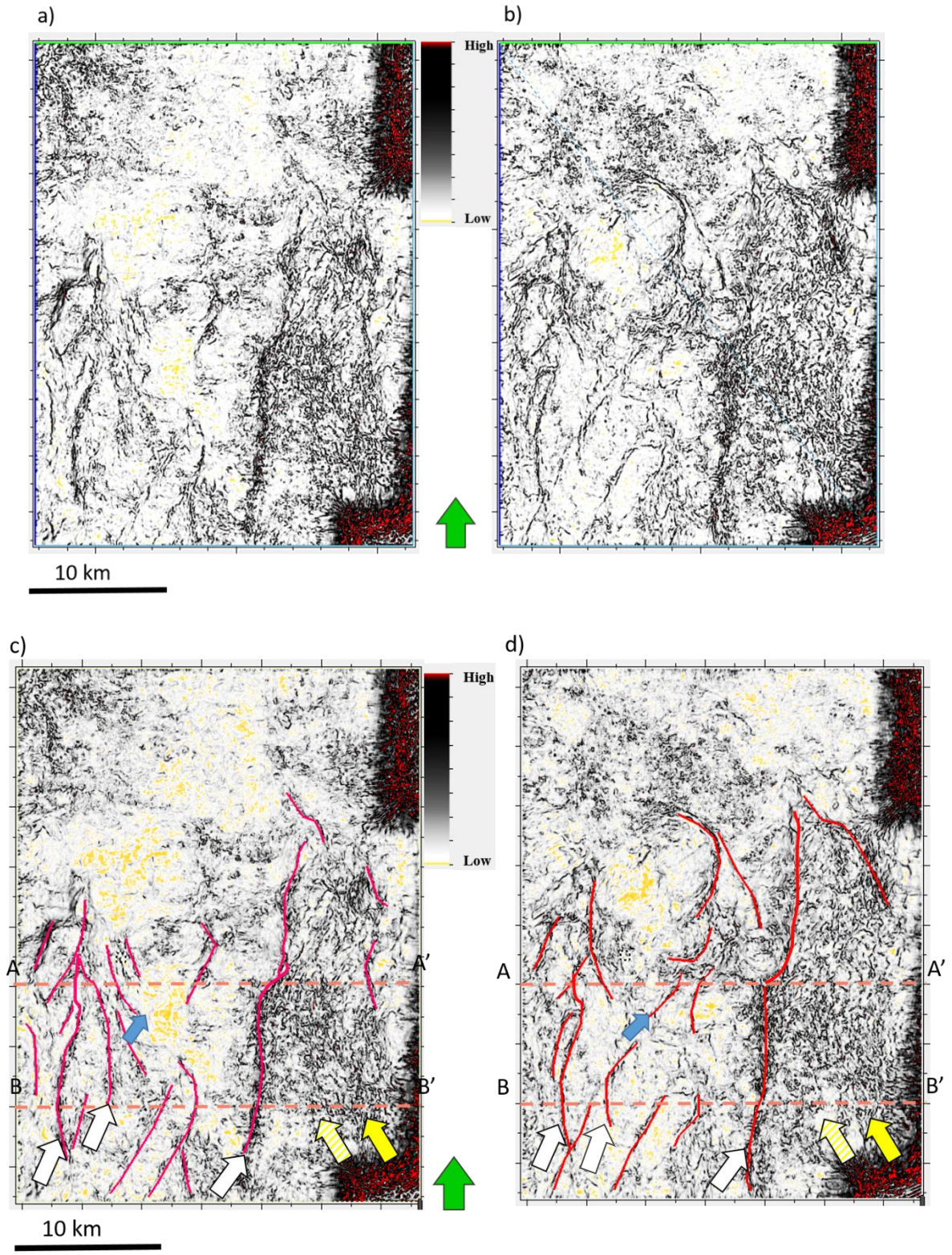

Figura 12 –Cortes horizontais do cubo de Variância. (a) corte de horizonte em t=2792 ms ; (b) corte de horizonte em t=3132 ms; (c) corte de horizonte de (a) interpretado; (d) sorte de horizonte de (b) interpretado. As setas brancas representam as principais falhas que podem ser facilmente associadas, nas imagens (c) e (d), apenas utilizando os *time-slices.* A seta azul representa uma falha que não pode ser vista no *time-slice* de 2792 ms, mas pode ser vista no *time-slice* de 3132 ms. A seta amarela, e a com padrão listrado representam falhas importantes da bacia que não podem ser bem definidas nos cortes de horizonte.

Na Figura 13 é possível ver a integração da interpretação dos cortes com a seção sísmica. Para cada falha foi atribuída cor e nome. Foram interpretadas mais duas falhas que não podem ser vistas no corte do volume de coerência (Figura 14) indicada pela seta amarela e listrada amarela. Seguindo esse processo para vários cortes horizontais de tempo e várias seções sísmicas, pode-se gerar uma análise rápida das principais falhas e relacioná-las ao sistema *horst-graben*, em seguida continuar com a interpretação convencional.

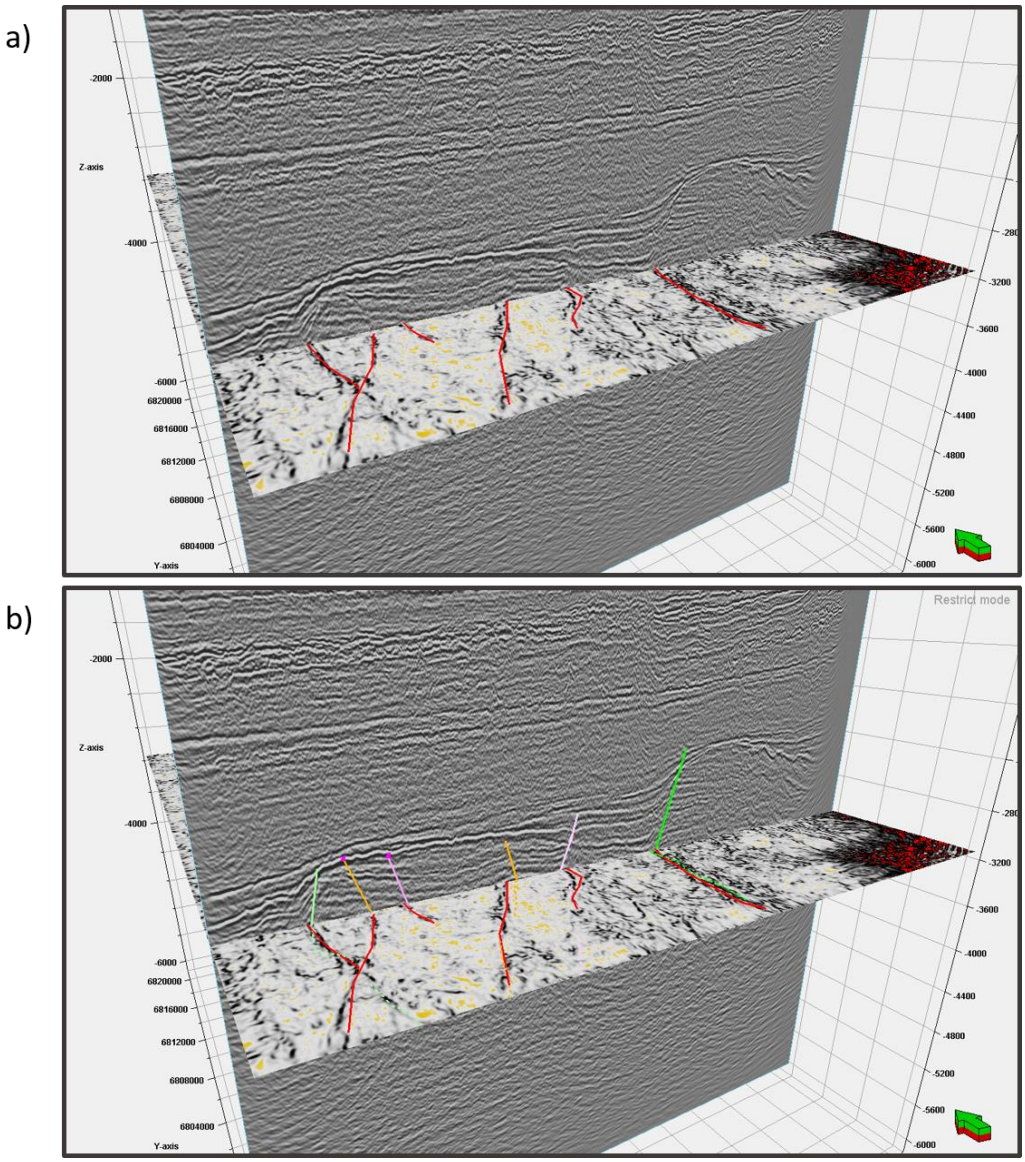

Figura 13 - Janela 3D do software Petrel mostrando a integração do mapeamento em cortes com a seção sísmica. A seção sísmica mostrada corresponde à *Inline* 4903, o perfil B-B' mostrado na Figura 11.

A qualidade das imagens de variância depende da qualidade do dado. Comumente, nem todas as partes do volume sísmico tem qualidade igualmente boa. Na Figura 12 e na Figura 14, as setas amarelas e listradas amarelas apontam para falhas que são de extrema importância para a estruturação da bacia, mas não podem ser identificadas com clareza na análise dos cortes de coerência. Isso pode ter ocorrido devido à perca de qualidade da sísmica nas bordas do volume sísmico.

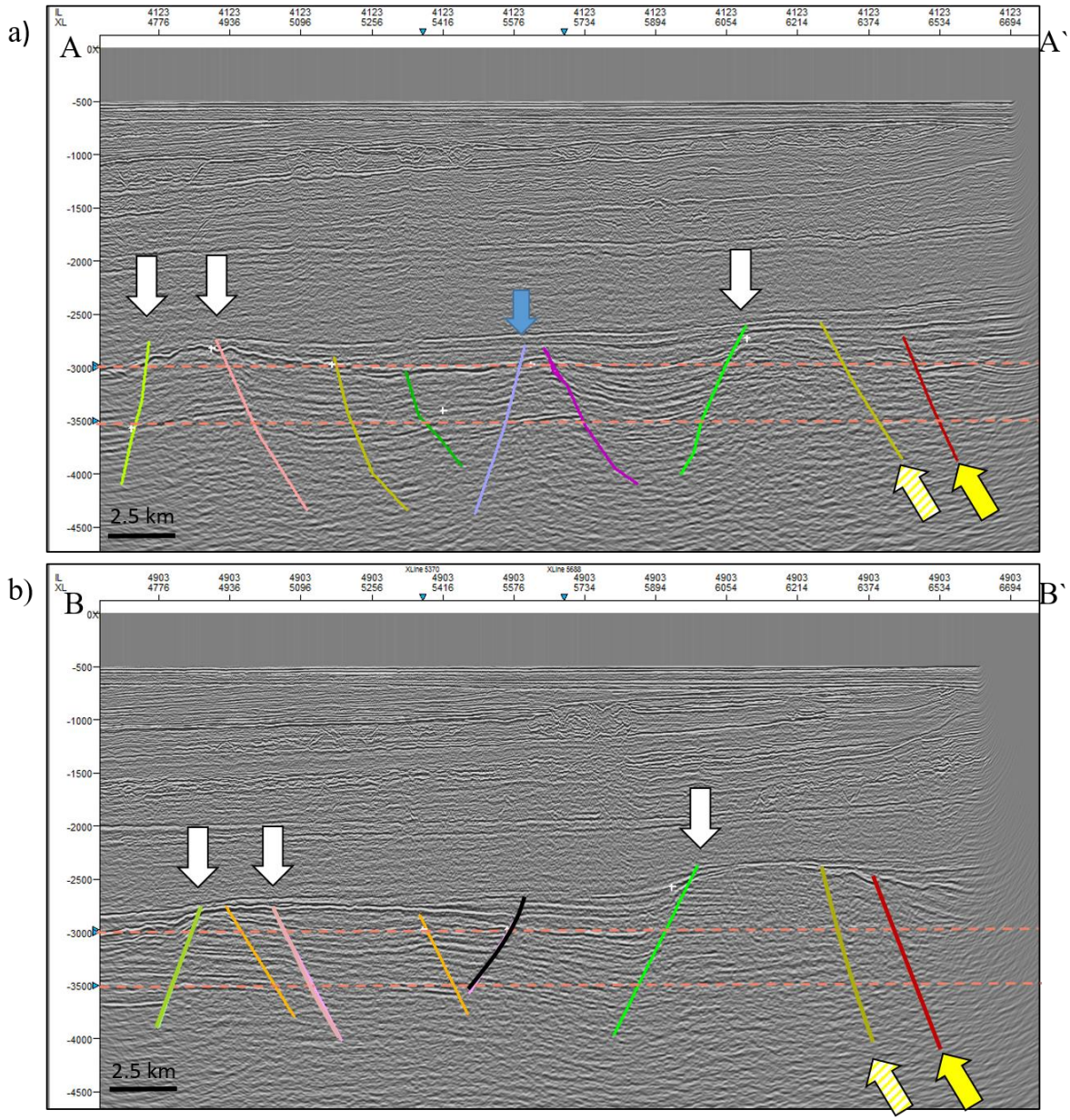

Figura 14– Perfis interpretados A-A` e B-B` indicados na Figura 11. As setas brancas e amarelas indicam as principais falhas da bacia. A seta azul mostra uma falha que pode ser vista no perfil sísmico, mas nem em todos os cortes horizontais.

A Figura 14 mostra duas seções sísmicas verticais com as falhas interpretadas. Essa interpretação se deu após a transferência das falhas do corte horizontal do atributo sísmico variância. Pode-se perceber que foram atribuídas diferentes cores para diferentes falhas, essa é uma das vantagens de se mapear as falhas primeiramente no corte horizontal, é possível distinguir as falhas que são conectadas ou não.

4.1.2. Atributos Volumétricos

Atributo Volumétrico é uma classificação de atributo geométrico em que é usado dois ou mais traços para se calcular o atributo. Uma das vantagens do atributo volumétrico é que ele possui uma maior razão sinal-ruído do que atributos geométricos baseados apenas em horizontes.

4.1.2.1. Atributos de Curvatura

Os atributos de curvatura vêm sendo cada vez mais utilizados na caracterização de falhas e fraturas, baseando-se no fato de que áreas de superfícies com determinadas curvaturas estejam relacionadas às falhas e fraturas (FRANCELINO e ANTUNES, 2011).

Curvatura é uma propriedade em duas dimensões de uma curva e descreve a quão é curvada uma superfície em determinado ponto. Ou seja, o quanto a curva desvia de uma linha reta em um ponto. Para esse ponto em particular, a curvatura é definida com a razão em que a direção da curva muda. Curvatura é intimamente relacionado à segunda derivada de uma linha ou de uma superfície. A convenção de sinais para a curvatura é mostrada na Figura 15.

A curvatura funciona ressaltando as curvaturas positivas (antiformes) e negativas (sinformes), enquanto que para uma superfície plana, ou em zonas de inflexão, o valor da curvatura é nulo (Figura 15).

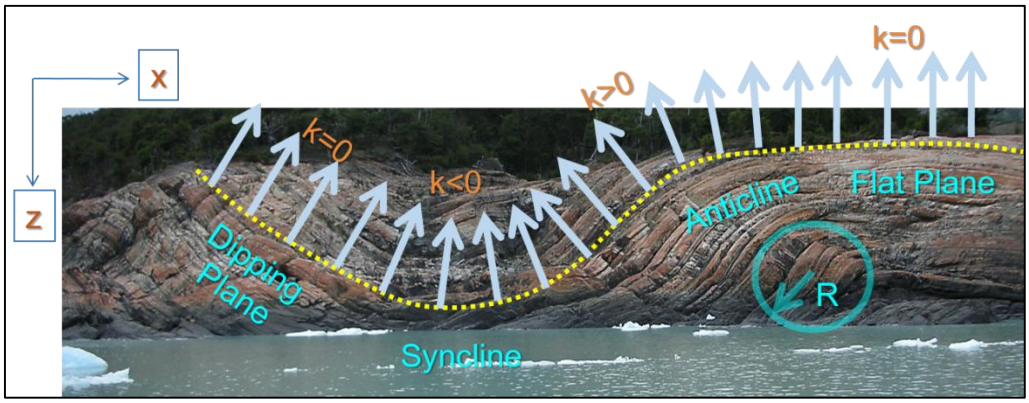

Figura 15 - Convenção de sinal para curvatura (2D) estrutural nos dados sísmicos. Modificado de MARFURT (2015).

Os atributos de curvatura selecionados para o trabalho foram: curvatura mais positiva (most-positive curvature) e da curvatura mais negativa (*most-negative curvature*). A curvatura mais positiva, k_1, representa a curva ao longo do eixo mais apertado enquanto que a curvatura mais negativa, k_2, representa a curva ao longo do eixo mais alongado (Figura 16).

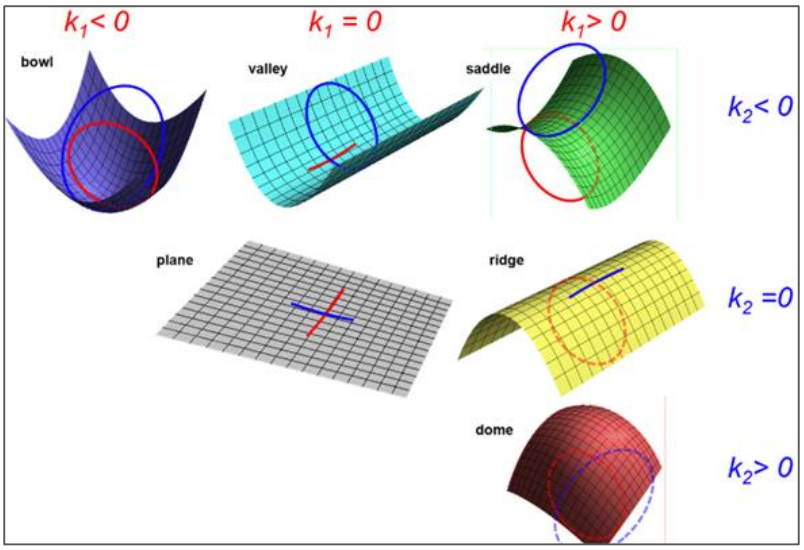

Figura 16 – Geometria de algumas superfícies dobradas e sua relação com a curvatura (CHOPRA e MARFURT, 2007).

As duas curvaturas podem ser positivas (definindo um domo) ou negativas (definindo uma cavidade), se as duas são iguais a zero tem-se um plano. Em geral, quanto maior o valor absoluto da curvatura, maior a deformação ao longo dos eixos (MARFURT, 2015).

Domos e cristas têm um alto valor de k1 (Figura 16) e são mostrados em vermelhos em um mapa k1; vales e planos de falhas tem um valor negativo de k2 e aparecem como azuis no mapa k2. As cristas aparecem como lineamentos vermelhos no mapa k1 (bloco alto da

falha) e vales (bloco baixo da falha), como ilustrado na Figura 17, aparecem como longos lineamentos azuis nos mapas k2.

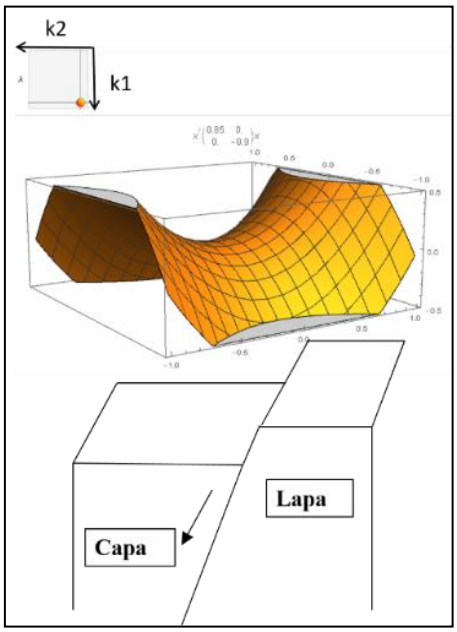

Figura 17 –Esquema mostrando a resposta da curvatura em uma falha normal. A Matriz dessa superfície quadrática representa os vetores k1 e k2. Supondo que os valores de k1 sejam positivos para baixo e k2 negativos para a esquerda, teremos valores positivos de k1 e negativos de k2 como uma resposta para as falhas. Simulação feita no Wolfram Demonstrations Project (http://demonstrations.wolfram.com/).

Os mapas de curvatura são mais úteis quando o k1 e k2 são sobrepostos para ver a interação de eventos fortemente positivos e fortemente negativos (Figura 18).

Na Figura 18 foi extraído o atributo de curvatura da superfície da Formação *Draupne*. A figura 18a mostra o mapa de curvatura mais positiva. Pode-se inferir desse mapa que os lineamentos em vermelhos aparentes no mapa de curvatura representam os efeitos dos blocos mais altos das falhas (representados pelas setas azuis). A figura 18b mostra o mapa de curvatura mais negativa, os lineamentos azuis inferem a presença das escarpas de falhas nos

locais indicados pelas setas vermelhas. Na figura 18c faz-se uma sobreposição das figuras 18a e 18b. Nesse mapa, as intercalações dos lineamentos vermelhos e azuis representam planos de falhas.

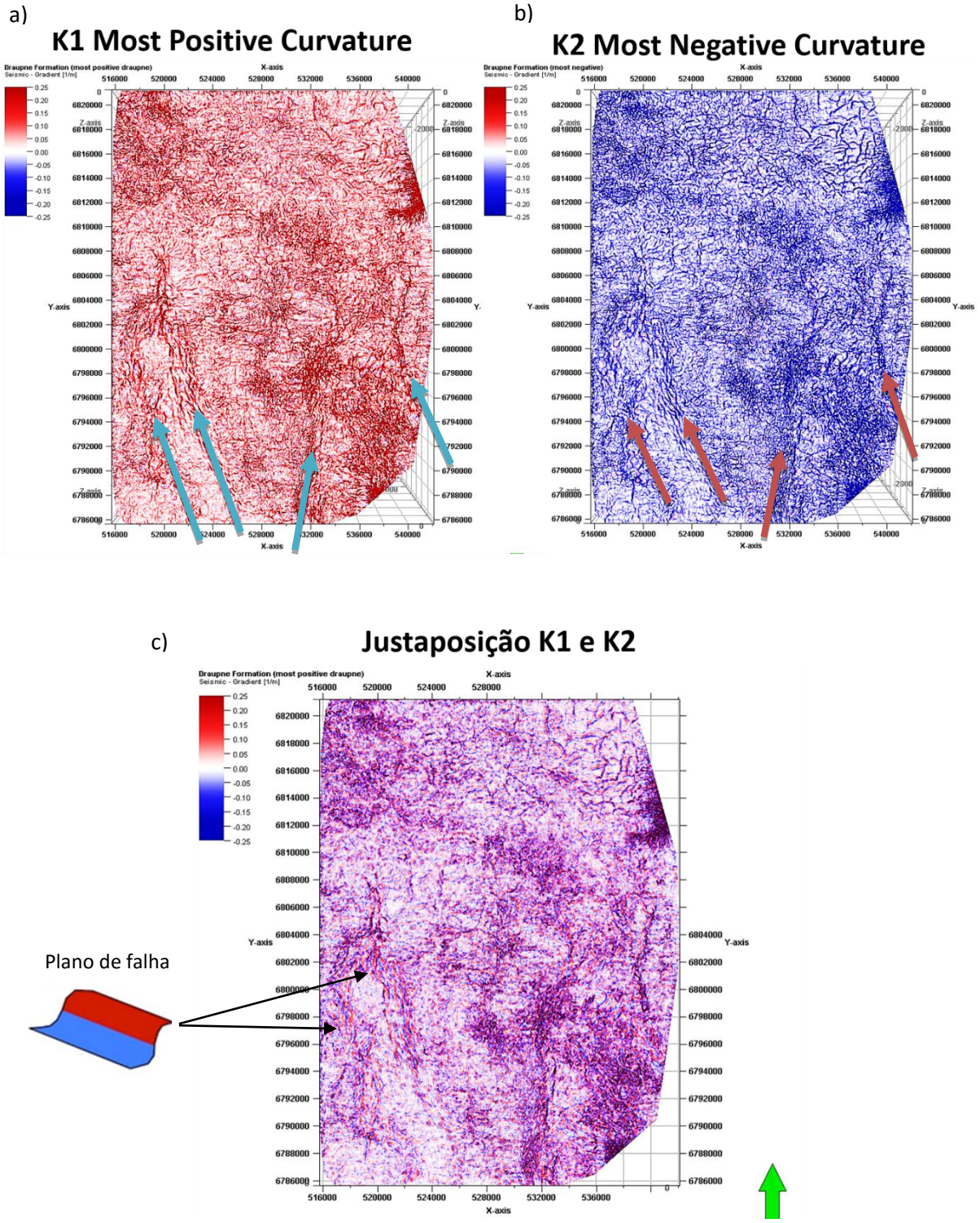

Figura 18 - Atributo de curvatura extraído da superfície da Formação Draupne. Os lineamentos vermelhos do mapa 18a de k1 (setas azuis) representam as cristas, como estamos falando de falhas, o bloco alto. Os lineamentos azuis no mapa 18b de k2 (setas vermelhas) representam o efeito da escarpa da falha. No mapa 18c foi feita uma sobreposição dos mapas 18a e 18b, pode-se perceber as intercalações dos lineamentos vermelhos e azuis, indicando falhas (como mostra as setas pretas).

4.2. Aspecto de Falhas em Atributos Geométricos e Volumétricos

Coerência, curvatura, e outros atributos sensitivos às falhas e dobras são algoritmos que são baseados em simples medidas. Tais medidas são simples, porém mais localizados que as medidas que os interpretes humanos usam com seus cérebros e olhos. Interpretes humanos tipicamente analisam vários segundos de dado sísmico enquanto decidem onde alocam a falha (CHOPRA e MARFURT, 2007). Em contraste, atributos geométricos analisam apenas de 20-40 ms de dado ao redor de cada ponto de análise.

A Figura 19a mostra um exemplo de uma falha lístrica. Por causa da distância dos refletores nessa falha, ela é facilmente detectada pela coerência. Pode-se perceber também que os refletores são rotacionados conforme a falha desliza para baixo, fazendo com que essa falha também seja vista pelo atributo de curvatura.

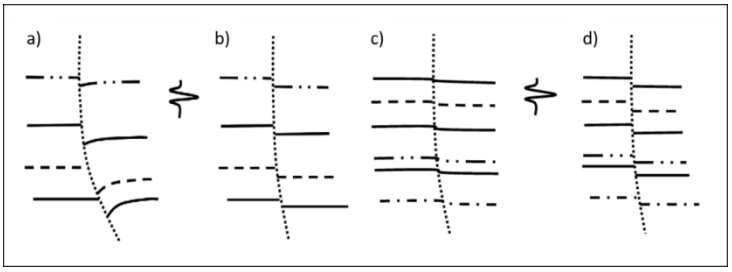

Figura 19 - Atributo sensitivo a falhas, em que o rejeito vertical é medido em termos da onda sísmica. (a) Falha lístrica. Essa falha vai ser vista tanto pelo atributo de coerência quanto pelo de curvatura; (b) falha *strike-slip*. Essa falha vai ser mostrada em pelo atributo de coerência, mas não pelo atributo de curvatura.; (c) uma falha com o rejeito vertical ¼ do comprimento de onda. A falha será mostrada pelo atributo de curvatura, mas não pela coerência; (d) falha sem rotação de refletor. Essa falha será mostrada pelo atributo de coerência, mas não pelo atributo de curvatura (CHOPRA e MARFURT, 2007).

A falha da Figura 19b também vai ser vista pela coerência, porém quase não ocorre rotação dos refletores, fazendo com que ela não seja vista no atributo de curvatura. A distância entre os refletores na falha da Figura 19c é menor do que ¼ do comprimento de onda, o atributo de coerência não vai mostrar essa falha. Contudo, o atributo de curvatura mostrara essa sutil mudança no mergulho. Assim como a falha da Figura 19a, a distância entre os refletores da falha na figura 19d é maior que ¼ do comprimento de onda, fazendo com que a falha seja mostarda no atributo de coerência, mas não sendo revelada no atributo de curvatura.

5. Interpretação Sísmica Regional

A interpretação sísmica é normalmente conduzida com o objetivo de se construir um modelo geológico de uma bacia ou área, ou seja, uma descrição que inclua a apresentação geométrica das diversas camadas e as propriedades mais importantes de cada uma delas. Em geral, dados sísmicos bem processados poderiam ser suficientes para atingir os diversos objetivos da interpretação sísmica, porém, a complexidade natural da geologia exige, normalmente, mais do que isso. Essa é a razão pela qual se utilizam diferentes atributos extraídos dos dados sísmicos, cada um deles com um fim específico.

A visualização dos dados sísmicos é possível de várias maneiras. Em seções verticais, que podem assumir qualquer direção, inclusive ziguezague, em cortes horizontais (*time* ou *depth slices*), em cortes de horizontes, ou seja, medidas de amplitude nos dados sísmicos ao longo de horizontes já interpretados, em diagramas de cerca, que agrupam diversas seções esparsas, apresentadas de forma a manter a visualização tridimensional entre elas, e em apresentações volumétricas dos dados, desde um simples cubo opaco até as versões semitransparentes dos atributos sísmicos.

Em relação à apresentação da distribuição das amplitudes sísmicas, existem duas opções: em *wiggle* com área variável ou em densidade variável. A apresentação convencional nos fluxos de interpretação sísmica é a em densidade variável na escala de tonalidades de cor cinza, variando de preto até branco. A alta capacidade de resolução desse tipo de apresentação, representada pela ampla banda de frequência da luz branca, permite a identificação de feições geológicas sutis que, na imagem colorida, poderiam ser atenuadas por feições vizinhas mais destacadas.

No presente trabalho foram mapeados cinco horizontes de interesse:

- Fase Pré-Rifte – 3 horizontes relacionados ao topo do Grupo *Statfjord*, *Dunlin* e *Brent* marcam a deposição da bacia antes da fase rifte do Jurássico.
- Fase Rifte – Horizonte da Formação *Heather*, sindeposicional e conta a história da bacia durante a fase rifte do Jurássico, época em que as principais falhas que estruturam a bacia se formaram.
- Transição de Fases – O horizonte do topo da Fomação *Draupne* que representa a transição do rifte do Jurássico para o Pós-rifte do Cretáceo.

A Figura 20 ilustra a seção sísmica A-A', onde são mostrados os cinco horizontes interpretados e as falhas. As falhas 1, 2, 3 e 4 são as falhas estruturalmente importantes para o sistema *horst-graben* da área.

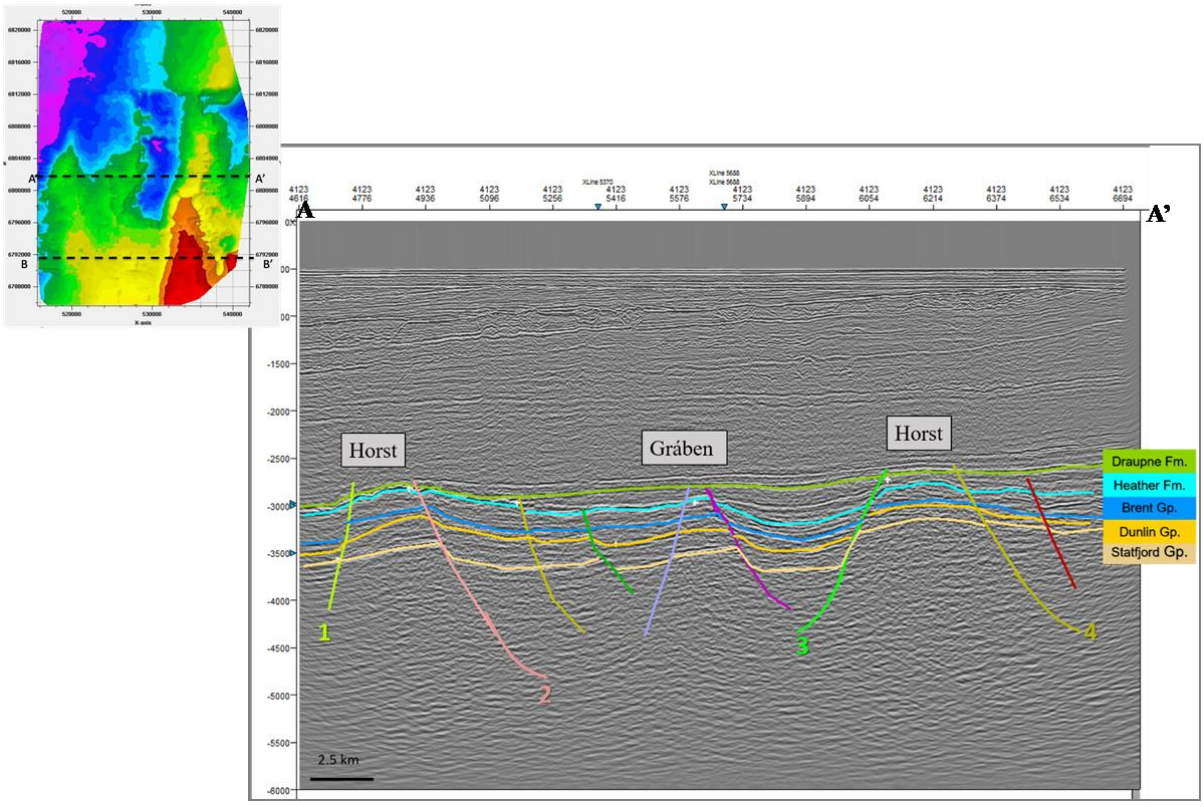

Figura 20 – Seção A-A' interpretada.

Os horizontes e falhas interpretadas no *software* Petrel também foram carregados no *software* Kingdom da empresa IHS. Na Figura 21 a interpretação sísmica da Formação Draupne foi horizontalizada (*flaten*). No tempo da deposição da Formação Draupne a bacia já possuía a estruturação que pode ser vista hoje em dia. As falhas nesse tempo de deposição já possuíam a mesma geometria que pode ser analisado no dado sísmico.

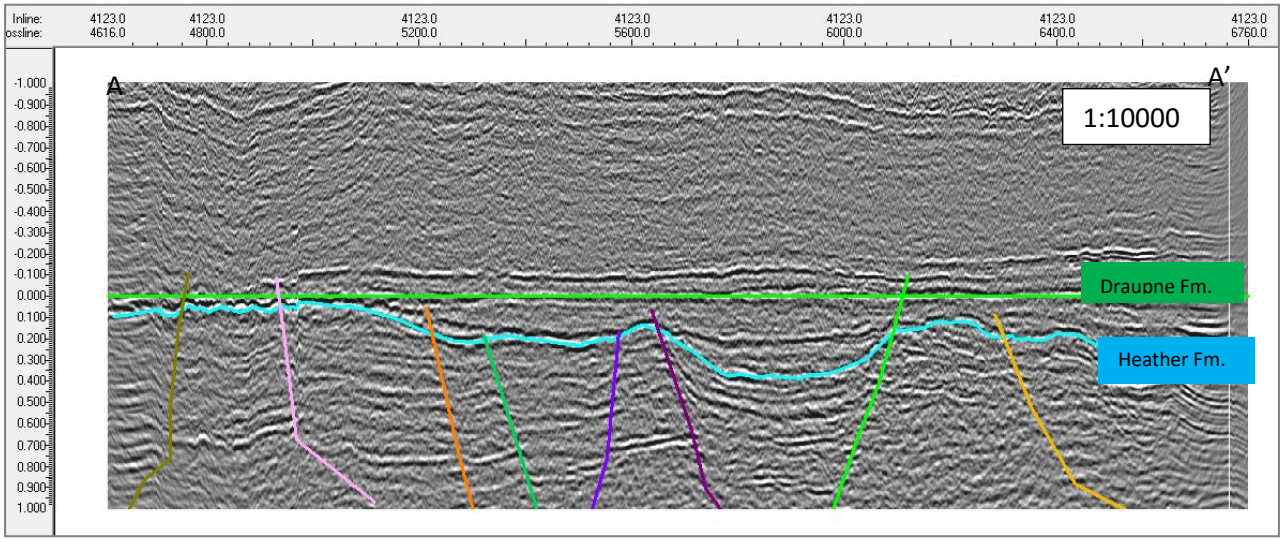

Figura 21 - Perfil A-A' com o horizonte do topo da Formação Draupne horizontalizado.

A Figura 22 mostra a janela 3D e o mapa final com as falhas interpretadas. Pode-se identificar através desses mapas a orientação N-S das falhas normais que estruturam o sistema *horst-graben.* Além das quatro principais falhas da área existem outras falhas internas. que provavelmente fazem parte da estruturação do relevo interno do *graben*.

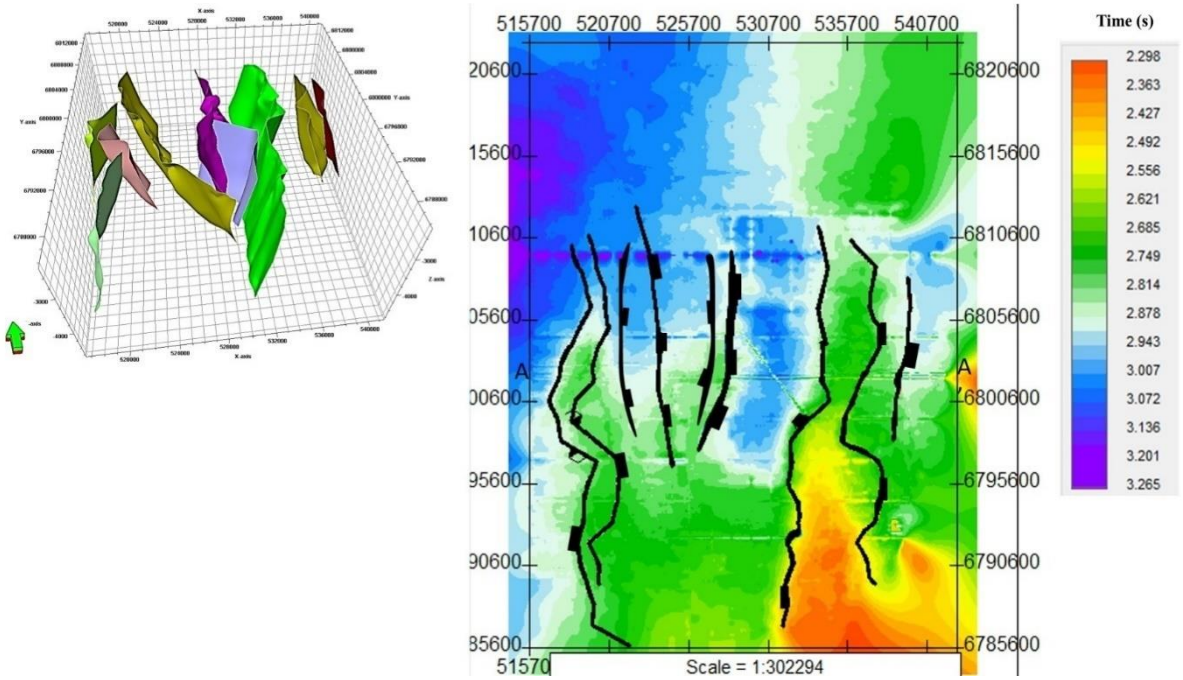

Figura 22 – Visualização 3D e em mapa das falhas regionais.

6. Resultados e Discussões

O método de interpretação assistida por atributos foi rápido e eficaz. Os mapas de tempo duplo (TWT) dos horizontes ilustrados na Figura 23, mostram a interpretação regional final utilizando esse método. Tais mapas de superfície dos horizontes foram mais facilmente gerados após a prévia interpretação estrutural usando os atributos sísmicos. Com a geração de mapas estruturais de tempo é possível visualizar melhor a relação das falhas com a evolução estrutural da bacia. As superfícies de tempo dos Grupos Statfjord e Dunlin que são pré-rifte descrevem superfícies menos estruturadas, mas afetada pela fase pré-rifte da bacia, que é simultânea ao início de abertura do Pangea e à mudança de sedimentação continental para marinho raso.

O Grupo Brent é sindeposicional ao começo da fase rifte do Jurássico. O mapa dessa superfície mostra que as formações desse grupo foram depositadas em uma configuração estrutural mais marcante, assim como a formação Heather que é sindeposicional à fase rifte. A Formação Draupne é um depósito transgressivo do pós-rifte, sua superfície é mais suavizada em relação à da Heather, a época de deposição dessa formação é marcada pelo fim da fase rifte e o começo da fase *sag* da bacia.

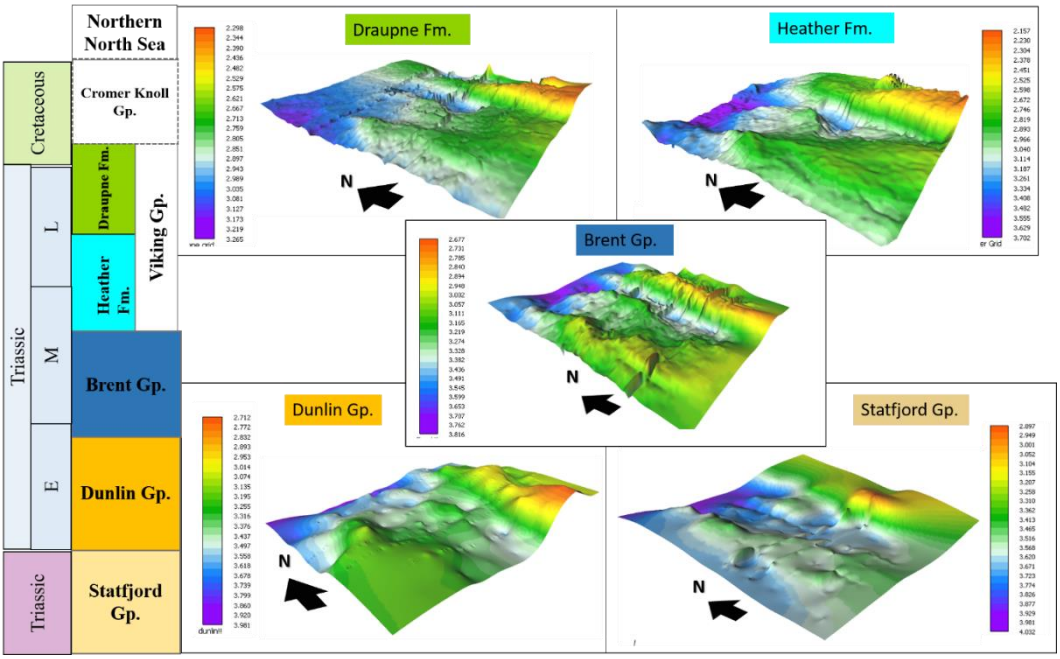

Figura 23 – Mapa estrutural TWT das superfícies utilizando o método de interpretação auxiliado por atributos.

Quatro principais falhas desse sistema *horst-graben* puderam ser identificadas e mapeadas rapidamente. As falhas dois e três da Figura 24 são falhas conjugadas, a falha três não só controla a estruturação do *Sogn Graben* à leste como também a estruturação do *Lomre Terrace* à sudeste. Foram mapeadas também falhas antitéticas e sintéticas na região do *graben*.

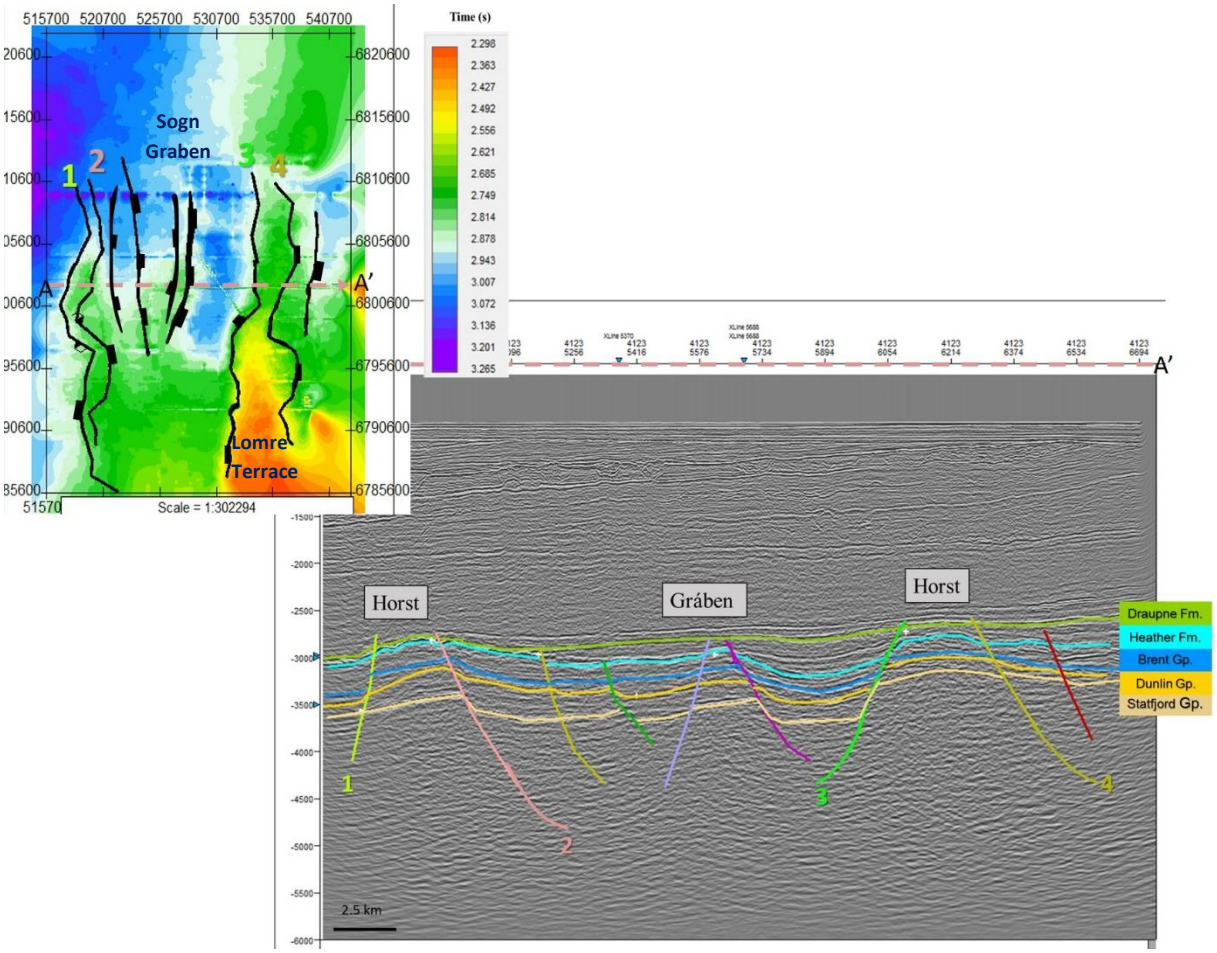

Figura 24 – Interpretação das principais falhas da área estudada.

Na Figura 25 é possível analisar a relação da curvatura, extraída de uma superfície com a seção sísmica vertical. As setas azuis apontam para as falhas dessa *inline* que possuem relação com os lineamentos azuis do mapa de curvatura mais negativa, as setas vermelhas apontam para os blocos altos do sistema de falhas que possuem relação com os lineamentos vermelhos do mapa de curvatura mais positiva. As falhas que foram mais perceptíveis nos mapas de curvatura foram a falha principal dois e falhas sintéticas à essa falha.

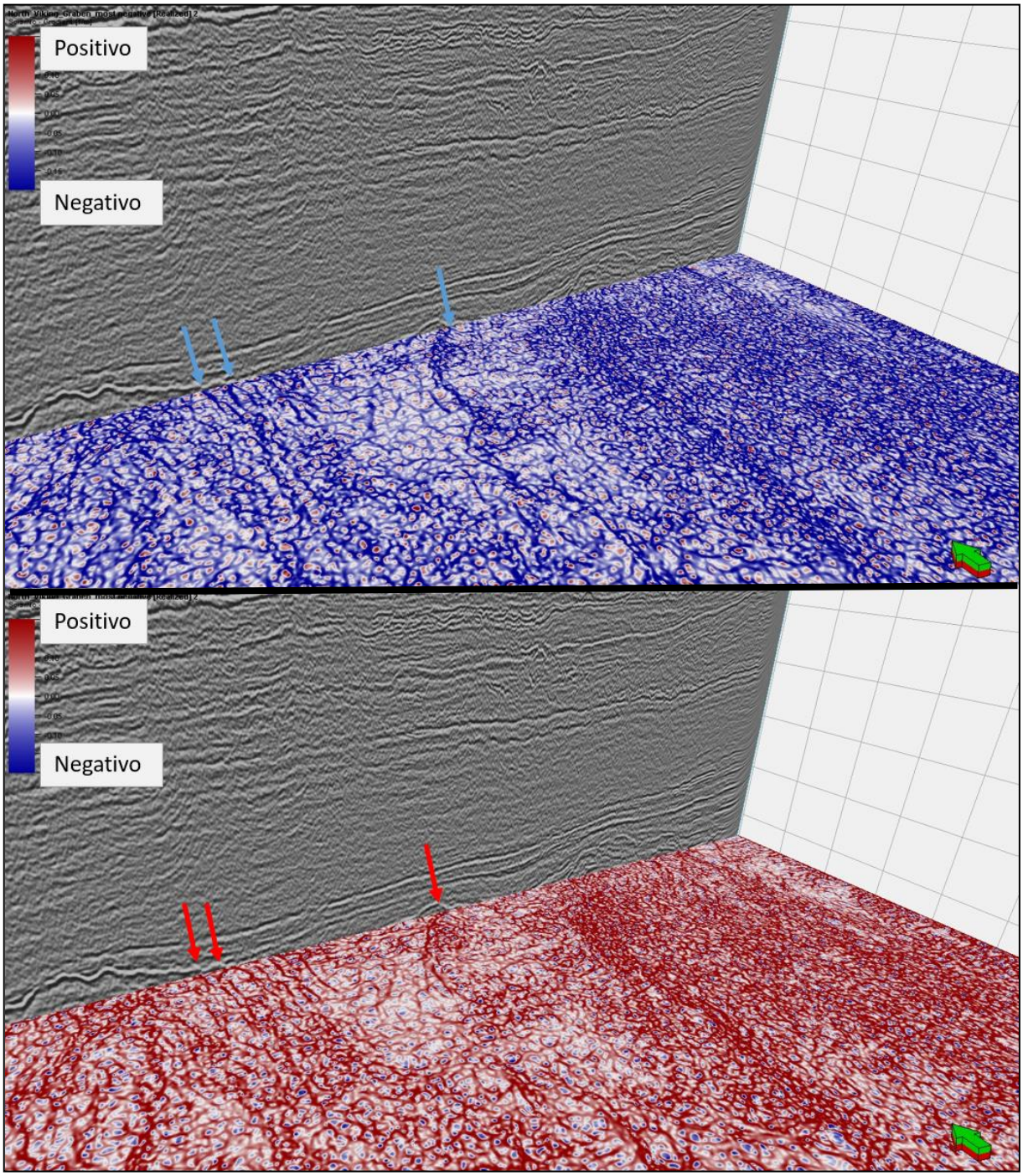

Figura 25 – Visualização 3D dos mapas de corte horizontal de curvatura (figura superior - mais negativa; figura inferior – mais positiva) cortado pela seção sísmica vertical A-A'.

A Figura 26 mostra o atributo Variância extraído da superfície Draupne, após a geração dos mapas de superfícies. É possível perceber que as áreas mais escuras indicam locais com falhas. As áreas brancas e amareladas indicam áreas com pouca variância, ou seja, áreas onde os traços tem continuidade. Esse atributo se mostrou mais eficaz no que se diz respeito às identificações de falhas. As falhas principais do sistema *horst-graben* podem ser facilmente identicadas, porém as falhas antitéticas e sintética do sistema não é tão perceptível.

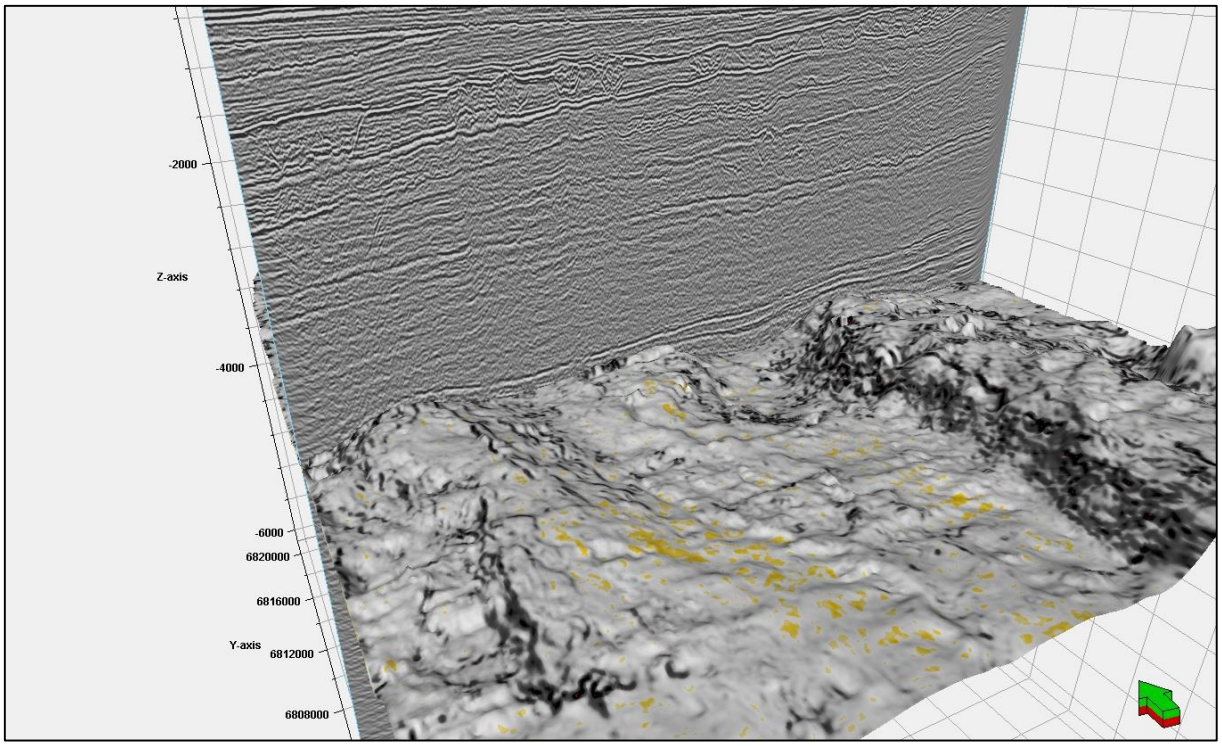

Figura 26 – Seção sísmica vertical A-A' cortado pelo mapa do atributo sísmico variância extraído da superfície Draupne.

É importante ressaltar que o processamento sísmico do dado desempenha um papel importante tanto na análise de atributos em dados pré-empilhamento quanto em dados pós-empilhamento. O dado utilizado nesse trabalho é um dado empilhado e migrado, cujas informações sobre processamento não foram disponibilizadas. O processamento pode modificar a amplitude, fase e frequência dos traços afetando assim as respostas que os atributos oferecerão.

7. Conclusões

A análise integrada de atributos sísmicos e a interpretação sísmica 3D possibilitou a caracterização das principais falhas do sistema rifte (Jurássico) da área. A metodologia adotada com a aplicação dos atributos de variância e curvatura foi de extrema importância para a etapa seguinte de interpretação sísmica. Apesar de não ser possível ter acesso aos dados de aquisição e processamento do dado sísmico 3D, pode-se perceber que é um dado de alta qualidade.

O atributo de variância se mostrou mais eficaz do que o atributo de curvatura na análise das falhas em *time-slices*. O dado apresentou excelente resposta na identificação da orientação e densidade de falhamentos utilizando o atributo de variância, o que possibilitou um melhor entendimento das estruturações que compõem o sistema rifte Jurássico do sistema *horst-graben*.

Para se otimizar mapas do atributo curvatura, é preciso um exame mais detalhado e provavelmente uma pré filtragem ou aplicação de outros atributos volumétricos ao dado sísmico empilhado antes que se extraia os atributos de curvatura. Um estudo adicional voltado para o tratamento de *wavelets* (aumento da resolução e redução do ruído coerente) seria importante, de modo a otimizar os resultados do atributo de curvatura. Outro estudo possível de realização adicional seria tratar o dado numa fase de pré-empilhamento, voltado para o realce de falhas, o que pode melhorar suas identificações com o auxílio de atributos sísmicos.

8. Referências Bibliográficas

ADDA, G. W., 2012. Hydrocarbon generation and migration from Jurassic source rocks in the northern North Sea. *Norwegian University of Science and Technology*.

BADLEY, M. E., PRICE, J. D. e AGDESTEIN, C. R. D. &. T., 1988. The structural evolution of the northern Viking Graben and its bearing upon extensional modes of basin formation. *Journal of the Geological Society,* pp. 455-472.

BYLES, C., 2012. *AN OVERVIEW OF THE MIDDLE JURASSIC PETROLEUM GEOLOGY OF THE NORTH SEA AND ITS PRODUCTIVE FIELDS.*

CHOPRA, S. e MARFURT, K. J., 2007. *Seismic Attributes for Prospect Identification and Reservoir Characterization.* SEG Geophysical Developments Series.

COWIE, P. A., UNDERHILL, J. R., BEHN, M. D., LIN, J., GILL, C. E., 2005. Spatio-temporal evolution of strain accumulation derived from multi-scale observations of Late Jurassic in the northern North Sea: A critical test of models for lithospheric extension. *Earth and Planetary Science Letters,* Issue 234, pp. 401-419.

FAERSETH, R. B. e PEDERSTAD, K., 1987. Regional sedimentology and petroleum geology of marine, late Bathonian-Valaginian sandstone in the North Sea.

FALEIDE, J. I., BJORLYKKE, K. e GABRIELSEN, R. H., 2010. *Geology of the Norwegian Continental shelf.*

FOSSEN, H., ODINSEN, T., FAERSETH, R. B. e GABRIELSEN, R. H., 2000. Detachments and low-angle faults in the nonrthern North Sea rift system. *Dynamics of the Norwegian Margin.*

FRANCELINO, A. V. M. e ANTUNES, A. F., 2011. Exemplo de aplicação de filtros e atributos sísmicos para o realce de falhas e fraturas no levantamento sísmico 3D do alto de siririzinho (Bacia Sergipe-Alagoas-Nordeste do Brasil).

GORMLY, J., BUCK, I. S. P. e CHUNG, H. M., 1993. Oil-source rock correlation in the North Viking Graben. *Advancesin Organic Geochemistry*.

GRADSTEIN, F., OGG, J. e SMITH, A., 2004. *Norlex.* Disponível em: <http://www.nhm2.uio.no/norlex/StandardLithostratigraphicWallchartOffshoreNorway.pdf >. Accesso em: 11 julho. 2016.

GUEST, B., 2013. Disponível em: <http://sanuja.com/blog/exams/glgy341-final>. Acesso em: 10 junho. 2016.

HAROLD, 2010. *Structural Development of the North Sea Basin.* Disponível em: <http://www.epgeology.com/structural-geology-f21/structural-development-the-north-sea-basin-t417.html>. Acesso em: 09 maio. 2015.

ILIFFE, J. E., LERCHE, I. e CAO, S., 1991. Basin analysis predications of known hydrocarbom occurances in the North Sea Viking Graben as a test case. *Earth Science Reviews*.

JOHNSON, H., LESLIE, A. B., WILSON, C. K., ANDREWS, I., COOPER, R. M., 2008. *Middle Jurassic, Upper Jurassic and Lower Cretaceous of the UK Central and North Sea.*

KEYM, M., DIECKMANN, V., HORSFIELD B., ERDMANN M., GALIMBERTI R., KUA L., LEITH L., PODLAHA O., 2006. Source rock heterogenity of the Upper Jurassic DRaupne Formation, North Viking Graben, and its relevence to petroleum generation studies. *Organic Geochemistry*.

DAVID. L. L., DWIGHT C. B., DAVID H., SERGEI A. P., RYAN D. T., STEVEN J. G., 2010. Sediment-Hosted Lead-Zinc Deposits in Earth History. *Economic Geology,* Volume 105, pp. 593-625.

MARFURT, K. J., 2015. *Marfurt Short Course Notes - Attributes for Prospect Evaluation and Reservoir Characterization - 5 days.* [Online]
Disponivel em:< http://mcee.ou.edu/aaspi/upload/Marfurt_Short_Course_Notes%20-%20Attributes%20for%20Prospect%20Evaluation%20and%20Reservoir%20Characterization%20-%205%20days/>. Acesso em: 09 junho. 2016.

MIDDLETON, M. F., 1989. A model for the formation of intracratonic sag basins. *Geophys. J. Znt.*, pp. 665-679.

ODINSEN, T., 2000. The geometries and deep structure of the northern North Sea rift system. In: *Dynamics of the Norwegian margin.* s.l.:s.n.

RAVNAS, R., NOTTVEDT, A., STEEL, R. J. & WINDELSTAD, J., 2000. Syn-rift sedimentary architetures in the Northern North Sea. *Dynamics of the Norwegian Margin*.

ROBERTSON, 2016. *AAPG Datapages.* [Online]
Disponível em:< http://www.datapages.com/gis-map-publishing-program/gis-open-files/global-framework/robertson-tellus-sedimentary-basins-of-the-world-map>. Acesso em: 02 janeiro. 2016.

RODEN, R., SMITH, T. e SACREY, D., 2015. Geologic pattern recognition from seismic attributes: Principal component-analysis and self-organized maps. *AAPG Special Sections: Interpretation.*

SANTOS, R. A. , 2014 - Apostila Interna de Interpretação Sísmica - UFF - Instituto de Geociências.

SCHLAKKER, A., CSIZMEG, J., POGÁCSÁS, G. e HORTi, A., 2012. Burial, Thermal and Maturation History in the Northern Viking Graben (North Sea). *Search and Discovery Article #50545 (2012),* 30 Janeiro.

SELLEY, R. C., 2010. *Applied Sedimentology.* s.l.:s.n.

SORENSEN, K., 1996. *Oil and gas exploration iin the North Sea.* s.l.:s.n.

STEWART, I. J., RATTEY, R. e VANN, I., 1992. Structural style and the habitat of hydrocarbons in the North Sea. *Structural and Tectonic Modelling and its Application to Petroleum Geology.*

TANER, M. T., 2001. Seismic Attributes. *CSEG Recorder.*

VAIL, P. R., MITCHUM, R. M. J. e THOMPSON, S., 1977. Seismic stratigraphy and global changes in sea level, part four: global cycles of relative changes of sea level. *AAPG Memoir,* Volume 26, pp. 83-98.

ZERVOS, F. A., 1986. *Geophysical investigation of sedimentary Basin Development: Viking Graben, North Sea.* s.l.:University of Edinburgh.