

Patrícia Cordeiro Pereira Pampanelli

**Suavização de dados de amplitude através de
difusão anisotrópica com preservação de
feições sísmicas**

Tese de Doutorado

Tese apresentada como requisito parcial para obtenção do grau de Doutor pelo Programa de Pós-graduação em Informática do Departamento de Informática do Centro Técnico Científico da PUC-Rio

Orientador: Prof. Marcelo Gattass

Rio de Janeiro
Agosto de 2015

Patrícia Cordeiro Pereira Pampanelli

**Suavização de dados de amplitude através de
difusão anisotrópica com preservação de
feições sísmicas**

Tese apresentada como requisito parcial para obtenção do grau de Doutor pelo Programa de Pós-graduação em Informática do Departamento de Informática do Centro Técnico Científico da PUC-Rio. Aprovada pela comissão examinadora abaixo assinada.

Prof. Marcelo Gattass

Orientador

Departamento de Informática

PUC-Rio

Prof. Waldemar Celes Filho

Departamento de Informática

PUC-Rio

Prof. Helio Cortês Vieira Lopes

Departamento de Informática

PUC-Rio

Prof. Pedro Mário Cruz e Silva

PUC-Rio

Prof. Cristina Nader Vasconcelos

Universidade Federal Fluminense

Prof. Marcos de Carvalho Machado

Petrobras

Prof. José Eugênio Leal

Coordenador do Centro Técnico Científico

PUC-Rio

Rio de Janeiro, 13 de Agosto de 2015

Todos os direitos reservados. Proibida a reprodução total ou parcial do trabalho sem autorização da universidade, do autor e do orientador.

Patrícia Cordeiro Pereira Pampanelli

Graduou-se em Tecnóloga em Desenvolvimento para Web pela Faculdade Vianna Júnior em 2007 e graduou-se em Bacharel em Ciência da Computação pela Universidade Federal de Juiz de Fora no ano de 2008. Tornou-se mestre em Modelagem Computacional pela Universidade Federal de Juiz de Fora em 2011.

Ficha Catalográfica

Pampanelli, Patrícia Cordeiro Pereira

Suavização de dados de amplitude através de difusão anisotrópica com preservação de feições sísmicas / Patrícia Cordeiro Pereira Pampanelli; orientador: Marcelo Gattass. — Rio de Janeiro : PUC-Rio, Departamento de Informática, 2015.

v., 95 f: il. ; 29,7 cm

1. Tese (Doutorado em Informática) - Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Informática.

Inclui referências bibliográficas.

1. Informática – Tese. 2. atributos sísmicos. 3. difusão anisotrópica. 4. tensor de difusão. 5. feições sísmicas. I. Gattass, Marcelo. II. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Informática. III. Título.

CDD: 004

Agradecimentos

Ao meu orientador, Marcelo Gattass, pelo crescimento profissional proporcionado durante todo o doutorado, pela confiança e apoio e pela excelente orientação durante toda a pesquisa. Ao Pedro Mário por todas as orientações, pela oportunidade de trabalhar em um ambiente dinâmico e criativo, além da paciência em transmitir os conhecimentos de geofísica.

Aos meus pais, Celina e Geraldo, pela educação, pela formação acadêmica excelente que sempre me proporcionaram, além do amor e apoio irrestritos. À minha irmã, Priscila, pela amizade, pelo carinho e por sempre acreditar em mim. A toda minha família por torcer por mim, em especial ao meu avô que foi sempre um grande exemplo pra mim.

Ao meu marido, Renato, por todo amor e companheirismo, pela paciência, pela compreensão e pelas muitas palavras de conforto durante toda a construção deste trabalho. À sua família por me receber sempre com muito carinho e torcerem pelo meu sucesso.

Aos colegas do Grupo de Geofísica Computacional por acompanharem de perto a minha evolução profissional, pelas ideias e pelas contribuições, especialmente à Geisa pelas inúmeras discussões produtivas e sugestões sempre relevantes e construtivas. À Eliana pela disponibilidade em ajudar com o método de rastreamento de horizontes. Aos colaboradores da Petrobras por todas as ideias e contribuições.

Aos meus amigos por compreenderem a minha ausência, celebrarem as minhas vitórias e estarem presentes nos momentos de descontração.

Ao CNPq, à PUC-Rio e à Petrobras pelos auxílios concedidos, sem os quais este trabalho não poderia ser feito.

A todos que estiveram presentes neste período de tanto crescimento e aprendizado.

Muito obrigada.

Resumo

Pampanelli, Patrícia Cordeiro Pereira; Gattass, Marcelo. **Suavização de dados de amplitude através de difusão anisotrópica com preservação de feições sísmicas**. Rio de Janeiro, 2015. 95p. Tese de Doutorado — Departamento de Informática, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

A interpretação sísmica consiste em um conjunto de metodologias que visam compreender o modelo estrutural e estratigráfico de uma determinada região. Durante este processo, o intérprete analisa a imagem sísmica buscando identificar estruturas geológicas como falhas, horizontes e canais, dentre outras. Dada a baixa razão sinal-ruído, os algoritmos que dão suporte à interpretação precisam de uma etapa de pré-processamento onde o ruído é reduzido. Esta tese propõe um novo método de filtragem por difusão anisotrópica que melhor preserva as feições sísmicas de interesse. A formulação do processo de difusão permite que os atributos identificadores de horizontes e de falhas sejam incorporados ao método a fim de evitar que estas estruturas sejam corrompidas durante a difusão da amplitude sísmica. O método proposto implementado apresenta resultados aplicados a dados reais disponíveis na literatura. Para estes resultados, é apresentada uma análise da influência do método de filtragem anisotrópica proposta nas medidas de correlação ao longo de horizontes previamente rastreados. Finalmente, a tese apresenta algumas conclusões e sugestões para trabalhos futuros.

Palavras-chave

atributos sísmicos; difusão anisotrópica; tensor de difusão; feições sísmicas.

Abstract

Pampanelli, Patrícia Cordeiro Pereira; Gattass, Marcelo (advisor). **Seismic amplitude smoothing by anisotropic diffusion preserving structural features**. Rio de Janeiro, 2015. 95p. Tese de Doutorado — Departamento de Informática, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Seismic interpretation can be viewed as a set of methodologies to enhance the understanding of the structural and stratigraphic model of a given region. During this process, the interpreter analyzes the seismic imaging seeking to identify geological structures such as faults, horizons and channels, among others. Given the low signal to noise ratio, the algorithms that support the interpretation require a pre-processing stage where the noise is reduced. This thesis proposes a new filtering method based on the anisotropic diffusion of the amplitude field. The formulation of the diffusion process proposed here uses seismic attributes to identify horizons and faults that are preserved in the diffusion process. The proposed method implemented in this thesis also presents results applied to real and synthetic data. Based on these results, we present an analysis of the influence of the proposed method in correlation measurements over horizons previously tracked. Finally the thesis presents some conclusions and suggestions for future work.

Keywords

seismic attributes; anisotropic diffusion; diffusion tensor; seismic features.

Sumário

1	Introdução	12
1.1	Definição do Problema	13
1.2	Motivação	14
1.3	Objetivos	15
1.4	Contribuições	16
1.5	Organização do Trabalho	17
2	Fundamentos de Atributos Sísmicos	18
2.1	Definições	18
2.2	Atributos Identificadores de Horizontes	20
2.3	Atributos de Falha	23
2.4	Filtragem por Difusão	42
3	Trabalhos Relacionados	44
3.1	Perona e Malik	44
3.2	Höcker e Fehmers	45
3.3	Dave Hale	46
3.4	Baddari <i>et al.</i>	47
3.5	Hastings	48
4	Método Proposto	50
4.1	Etapa 1 - Cálculo dos Atributos Associados às Feições Sísmicas	51
4.2	Etapa 2 - Filtragem Anisotrópica	54
5	Implementação e Resultados	59
5.1	Implementação da Equação de Difusão	59
5.2	Metodologia de Avaliação Qualitativa	61
5.3	Metodologia de Avaliação Quantitativa	76
6	Conclusões e Trabalhos Futuros	83
6.1	Base de Dados Pública	85
6.2	Trabalhos Futuros	85
	Referências Bibliográficas	87
A	<i>A New Fault-Enhancement Attribute Based on First Order Directional Derivatives of Complex Trace</i>	91

Lista de Figuras

1.1	Divisão dos processos de interpretação de dados sísmicos. A interpretação estrutural é composta pela interpretação de horizontes e de falhas.	12
1.2	Seção inline na posição 200 do dado de amplitude F3 Block obtido no repositório Open seismic repository (1). As setas em vermelho destacam duas regiões de falha deste dado sísmico. As setas em azul exemplificam regiões onde os horizontes são mais visíveis.	13
1.3	Seção horizontal na posição 404ms do dado de amplitude F3 Block obtido no repositório Open seismic repository (1). As setas em vermelho destacam duas regiões de falha.	13
2.1	Janela de amostras elíptica (esquerda) onde a e b representam os eixos maior e menor da elipse, respectivamente. Janela de amostras retangular (direita). Os eixos x e y representam as direções inline e crossline, respectivamente.	19
2.2	Exemplo de meia janela vertical para $K = 3$. Observe que, para o traço u mostrado nesta figura, a janela de análise h contém 7 amostras. O tamanho da janela de amostras varia de acordo com o cálculo de cada atributo sísmico.	20
2.3	Esquema ilustrando os vetores que representam o gradiente dos atributos identificadores de horizontes ∇O e o gradiente da amplitude ∇X ao longo do horizonte.	21
2.4	Janela de amostras para o cálculo do cubo de coerência. São utilizados três traços, sendo um traço de referência u_0 (laranja) e dois traços vizinhos, um na direção inline u_1 (vermelho) e o outro na direção crossline u_2 (verde).	25
2.5	Diferentes variações laterais do sinal sísmico. (2)	27
2.6	Janela de amostras utilizada para o cálculo do atributo de semelhança (<i>semblance</i>). Neste exemplo, é mostrada uma janela de amostras com o número de traços vizinhos J igual a 4, mas é importante salientar que o tamanho da janela de amostras pode variar.	28
2.7	Fatia de tempo mostrando o atributo de cubo de coerência. (3)	32
2.8	Fatia de tempo com o atributo de semelhança. (3)	32
2.9	Autoestrutura calculada para a mesma fatia de tempo mostrada nas duas figuras anteriores. (3)	33
2.10	Resultados das curvaturas máxima e mínima utilizando a fase instantânea como atributo identificador de horizontes (4).	36
2.11	Resultados das curvaturas máxima e mínima utilizando a derivada vertical como atributo identificador de horizontes (4).	37
2.12	Resultados das curvaturas máxima e mínima utilizando as cristas e vales como atributos identificadores de horizontes (4).	37
2.13	Seção vertical do dado de amplitude de entrada (5).	38

2.14	O atributo de cubo de coerência obtido para uma seção vertical (5).	38
2.15	O atributo de autoestrutura mostrado em uma seção vertical (5).	39
2.16	Resultado obtido para o método proposto para a coerência preditiva (5).	39
2.17	Operadores de primeira e segunda ordem para detecção de arestas	40
2.18	Variação de amplitude ao longo de um horizonte em um dado sintético (6).	42
3.1	A primeira imagem mostra uma impressão digital com bastante ruído. Na segunda imagem, é possível visualizar o campo vetorial desenhado sobre a impressão digital. Observe que a orientação deve respeitar as arestas das digitais (7).	48
4.1	Fluxograma que mostra uma visão geral do método proposto para filtragem anisotrópica de dados sísmicos. A etapa (1) consiste no cálculo dos atributos que identificam as feições sísmicas (horizontes e falhas). A etapa (2) utiliza estes atributos para aplicar o processo de difusão no dado sísmico de entrada, enquanto preserva os horizontes e as falhas. Estas duas etapas são repetidas até que o resultado seja considerado satisfatório de acordo com algum critério visual ou numérico.	51
4.2	Fluxograma com a descrição dos passos que compõem a primeira etapa do método proposto. Nesta etapa, são calculados os atributos que identificam os horizontes e as falhas do dado sísmico. Estes atributos são obtidos a partir do traço complexo $Z(t)$, composto pela parte real (amplitude $X(t)$) e a parte imaginária $Y(t)$. Esta última é calculada a através da transformada de Hilbert.	52
4.3	Fluxograma com o método proposto detalhando a etapa (2). Esta consiste na construção e aplicação do método proposto de filtragem anisotrópica no dado sísmico de entrada. Nesta etapa, são calculados o tensor de difusão e o fator de preservação de falhas, os quais utilizam os atributos calculados na etapa (1).	55
5.1	Conjunto de amostras (vermelho) rastreadas para um determinado horizonte sísmico na inline 580 do dado sísmico F3 Block (1). A seta em azul destaca uma região com uma falha bem evidente. Já o domo de sal é marcado pela seta em amarelo e um segundo conjunto de falhas é destacado pela seta em verde.	62
5.2	Resultados obtidos na inline 580, utilizando a amplitude (b) e a fase instantânea (c), como atributos de orientação. Algumas regiões de interesse são destacadas pelas setas coloridas. É mostrado em vermelho o horizonte sísmico rastreado e utilizado como referência para as medições de correlação.	65
5.3	Visões ampliadas: (a) amplitude de entrada da inline 580; (b) suavização anisotrópica orientada pela amplitude; (c) suavização anisotrópica orientada pela fase instantânea.	67
5.4	Dado sísmico da crossline 620.	68

5.5	Resultados obtidos na crossline 620, utilizando a amplitude (acima) e a fase instantânea (abaixo) como atributos de orientação. Algumas regiões de interesse são destacadas pelas setas coloridas. É mostrado em vermelho o horizonte sísmico rastreado e utilizado como referência para as medições de correlação.	69
5.6	Visões ampliadas da inline 580: (a) dado sísmico de entrada; (b) suavização anisotrópica sem o coeficiente de preservação de falhas ϵ ; (c) suavização anisotrópica com o coeficiente de preservação de falhas ϵ . Nas duas figuras (b-c) foi utilizada a fase instantânea como atributo de orientação.	71
5.7	Dado sísmico de entrada na crossline 720.	72
5.8	Resultados de 1(um) até 8(oito) passos do processo de filtragem anisotrópica orientada pela amplitude sísmica e com o coeficiente ϵ .	74
5.9	Resultados de 1(um) até 8(oito) passos do processo de filtragem anisotrópica orientada pela fase instantânea e com o coeficiente ϵ .	75
5.10	Gráfico com a medida de correlação total calculada entre amostras vizinhas. Este resultado foi gerado variando o número de passos do método de filtragem anisotrópica orientado pela fase instantânea e utilizando o coeficiente de preservação de falhas. Estas medidas foram extraídas ao longo do horizonte de referência na inline 240.	78
5.11	Número de erros de rastreamento de acordo com as abordagens da filtragem anisotrópica proposta e variando o número de iterações.	79
5.12	Gráfico com o tempo total de execução variando o tamanho das instâncias do problema.	82

*A mente que se abre a uma nova ideia, jamais
voltará ao seu tamanho original*

Albert Einstein.

Introdução

A interpretação sísmica consiste em um conjunto de metodologias que visam compreender o modelo estrutural e estratigráfico da geologia de uma determinada região. A Figura 1.1 apresenta um gráfico que ilustra a classificação dos processos de interpretação de dados sísmicos. A interpretação estratigráfica tem como principal objetivo avaliar os sistemas deposicionais de uma bacia. Já a interpretação estrutural visa estudar a disposição da geologia em subsuperfícies. A interpretação estrutural pode ser dividida entre o mapeamento de horizontes e de falhas.

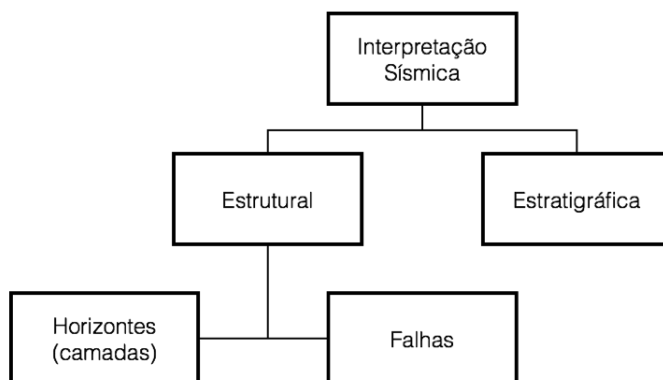


Figura 1.1: Divisão dos processos de interpretação de dados sísmicos. A interpretação estrutural é composta pela interpretação de horizontes e de falhas.

A interpretação de dados sísmicos pode ser feita tanto em seções verticais (Fig. 1.2) como em seções horizontais (Fig. 1.3). A escolha do tipo de visualização depende da tarefa que o intérprete pretende executar. É comum que a interpretação de horizontes seja feita em seções verticais, visto que estes têm uma tendência a serem mais horizontais. Portanto, os horizontes são mais bem visualizados através de cortes verticais do volume sísmico, como destacado pelas setas em azul na Figura 1.2. Por outro lado, as falhas, que são predominantemente verticais, geralmente ficam mais evidentes em seções horizontais, como destacado pelas setas em vermelho na Figura 1.3.

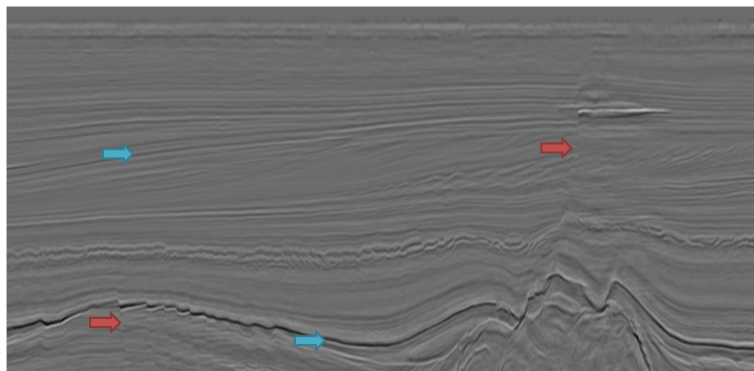


Figura 1.2: Seção inline na posição 200 do dado de amplitude F3 Block obtido no repositório Open seismic repository (1). As setas em vermelho destacam duas regiões de falha deste dado sísmico. As setas em azul exemplificam regiões onde os horizontes são mais visíveis.

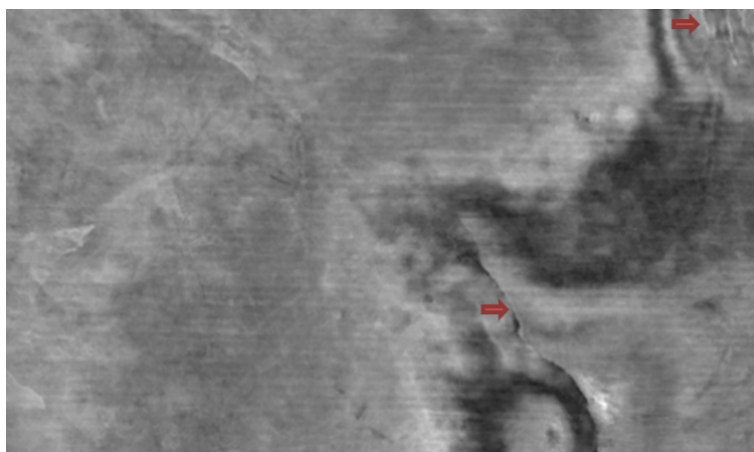


Figura 1.3: Seção horizontal na posição 404ms do dado de amplitude F3 Block obtido no repositório Open seismic repository (1). As setas em vermelho destacam duas regiões de falha.

1.1

Definição do Problema

A interpretação estrutural é fundamental para modelar a geologia de determinada região. Durante este processo, o intérprete analisa a imagem sísmica buscando identificar estruturas geológicas como falhas, horizontes e canais, dentre outras. Neste processo, o intérprete busca ferramentas para melhorar a visualização destas estruturas. São utilizados recursos como os atributos sísmicos, ou mesmo métodos de filtragem do dado sísmico para a remoção de ruídos. Em outras palavras, a qualidade do dado sísmico influencia diretamente o trabalho do intérprete.

O processo de interpretação estrutural é uma etapa bastante trabalhosa. A indústria tem buscado desenvolver métodos automáticos para identificação destas feições com o objetivo de reduzir o tempo deste processo. Estes métodos não visam substituir o trabalho do intérprete, visto que a experiência adquirida ao longo do tempo pelo profissional é de extrema importância. Contudo, estes métodos oferecem ao intérprete uma estrutura inicial da feição sísmica, permitindo que este trabalhe no ajuste fino do modelo.

A presença de ruído, inerente aos processos de aquisição, dificulta a identificação das feições sísmicas. Além disto, a presença de ruído pode tornar muito difícil, ou até inviabilizar, a aplicação de métodos automáticos ou semiautomáticos de rastreamento de horizontes e extração de falhas.

O processo de filtragem do dado sísmico é fundamental para a remoção do ruído, para o realce de estruturas relevantes e, por consequência, para a melhora na visualização da imagem sísmica. Contudo, é essencial que as feições sísmicas sejam preservadas durante o processamento. Em outras palavras, não é recomendável aplicar um filtro que, junto com a remoção do ruído, destrua as informações de falhas e de horizontes do dado sísmico.

O método proposto neste trabalho visa filtrar o dado sísmico, preservando as feições sísmicas. São utilizados atributos capazes de representar estas feições para que as informações associadas aos horizontes e às falhas não sejam perdidas durante o processamento. A preservação destas feições é o requisito principal do método proposto.

1.2 Motivação

O processo de interpretação de falhas e de horizontes é uma etapa importante no mapeamento estrutural. A localização destas feições sísmicas é fundamental para conhecer o sistema geológico de uma região. Este processo de interpretação estrutural é essencial para a modelagem e para a caracterização de reservatórios. Nesta etapa, o intérprete busca identificar as estruturas de falha em seções sísmicas 2D. Além disto, através de métodos de geração de malhas e de interpolação, é possível obter as superfícies que representam estas feições sísmicas.

Contudo, este fluxo de interpretação sísmica representa um processo trabalhoso e dependente do treinamento e da experiência do intérprete. O alto custo associado à interpretação estrutural, além da demanda crescente da indústria, são fatores que motivam diversos pesquisadores a buscarem atributos que realcem as falhas, representem bem os horizontes e, por consequência, dêem

suporte a estes processos.

A distribuição cronológica das pesquisas sobre os atributos sísmicos mostra que a partir dos anos 90 foram propostos diversos atributos sísmicos em um curto período de tempo (8). Nesta mesma época, a indústria intensificou o uso de dados sísmicos 3D, ao invés dos dados 2D que eram essencialmente limitados às seções verticais. Os dados sísmicos 3D são considerados como um grande avanço para a indústria de óleo e gás. Neste contexto, o uso de atributos sísmicos tornou-se fundamental para o fluxo de trabalho dos intérpretes, diante do aumento no volume de dados a serem analisados.

Diversos atributos de falha propostos na literatura, como o cubo de coerência (9), a semelhança (*semblance*) (10), a autoestrutura (*eigenstructure*) (3) e a variância (11) são calculados tendo como base a coerência entre os traços. Já outros atributos baseados em métodos de processamento de imagens (12) analisam o dado sísmico do ponto de vista da detecção de arestas. Contudo, os resultados destes atributos mostram que estes ainda são muito suscetíveis ao ruído de aquisição (*footprint*) e pouco robustos. Além disso, a maioria dos atributos utiliza um método com alto custo computacional para obter a orientação, conhecido como *dip scan*. Em função disto, a pesquisa para realçar as feições sísmicas de forma coerente é um problema relevante para a indústria de óleo e gás.

A avaliação quantitativa do processo de filtragem do dado sísmico ainda é um problema em aberto. Muitos trabalhos apresentam resultados que não podem ser reproduzidos nem avaliados de forma qualitativa, prejudicando o avanço das pesquisas nesta área. Somente agora encontram-se disponíveis alguns dados públicos de levantamentos sísmicos. Entretanto, a organização destes dados, juntamente com uma metodologia objetiva de avaliação, ainda é deficiente.

1.3

Objetivos

O principal objetivo deste trabalho é propor um método de filtragem de dados sísmicos preservando as feições sísmicas, como horizontes e falhas. O método proposto dá suporte ao trabalho do intérprete no processo de inferência e identificação das características geológicas de interesse, acelerando o processo de interpretação sísmica.

Os critérios importantes que devem ser avaliados neste processo são: consequência da filtragem no dado sísmico nos processos de rastreamento, critério utilizado para a orientação, importância da preservação de falhas e

horizontes, custo computacional, possibilidade de controle do nível de detalhe (multirresolução) e o aumento da correlação ao longo dos horizontes.

Adicionalmente, o dado sísmico resultante do processamento proposto neste trabalho pode ser fornecido como entrada para métodos de realce (13) e extração automática de falhas (14). Além de auxiliar a interpretação de feições sísmicas, a filtragem do dado sísmico pode melhorar o resultado de diversos outros atributos, como a curvatura, a variância e o cubo de coerência, dentre outros.

O segundo objetivo deste trabalho é estudar e propor métricas de avaliação da filtragem do dado sísmico. Pretende-se ainda criar uma base de dados pública procurando fomentar a avaliação do método proposto com relação aos demais atributos. Esta base de dados deve permitir uma discussão mais objetiva no meio acadêmico e científico, servindo de referência para outros trabalhos.

1.4

Contribuições

Como principais contribuições deste trabalho, pode-se citar:

- Desenvolvimento de um novo método de filtragem anisotrópica diretamente baseado nas equações de difusão e utilizando a fase instantânea, como atributo identificador de horizontes, e a primeira derivada direcional do traço complexo, como atributo de falha. Estes atributos são utilizados com objetivo de preservar estas estruturas durante o processamento do dado sísmico. As vantagens deste método incluem:
 - ser um método automático de filtragem com restrições, sendo estas extraídas do próprio dado sísmico. O usuário não precisa definir restrições para os horizontes e as falhas do dado sísmico.
 - ser facilmente utilizável, sendo necessário um conjunto bastante restrito de parâmetros para execução do método proposto.
- Além do método de filtragem anisotrópica, um novo atributo de falha, baseado na primeira derivada direcional do traço complexo, também foi desenvolvido durante esta pesquisa. Mais detalhes sobre este atributo de falha proposto estão incluídos no apêndice deste trabalho.

Assim, também são contribuições secundárias deste trabalho:

- Organização de uma base de dados com os dados utilizados para o desenvolvimento e para a avaliação do trabalho proposto. Esta base inclui o dado sísmico apresentado nos resultados, assim como os horizontes previamente rastreados utilizados para a avaliação quantitativa. Estes dados estão disponíveis no link: <http://webserver2.tecgraf.puc-rio.br/seismic>;

1.5

Organização do Trabalho

O documento desta tese está organizado conforme descrito a seguir. No Capítulo 1 é apresentado o contexto no qual este trabalho está inserido, além das motivações para esta pesquisa, definição do problema, os objetivos e as principais contribuições deste trabalho. Em seguida, no Capítulo 2 são apresentados os fundamentos teóricos necessários para o entendimento da metodologia proposta. Já o Capítulo 3 apresenta uma breve descrição dos trabalhos relacionados. No Capítulo 4 é descrita a metodologia para filtragem de dados sísmicos com preservação de feições sísmicas. O Capítulo 5 apresenta a descrição da implementação desenvolvida, assim como os resultados e as avaliações, quantitativa e qualitativa, do método proposto. Por fim, no Capítulo 6 são apresentadas as conclusões obtidas a partir desta pesquisa, assim como sugestões de trabalhos futuros.

Fundamentos de Atributos Sísmicos

Para o melhor entendimento deste trabalho são apresentados alguns conceitos relacionados aos atributos sísmicos. Além disto, é fundamental definir a nomenclatura que será utilizada tanto para descrever matematicamente os atributos sísmicos, como também para apresentar o método proposto. Portanto, este capítulo tem como objetivo principal fornecer os fundamentos necessários para a compreensão deste trabalho. Dentre os fundamentos deste trabalho estão alguns conceitos sobre dados sísmicos, como traço e amostras, os atributos capazes de representar de forma consistente as feições sísmicas (horizontes e falhas) e o processo de filtragem utilizando as equações de difusão.

Na Seção 2.1.1 são apresentados conceitos relacionados ao acesso e à referenciação das amostras no volume sísmico. Já na Seção 2.2 são descritos os atributos identificadores de horizontes e, em seguida, na Seção 2.3 são apresentados alguns dos atributos de falha conhecidos na literatura. Por fim, é apresentada a suavização através das equações de difusão na Seção 2.4.

2.1

Definições

Nesta seção são apresentados os conceitos da janela de amostra e da meia janela vertical, ambos importantes para o entendimento dos atributos de falha descritos neste capítulo.

2.1.1

Janela de amostras

Uma janela de amostras, em 3D, pode ser representada por um elipsóide ou um paralelogramo, conforme ilustrado com uma vista de topo do volume na Figura 2.1. Portanto, a janela de amostras contém J traços ao redor do ponto de análise.

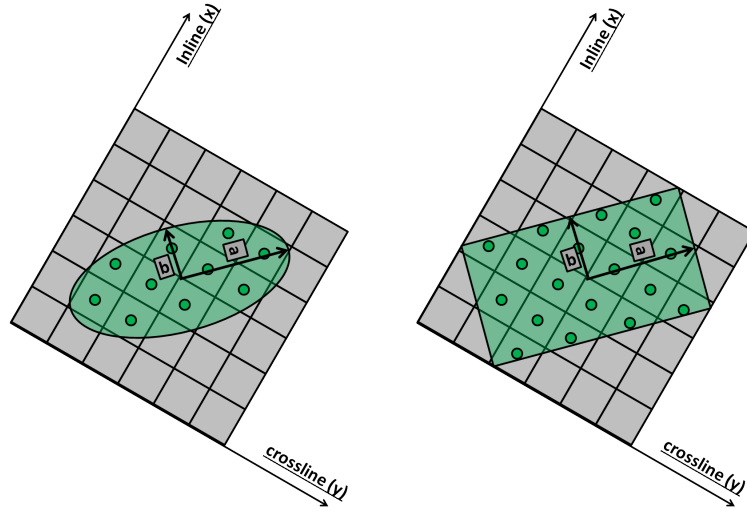


Figura 2.1: Janela de amostras elíptica (esquerda) onde a e b representam os eixos maior e menor da elipse, respectivamente. Janela de amostras retangular (direita). Os eixos x e y representam as direções inline e crossline, respectivamente.

2.1.2

Meia janela vertical

A meia janela vertical representa o número de amostras contido na metade da janela de análise de um dado traço. Supondo uma meia janela de tamanho K , tem-se que, para um traço, a janela de análise h contém $2K + 1$ amostras, conforme ilustrado na Figura 2.2.

Observa-se que o eixo do tempo t cresce de cima para baixo. Esta é uma convenção adotada para os dados sísmicos de modo geral. Adicionalmente, um voxel do traço sísmico pode ser acessado da forma $u(t, x_i, y_i)$.

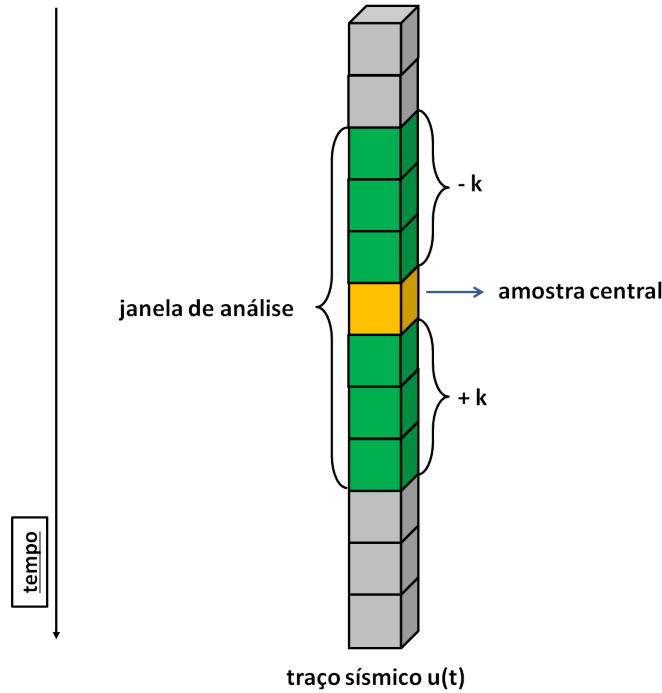


Figura 2.2: Exemplo de meia janela vertical para $K = 3$. Observe que, para o traço u mostrado nesta figura, a janela de análise h contém 7 amostras. O tamanho da janela de amostras varia de acordo com o cálculo de cada atributo sísmico.

2.2

Atributos Identificadores de Horizontes

Os atributos sísmicos capazes de identificar os horizontes são fundamentais para diversas aplicações. Estes atributos foram apresentados por Silva *et al.* (15). Os atributos que fazem parte desta classe são aqueles nos quais os horizontes são representados como superfícies de nível, ou seja, o valor do atributo é constante ao longo dos horizontes. Fato que não ocorre com o atributo de amplitude. Esta característica desta classe de atributos permite, por exemplo, calcular as normais de um horizonte de forma consistente. Os autores propõem três atributos identificadores de horizontes: a derivada vertical do traço sísmico, a fase instantânea e o detector de cristas (*ridges*) e vales (*valleys*). Estes três atributos são descritos nas seções a seguir. Os atributos identificadores de horizontes serão referenciados de forma genérica como O nas demais seções deste trabalho.

A Figura 2.3 ilustra o gradiente do atributo identificador de horizontes ∇O e o gradiente da amplitude ∇X . Observe que o gradiente da amplitude varia ao longo dos horizontes impedindo que este seja usado para representar de forma coerente a orientação do horizonte. Esta variação fica evidente ao

analisar que, diferentemente do gradiente ∇O , o gradiente da amplitude ∇X não é exatamente perpendicular ao horizonte.

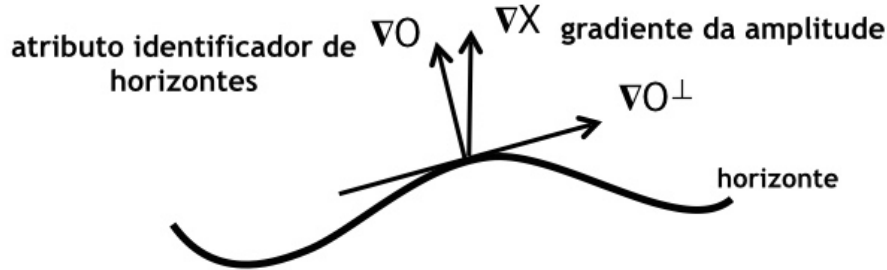


Figura 2.3: Esquema ilustrando os vetores que representam o gradiente dos atributos identificadores de horizontes ∇O e o gradiente da amplitude ∇X ao longo do horizonte.

2.2.1

Derivada Vertical do Traço Sísmico

Os horizontes sísmicos coincidem com os valores máximos e mínimos de amplitude ao longo do traço sísmico. A derivada vertical, proposta como atributo identificador de horizontes, consiste na diferenciação ao longo de um traço sísmico. Desta forma, quando a derivada vertical V é calculada para o traço sísmico (Eq. 2-1), os horizontes são representados pelas regiões onde a derivada é igual à zero. Portanto, a derivada vertical é capaz de identificar os horizontes sísmicos como superfícies de nível, atendendo assim o requisito básico para que um atributo sísmico seja um atributo identificador de horizontes.

$$V = \frac{\partial u}{\partial t} \quad (2-1)$$

2.2.2

Fase Instantânea

O trabalho proposto por Taner *et al.* (16) afirma que a fase instantânea Φ é amplamente utilizada devido a sua continuidade lateral. Este atributo identificador de horizontes é obtido a partir do traço complexo $Z(t)$ (Eq. 2-2). O traço complexo é formado pela parte real, a amplitude X , e a parte imaginária Y , que corresponde ao resultado da transformada de Hilbert. O trabalho desenvolvido por Silva (6) utiliza o atributo de fase instantânea para

o cálculo das normais dos horizontes e para visualização volumétrica, já que a amplitude varia ao longo dos horizontes. Desta forma, o autor mostra que a utilização da amplitude resulta em um campo de normais que não é coerente com os horizontes sísmicos.

$$Z(t) = X(t) + iY(t) \quad (2-2)$$

A Equação 2-3 descreve o atributo de fase instantânea Φ . Observe que este é obtido através do arco tangente da razão entre a parte complexa e a parte real do traço complexo.

$$\Phi(x, y, t) = \arctan\left(\frac{Y(x, y, t)}{X(x, y, t)}\right) \quad (2-3)$$

onde X representa o atributo de amplitude sísmica e Y representa o resultado da transformada de Hilbert aplicada traço a traço no volume sísmico.

É importante ressaltar que a fase instantânea é descontínua em $-\pi$ e π . Portanto, não se pode calcular o gradiente deste atributo através de diferenças finitas, por exemplo. Uma solução é calcular a fase desenrolada, que é contínua, a partir da fase instantânea. Outra solução, adotada neste trabalho, é fazer o cálculo do gradiente da fase de forma analítica. As equações para o cálculo analítico do gradiente da fase instantânea são:

$$[\nabla\Phi] = \left(\frac{\partial\Phi}{\partial x}, \frac{\partial\Phi}{\partial y}, \frac{\partial\Phi}{\partial t}\right) \quad (2-4)$$

$$\frac{\partial\Phi}{\partial x} = \frac{1}{X^2 + Y^2} \left(X \frac{\partial Y}{\partial x} - Y \frac{\partial X}{\partial x}\right) \quad (2-5)$$

$$\frac{\partial\Phi}{\partial y} = \frac{1}{X^2 + Y^2} \left(X \frac{\partial Y}{\partial y} - Y \frac{\partial X}{\partial y}\right) \quad (2-6)$$

$$\frac{\partial\Phi}{\partial t} = \frac{1}{X^2 + Y^2} \left(X \frac{\partial Y}{\partial t} - Y \frac{\partial X}{\partial t}\right) \quad (2-7)$$

A parcela $X^2 + Y^2$ corresponde ao atributo de envelope. Este termo pode ser omitido no cálculo do gradiente quando o campo vetorial resultante

é normalizado.

2.2.3

Detector de Cristas e Vales

O atributo detector de cristas (*ridges*) e vales (*valleys*) é descrito como atributo identificador de horizonte no trabalho de Martins (17). Esta técnica para detecção de máximos e mínimos é comumente utilizada em processamento de imagens. Para os dados sísmicos, as cristas podem ser vistas como regiões de máximo local e, analogamente, os vales são regiões de mínimos locais. Como dito anteriormente, os horizontes correspondem aos máximos e mínimos de amplitude ao longo do traço sísmico. Desta forma, o atributo capaz de detectar estes picos de amplitude pode representar um horizonte sísmico como uma superfície de nível. O atributo capaz de detectar cristas e vales proposto por Martins é baseado no trabalho do Lindeberg (18).

2.3

Atributos de Falha

Na literatura existem diversos atributos sísmicos que visam destacar as regiões de falhas. Esta seção apresenta uma breve descrição dos principais atributos sísmicos, assim como a descrição de como as linhas de pesquisa envolvendo estes atributos evoluíram ao longo das últimas décadas. Os atributos descritos nesta seção também são amplamente utilizados como referência na análise de resultados em trabalhos científicos. A Tabela 2.1 apresenta oito linhas de pesquisa sobre atributos sísmicos para visualização, realce e extração de falhas organizadas em ordem cronológica.

Ano	Atributo	Principal referência
1994	Curvatura sobre horizontes	(19)
1995	Cubo de coerência	(9)
1996	Detecção de arestas	(12)
1998	Semelhança (<i>Semblance</i>)	(10)
1998	Curvatura volumétrica	(20)
1999	Autoestrutura (<i>Eigenstructure</i>)	(3)
2000	Cubo de variância	(11)
2013	Coerência preditiva	(5)

Tabela 2.1: Linha do tempo com os principais atributos sísmicos de falhas. Ao lado de cada linha de pesquisa foi colocada a referência para o principal trabalho envolvendo o respectivo atributo.

Existem três abordagens diferentes para a avaliação do dado sísmico baseadas em medidas de coerência entre os traços. Apesar de terem sido propostos há bastante tempo, estes atributos ainda são amplamente utilizados para visualização de falhas e outras características estratigráficas. Os atributos de cubo de coerência por correlação cruzada, semelhança e a autoestrutura são conhecidos na literatura como as três gerações de atributos de coerência (5). As três seções a seguir descrevem estas linhas de pesquisa e em seguida são apresentadas as demais abordagens.

2.3.1

Cubo de Coerência

Originalmente, o atributo conhecido como cubo de coerência, foi proposto por Bahorich e Farmer (9) na década de 90 e faz parte da primeira geração dos atributos de coerência para dados sísmicos. O mesmo é baseado no cálculo clássico de correlação cruzada. A equação a seguir apresenta o cálculo clássico da correlação cruzada normalizada entre as funções $f(x)$ e $g(x)$ definidas numa partição:

$$\rho = \frac{1}{N} \sum_{x=0}^N \frac{(f(x) - \mu_f)(g(x) - \mu_g)}{\sigma_f \sigma_g} \quad (2-8)$$

onde N representa o número de amostras, μ_f e μ_g são as médias de f e g , respectivamente. O desvio padrão é dado por:

$$\sigma_f = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{x=0}^N (f(x) - \mu_f)^2} \quad (2-9)$$

onde μ_f é:

$$\mu_f = \frac{1}{N} \sum_{x=0}^N f(x) \quad (2-10)$$

A versão mais simples do cálculo do cubo de coerência para um determinado traço do volume considera um traço de referência u_0 e mais dois traços vizinhos nas direções inline u_1 (vermelho) e crossline u_2 (verde), como apresentado na figura a seguir:

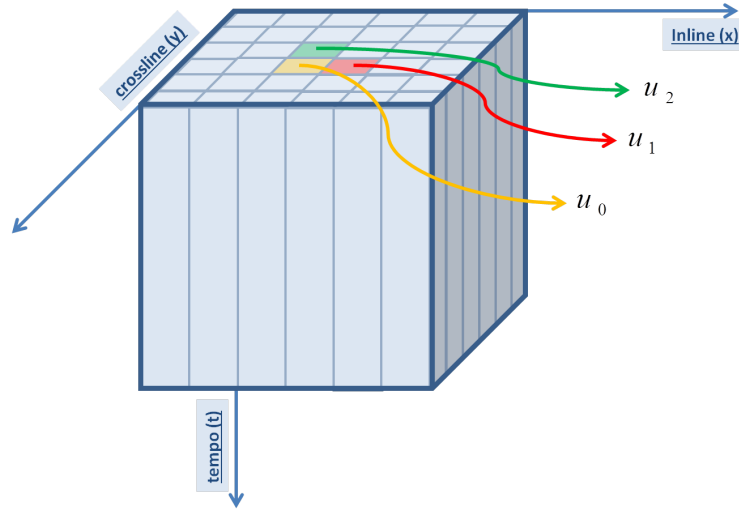


Figura 2.4: Janela de amostras para o cálculo do cubo de coerência. São utilizados três traços, sendo um traço de referência u_0 (laranja) e dois traços vizinhos, um na direção inline u_1 (vermelho) e o outro na direção crossline u_2 (verde).

De acordo com a notação apresentada na Seção 2.1 e reescrevendo a equação clássica da correlação cruzada (Eq. 2-9) em função dos traços sísmicos, tem-se que a correlação cruzada normalizada ρ_x para a direção inline (x), com um deslocamento τ_x na janela de análise, é dada por:

$$\rho_x(t, \tau_x) = \frac{\sum_{k=-K}^{+K} ([u_0(t + k\Delta t) - \mu_0(t)] [u_1(t + k\Delta t - \tau_x) - \mu_1(t - \tau_x)])}{\sigma_0 \sigma_1} \quad (2-11)$$

onde:

$$\sigma_n = \sqrt{\frac{1}{2K+1} \sum_{k=-K}^{+K} (u_n(t + k\Delta t) - \mu_n(t))^2} \quad (2-12)$$

$$\mu_n = \frac{1}{2K+1} \sum_{k=-K}^{+K} u_n(t + k\Delta t) \quad (2-13)$$

Aplicando o mesmo na direção crossline (y), tem-se que a correlação cruzada normalizada ρ_y calculada entre os traços u_0 e u_2 é dada por:

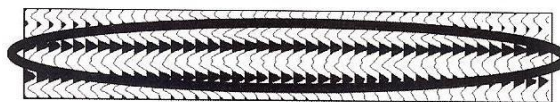
$$\rho_y(t, \tau_y) = \frac{\sum_{k=-K}^{+K} ([u_0(t + k\Delta t) - \mu_0(t)] [u_2(t + k\Delta t - \tau_y) - \mu_2(t - \tau_y)])}{\sigma_0 \sigma_2} \quad (2-14)$$

Dentre as $2K + 1$ amostras da janela de análise, é obtido o máximo da correlação cruzada $\rho(t, \tau, x_i, y_i)$ entre a amostra de referência (x_i, y_i) e as amostras no traço vizinho. O valor final da correlação cruzada c_{xy} num tempo t , com uma janela de τ_x e τ_y em (x_i, y_i) , é dado pela média geométrica entre o valor máximo da correlação nas direções inline (x) e crossline (y):

$$c_{xy} = \sqrt{(max_{\tau_x} \rho_x(t, \tau_x, x_i, y_i)) (max_{\tau_y} \rho_y(t, \tau_y, x_i, y_i))} \quad (2-15)$$

Esta primeira linha de pesquisa baseada em cálculos de coerência consiste em avaliar a relação de semelhança entre os traços sísmicos. Esta medida leva em consideração o fato de que são observadas grandes variações laterais do sinal nas regiões onde encontram-se as falhas. Em contrapartida, fora das regiões de falha o sinal sísmico apresenta alta coerência. A sensibilidade da medida de correlação cruzada à estas variações do sinal faz com que o atributo seja útil para a visualização de falhas em dados sísmicos.

A Figura a seguir ilustra esta variação em quatro situações distintas. As Figuras 2.5(a) e 2.5(b) mostram uma alta correlação ao longo dos horizontes, sendo que somente a segunda apresenta algum mergulho. Por outro lado, as duas últimas mostram uma baixa correlação e, no caso da última figura, apresenta mergulho.



2.5(a): Alta coerência lateral do sinal com pouco mergulho.



2.5(b): Alta coerência lateral do sinal na presença de mergulho.



2.5(c): Baixa coerência lateral com pouco mergulho.



2.5(d): Baixa coerência lateral na presença de mergulho.

Figura 2.5: Diferentes variações laterais do sinal sísmico. (2)

2.3.2

Semelhança (*Semblance*)

A segunda geração dos atributos de coerência teve início com a proposta de Marfurt *et al.* (10) para o atributo de semelhança. O primeiro passo para o cálculo da semelhança é a definição de uma janela de amostras. Ao contrário do cálculo do cubo de coerência, essa janela pode conter um número variável de traços. A Figura 2.6 apresenta uma janela com o número de traços vizinhos J igual à 4:

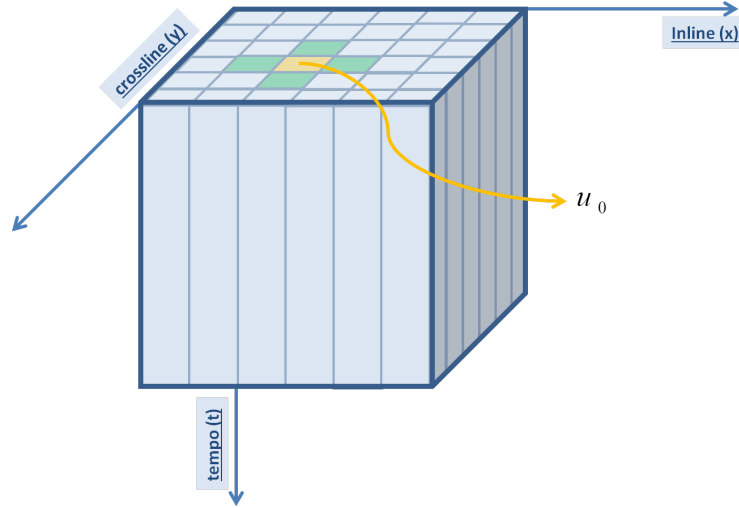


Figura 2.6: Janela de amostras utilizada para o cálculo do atributo de semelhança (*semblance*). Neste exemplo, é mostrada uma janela de amostras com o número de traços vizinhos J igual a 4, mas é importante salientar que o tamanho da janela de amostras pode variar.

O cálculo do atributo de semelhança considera como entrada, além do dado sísmico, a orientação definida pelo mergulho aparente. A Equação 2-16 mostra a definição matemática do atributo de semelhança, dado por $\sigma(t, x_0, y_0, p, q)$, como sendo a razão entre o quadrado da média do traço sísmico e a média do traço sísmico ao quadrado.

$$\sigma(t, x_0, y_0, p, q) = \frac{\left[\frac{1}{J} \sum_{j=1}^J u_j(t - p\Delta x_j - q\Delta y_j) \right]^2}{\frac{1}{J} \sum_{j=1}^J [u_j(t - p\Delta x_j - q\Delta y_j)]^2} \quad (2-16)$$

onde Δx_j e Δy_j representam as distâncias do j -ésimo traço com relação ao traço de referência, J é o número de traços da janela de amostras e t representa uma amostra do traço sísmico. O mergulho aparente p (inline) e q (crossline) são definidos por:

$$p = 2 \tan \left(\frac{\theta_x}{v} \right) \quad (2-17)$$

$$q = 2 \tan \left(\frac{\theta_y}{v} \right) \quad (2-18)$$

onde θ_x e θ_y são os ângulos de mergulho nas direções inline e crossline, respectivamente, e v é uma constante de velocidade.

Uma das motivações do atributo de semelhança é melhorar a resolução vertical com relação ao atributo do cubo de coerência. Contudo, o cálculo dado pela Equação 2-16 é bastante sensível à presença de ruído. Por conta disto, o valor final da coerência é calculado através da média das medidas de semelhança para uma janela de análise com $2K+1$ amostras, como mostrado na Equação 2-19. O aumento no número de amostras na vertical permite melhorar a resolução nesta direção, além de capturar melhor as variações laterais do sinal sísmico e, conseqüentemente, melhorando a visualização das falhas. Além disso, diferentemente do cubo de coerência, este atributo considera em sua formulação um número arbitrário J de traços vizinhos.

$$c_s(t, x_0, y_0, p, q) = \frac{\sum_{k=-K}^K \left[\frac{1}{J} \sum_{j=1}^J u_j(t + k\Delta t - p\Delta x_j - q\Delta y_j) \right]^2}{\frac{1}{J} \sum_{k=-K}^K \left[\sum_{j=1}^J [u_j(t + k\Delta t - p\Delta x_j - q\Delta y_j)]^2 \right]} \quad (2-19)$$

onde Δt representa a variação em tempo entre as amostras $u(t)$ no traço sísmico.

O atributo de semelhança pode ser generalizado para qualquer processo de filtragem. Neste sentido, o trabalho desenvolvido por Dave Hale (21) descreve uma forma modificada do método de filtragem por difusão anisotrópica desenvolvido por Höcker e Fehmers (22), (23). O tensor de estrutura do gradiente da amplitude é utilizado com objetivo de orientar o método de filtragem. Logo, o atributo de semelhança é calculado a partir do processo de filtragem anisotrópica. Além disto, é apresentada uma generalização para a Equação 2-19.

2.3.3 Autoestrutura (Eigenstructure)

A terceira geração dos atributos de coerência consiste na decomposição da matriz de covariância para a análise dos auto-valores. O trabalho desenvolvido por Gersztenkorn e Marfurt (3), que propõe o atributo de autoestrutura, apresenta uma análise comparativa dos resultados do atributo de autoestrutura com relação ao atributo de semelhança. Nesta análise observa-se que a matriz de covariância permite uma distinção entre sinal e ruído, apresentando resultados mais robustos. De forma similar ao atributo de semelhança, o número de traços (Eq. 2-20) é variável, como mostrado na Figura 2.6.

Primeiramente, é montada uma matriz de dados $[D]$, onde são armazenadas as informações dos J traços pertencentes a janela de amostras e as $2K+1$ amostras da janela de análise h , como mostrado na Equação 2-20.

$$[D] = \begin{bmatrix} u_{(-K)1} & u_{(-K)2} & \cdots & u_{(-K)J} \\ u_{(-K+1)1} & u_{(-K+1)2} & \cdots & u_{(-K+1)J} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ u_{K1} & u_{K2} & \cdots & u_{KJ} \end{bmatrix} \quad (2-20)$$

onde $u_{kj} = u_j(t + k\Delta t)$ representa cada elemento da matriz $[D]$.

A matriz de covariância é obtida a partir desta matriz de dados (Eq. 2-21). A matriz de covariância $[C]$ é simétrica, positiva e semi-definida com auto-valores positivos e maiores ou iguais à zero.

$$[C] = [D]^T [D] \quad (2-21)$$

A definição de coerência a partir da autoestrutura utiliza o traço $Tr([C])$ e é definida pela Equação 2-22.

$$c_e = \frac{\lambda_1}{Tr([C])} = \frac{\lambda_1}{\sum_{j=1}^J c_{jj}} = \frac{\lambda_1}{\sum_{j=1}^J \lambda_j} \quad (2-22)$$

onde λ_1 é o maior auto-valor.

O trabalho desenvolvido posteriormente por Marfurt *et al.* (24) sugere uma modificação no cálculo do atributo de autoestrutura, visto que a proposta original para este atributo não levava em consideração as medidas de orientação. De acordo com os autores, a precisão no cálculo do mergulho está diretamente associada à detecção da maior variação do sinal, representando as falhas com mais qualidade e melhorando a resolução lateral do atributo. Para incluir a orientação no cálculo do atributo, cada elemento da matriz de dados é reescrito da seguinte forma:

$$u_{kj} = u_j(t + k\Delta t - px_j - qy_j) \quad (2-23)$$

onde p e q representam o mergulho aparente nas direções inline e crossline, respectivamente, e x_j e y_j são a posição do traço u no volume sísmico.

Por fim, o atributo de autoestrutura, considerando o mergulho aparente, é dado pelos autovalores da matriz de covariância calculada aplicando a orientação, como mostrado na Equação 2-23.

O atributo de autoestrutura ainda apresenta um alto custo

computacional. Recentemente, foi proposto um método com objetivo de aumentar a eficiência computacional no cálculo do atributo de autoestrutura (25). Os autores tiram proveito da coerência espacial afim de otimizar a montagem da matriz de covariância, parte do método bastante custosa. Além disso, para a busca do maior auto-valor, é utilizado o método das potências.

Análise Comparativa dos Atributos de Coerência

Nas seções anteriores foram apresentados os atributos considerados na literatura como as três gerações de coerência. Um aspecto importante que diferencia esses atributos é que o cubo de coerência e a autoestrutura, nas propostas originais dos atributos, não levam em consideração o mergulho aparente p e q , ao contrário do atributo de semelhança.

Nas Figuras 2.7, 2.8 e 2.9 são mostrados resultados comparativos entre as três gerações dos atributos de coerência apresentados anteriormente (cubo de coerência, semelhança e autoestrutura). Os resultados mostram que, no caso do cubo de coerência (Fig. 2.7), existe uma grande quantidade de ruído, o que dificulta a visualização de alguns detalhes presentes no dado sísmico. Por outro lado, o atributo de semelhança (Fig. 2.8) apresenta uma imagem menos ruidosa. Contudo, junto com a redução do ruído e, por consequência, a suavização do atributo, muitas das informações relevantes da sísmica são perdidas. Por último, observando o resultado da autoestrutura mostrado na Figura 2.9 fica evidente a melhoria no nível de detalhe do atributo com relação às duas gerações anteriores de atributos de coerência. Em outras palavras, as características geológicas e estruturais da região são identificadas com mais clareza. No entanto, dois aspectos podem dificultar a utilização deste atributo na prática: o alto custo computacional (25), como citado anteriormente, e a dependência do atributo com relação à precisão no cálculo do mergulho (24).



Figura 2.7: Fatia de tempo mostrando o atributo de cubo de coerência. (3)

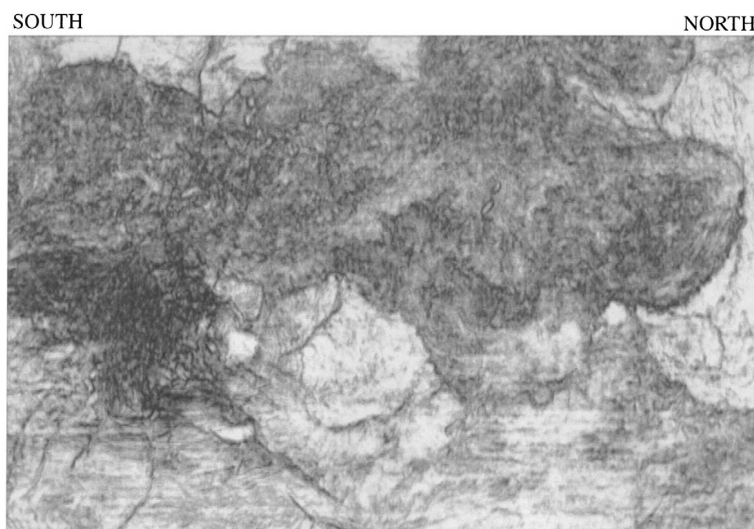


Figura 2.8: Fatia de tempo com o atributo de semelhança. (3)

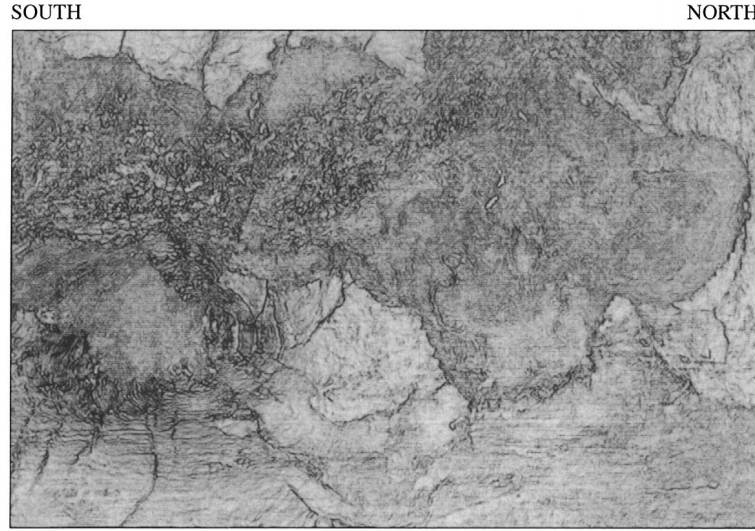


Figura 2.9: Autoestrutura calculada para a mesma fatia de tempo mostrada nas duas figuras anteriores. (3)

Além disto, nos três atributos de coerência, é possível observar a presença do ruído de aquisição, mais visível na parte de baixo da imagem. Esse ruído aparece como padrões horizontais que não representam nenhuma estrutura geológica e tem origem no processo de aquisição da imagem sísmica.

2.3.4

Cubo de Variância

O atributo conhecido como cubo de variância é bastante utilizado para a visualização e extração de falhas em dados sísmicos (11). O atributo é definido pelo cálculo estatístico clássico da variância, como mostrado na Equação 2-24.

$$var = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (y_i - \mu)^2 \quad (2-24)$$

Reescrevendo o Equação 2-24 utilizando a notação descrita anteriormente, tem-se que o cálculo da variância $var(t, p, q)$, onde t representa a amostra no traço sísmico e p e q representam o mergulho aparente nas direções inline e crossline, respectivamente, é dado por:

$$var(t, x_0, y_0, p, q) = \frac{1}{J} \sum_{j=1}^J [u_j(t - p\Delta x_j - q\Delta y_j) - \mu(t, p, q)]^2 \quad (2-25)$$

A variância é calculada de forma mais eficiente com a seguinte formulação (2):

$$\begin{aligned} var(t, x_0, y_0, p, q) = & \frac{1}{J} \sum_{j=1}^J [u(t - p\Delta x_j - q\Delta y_j, x_j, y_j)]^2 - \\ & - \left[\frac{1}{J} \sum_{j=1}^J u(t - p\Delta x_j - q\Delta y_j, x_j, y_j) \right]^2 \end{aligned} \quad (2-26)$$

A medida de coerência a partir da variância é calculada utilizando $2k + 1$ amostras e normalizada pela energia de todos os traços:

$$c_v(t, x_0, y_0, p, q) = \frac{\sum_{k=-K}^{+K} var_k(t, x_0, y_0, p, q)}{\sum_{k=-K}^{+K} \sum_{j=1}^J [u_j(t + k\Delta t - p\Delta x_j - q\Delta y_j)]^2} \quad (2-27)$$

Observando a definição matemática do atributo de semelhança (Eq. 2-19) e comparando com a definição da variância, apresentada na Equação 2-27, pode-se concluir que existe uma relação matemática entre estes dois atributos (2), ou seja, a variância é escrita como sendo 1 (um) menos o valor da medida de semelhança:

$$c_v(t, x_0, y_0, p, q) = 1 - \frac{\sum_{k=-K}^{+K} \left[\frac{1}{J} \sum_{j=1}^J u_j(t + k\Delta t - p\Delta x_j - q\Delta y_j) \right]^2}{\sum_{k=-K}^{+K} \frac{1}{J} \sum_{j=1}^J [u_j(t + k\Delta t - p\Delta x_j - q\Delta y_j)]^2} = 1 - c_s \quad (2-28)$$

O cálculo da variância (Eq. 2-27) pode ser generalizado para a norma $\|f(x)\|^r$, como mostrado na Equação 2-29. Alguns trabalhos utilizam a norma de Manhattan ($r = 1$):

$$c_v(t, x_0, y_0, p, q) = 1 - \frac{\sum_{k=-K}^{+K} \left[\frac{1}{J} \sum_{j=1}^J u_j(t + k\Delta t - p\Delta x_j - q\Delta y_j) \right]^r}{\sum_{k=-K}^{+K} \frac{1}{J} \sum_{j=1}^J [u_j(t + k\Delta t - p\Delta x_j - q\Delta y_j)]^r} = 1 - c_s \quad (2-29)$$

2.3.5

Atributo de Curvatura

O atributo de curvatura tem se mostrado uma ferramenta poderosa para a visualização de falhas e fraturas, dentre outras características estratigráficas. Inicialmente, o cálculo da curvatura era feito sobre horizontes já rastreados (19). Contudo, esta necessidade da rastreamento prévio dos horizontes

representava uma grande limitação para este método. Além de ser uma etapa custosa, o rastreamento está sujeito à experiência do intérprete. Outro aspecto negativo desta abordagem é que nem todas as características geológicas relevantes estão localizadas ou podem ser observadas ao longo de horizontes rastreados. Por fim, o cálculo de curvatura sobre horizontes pode inserir artefatos indesejados no resultado final do atributo (26).

Em 1998 foi proposto o cálculo de curvatura volumétrica, ou seja, independente do rastreamento dos horizontes. O trabalho desenvolvido por Donias *et al.* (20) propõe o cálculo de curvatura volumétrica baseado na formulação do divergente do campo vetorial do mergulho calculado sobre os planos normais ao horizonte. Por outro lado, Chopra e Marfurt (2) utilizam as derivadas fracionárias do mergulho aparente para cada fatia de tempo para extrair a curvatura em cada voxel do volume.

Recentemente, o trabalho desenvolvido por Martins *et al.* (4) propôs o cálculo de curvatura volumétrica para dados sísmicos 3D, assumindo que os horizontes podem ser interpretados como superfícies de nível descritas por uma função $S(x, y, z) = 0$. Esta função implícita pode ser vista como um identificador local da superfície do horizonte. Este trabalho leva em consideração o uso de atributos identificadores de horizontes apresentados por Silva *et al.* em (15).

O cálculo da curvatura volumétrica para superfícies implícitas depende somente do gradiente da função $S(x, y, z)$, da matriz hessiana e da matriz adjunta da hessiana, apresentadas nas Equações 2-30, 2-31 e 2-32, respectivamente (27):

$$[\nabla S] = \left(\frac{\partial S}{\partial x}, \frac{\partial S}{\partial y}, \frac{\partial S}{\partial z} \right) = (S_x, S_y, S_z) \quad (2-30)$$

$$[H(S)] = \begin{pmatrix} \frac{\partial^2 S}{\partial x^2} & \frac{\partial^2 S}{\partial x \partial y} & \frac{\partial^2 S}{\partial x \partial z} \\ \frac{\partial^2 S}{\partial y \partial x} & \frac{\partial^2 S}{\partial y^2} & \frac{\partial^2 S}{\partial y \partial z} \\ \frac{\partial^2 S}{\partial z \partial x} & \frac{\partial^2 S}{\partial z \partial y} & \frac{\partial^2 S}{\partial z^2} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} S_{xx} & S_{xy} & S_{xz} \\ S_{yx} & S_{yy} & S_{yz} \\ S_{zx} & S_{zy} & S_{zz} \end{pmatrix} \quad (2-31)$$

$$[H^*(S)] = \begin{pmatrix} \text{Cofator}(S_{xx}) & \text{Cofator}(S_{xy}) & \text{Cofator}(S_{xz}) \\ \text{Cofator}(S_{yx}) & \text{Cofator}(S_{yy}) & \text{Cofator}(S_{yz}) \\ \text{Cofator}(S_{zx}) & \text{Cofator}(S_{zy}) & \text{Cofator}(S_{zz}) \end{pmatrix} \quad (2-32)$$

As curvaturas gaussiana, média, máxima e mínima são obtidas através

das equações:

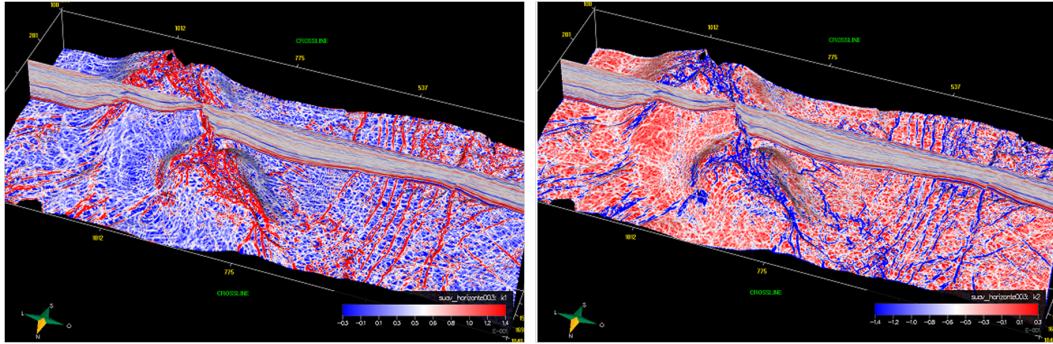
$$K_G = \frac{[\nabla S] [H(S)] \{\nabla S\}}{\|\nabla S\|^4} = - \frac{\begin{vmatrix} [H(S)] & \{\nabla S\} \\ [\nabla S] & 0 \end{vmatrix}}{\|\nabla S\|^4} \quad (2-33)$$

$$K_M = \frac{[\nabla S] [H(S)] \{\nabla S\} - \|\nabla S\|^2 Tr([H(S)])}{2 \|\nabla S\|^3} \quad (2-34)$$

$$k_1, k_2 = K_M \pm \sqrt{K_M^2 - K_G} \quad (2-35)$$

A formulação matemática das curvaturas mostra que, do ponto de vista do processamento de imagens, o uso de curvatura para detecção de arestas é equivalente ao uso de operadores de segunda derivada.

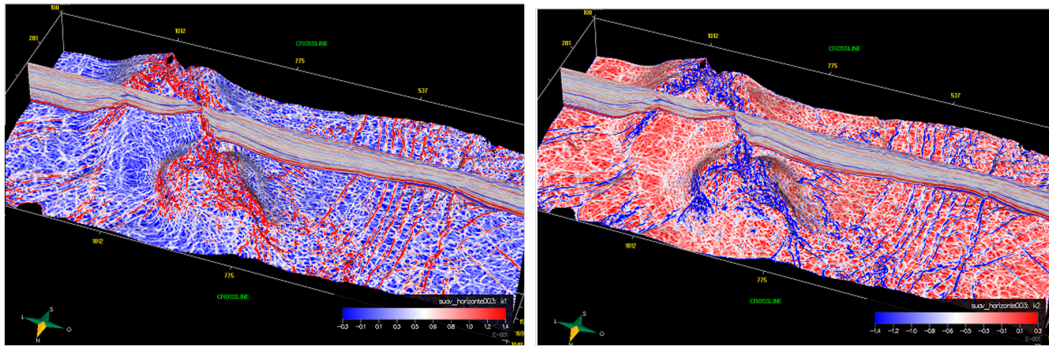
As Figuras 2.10, 2.11 e 2.12 apresentam os resultados do cálculo do atributo de curvatura volumétrica proposto por Martins *et al.* (4). Para facilitar a visualização destes resultados, o atributo de curvatura foi mapeado sobre um horizonte já conhecido:



2.10(a): Curvatura máxima k_1

2.10(b): Curvatura mínima k_2

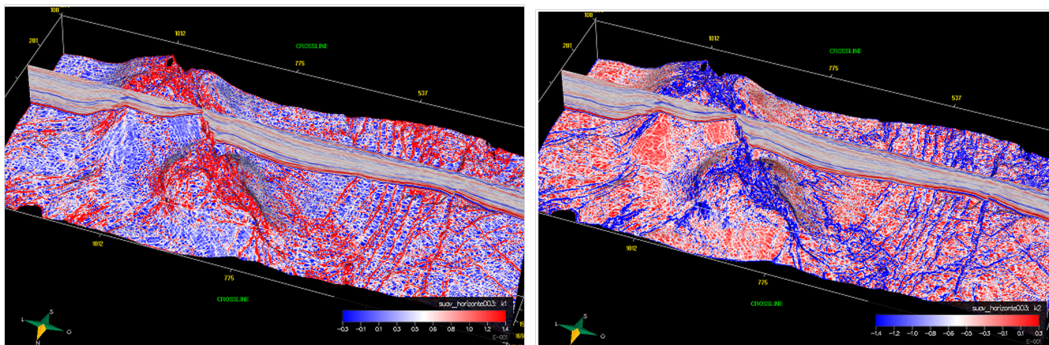
Figura 2.10: Resultados das curvaturas máxima e mínima utilizando a fase instantânea como atributo identificador de horizontes (4).



2.11(a): Curvatura máxima k_1

2.11(b): Curvatura mínima k_2

Figura 2.11: Resultados das curvaturas máxima e mínima utilizando a derivada vertical como atributo identificador de horizontes (4).



2.12(a): Curvatura máxima k_1

2.12(b): Curvatura mínima k_2

Figura 2.12: Resultados das curvaturas máxima e mínima utilizando as cristas e vales como atributos identificadores de horizontes (4).

2.3.6

Coerência Preditiva (Predictive Coherence)

Fomel propôs um método de predição dos traços sísmicos a partir da informação de mergulho e de um traço de referência (28). Este volume predito é utilizado para o cálculo do atributo de falha chamado de coerência preditiva. O método consiste em analisar a diferença entre o volume de entrada (dado original) e o volume resultante do método de predição (5).

A Figura 2.13 mostra o dado de amplitude utilizado como entrada. Os resultados são apresentados comparando o atributo proposto com o cubo de coerência (9) (Fig. 2.14) e a autoestrutura (11) (Fig. 2.15). O resultado apresentado na Figura 2.16 mostra que, ao contrário do cubo de coerência e da autoestrutura, o atributo de coerência preditiva não tem resposta ao longo

dos horizontes, destacando somente as regiões de falhas. Contudo, o atributo apresenta uma característica bastante descontínua (granularizada).

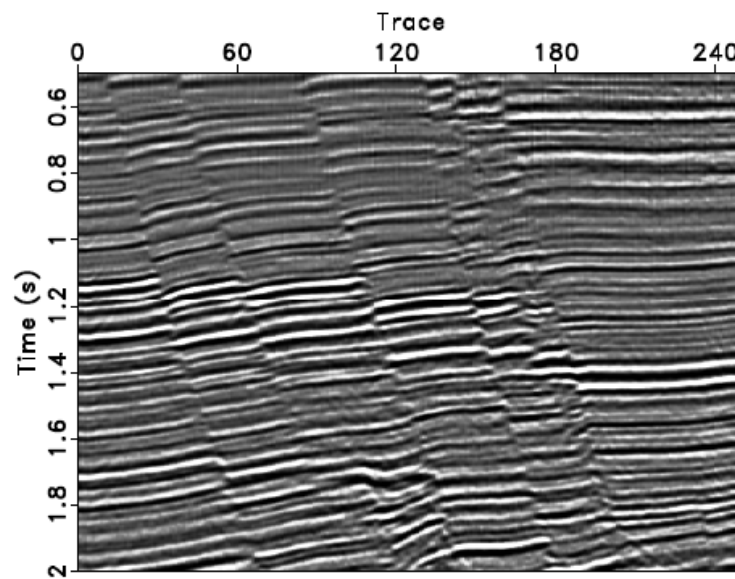


Figura 2.13: Seção vertical do dado de amplitude de entrada (5).

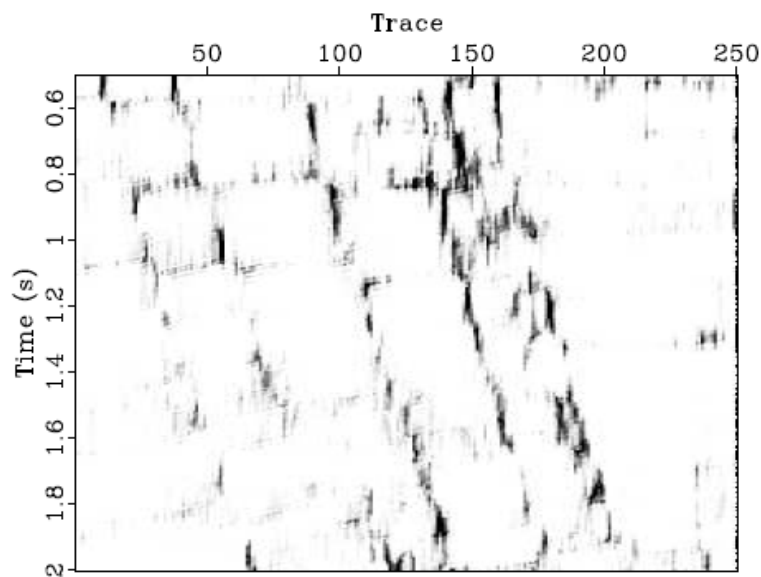


Figura 2.14: O atributo de cubo de coerência obtido para uma seção vertical (5).

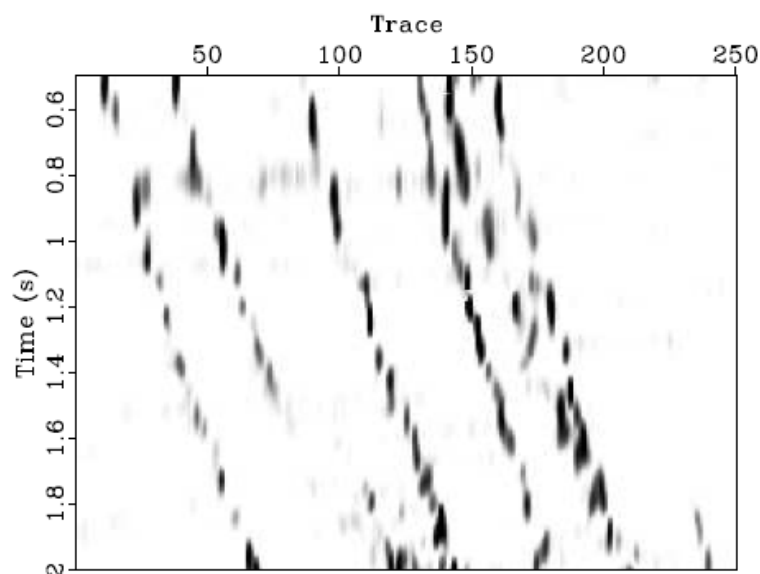


Figura 2.15: O atributo de autoestrutura mostrado em uma seção vertical (5).

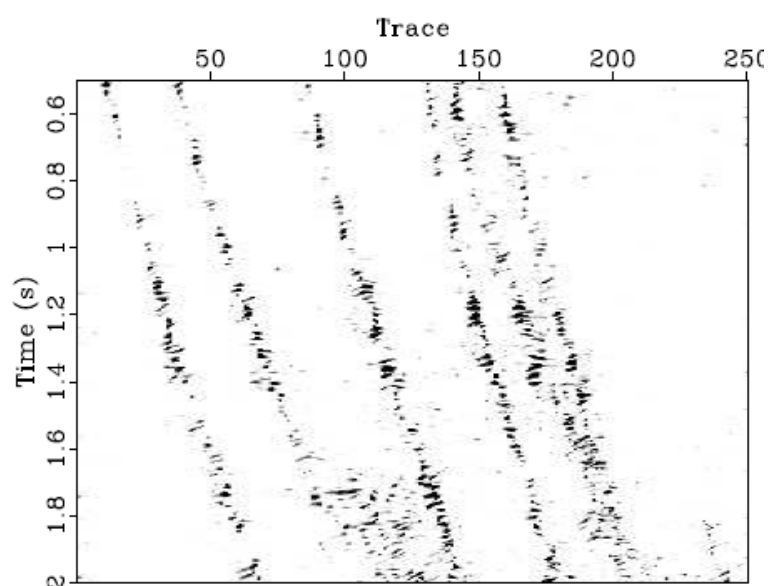


Figura 2.16: Resultado obtido para o método proposto para a coerência preditiva (5).

De forma semelhante, o método de predição do volume sísmico foi usado também para o cálculo do atributo de curvatura (29).

2.3.7

Detecção de Arestas

Dentre as diversas linhas de pesquisa sobre atributos sísmicos para visualização de falhas, pode-se citar os trabalhos que utilizam técnicas de processamento de imagens. Diferentemente das demais linhas de pesquisa

apresentadas anteriormente, que baseiam-se em medidas de coerência entre os traços sísmicos, estas abordagens interpretam as falhas como arestas em imagens. Desta forma, muitos dos trabalhos que seguem esta linha de pesquisa utilizam métodos de detecção de arestas para ressaltar falhas em dados sísmicos. Existem métodos que utilizam operadores em 2D e 3D.

As falhas sísmicas são observadas como descontinuidades ao longo dos horizontes. Por conta disto, é possível aplicar operadores diferenciais de primeira ou segunda ordem para a detecção de arestas em dados sísmicos. Para os operadores de primeira ordem, as falhas são evidenciadas como máximos e mínimos no atributo resultante. Já para os operadores de segunda ordem, as falhas aparecem como cruzamentos de zero, como mostrado na Figura 2.17.

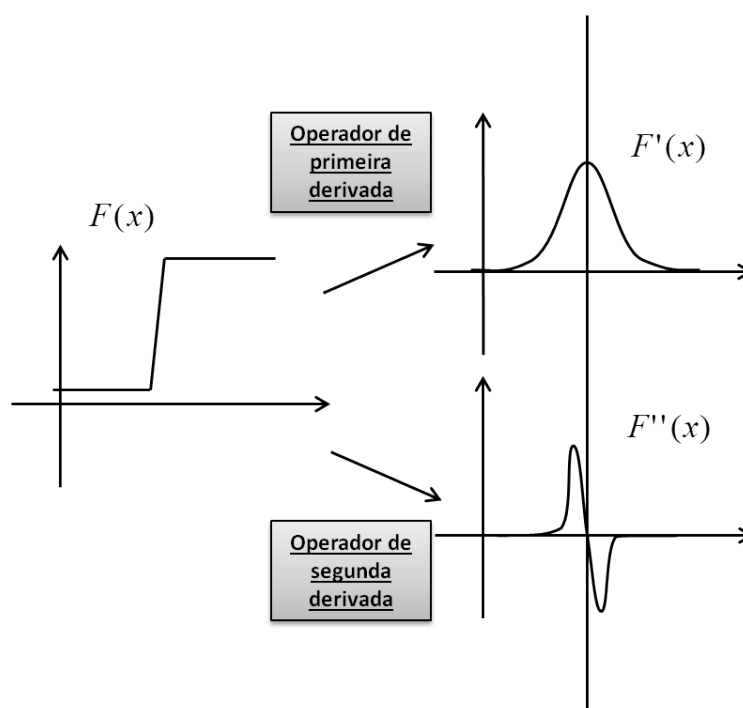


Figura 2.17: Operadores de primeira e segunda ordem para detecção de arestas

O trabalho desenvolvido por Luo *et al.* (12) é um dos precursores no uso de métodos de detecção de arestas em dados sísmicos. Diversos trabalhos seguiram nesta mesma linha, como o trabalho de Jing *et al.* (30). Ambos destacam os métodos de detecção de arestas como ferramentas poderosas para a análise sísmica. Os autores nestes dois trabalhos optaram pelo uso de operadores de primeira derivada. O filtro de Sobel é um exemplo de operador bastante utilizado em processamento de imagens.

De forma similar, o trabalho desenvolvido por Aqrawi e Boe (31) aplica uma forma modificada do filtro de Sobel para evidenciar falhas em dados sísmicos. Adicionalmente, é feita uma normalização dos valores de amplitude

e o operador é aplicado na direção de mergulho. Uma técnica semelhante é utilizada para detectar discontinuidades em regiões de domos de sal (32), podendo ser utilizada também para realçar outras estruturas geológicas, auxiliando não só a interpretação estrutural, mas também interpretação estratigráfica e de litologias (33).

O método apresentado por Song *et al.* (34) também aplica o operador de Sobel. Contudo, diferentemente dos trabalhos citados anteriormente, onde o operador é aplicado diretamente sobre os voxels do volume, os autores optaram por uma função cúbica para a aproximação local do horizonte. Além disso, é considerada uma janela de amostras perpendicular à direção de mergulho do horizonte, com o objetivo de suavizar o atributo resultante.

De acordo com os trabalhos apresentados anteriormente, a orientação dos horizontes é fundamental para os métodos de detecção de arestas. Esta orientação deve ser determinada de forma consistente, visto que os filtros são aplicados na direção de mergulho dos horizontes. Uma orientação calculada de forma imprecisa pode fazer com que o filtro de detecção de arestas extraia outras discontinuidades associadas aos horizontes. A aplicação do filtro orientado se deve ao fato de que as falhas, ou discontinuidades, encontram-se ao longo dos horizontes. Nesse sentido, torna-se relevante no contexto de atributos de falha o uso de atributos identificadores de horizontes, como a fase instantânea e a derivada vertical do traço sísmico (15). Além de propor diversos atributos de falha, o trabalho desenvolvido por Silva *et al.* ressalta que a amplitude não deve ser utilizada como atributo identificador de horizonte (6). Isto decorre do fato de que existem variações de amplitude ao longo dos horizontes, ou seja, o horizonte não pode ser observado como uma superfície de nível. A Figura 2.18 mostra a variação de amplitude ao longo de um mesmo horizonte sísmico em um dado sintético.

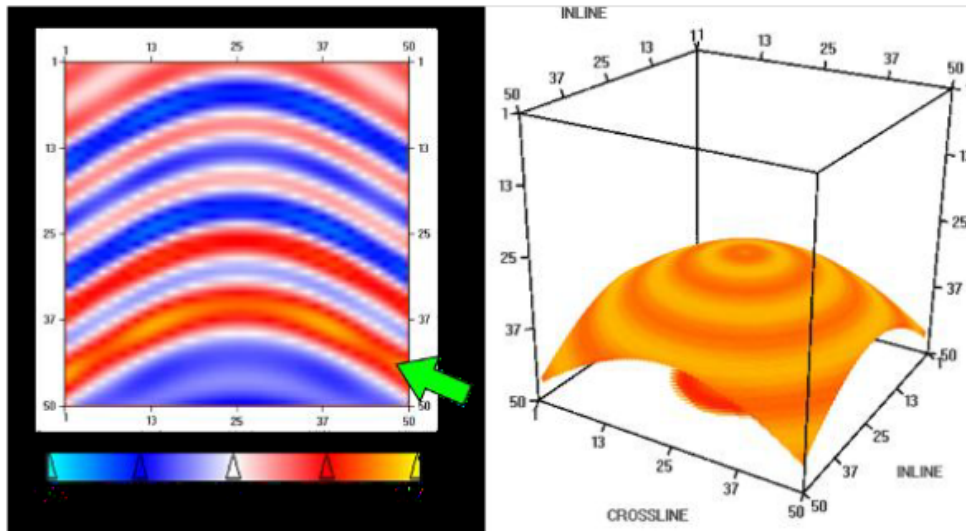


Figura 2.18: Variação de amplitude ao longo de um horizonte em um dado sintético (6).

2.4

Filtragem por Difusão

A difusão é um processo físico que busca balancear as diferenças de concentração (ou temperatura) sem que exista perda de massa (ou calor). No contexto dos dados sísmicos, a amplitude do traço sísmico u é interpretada como sendo a concentração ou temperatura que irá sofrer difusão. Desta forma, o processo de difusão pode ser aplicado ao dado sísmico como uma espécie de filtragem orientada. Os processos de difusão são regidos pela primeira e segunda leis de Fick.

2.4.1

Primeira Lei de Fick

A primeira lei de Fick relaciona o fluxo de difusão com a conservação de massa (ou calor). O fluxo de calor ou massa ocorre das regiões de maior concentração para as regiões de menor concentração. O vetor de fluxo $[j]$ é proporcional ao gradiente da concentração, como apresentado na Equação 2-36:

$$[j] = -D\nabla u \quad (2-36)$$

onde ∇u representa o gradiente da concentração u no espaço e D é o coeficiente de difusão (difusividade).

2.4.2

Segunda Lei de Fick

A segunda lei de Fick mede a variação da concentração ao longo do tempo. Esta relação é dada pelo divergente do fluxo, como mostrado na equação a seguir:

$$\frac{\partial u}{\partial t} = -\nabla \cdot (J) \quad (2-37)$$

onde $\nabla \cdot$ representa o divergente e t é o tempo. Substituindo a equação do fluxo na equação acima, tem-se que:

$$\frac{\partial u}{\partial t} = \nabla \cdot (D \nabla u) \quad (2-38)$$

2.4.3

Difusividade (Coeficiente de Difusão)

A difusividade D (Eq. 2-38) é fundamental para a formulação de um filtro com base nos processos de difusão. A difusividade permite determinar o comportamento do processo de difusão, controlando a direção, assim como as regiões, na qual a difusão pode ocorrer. A difusividade pode ser representada por um escalar ou por um tensor. No caso em que o coeficiente de difusão é um escalar, a difusão ocorre preferencialmente dentro de uma região, em detrimento da difusão entre diferentes regiões da imagem. O que define o interior de uma região e a fronteira entre regiões é a diferença de tons de cinza ou, no contexto de dados sísmicos, a diferença de amplitude. Já na formulação com o tensor, o processo de difusão ocorre, predominantemente, em uma determinada direção.

Os processos de filtragem podem ser isotrópicos ou anisotrópicos. Os filtros isotrópicos são aqueles que utilizam a difusividade dada por um escalar. Este coeficiente pode, ou não, variar ao longo da imagem. Quando este coeficiente é constante ao longo da imagem, tem-se um filtro isotrópico e homogêneo. Neste caso, o processo de difusão é equivalente à aplicação de um filtro gaussiano. Caso contrário, o filtro é dito isotrópico e heterogêneo. Por outro lado, quando a difusividade é representada por um tensor, constante ou variável, a filtragem é classificada como anisotrópica.

3

Trabalhos Relacionados

Neste capítulo são apresentados alguns trabalhos relacionados que servem de base para o desenvolvimento do método proposto. Os filtros formulados através das equações de difusão representam uma ferramenta poderosa para processamento de imagens (35). Estes filtros tratam os tons de cinza como sendo a concentração ou calor que sofre difusão ao longo do tempo. Diversos trabalhos utilizam estes filtros em uma série de aplicações diferentes, como o realce de arestas e a remoção de ruído, dentre outras.

3.1

Perona e Malik

Uma das principais referências, quando se trata de utilizar os processos de difusão para formular filtros de imagens, é o trabalho desenvolvido por Perona e Malik (36). Neste trabalho, os autores utilizam o processo de difusão isotrópica para obter uma representação em multi-escala de uma imagem em tons de cinza. Cada escala consiste em um passo do processo de difusão. O trabalho é voltado para imagens em tons de cinza, não tendo como foco as imagens sísmicas.

O filtro proposto por Perona e Malik é formulado a partir da equação de difusão apresentada na Seção 2.4.2. O termo de difusividade é representado por um escalar e é calculado em função da norma do gradiente da imagem $\|\nabla u\|$. Portanto, este processo de difusão é classificado como isotrópico e heterogêneo. Os autores sugerem duas funções para o cálculo da difusividade:

$$g(\|\nabla u\|) = e^{-\left(\frac{\|\nabla u\|}{K}\right)^2} \quad (3-1)$$

onde K pode ser uma constante ou uma estimativa de ruído, e:

$$g(\|\nabla u\|) = \frac{1}{1 + \left(\frac{\|\nabla u\|}{K}\right)^2} \quad (3-2)$$

É possível observar que ambas as funções são positivas e monotonicamente decrescentes com $g(0) = 1$.

Os resultados apresentados mostram que a difusividade é eficiente ao preservar as arestas, enquanto o processo de difusão reduz o ruído presente na imagem. O método contribui ainda para a detecção de arestas, na medida

em que preserva somente as arestas mais significativas da imagem. Contudo, é importante frisar que no contexto da sísmica outras informações precisam ser levadas em consideração ao aplicar a difusão no dado de amplitude. Os horizontes não podem ser tratados como uma única região com tons de cinza parecidos. Isto se deve, principalmente, ao fato de que a amplitude varia ao longo do horizonte. Além disto, a informação de mergulho do horizonte é fundamental e precisa ser incorporada na formulação do filtro.

3.2

Höcker e Fehmers

O trabalho proposto por Höcker e Fehmers (22) aplica o processo de difusão para dados sísmicos levando em consideração a preservação das regiões de falha e a orientação do processo de difusão. Por levar em consideração a orientação na equação de difusão, ou seja, a difusividade é dada por um tensor, o processo é classificado como anisotrópico e heterogêneo.

Diferentemente do método proposto nesta pesquisa, os autores utilizam o gradiente da amplitude sísmica como orientação da difusão. O resultado apresentado pelos autores é satisfatório. Contudo, é importante ressaltar que, antes do gradiente da amplitude ser incorporado ao processo de difusão, é aplicado um filtro passa-baixa no campo vetorial. Esta suavização do gradiente da amplitude é feita visando compensar as variações de amplitude ao longo dos horizontes. Sem esta etapa de suavização, o processo de difusão pode vir a ocorrer na direção perpendicular ao horizonte, o que não é desejável.

Os autores propõem um fator para impedir que o processo de difusão ocorra através das regiões de falha. Este escalar é obtido em função do tensor de estrutura calculado em duas escalas σ e ρ , como mostrado na Equação 3-3. Esta escala é definida pela gaussiana que é aplicada no campo vetorial do gradiente da amplitude:

$$\epsilon = \frac{Tr(S_{\sigma}S_{\rho})}{Tr(S_{\sigma})Tr(S_{\rho})} \quad (3-3)$$

Observando a Equação 3-3, que define o fator de continuidade, é possível concluir que este consiste no quadrado do produto escalar entre os dois campos escalares. Em outras palavras, supondo um campo vetorial na escala σ , onde v_{σ} representa um vetor nesta escala e um segundo campo vetorial com v_{ρ} , o fator de continuidade consiste no produto escalar mostrado na Equação 3-4. Na prática, esta relação representa a diferença entre as altas frequências dos campos vetoriais nas escalas σ e ρ :

$$\epsilon = (v_\sigma \cdot v_\rho)^2 \quad (3-4)$$

Para a resolução numérica do processo de difusão, os autores citam uma abordagem implícita, mas não apresentam detalhes da resolução do sistema.

3.3

Dave Hale

Os filtros formulados com base nos processos de difusão são amplamente utilizados para melhorar a resposta de diversos atributos sísmicos. Os atributos descritos no Capítulo 2 podem ter respostas melhores ao remover ruídos do dado sísmico. Neste sentido, o trabalho desenvolvido por Dave Hale (21) aplica a difusão anisotrópica no dado de amplitude e propõe um novo atributo de semelhança com base no atributo descrito na Seção 2.3.2.

O autor reafirma a importância da orientação para a correta aplicação do processo de difusão. De forma semelhante ao trabalho desenvolvido por Höcker e Fehmers (22), a orientação é obtida através da suavização do campo vetorial de gradientes utilizando a derivada da gaussiana. O atributo utilizado para a orientação do filtro é a amplitude.

A formulação da difusão é bastante semelhante à apresentada no trabalho anterior, sendo que a preservação das regiões de falha em 3D é feita através do cálculo da isotropia, linearidade e planaridade, como mostrado nas Equações 3-5, 3-6 e 3-7, respectivamente. De acordo com o autor, de forma mais geral, os auto-valores do tensor de difusão podem variar de acordo com estes atributos. Em outras palavras, nas regiões onde a linearidade é maior é permitido que ocorra o processo de difusão. Caso contrário, entende-se que não existe uma orientação bem definida, sendo esta uma região de falha.

$$\lambda_i = \frac{\lambda_2}{\lambda_0} \quad (3-5)$$

onde λ_i representa a isotropia e $\lambda_0 \geq \lambda_1 \geq \lambda_2$.

$$\lambda_l = \frac{\lambda_1 - \lambda_2}{\lambda_0} \quad (3-6)$$

onde λ_l representa a linearidade.

$$\lambda_p = \frac{\lambda_0 - \lambda_1}{\lambda_0} \quad (3-7)$$

onde λ_p representa a planaridade.

Outro aspecto importante tratado neste trabalho é a resolução numérica do processo de difusão. Assim como citado no trabalho anterior, a resolução através de métodos explícitos é condicionalmente estável, sendo necessário um passo de integração muito pequeno. Por conta disto, deve-se utilizar uma abordagem implícita que é incondicionalmente estável e permite passos de integração maiores. É observado pelo autor que poucos passos do processo de filtragem são suficientes para apresentar bons resultados.

3.4

Baddari *et al.*

Recentemente, o método proposto por Perona e Malik (36) foi diretamente aplicado ao processo de filtragem de dados sísmicos, no trabalho desenvolvido por Baddari *et al.* (37). Os autores aplicam o método quase que de forma direta, alterando alguns aspectos como a definição da função associada a difusividade. Neste contexto, eles propõe a utilização da função de Turkey, mostrada na Equação 3-8. É importante ressaltar que os autores, assim como nos demais trabalhos voltados para dados sísmicos, utilizam a amplitude como atributo de orientação:

$$g(\|\nabla u\|) = \begin{cases} \frac{1}{2} \left[1 - \left(\frac{\|\nabla u\|}{\sigma} \right)^2 \right] & \text{se } \|\nabla u\| \leq \sigma \\ 0 & \text{caso contrário} \end{cases} \quad (3-8)$$

onde σ é um parâmetro que controla a intensidade do processo de difusão.

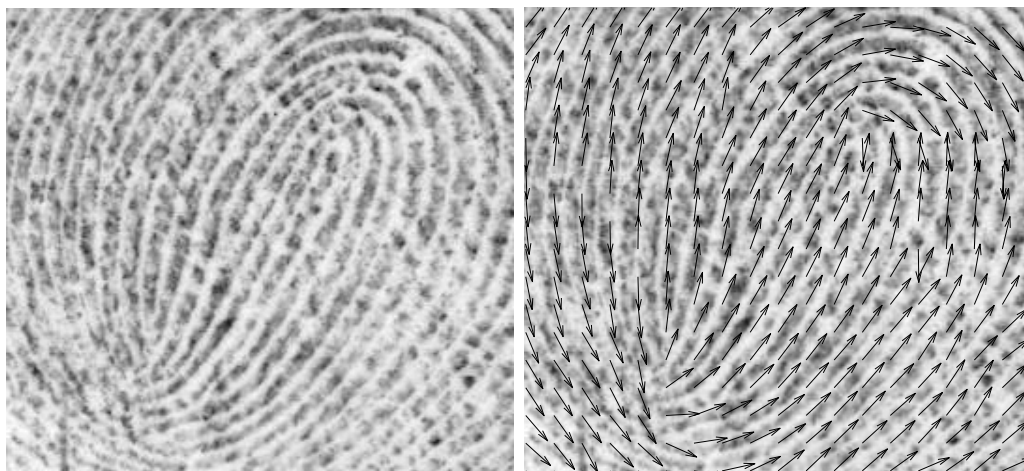
O processo é implementado de forma explícita, onde cada pixel da imagem é atualizado de forma independente em cada passo de filtragem. A equação de difusão é discretizada utilizando o operador Laplaciano. Além disso, os autores utilizam uma imagem sintética para analisar a razão sinal/ruído das imagens resultantes do processo de filtragem e concluem que poucos passos, entre 3 e 8, são suficientes. Esta razão é calculada através da Equação 3-9.

$$SNR(dB) = 10 \log_{10} \frac{\sum_{i=0}^N \sum_{j=0}^M f(i, j)^2}{\sum_{i=0}^N \sum_{j=0}^M (f(i, j) - F(i, j))^2} \quad (3-9)$$

onde $F(i, j)$ é a imagem de entrada e $f(i, j)$ é a imagem filtrada.

3.5 Hastings

Os métodos de processamento de imagens que simulam o processo de difusão com o objetivo de realçar ou suprimir ruído de imagens são amplamente aplicados. Neste sentido, os filtros por difusão são utilizados também para tratamento de imagens de impressões digitais. É importante ressaltar que as imagens de impressões digitais tem muito em comum com os dados sísmicos. A orientação extraída da imagem, em ambos os casos, é fundamental para que o processamento seja coerente e não destrua informações relevantes da imagem. Os métodos de filtragem de imagens de impressões digitais têm como requisito respeitar a orientação e não filtrar na direção perpendicular às arestas das digitais. A Figura 3.1 apresenta uma imagem de impressão digital de entrada e, ao lado, o campo vetorial de orientação da difusão sobreposto na imagem. Outra característica em comum entre estes dois tipos de imagens é que o processo de aquisição está sujeito à bastante ruído.



3.1(a): Impressão digital

3.1(b): Campo de orientação

Figura 3.1: A primeira imagem mostra uma impressão digital com bastante ruído. Na segunda imagem, é possível visualizar o campo vetorial desenhado sobre a impressão digital. Observe que a orientação deve respeitar as arestas das digitais (7).

O trabalho desenvolvido por Hastings (7) propõe o uso da difusão para realçar as arestas nas imagens de impressões digitais. O principal desafio apresentado pelo autor consiste em obter um campo vetorial suave capaz de

orientar o processo de difusão de forma consistente. Neste sentido, o campo vetorial é suavizado em uma etapa de pré-processamento.

Com base nos trabalhos apresentados, observa-se que a filtragem de dados sísmicos ainda é um problema em aberto, sendo a preservação de feições sísmicas um critério fundamental para eficácia destes métodos. Fica claro que ainda existem contribuições para serem feitas no tocante à definição dos critérios para orientação do processo de difusão, a qual comumente é feita utilizando o atributo sísmico de amplitude. Outro aspecto fundamental, que ainda está em aberto, é a metodologia utilizada para avaliação quantitativa dos resultados, no contexto da filtragem de dados sísmicos.

Método Proposto

Este capítulo apresenta a filtragem anisotrópica com preservação de feições sísmicas desenvolvida neste trabalho. Na formulação do método proposto, é incorporado um atributo identificador de horizontes (Sec. 2.2). Além disto, é utilizado também um atributo de falha. O atributo identificador de horizontes é incorporado ao método proposto para evitar que a difusão ocorra na direção perpendicular aos horizontes. O atributo de falha, por sua vez, é utilizado para preservar as falhas durante a filtragem, evitando que o processo de difusão ocorra através destas estruturas.

A Figura 4.1 apresenta uma visão geral da filtragem anisotrópica proposta. O método é composto de duas etapas principais. A primeira recebe como entrada o dado de amplitude, calculando os atributos que identificam as feições sísmicas. Na segunda etapa, o processo de difusão anisotrópica é aplicado ao dado de amplitude, considerando as restrições impostas pelos atributos calculados na primeira etapa. As seções a seguir descrevem detalhadamente as duas etapas do método proposto.

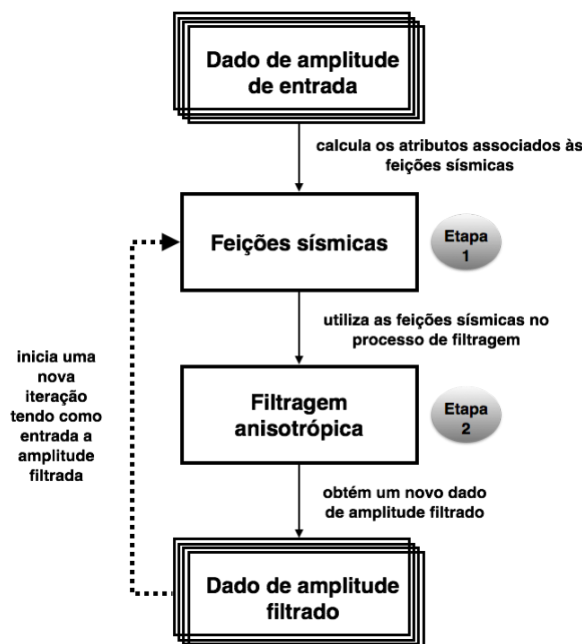


Figura 4.1: Fluxograma que mostra uma visão geral do método proposto para filtragem anisotrópica de dados sísmicos. A etapa (1) consiste no cálculo dos atributos que identificam as feições sísmicas (horizontes e falhas). A etapa (2) utiliza estes atributos para aplicar o processo de difusão no dado sísmico de entrada, enquanto preserva os horizontes e as falhas. Estas duas etapas são repetidas até que o resultado seja considerado satisfatório de acordo com algum critério visual ou numérico.

4.1

Etapa 1 - Cálculo dos Atributos Associados às Feições Sísmicas

Nesta seção são apresentados os atributos utilizados para identificar os horizontes e as falhas, preservando-os durante a filtragem por difusão anisotrópica. As duas seções a seguir descrevem como estes atributos são inseridos na formulação do método proposto.

A Figura 4.2 apresenta o fluxograma do método proposto com a primeira etapa detalhada. É possível observar que ambos os atributos são calculados a partir do traço complexo $Z(t)$ (Sec. 2.2.2).

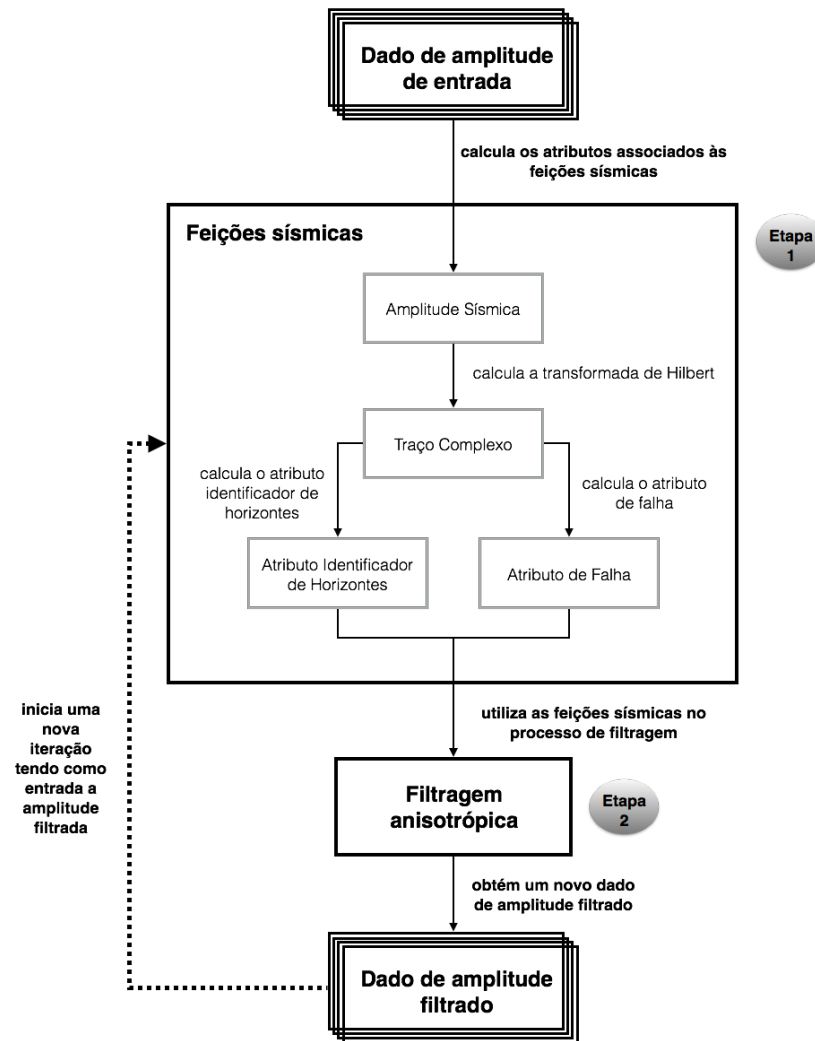


Figura 4.2: Fluxograma com a descrição dos passos que compõem a primeira etapa do método proposto. Nesta etapa, são calculados os atributos que identificam os horizontes e as falhas do dado sísmico. Estes atributos são obtidos a partir do traço complexo $Z(t)$, composto pela parte real (amplitude $X(t)$) e a parte imaginária $Y(t)$. Esta última é calculada a através da transformada de Hilbert.

4.1.1

Atributo Identificador de Horizontes

Os atributos identificadores de horizontes estão descritos na Seção 2.2. Estes identificam os horizontes sísmicos como superfícies de nível. Neste contexto, estes atributos são utilizados para evitar que o processo de difusão ocorra na direção perpendicular aos horizontes, preservando estas feições no dado sísmico filtrado.

A fase instantânea Φ (Sec. 2.2.2) é o atributo identificador de horizontes escolhido neste trabalho para orientar o processo de filtragem anisotrópica.

Logo, o gradiente deste atributo é calculado de forma analítica e incorporado à formulação do problema como uma restrição de direção do processo de difusão. Isto garante que a difusão ocorre somente ao longo dos horizontes sísmicos, condição necessária para preservação destas feições.

4.1.2

Atributo Identificador de Falhas Geológicas

Diversos atributos de falha são propostos na literatura. Os atributos mais difundidos, dentre as aplicações sísmicas voltadas para interpretação, estão descritos na Seção 2.3. Do ponto de vista de processamento de imagens, a identificação de falhas em dados sísmicos pode ser pensada como um problema de detecção de arestas, como apresentado na Seção 2.3.7. Desta forma, as falhas aparecem como descontinuidades ao longo dos horizontes.

Dentre os métodos de processamento de imagens, a primeira derivada é amplamente utilizada como um operador de detecção de arestas. Estas aparecem como máximos e mínimos na primeira derivada. No contexto de dados sísmicos, a primeira derivada deve ser aplicada utilizando a orientação dos horizontes, como desenvolvido no trabalho (38) (Apêndice A). Portanto, é devido à utilização dos atributos identificadores de horizontes que se pode dizer que as descontinuidades detectadas como falha estão localizadas ao longo dos horizontes.

O atributo de falha utilizado neste trabalho é definido através da primeira derivada orientada do traço complexo $Z(t)$ (38). O traço complexo é composto de uma parte real, a amplitude sísmica $X(t)$, e uma parte imaginária $Y(t)$ que é obtida através da transformada de Hilbert. Portanto, a primeira derivada orientada da amplitude $X(t)$ é dada pelo produto escalar entre o vetor perpendicular ao gradiente da fase instantânea $\nabla\Phi^\perp$ e o gradiente da amplitude ∇X , como mostrado na Equação 4-1. O mesmo cálculo é feito para a parte imaginária do traço complexo.

$$F = \nabla\Phi^\perp \cdot \nabla X \quad (4-1)$$

onde F é o atributo em 2D que indica as regiões de falhas do dado sísmico e o operador \cdot representa o produto escalar entre dois vetores. Este atributo é utilizado por ser matematicamente robusto, além de aproveitar o gradiente da fase instantânea, já calculado para identificação dos horizontes. A primeira derivada do traço complexo é, portanto, definida como o máximo entre a derivada orientada da parte real do traço complexo, a amplitude X , e a parte

complexa Y :

$$F_{final} = MAX(\nabla\Phi^\perp \cdot \nabla X, \nabla\Phi^\perp \cdot \nabla Y) \quad (4-2)$$

onde ∇Y é o gradiente da parte complexa, obtida através da transformada de Hilbert. A versão em 3D deste atributo é calculada através do máximo entre os valores obtidos nas direções inline e crossline do volume sísmico.

Este atributo é incorporado ao método de filtragem anisotrópica proposta na forma de um coeficiente que evita que a difusão ocorra através das regiões consideradas como falha.

4.2

Etapa 2 - Filtragem Anisotrópica

A Figura 4.3 apresenta novamente o método proposto, desta vez, detalhando a segunda etapa. Esta consiste na utilização dos atributos identificadores de horizontes e falhas obtidos na primeira etapa, para guiar o processo de difusão aplicado ao dado sísmico de entrada. O objetivo deste processo é suprimir pequenas variações de amplitude, enquanto preserva as regiões de falha.

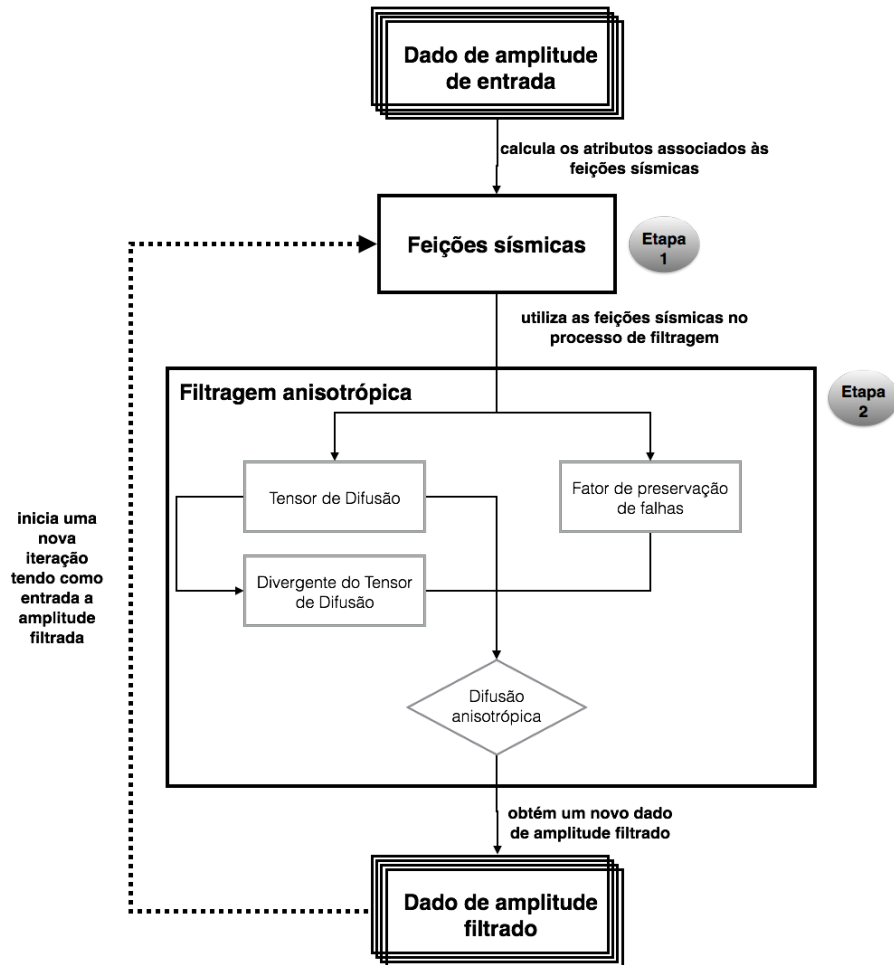


Figura 4.3: Fluxograma com o método proposto detalhando a etapa (2). Esta consiste na construção e aplicação do método proposto de filtragem anisotrópica no dado sísmico de entrada. Nesta etapa, são calculados o tensor de difusão e o fator de preservação de falhas, os quais utilizam os atributos calculados na etapa (1).

A fundamentação teórica sobre os processos de difusão é apresentada na Seção 2.4, onde é descrita a equação diferencial que rege o processo de difusão de calor/concentração. O método proposto é desenvolvido a partir da Equação de difusão 4-3:

$$\frac{\partial u}{\partial t} = \nabla \cdot (D \nabla u) \quad (4-3)$$

onde u representa a amplitude sísmica, tratada neste trabalho como sendo a concentração/ou calor que irá sofrer difusão. Reescrevendo a Equação 4-3 em função da posição $p(x, y, z)$ do volume sísmico, tem-se que a difusão em 3D é

dada por:

$$\frac{\partial u}{\partial t} = \nabla \cdot (D(p) \cdot \nabla u(p)) \quad (4-4)$$

4.2.1

Tensor de Difusão

O termo D (Eq. 4-3) representa a difusividade, responsável por determinar o processo de difusão. A difusividade pode ser descrita por um escalar ou um tensor. Neste trabalho, por se tratar de um processo anisotrópico, a difusividade é dada por um tensor $[D]$. A matriz $[D]$ é obtida em função do campo vetorial do gradiente da fase, como mostrado na Equação 4-5.

$$[D] = \nabla \Phi^\perp \times (\nabla \Phi^\perp)^T \quad (4-5)$$

onde $(\nabla \Phi^\perp)^T$ representa o vetor transposto do gradiente da fase instantânea.

Neste trabalho, é adotada a seguinte notação para descrever o tensor de difusão $[D]$ em 3D:

$$[D](p) = \begin{pmatrix} d_{xx}(p) & d_{xy}(p) & d_{xz}(p) \\ d_{yx}(p) & d_{yy}(p) & d_{yz}(p) \\ d_{zx}(p) & d_{zy}(p) & d_{zz}(p) \end{pmatrix} \quad (4-6)$$

onde d representa cada uma das componentes do tensor.

Divergente do Tensor de Difusão

A equação de difusão (Eq. 4-4) é expandida realizando a multiplicação da matriz $[D]$ pelo vetor gradiente ∇u , resultando em um vetor 3D. Posteriormente, o operador divergente é aplicado no vetor resultante desta multiplicação:

$$\begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial t} = & \frac{\partial}{\partial x} \left(d_{xx} \frac{\partial u}{\partial x} + d_{xy} \frac{\partial u}{\partial y} + d_{xz} \frac{\partial u}{\partial z} \right) + \\ & + \frac{\partial}{\partial y} \left(d_{yx} \frac{\partial u}{\partial x} + d_{yy} \frac{\partial u}{\partial y} + d_{yz} \frac{\partial u}{\partial z} \right) + \\ & + \frac{\partial}{\partial z} \left(d_{zx} \frac{\partial u}{\partial x} + d_{zy} \frac{\partial u}{\partial y} + d_{zz} \frac{\partial u}{\partial z} \right) \end{aligned} \quad (4-7)$$

onde $\left(\frac{\partial}{\partial x}, \frac{\partial}{\partial y}, \frac{\partial}{\partial z}\right)$ representa o operador divergente.

Na Equação 4-7 aparecem os termos associados às derivadas dos elementos do tensor d_{xx} , d_{xy} , d_{xz} , e assim por diante, ou seja, aparecem termos como $\frac{\partial d_{xx}}{\partial x}$, $\frac{\partial d_{xy}}{\partial x}$, $\frac{\partial d_{xz}}{\partial x}$. Neste trabalho, observou-se que estes termos inserem instabilidade na resolução do sistema. Acredita-se que esta instabilidade esteja relacionada ao ruído presente no dado sísmico de entrada. Desta forma, optou-se por omitir estes termos, por conta de sua dimensionalidade.

4.2.2

Fator de Preservação de Falhas

O atributo de falha F obtido na etapa (1) é incorporado ao método proposto através do coeficiente ε , onde $0 \leq \varepsilon \leq 1$. Este coeficiente, mostrado na Equação 4-8, impede que o processo de difusão ocorra nas regiões consideradas como falhas, em outras palavras, nas regiões em que este atributo se aproxima de 0 (zero). Desta forma, a equação final para o processo de difusão é dada por:

$$\frac{\partial u}{\partial t} = \varepsilon \nabla (D(p) \cdot \nabla u(p)) \quad (4-8)$$

onde ε é dado pelo quadrado do atributo de falha F , apresentado na Equação 4-2.

4.2.3

Difusão Anisotrópica

A formulação final da filtragem por difusão anisotrópica é obtida a partir da Equação 4-7. Nesta equação é levado em consideração o coeficiente ε de preservação das falhas, apresentado na Seção 4.2.2. Desta forma, a equação que descreve o processo de difusão do dado sísmico de entrada ao longo do tempo t é mostrado na Equação 4-9.

$$\begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial t} = \varepsilon & \left(d_{xx} \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + d_{yy} \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + d_{zz} \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) + \\ & 2\varepsilon \left(d_{xy} \frac{\partial^2 u}{\partial xy} + d_{yz} \frac{\partial^2 u}{\partial yz} + d_{xz} \frac{\partial^2 u}{\partial xz} \right) \end{aligned} \quad (4-9)$$

onde o posicionamento p foi omitido nesta equação como forma de simplificar a notação. Esta equação descreve o processo de difusão para cada voxel (x, y, z) do volume sísmico.

Por fim, é montado um sistema, com base na Equação 4-9, onde cada linha está associada a um voxel do volume sísmico. A resolução deste sistema representa a simulação do processo de difusão no dado sísmico.

Implementação e Resultados

Este capítulo está organizado em três seções. A primeira descreve a implementação desenvolvida para o método proposto de filtragem anisotrópica com preservação de feições sísmicas. Na segunda seção é descrita a metodologia utilizada para avaliação quantitativa e qualitativa dos resultados. Na terceira são apresentados os resultados obtidos em dados reais para a filtragem anisotrópica proposta neste trabalho.

5.1

Implementação da Equação de Difusão

A implementação iterativa da filtragem anisotrópica com preservação de feições sísmicas, representada pela Equação 4-9, foi desenvolvida utilizando a linguagem C++. Este programa consiste em uma prova de conceito do método proposto neste trabalho e, portanto, não está otimizado.

5.1.1

Discretização Implícita do Operador Laplaciano

A equação que descreve a filtragem anisotrópica proposta é escrita em função dos termos de segunda derivada em x , y e z , assim como as respectivas derivadas cruzadas. Foi utilizado o operador de diferenças centrais para discretizar as segundas derivadas na Equação 4-9. O resultado destas discretizações é apresentado nas equações a seguir, onde Δx , Δy e Δz são iguais à 1(um), considerando que a estrutura de dados utilizada para representar o volume sísmico é uma grade tridimensional regular e estruturada:

$$\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} = \frac{u_{x+1,y,z}^{n+1} - 2u_{x,y,z}^{n+1} + u_{x-1,y,z}^{n+1}}{(\Delta x)^2} \quad (5-1)$$

$$\frac{\partial^2 u}{\partial y^2} = \frac{u_{x,y+1,z}^{n+1} - 2u_{x,y,z}^{n+1} + u_{x,y-1,z}^{n+1}}{(\Delta y)^2} \quad (5-2)$$

$$\frac{\partial^2 u}{\partial z^2} = \frac{u_{x,y,z+1}^{n+1} - 2u_{x,y,z}^{n+1} + u_{x,y,z-1}^{n+1}}{(\Delta z)^2} \quad (5-3)$$

$$\frac{\partial^2 u}{\partial x \partial y} = \frac{\partial^2 u}{\partial y \partial x} = \frac{(u_{x+1,y+1,z}^{n+1} + u_{x-1,y-1,z}^{n+1}) - (u_{x-1,y+1,z}^{n+1} + u_{x+1,y-1,z}^{n+1})}{4\Delta x \Delta y} \quad (5-4)$$

$$\frac{\partial^2 u}{\partial x \partial z} = \frac{\partial^2 u}{\partial z \partial x} = \frac{(u_{x+1,y,z+1}^{n+1} + u_{x-1,y,z-1}^{n+1}) - (u_{x-1,y,z+1}^{n+1} + u_{x+1,y,z-1}^{n+1})}{4\Delta x \Delta z} \quad (5-5)$$

$$\frac{\partial^2 u}{\partial z \partial y} = \frac{\partial^2 u}{\partial y \partial z} = \frac{(u_{x,y+1,z+1}^{n+1} + u_{x,y-1,z-1}^{n+1}) - (u_{x,y-1,z+1}^{n+1} + u_{x,y+1,z-1}^{n+1})}{4\Delta y \Delta z} \quad (5-6)$$

Substituindo as discretizações na equação de difusão (Eq. 4-9), obtém-se a Equação 5-7 que descreve o processo de difusão em cada voxel (x, y, z) do volume sísmico. Portanto, cada linha do sistema de equações está associada a um voxel do volume sísmico.

A solução explícita da Equação 5-7 é condicionalmente estável, necessitando de passos de integração menores e, portanto, um número maior de passos de filtragem. Desta forma, é importante ressaltar que estas equações foram discretizadas utilizando uma abordagem implícita que é incondicionalmente estável.

$$\begin{aligned} u_{x,y,z}^{n+1} = & u_{x,y,z}^n + \epsilon \Delta t [\\ & (d_{xx}) u_{x+1,y,z}^{n+1} + (d_{xx}) u_{x-1,y,z}^{n+1} \\ & + (d_{yy}) u_{x,y+1,z}^{n+1} + (d_{yy}) u_{x,y-1,z}^{n+1} \\ & + (d_{zz}) u_{x,y,z+1}^{n+1} + (d_{zz}) u_{x,y,z-1}^{n+1} \\ & - (2d_{xx} + 2d_{yy} + 2d_{zz}) u_{x,y,z}^{n+1} \\ & + \left(\frac{d_{xy}}{2}\right) u_{x+1,y+1,z}^{n+1} + \left(\frac{d_{xy}}{2}\right) u_{x-1,y-1,z}^{n+1} \\ & - \left(\frac{d_{xy}}{2}\right) u_{x+1,y-1,z}^{n+1} - \left(\frac{d_{xy}}{2}\right) u_{x-1,y+1,z}^{n+1} \\ & + \left(\frac{d_{xz}}{2}\right) u_{x+1,y,z+1}^{n+1} + \left(\frac{d_{xz}}{2}\right) u_{x-1,y,z-1}^{n+1} \\ & - \left(\frac{d_{xz}}{2}\right) u_{x+1,y,z-1}^{n+1} - \left(\frac{d_{xz}}{2}\right) u_{x-1,y,z+1}^{n+1} \\ & + \left(\frac{d_{yz}}{2}\right) u_{x,y+1,z+1}^{n+1} + \left(\frac{d_{yz}}{2}\right) u_{x,y-1,z-1}^{n+1} \\ & - \left(\frac{d_{yz}}{2}\right) u_{x,y+1,z-1}^{n+1} - \left(\frac{d_{yz}}{2}\right) u_{x,y-1,z+1}^{n+1}] \end{aligned} \quad (5-7)$$

A implementação desenvolvida para este trabalho consiste de uma versão em 2D da Equação 5-7, mostrada na Equação 5-8.

$$\begin{aligned}
 u_{x,y}^{n+1} = & u_{x,y}^n + \epsilon \Delta t [\\
 & (d_{xx}) u_{x+1,y}^{n+1} + (d_{xx}) u_{x-1,y}^{n+1} \\
 & + (d_{yy}) u_{x,y+1}^{n+1} + (d_{yy}) u_{x,y-1}^{n+1} \\
 & - (2d_{xx} + 2d_{yy}) u_{x,y}^{n+1} \\
 & + \left(\frac{d_{xy}}{2} \right) u_{x+1,y+1}^{n+1} + \left(\frac{d_{xy}}{2} \right) u_{x-1,y-1}^{n+1} \\
 & - \left(\frac{d_{xy}}{2} \right) u_{x+1,y-1}^{n+1} - \left(\frac{d_{xy}}{2} \right) u_{x-1,y+1}^{n+1}]
 \end{aligned} \tag{5-8}$$

5.1.2

Método do Gradiente Conjugado

A resolução do sistema, que é esparso, é obtida através do método do gradiente conjugado com o pré-condicionador de Jacobi. O sistema deve ser resolvido para cada passo de filtragem. São permitidas no máximo 200 iterações do método do gradiente conjugado, podendo o método convergir com menos iterações. A tolerância para determinar a convergência é de $1.e10^{-6}$. Na versão em 3D, cada linha do sistema apresenta 19 elementos não nulos. Já na versão em 2D implementada são obtidos 9 coeficientes não nulos para cada linha do sistema. Estes elementos não nulos estão associados à vizinha 3x3 adotada na versão 2D deste trabalho.

5.2

Metodologia de Avaliação Qualitativa

O método proposto de filtragem anisotrópica com preservação de feições sísmicas é aplicado ao dado público do Mar do Norte, o F3 Block obtido no repositório Open Seismic Repository (1) e utilizado para a avaliação e a validação deste trabalho. Neste dado sísmico é possível visualizar a existência de um domo de sal na parte inferior do lado direito, destacado pela seta em amarelo, além de uma falha bastante evidente do lado direito (seta em azul) e um conjunto de falhas destacado pela seta em verde na região inferior à esquerda (Fig. 5.1).

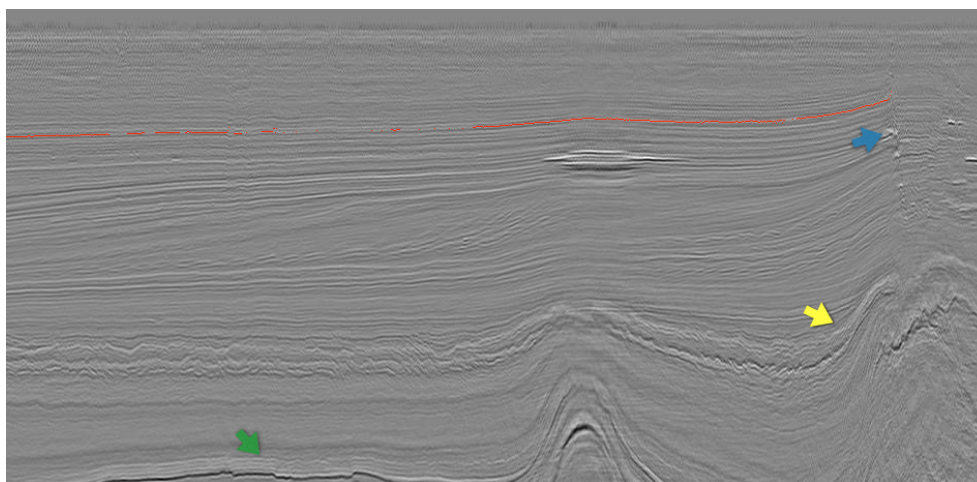


Figura 5.1: Conjunto de amostras (vermelho) rastreadas para um determinado horizonte sísmico na inline 580 do dado sísmico F3 Block (1). A seta em azul destaca uma região com uma falha bem evidente. Já o domo de sal é marcado pela seta em amarelo e um segundo conjunto de falhas é destacado pela seta em verde.

Os dados sísmicos filtrados obtidos através do método proposto de filtragem anisotrópica são apresentados nesta seção, nas direções inline e crossline. O programa desenvolvido foi executado em uma máquina com a seguinte configuração: processador Intel Core i5-3450 CPU 3.10GHz 64bits, com 16GB de memória RAM e com o sistema operacional CentOS 5. Estes testes têm o objetivo de avaliar os seguintes aspectos do método proposto:

- Qual atributo de orientação (amplitude ou fase instantânea) utilizar para construir o tensor de difusão $[D]$?
- Qual a importância do coeficiente ϵ (Eq. 5-8) para a preservação de falhas?
- Qual a influência do número de passos de filtragem no dado sísmico?

A Tabela 5.1 apresenta um resumo dos cenários utilizados para avaliar o método proposto. No primeiro cenário é observada a influência no processo de filtragem anisotrópica dos dois atributos de orientação utilizados neste trabalho, a amplitude e a fase instantânea. Neste cenário não foi utilizado o coeficiente de preservação de falhas ϵ , sendo executados um total de 4 (quatro) passos. Já no segundo cenário, o resultado da filtragem anisotrópica tem como objetivo avaliar a influência do coeficiente de preservação de falhas ϵ . Já no último cenário, são mostrados alguns resultados variando o número de passos, com um total de 8 passos de filtragem executados. Em todos os cenários foi

utilizado um passo de integração de 1 segundo para a execução do método do gradiente conjugado.

	Atributo de Orientação	Coefficiente de Preservação de Falhas	Número de passos de filtragem
Cenário 1	Amplitude	Nenhum	4 passos
	x		
Cenário 2	Fase Instantânea	Nenhum	4 passos
	Fase Instantânea	x	
		Atributo de Falha	
Cenário 3	Amplitude	Atributo de Falha	1 - 8 passos
	x		
	Fase Instantânea		

Tabela 5.1: Descrição dos parâmetros utilizados na filtragem anisotrópica aplicada em cada um dos 3 (três) cenários. Três aspectos do método proposto são avaliados nestes cenários: atributo de orientação da filtragem anisotrópica, o coeficiente de preservação de falhas ϵ e o número de passos de filtragem.

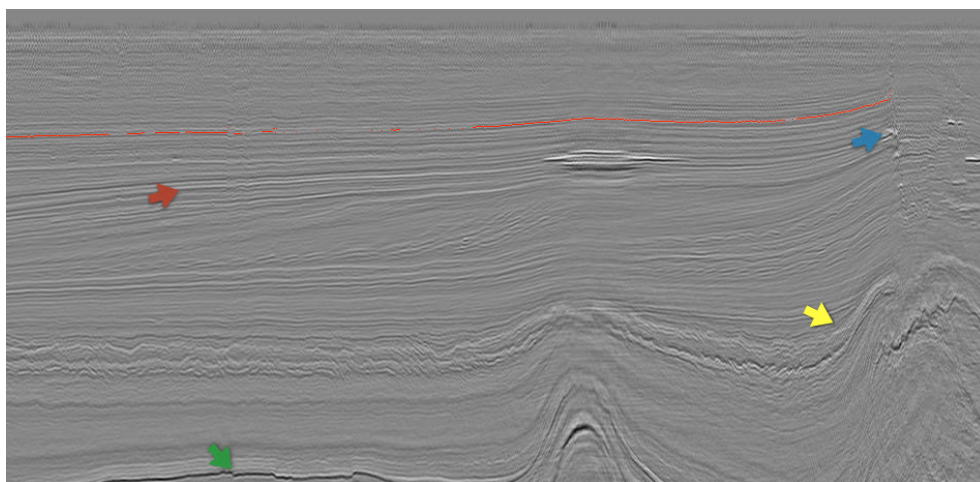
5.2.1
Cenário 1

O primeiro cenário tem como objetivo comparar os resultados da filtragem anisotrópica com a orientação dada pela amplitude e pela fase instantânea. O coeficiente de preservação de falhas ϵ não foi utilizado neste cenário, sendo executado um total de 4 passos de filtragem. Os resultados são apresentados em 4 fatias distintas, sendo duas inlines e duas crosslines.

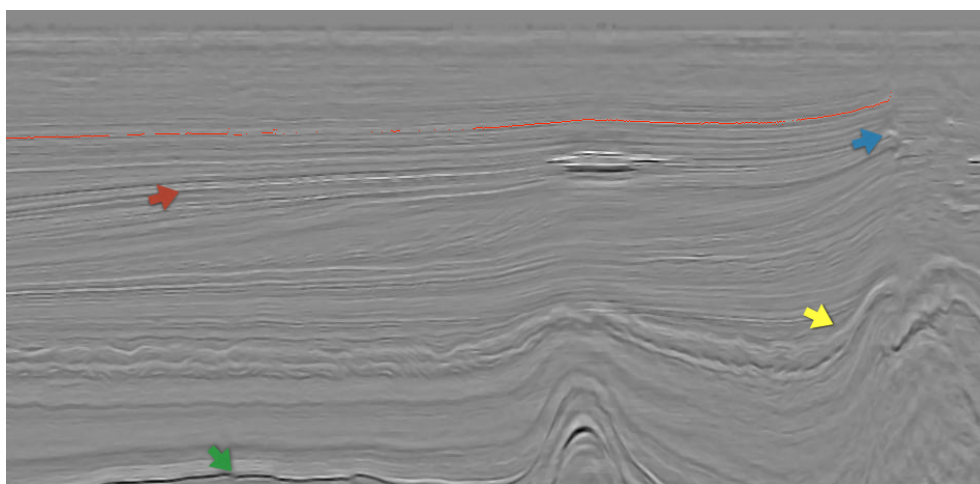
O primeiro resultado é obtido tendo como entrada a inline 580, mostrada na Figura 5.2(a). Esta figura mostra a amplitude sísmica de entrada do método de filtragem anisotrópica proposta neste trabalho.

Os resultados do processo de filtragem anisotrópica após a execução de 4 passos são mostrados nas Figuras 5.2(b-c). Nestes resultados foram utilizadas a amplitude (Fig. 5.2(b)) e a fase instantânea (Fig. 5.2(c)) como atributo de orientação do processo de difusão. Na Figura 5.2(b) é possível observar, na região destacada pela seta em vermelho, que os horizontes foram bastante corrompidos pelo processo de filtragem orientada pela amplitude. Já com a orientação do atributo de fase instantânea, os horizontes permanecem visíveis na imagem sísmica. Ao mesmo tempo, uma parte do ruído presente na sísmica de entrada (Fig. 5.2(a)) foi removida. Um comportamento semelhante é observado na região destacada pela seta em verde. O horizonte sísmico que apresenta ruído no dado de entrada, aparece corrompido no resultado

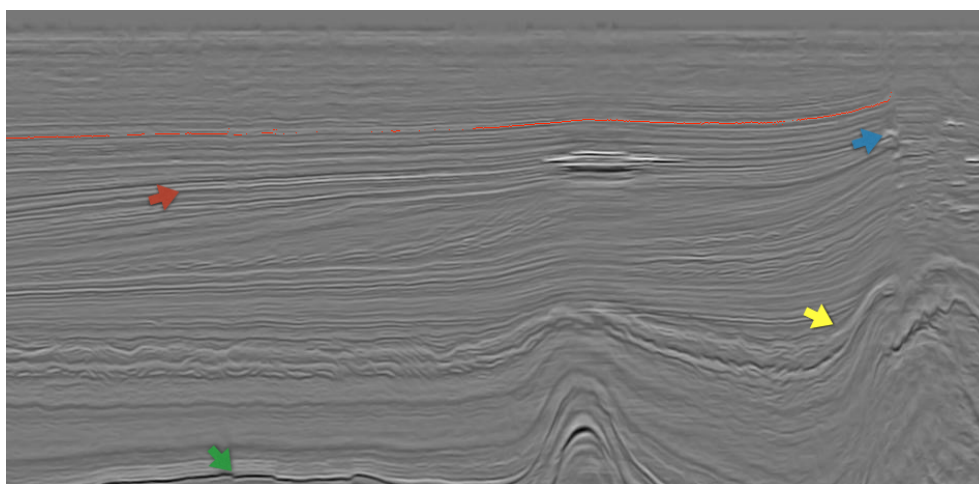
com a amplitude como atributo de orientação. Por outro lado, este aparece suavizado e preservado no dado sísmico filtrado com a orientação dada pela fase instantânea.



5.2(a): Dado de entrada na inline 580.



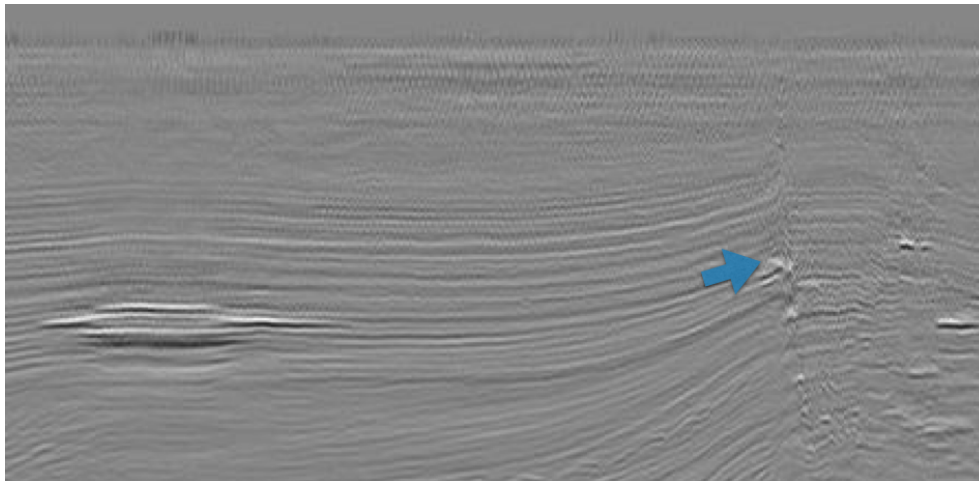
5.2(b): Suavização orientada pelo atributo de amplitude



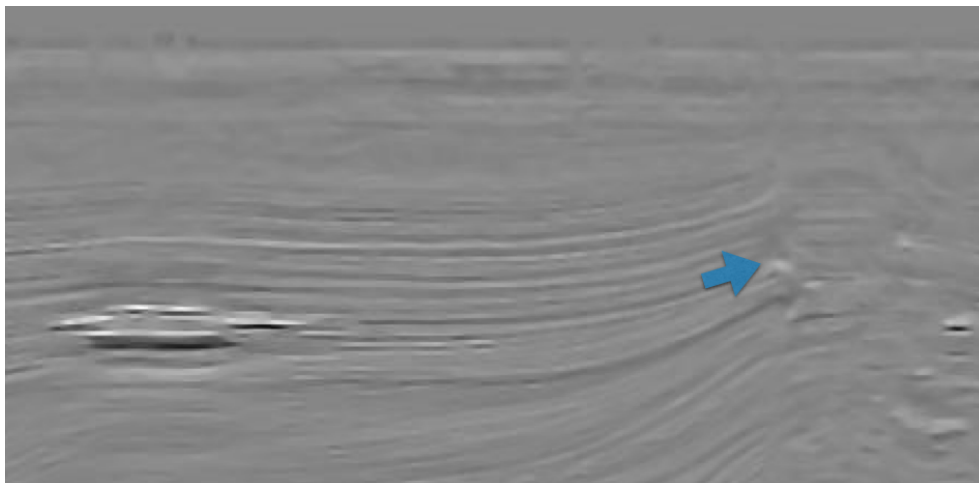
5.2(c): Suavização orientada pela fase instantânea

Figura 5.2: Resultados obtidos na inline 580, utilizando a amplitude (b) e a fase instantânea (c), como atributos de orientação. Algumas regiões de interesse são destacadas pelas setas coloridas. É mostrado em vermelho o horizonte sísmico rastreado e utilizado como referência para as medições de correlação.

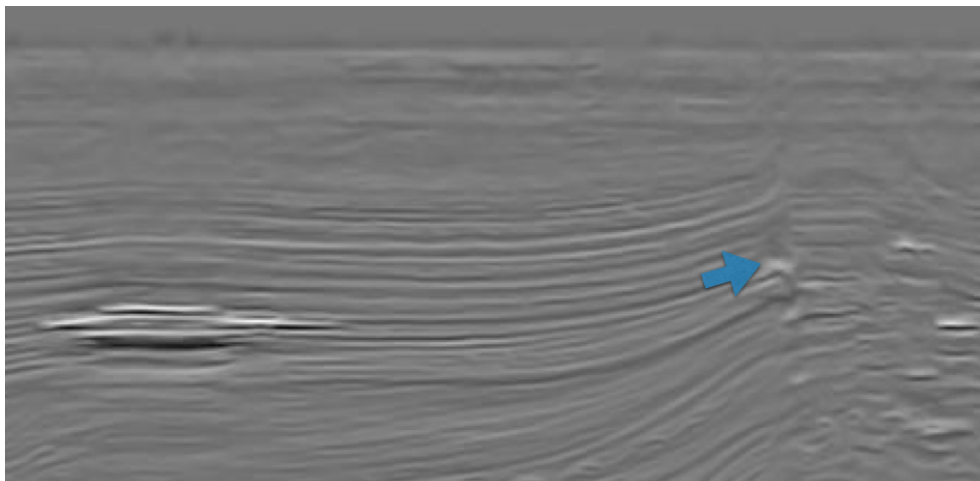
A Figura 5.3(a) apresenta uma visão ampliada da região de falha, destacada pela seta em azul. Nesta figura, é possível observar uma grande quantidade de ruído ao longo dos horizontes sísmicos. Além disto, é visualizada uma região de falha no lado direito. Na Figura 5.3(b) fica claro que a amplitude varia ao longo dos horizontes sísmicos e, por consequência, não representa uma orientação coerente, corrompendo os horizontes durante o processo de filtragem anisotrópica. Diferentemente da Figura 5.3(b), o resultado apresentado utilizando a fase instantânea como atributo de orientação mostra que nesta abordagem os horizontes foram preservados, enquanto parte do ruído foi removida com relação a sísmica original (Fig. 5.3(a)).



5.3(a): Inline 580 utilizada como dado de entrada.



5.3(b): Resultado com a orientação dada pela amplitude.



5.3(c): Resultado com a orientação dada pela fase instantânea.

Figura 5.3: Visões ampliadas: (a) amplitude de entrada da inline 580; (b) suavização anisotrópica orientada pela amplitude; (c) suavização anisotrópica orientada pela fase instantânea.

Na Figura 5.4 é mostrada a crossline 620 original do dado público F3 Block. Nesta figura são destacadas duas regiões de interesse do dado sísmico. A seta em vermelho apresenta uma região de falha, pela qual passa o horizonte rastreado (linha em vermelho) pelo intérprete e utilizado como referência nestes resultados. Já a seta em verde aponta uma região de grande interesse próxima ao domo de sal.

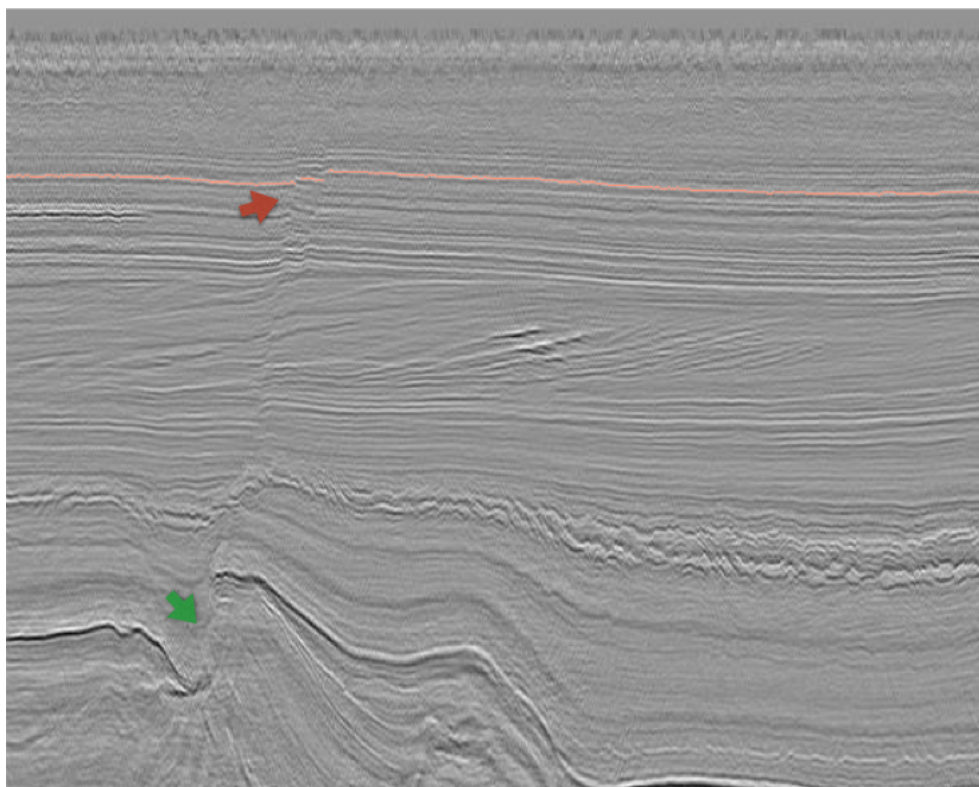
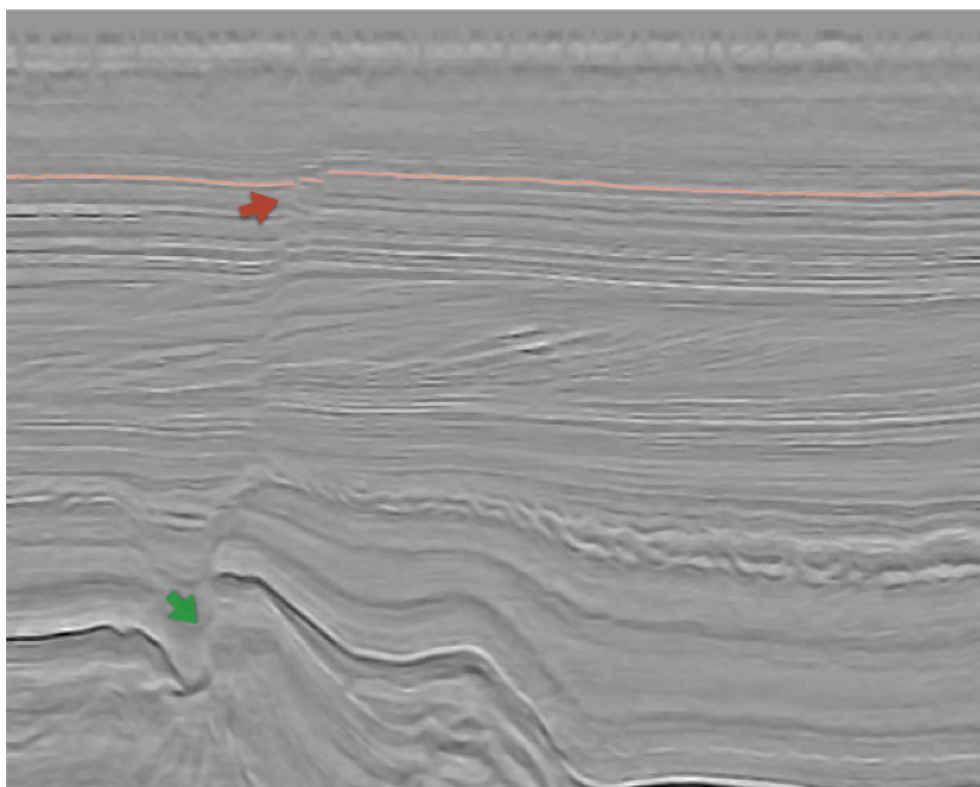
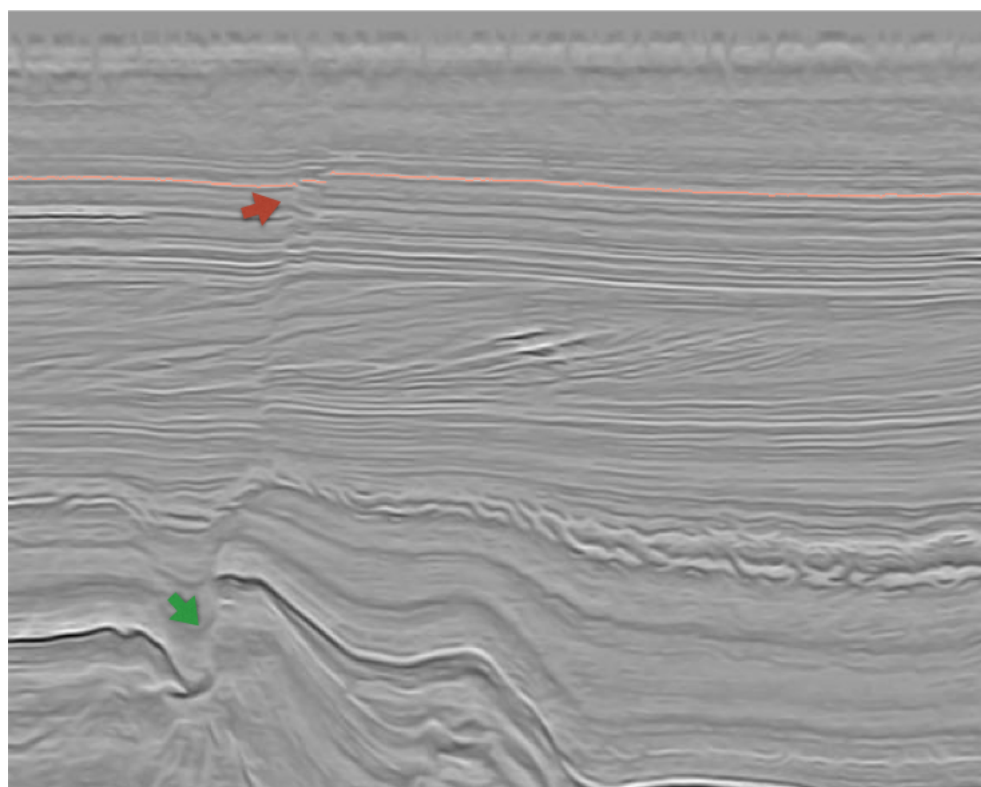


Figura 5.4: Dado sísmico da crossline 620.

O resultado da filtragem anisotrópica proposta neste trabalho é apresentada nas Figuras 5.5(a-b). Assim como no resultado anterior, é constatado que a orientação dada pela amplitude (Fig. 5.5(a)) destrói as estruturas presentes na sísmica original, comprovando que este atributo sísmico não pode ser considerado como um atributo identificador de horizontes. Já na Figura 5.5(b) fica claro que o processo de difusão anisotrópica orientado pelo gradiente da fase instantânea preservou os horizontes, ao mesmo tempo que melhorou a razão sinal/ruído. A diferença entre os dois resultados fica ainda mais evidente na região do horizonte rastreado, especialmente na região de falha, destacada pela seta em vermelho. Vale ressaltar que, em ambos os casos, o horizonte apresentado em vermelho foi rastreado na sísmica original, sendo mostrado somente como referência para facilitar a visualização.



5.5(a): Resultado com a amplitude como atributo de orientação.



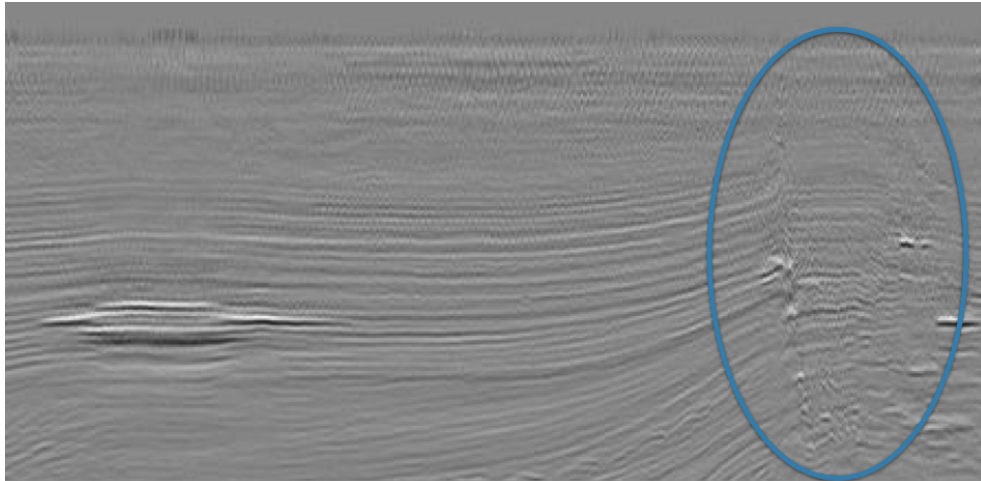
5.5(b): Resultado com a fase instantânea como atributo de orientação.

Figura 5.5: Resultados obtidos na crossline 620, utilizando a amplitude (acima) e a fase instantânea (abaixo) como atributos de orientação. Algumas regiões de interesse são destacadas pelas setas coloridas. É mostrado em vermelho o horizonte sísmico rastreado e utilizado como referência para as medições de correlação.

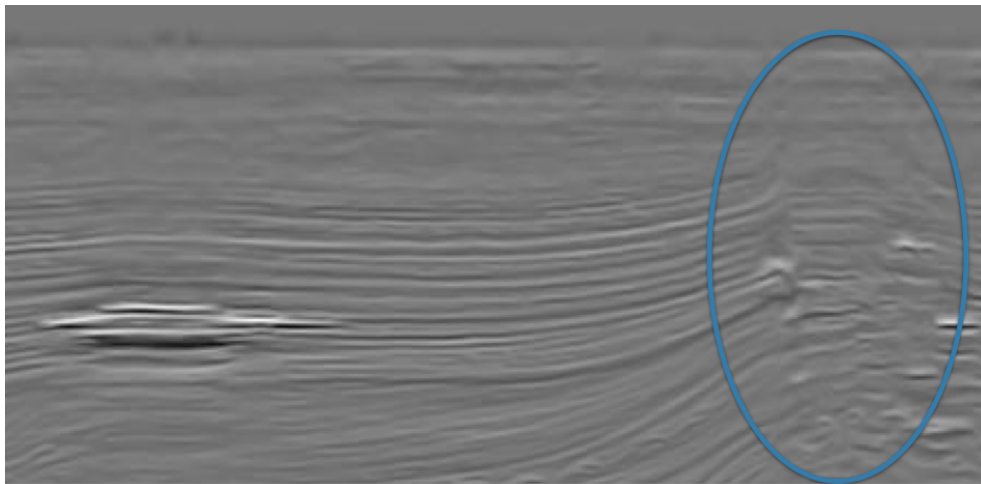
5.2.2

Cenário 2

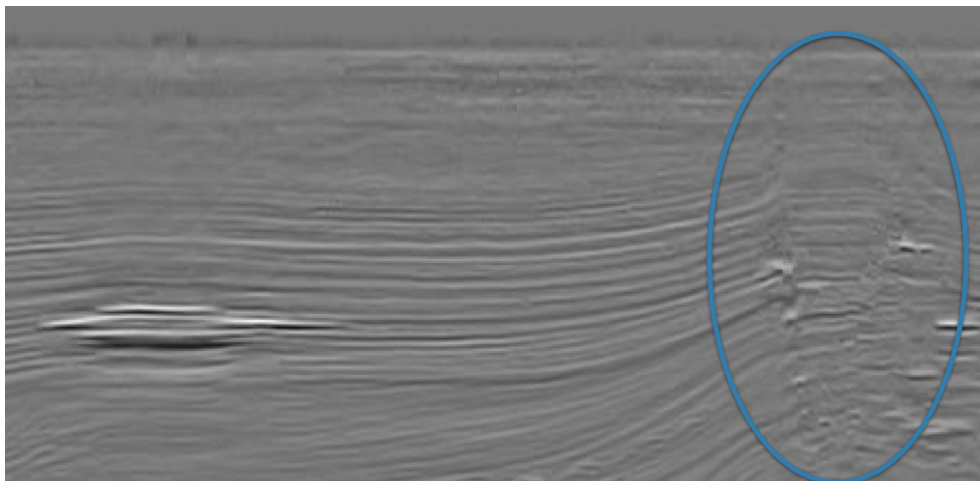
Este segundo cenário consiste na avaliação da influência do coeficiente de preservação de falhas ϵ no processo de filtragem anisotrópica. Neste cenário também foi utilizada a inline 580. A avaliação da influência deste coeficiente é feita na região de falha, destacada pela região em azul na Figura 5.6(a). Esta mesma região é destacada na imagem 5.6(b) que apresenta o resultado da filtragem anisotrópica sem o coeficiente de preservação de falhas ϵ . Nesta figura fica evidente que o processo de difusão atravessou as regiões de falha. Já na Figura 5.6(c) é visível que este coeficiente evitou que o processo de difusão ocorresse através das mesmas.



5.6(a): Amplitude sísmica de entrada.



5.6(b): Resultado sem o coeficiente de preservação de falhas ϵ .



5.6(c): Resultado com o coeficiente de preservação de falhas ϵ .

Figura 5.6: Visões ampliadas da inline 580: (a) dado sísmico de entrada; (b) suavização anisotrópica sem o coeficiente de preservação de falhas ϵ ; (c) suavização anisotrópica com o coeficiente de preservação de falhas ϵ . Nas duas figuras (b-c) foi utilizada a fase instantânea como atributo de orientação.

5.2.3

Cenário 3

Este cenário tem como objetivo apresentar a evolução do processo de difusão à medida em que são executados os passos do método de filtragem anisotrópica proposto nesta pesquisa. O passo de integração utilizado nestes resultados foi de 1s e todas as imagens foram geradas utilizando o coeficiente ϵ . Na Figura 5.7 é mostrada a crossline 720 utilizada como entrada para o processo de difusão anisotrópica.

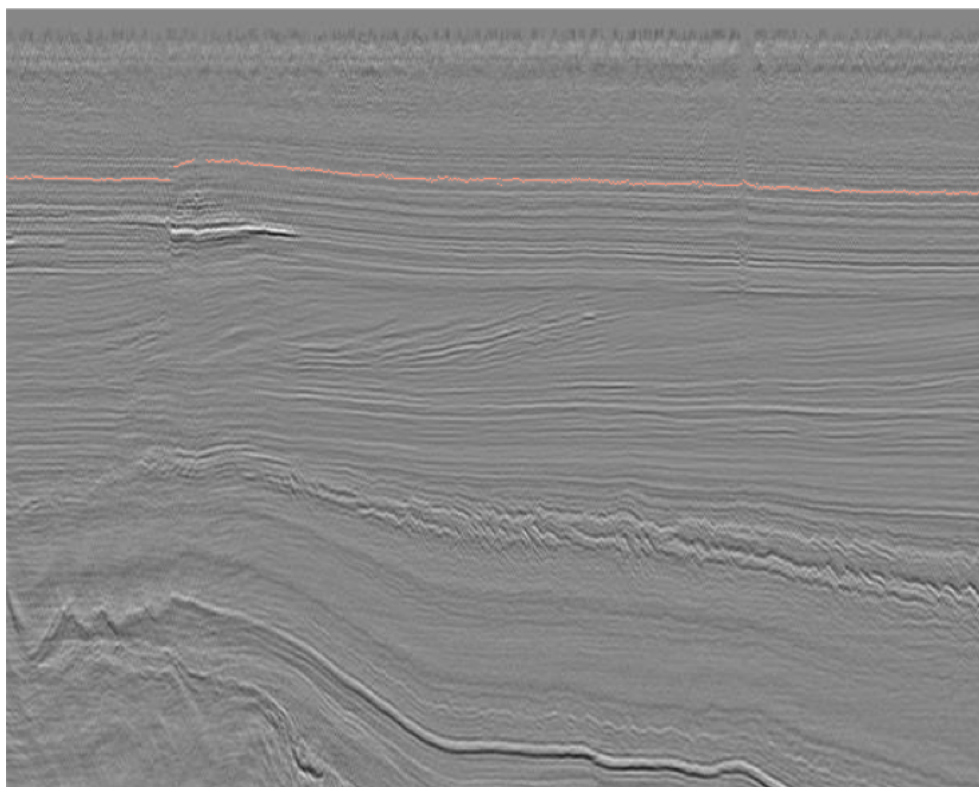
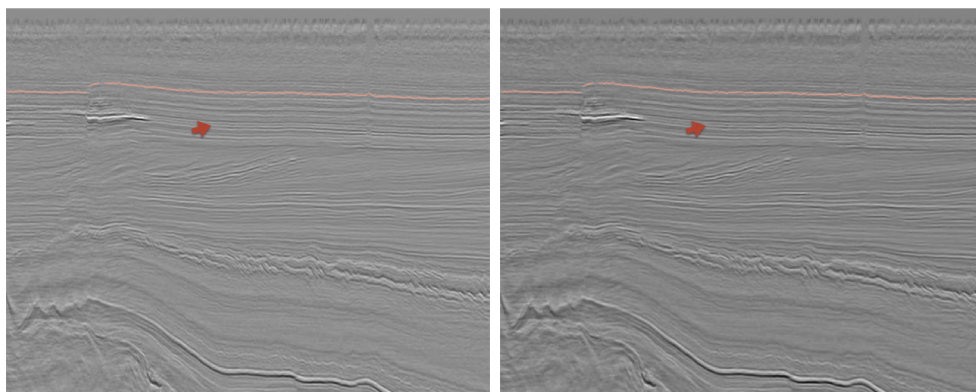


Figura 5.7: Dado sísmico de entrada na crossline 720.

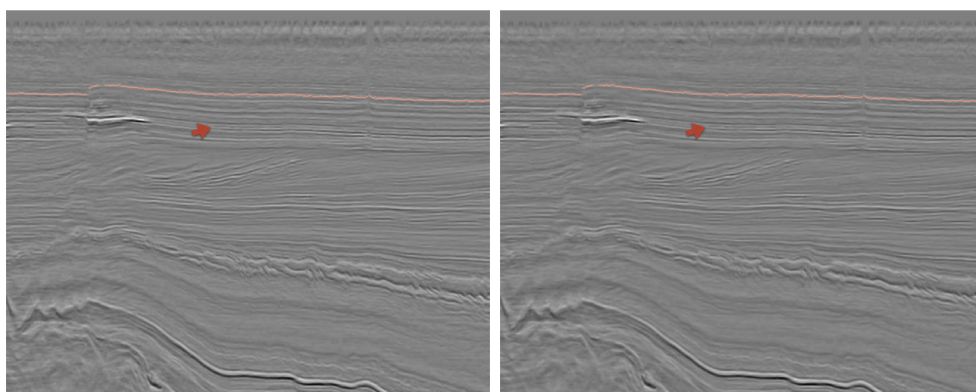
Na sísmica de entrada (Fig. 5.7) foram executadas duas versões do filtro anisotrópico. Na primeira, a amplitude foi utilizada como atributo de orientação da difusão anisotrópica e foram aplicados 8 passos do método proposto, como mostrado nas Figuras 5.8(a-h). Fica visível à medida que o processo de difusão é executado que os horizontes logo começam a ser degradados e a informação destes se perde com o processo de filtragem. Esta perda de informações dos horizontes é visível já no terceiro passo de filtragem (Fig. 5.8(c)). A seta em vermelho destaca uma região em que isto ocorre claramente. Já nas Figuras 5.9 são apresentados os resultados com a orientação dada pelo gradiente da fase instantânea. Mesmo após alguns passos do método de suavização, os horizontes e as falhas permanecem preservados na sísmica

filtrada. A seta em vermelho destaca a região na qual os horizontes sísmicos continuam visíveis mesmo após vários passos do processo de filtragem.



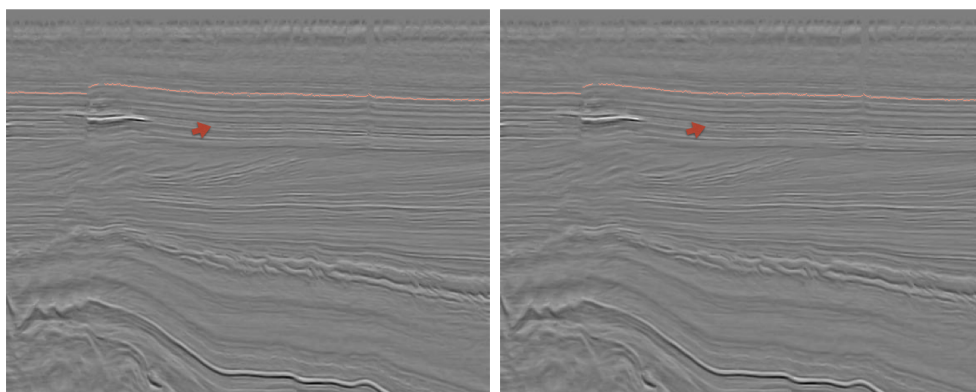
5.8(a): 1 passo

5.8(b): 2 passos



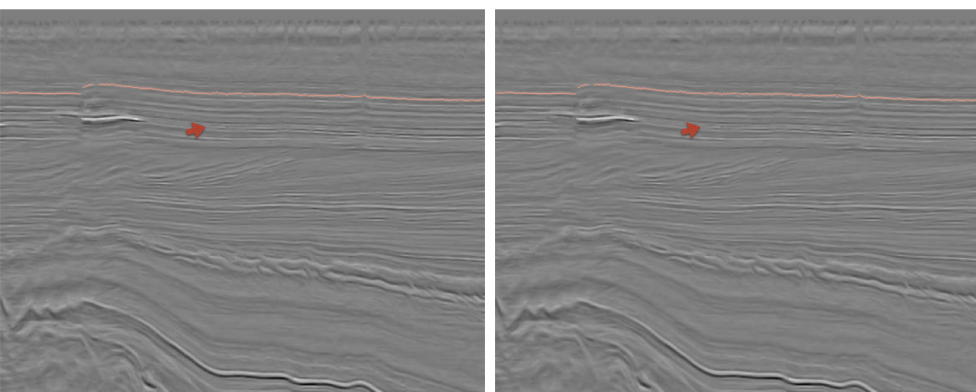
5.8(c): 3 passos

5.8(d): 4 passos



5.8(e): 5 passos

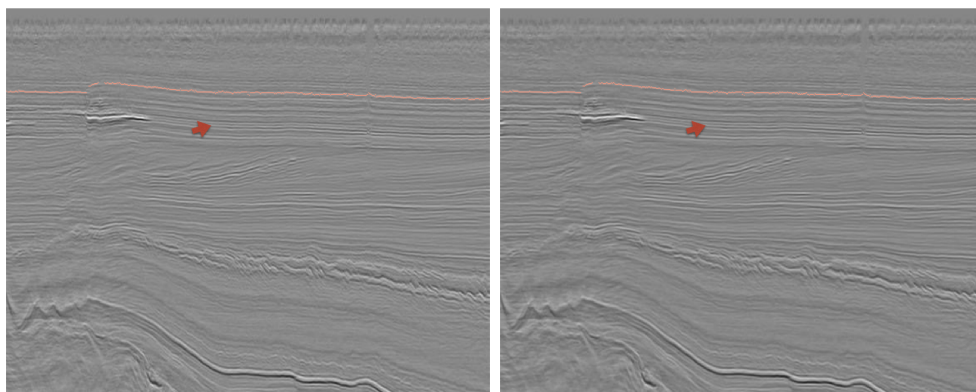
5.8(f): 6 passos



5.8(g): 7 passos

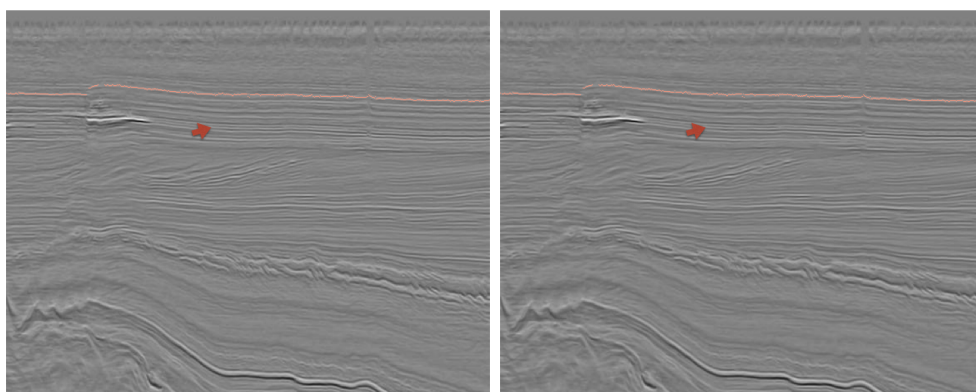
5.8(h): 8 passos

Figura 5.8: Resultados de 1(um) até 8(oito) passos do processo de filtragem anisotrópica orientada pela amplitude sísmica e com o coeficiente ϵ .



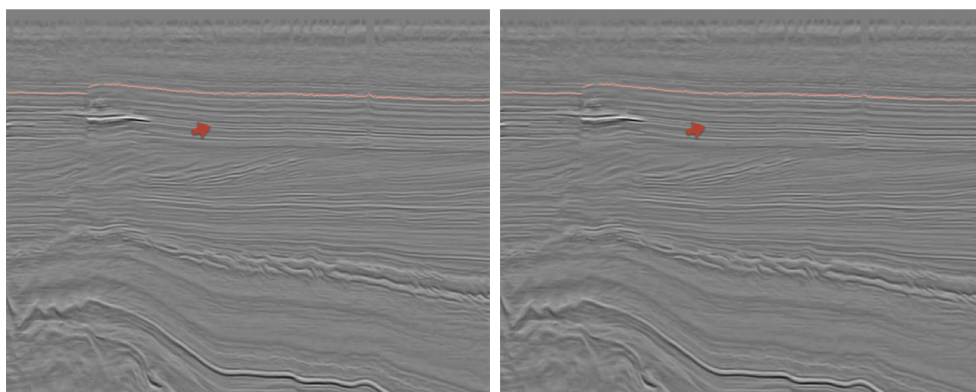
5.9(a): 1 passo

5.9(b): 2 passos



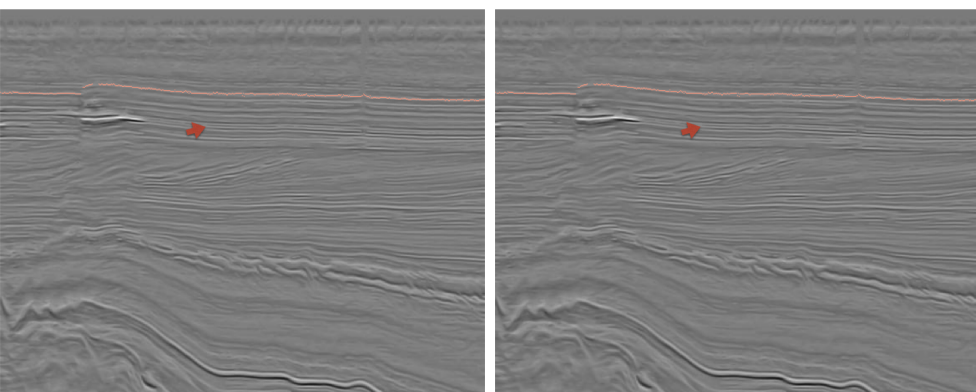
5.9(c): 3 passos

5.9(d): 4 passos



5.9(e): 5 passos

5.9(f): 6 passos



5.9(g): 7 passos

5.9(h): 8 passos

Figura 5.9: Resultados de 1(um) até 8(oito) passos do processo de filtragem anisotrópica orientada pela fase instantânea e com o coeficiente ϵ .

5.3

Metodologia de Avaliação Quantitativa

A metodologia de avaliação quantitativa aplicada para análise da filtragem anisotrópica com preservação de feições sísmicas tem como base o cálculo da correlação de Pearson. Esta medida é calculada ao longo de horizontes previamente rastreados no dado sísmico F3 Block. Neste sentido, são avaliados dois aspectos distintos desta medida. Primeiramente, é calculada a correlação de Pearson ao longo do horizonte de gabarito. Espera-se que esta medida entre amostras vizinhas nos horizontes aumente, visto que o objetivo do processo de filtragem é reduzir as variações de amplitude ao longo dos horizontes.

Posteriormente, esta medida de correlação também é utilizada para refazer o rastreamento do horizonte de gabarito em cada fatia filtrada. Desta forma, é possível observar o efeito da filtragem no processo de rastreamento dos horizontes. O método utilizado é o algoritmo rastreamento de horizonte utilizando o algoritmo de caminho mínimo, proposto por Goldner (39). Destes novos rastreamentos é extraída uma métrica que verifica a distância do novo horizonte para o horizonte de gabarito. É dada uma tolerância de dois pixels para classificar os pontos rastreados como erros/acertos. Para os horizontes que já são rastreados corretamente pelo algoritmo de caminho mínimo, espera-se que o processo de filtragem não prejudique o rastreamento, obtendo um novo horizonte na sísmica filtrada bem próximo do horizonte original. Para os casos onde o rastreamento, na sísmica de entrada, obteve uma taxa de erro alta, espera-se que o método proposto de filtragem anisotrópica contribua de forma positiva reduzindo o ruído e, consequentemente, permitindo um rastreamento com uma taxa de erro menor.

A Figura 5.1 mostra em vermelho o conjunto de amostras rastreadas para um horizonte sísmico na inline 580 do dado F3 Block. Este dado de rastreamento consiste na informação da altura do horizonte em cada traço sísmico do volume. Esta interpretação (vermelho) utilizada como gabarito foi fornecida pelo intérprete da Petrobras, Fernando Barbosa.

Além das medidas de correlação, são apresentadas algumas medidas de tempo e execução variando o tamanho das instâncias de entrada do método proposto, juntamente com uma análise da complexidade teórica do método proposto.

5.3.1

Avaliação da Correlação ao Longo dos Horizontes Previamente Rastreados

Esta seção apresenta a avaliação da correlação ao longo dos horizontes utilizados como referência. Esta medida foi feita calculando a correlação entre amostras vizinhas do horizonte. Ao aplicar o método de filtragem anisotrópica, espera-se que a correlação aumente ao longo do horizonte. A filtragem anisotrópica aplicada ao dado sísmico de entrada para este resultado utilizou a fase instantânea como atributo de orientação, além de fazer uso do coeficiente de preservação de falhas.

O Gráfico 5.10 apresenta a medida de correlação entre as amostras do horizonte de referência na inline 240 do dado F3 Block. Foi analisado um total de 909 amostras rastreadas no horizonte de referência. Vale observar que o valor máximo para a soma das correlações deste conjunto de amostras é de 908, sendo, neste caso, todas as amostras iguais. Analisando este resultado, verifica-se que a correlação aumentou, como esperado. Esta começou com 89,43% da correlação total e alcançando 90,64%. Analisando o aumento por iteração da correlação acumulada, é possível observar que este aumento se concentra, principalmente, nos primeiros 5 passos do filtragem método proposto.

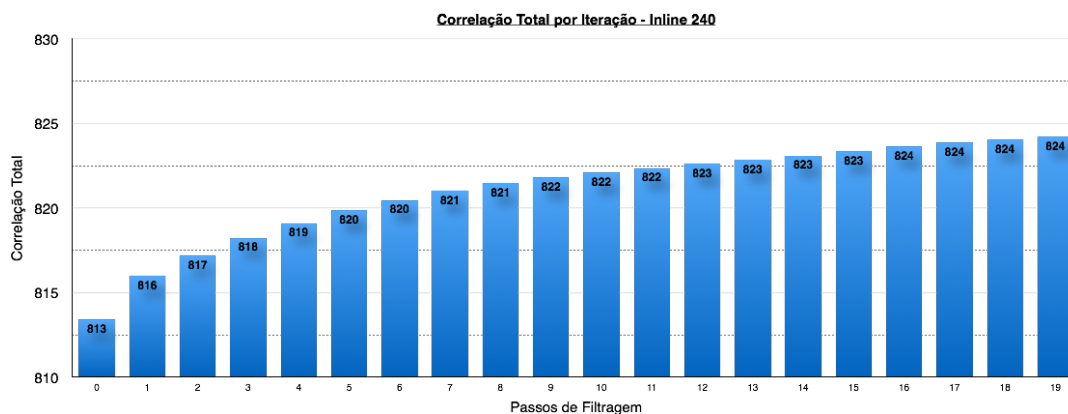


Figura 5.10: Gráfico com a medida de correlação total calculada entre amostras vizinhas. Este resultado foi gerado variando o número de passos do método de filtragem anisotrópica orientado pela fase instantânea e utilizando o coeficiente de preservação de falhas. Estas medidas foram extraídas ao longo do horizonte de referência na inline 240.

5.3.2

Avaliação do Rastreamento de Horizontes na Sísmica Preprocessada

O rastreamento automático de horizontes é uma ferramenta essencial para a interpretação sísmica. Este tem como objetivo principal fornecer ao intérprete uma primeira aproximação do horizonte a partir do qual podem ser feitos ajustes pontuais. Esta seção apresenta os efeitos do método proposto no rastreamento automático de horizontes, comparando a filtragem anisotrópica orientada com o atributo de fase instantânea e com a amplitude. O método de rastreamento utilizado para estes resultados foi desenvolvido por Goldner (39). Os horizontes utilizados como gabarito são os mesmos apresentados nos resultados anteriores.

O Gráfico 5.11 apresenta a taxa de erros em função do número de passos de filtragem para 9 fatias diferentes dos dados sísmico F3 Block, são elas: inlines 0, 20, 60, 240 e 580; e as crosslines 400, 640, 720 e 950. São apresentados os resultados utilizando o método proposto (em azul), além das outras 3 abordagens descritas anteriormente. No dado de entrada, o número total de amostras erradas é de 1094 de um total de 5377 amostras do gabarito, ou seja, aproximadamente 20% das amostras dos horizontes são consideradas erradas. Entre 2 e 4 passos do método proposto, o rastreamento feito na fatia filtrada com a difusão anisotrópica orientada pela fase instantânea e utilizando o coeficiente de preservação de falha obteve o melhor desempenho, onde o número de amostras erradas caiu para aproximadamente 16% (867 amostras

erradas). Analisando os resultados até 20 passos de filtragem anisotrópica, pode-se observar que a filtragem utilizando a fase instantânea se manteve estável e robusto, se comparada com a filtragem orientada pelo atributo de amplitude e sem o coeficiente de preservação de falhas (laranja). Em outras palavras, ao utilizar a amplitude como atributo de orientação, sem o coeficiente de preservação de falhas, logo nas primeiras iterações as feições sísmicas são deterioradas e o rastreamento se perde na sísmica filtrada. Além disto, avaliando a influência da estratégia de preservação de falhas, pode-se concluir que a inclusão deste coeficiente foi fundamental para que o método se mantenha robusto.

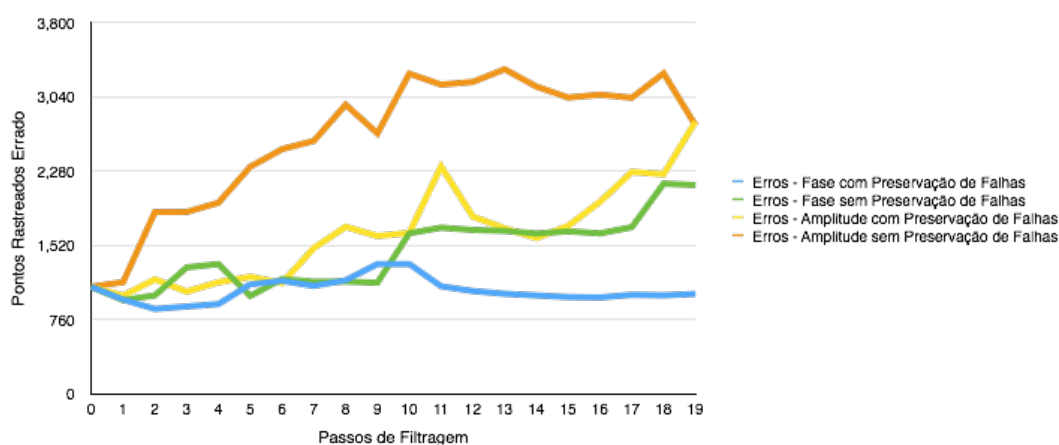


Figura 5.11: Número de erros de rastreamento de acordo com as abordagens da filtragem anisotrópica proposta e variando o número de iterações.

5.3.3

Medidas de Tempo de Execução

Nesta seção são apresentadas as medidas de tempo de execução da implementação do método proposto. Os testes foram executados 10 vezes para cada fatia. Os resultados de tempo de execução apresentados representam uma média aritmética dos tempos obtidos em cada medição. Foram feitas duas avaliações de tempo do método proposto. Na primeira, são apresentadas as medidas de tempo de execução variando o número de passos do método de filtragem anisotrópica. Já no segundo cenário, o tempo total de execução foi avaliado fixando o número de passos de filtragem e variando somente as dimensões das fatias do dado sísmico de entrada.

Para o primeiro resultado, foram utilizadas duas imagens: a inline 240 e a crossline 400. As Tabelas 5.2 e 5.3 apresenta o tempo de execução total por número de passos de filtragem para a inline 240, com dimensões de 951

por 462, e para a crossline 400 (581 por 462). Portanto, para a filtragem da inline 240, o sistema que deve ser resolvido a cada passo de integração tem dimensões de 439.362 por 439.362. Observa-se que, para esta fatia, são necessários aproximadamente 2 minutos para executar 10 passos do método de filtragem proposto. Além disto, para cada passo do processo de filtragem foram necessárias em média 89 iterações do método do gradiente conjugado. O número total de iterações decai a medida em que os passos de filtragem são aplicados na sísmica de entrada (Tab. 5.2 e 5.3). Vale ressaltar que, em cada passo do processo de filtragem, todos os atributos, como a fase instantânea e o traço complexo, são recalculados. Isto se deve ao fato de que, em cada passo, é necessário atualizar o atributo de orientação, ou seja, corrigir a direção do processo de difusão a fim de evitar o surgimento de artefatos indesejados no dado sísmico filtrado.

O custo computacional apresentado é esperado devido a implementação implícita e sequencial do método proposto. Por outro lado, esta abordagem para a resolução do sistema é incondicionalmente estável, sendo que poucos passos de filtragem são suficientes para remover ruído do dado sísmico preservando as feições sísmicas.

Número de passos de filtragem	Tempo de execução (s) (951x462)	Número total de iterações do método de gradiente conjugado
1	16s	98 iterações
2	30s	190 iterações
3	44s	280 iterações
4	57s	370 iterações
5	70s	460 iterações
6	84s	547 iterações
7	97s	634 iterações
8	110s	721 iterações
9	123s	807 iterações
10	136s	892 iterações

Tabela 5.2: Tabela apresentando os tempos de execução do método proposto de acordo com o número de passos de filtragem e aplicado à fatia inline 240 com 439.362 pixels.

Número de passos de filtragem	Tempo de execução (s) (581x462)	Número total de iterações do método de gradiente conjugado
1	10s	95 iterações
2	20s	187 iterações
3	30s	277 iterações
4	40s	366 iterações
5	49s	456 iterações
6	59s	544 iterações
7	68s	630 iterações
8	78s	718 iterações
9	87s	803 iterações
10	96s	888 iterações

Tabela 5.3: Tabela apresentando os tempos de execução do método proposto de acordo com o número de passos de filtragem e aplicado à fatia crossline 400 com 268.422 pixels.

Neste segundo resultado foi avaliado o tempo e execução em função do tamanho da fatia de entrada. Para este resultado foram geradas 200 fatias com dimensões entre 11x11 e 411x411. Para possibilitar a ocorrência do processo de difusão de forma semelhante ao dado sísmico, estas fatias de teste foram geradas a partir de uma fatia original do dados sísmico F3 Block.

Um dos objetivos desta segunda análise do tempo de execução é fazer uma breve análise da complexidade em tempo da versão 2D do método proposto neste trabalho. Dada uma fatia com dimensões $n \times n$, a primeira etapa (Sec. 4.1) tem a complexidade com limite inferior de $O(n^2 \log n)$ devido à transformada de Fourier, utilizada para o cálculo da transformada de Hilbert de cada traço do dado sísmico. Já a segunda etapa (Sec. 4.2) do método proposto consiste principalmente da resolução do sistema de equações utilizando o método do gradiente conjugado. A complexidade teórica deste método se deve principalmente a complexidade associada à multiplicação de matriz por vetor que é $O(n^2)$. Sendo necessárias no máximo n iterações para a convergência do método, portanto a complexidade resultante é de $O(n^3)$.

A complexidade cúbica pode ser comprovada no gráfico 5.12, onde é apresentado o tempo total de execução de acordo com o número de pixels da fatia de entrada. Neste gráfico foi aproximada uma equação cúbica (tracejada) que melhor se ajusta às medições de tempo realizadas.

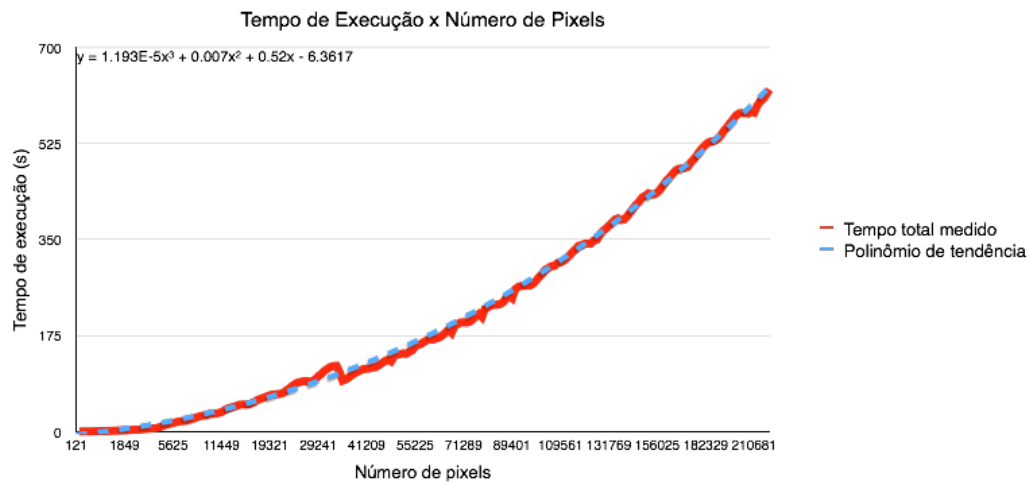


Figura 5.12: Gráfico com o tempo total de execução variando o tamanho das instâncias do problema.

Conclusões e Trabalhos Futuros

Embora diversos avanços tenham sido obtidos no desenvolvimento de métodos de filtragem, muitos trabalhos ainda buscam soluções para remover ruído enquanto preservam os horizontes e as falhas no dado sísmico. As soluções apresentadas na literatura ainda apresentam limitações ao incorporar as restrições impostas pelas feições sísmicas nos processos de filtragem. Estes métodos visam dar suporte ao processo de interpretação, no qual o intérprete analisa a imagem sísmica buscando identificar estruturas geológicas, como falhas, horizontes e canais, dentre outras. O processo de interpretação estrutural é bastante custoso, entre outros motivos, devido à baixa razão sinal/ruído do dado sísmico. Além disto, a presença de ruído dificulta a utilização de métodos de rastreamento automático de horizontes e falhas. Em geral, os métodos automáticos e semi-automáticos fornecem um rastreamento inicial acelerando o trabalho do intérprete.

Visando melhorar a razão sinal/ruído em imagens, diversos trabalhos na literatura propõe a utilização de métodos baseados nos processos de difusão anisotrópica de calor. Desta forma, os tons de cinza de uma imagem são considerados como sendo a concentração que deve sofrer difusão a cada passo. A modelagem matemática através das equações diferenciais permite controlar diversos aspectos do processo de difusão, como, por exemplo, a sua direção. Além disto, a inclusão de um coeficiente de preservação de falhas restringe o processo de difusão em determinadas regiões.

A pesquisa apresentada inclui o desenvolvimento de um novo atributo de falha que tem como base a primeira derivada orientada do traço complexo. Este atributo de falha é fundamentado na teoria de detecção de arestas e utiliza o gradiente da fase instantânea para encontrar as descontinuidades ao longo dos horizontes.

Foi proposto nesta tese um método que realiza a filtragem de dados sísmicos utilizando os conceitos de difusão de calor. O atributo de falha desenvolvido foi incorporado ao método de filtragem anisotrópica, assim como um atributo identificador de horizontes, com objetivo de preservar as feições sísmicas. No método proposto, o tensor de difusão foi construído utilizando o campo gradiente da fase instantânea. Já o atributo de falha foi incorporado ao método proposto na forma de um coeficiente que impede que a difusão ocorra nas regiões de falha.

Para a apresentação dos resultados do método proposto foi utilizado

o dado público F3 Block (1). O método proposto foi avaliado em diversas fatias deste dado real do Mar do Norte. Foram executados três cenários onde o método proposto foi avaliado de forma qualitativa diante da variação dos seguintes aspectos: atributo de orientação (amplitude ou fase instantânea), coeficiente de preservação de falhas e a variação no número de passos de filtragem. Além disto, para a avaliação quantitativa, foram extraídas medidas de correlação ao longo de horizontes previamente rastreados, medições de tempo de execução variando o tamanho da instância de entrada e uma avaliação do rastreamento de horizontes, quando realizado no dado sísmico filtrado.

No primeiro cenário foram mostradas duas fatias, nas direções inline e crossline, do dados sísmico público F3 Block. Originalmente na literatura, o atributo de amplitude é amplamente utilizado como orientação para diversos cálculos no dado sísmico. Contudo, no primeiro cenário foi mostrado que a substituição deste atributo pelo atributo da fase instantânea melhora consideravelmente o resultado do processo de filtragem. Em outras palavras, o atributo identificador de horizontes permite que o processo de difusão ocorra ao longo dos horizontes sísmicos, preservando estas estruturas. O mesmo não ocorre com a amplitude, que não pode ser considerada como atributo identificador de horizontes, e com a qual o processo de difusão também ocorre na direção perpendicular aos horizontes. Já no segundo cenário, é possível observar que o coeficiente de preservação de falhas atua de forma eficiente ao impedir que os processos de difusão ocorram através das regiões de falha. Por fim, no terceiro cenário foi observado como que o processo de difusão ocorre com o aumento no número de iterações. Neste cenário foram executados 8 iterações utilizando a amplitude e a fase instantânea. Constatou-se que, já nas primeiras iterações, o processo de difusão orientado com a amplitude destrói os horizontes sísmicos. A fase instantânea, por outro lado, preservou estas feições.

Ao medir os tempos de execução do processo de filtragem anisotrópica proposta, fica evidente o custo computacional associado à abordagem implícita para resolução do sistema de equações, utilizando o método do gradiente conjugado. Contudo, foi mostrado que são necessários poucos passos de filtragem até que se obtenha um aumento satisfatório na medida de correlação ao longo dos horizontes. Apresentou-se ainda uma breve análise da complexidade em tempo do método proposto, concluindo que a complexidade final é $O(n^3)$. Foi apresentada também uma análise do rastreamento de horizontes no dado sísmico filtrado. Neste resultado, foi possível observar que, de fato, o requisito da preservação das feições sísmicas é atendido com o método proposto, onde é utilizada a fase instantânea e o coeficiente de preservação de

falhas.

Embora apresente resultados bastante satisfatórios ao remover ruído preservando as feições sísmicas, o método proposto apresenta algumas limitações. A primeira delas está associada ao custo computacional da aplicação do processo de difusão. A abordagem implícita foi escolhida devido à sua estabilidade numérica. Acredita-se que a abordagem explícita necessita de passos de integração menores para se manter numericamente estável.

Apesar das restrições de desempenho descritas acima, o trabalho proposto nesta tese foi eficiente e robusto ao filtrar o dado sísmico, removendo ruído e preservando as feições sísmicas. Os resultados apresentados confirmam as hipóteses associadas à importância de incluir os atributos identificadores de feições sísmicas no método de filtragem anisotrópica.

6.1

Base de Dados Pública

Ao final desta pesquisa foi gerada uma base de dados pública com os dados utilizados para o desenvolvimento e avaliação deste trabalho. Juntamente com estes dados, foi disponibilizado um leitor das fatias do dado sísmico. Esta base de dados está disponível no endereço eletrônico: <http://webserver2.tecgraf.puc-rio.br/seismic>.

6.2

Trabalhos Futuros

O método proposto fez uso da fase instantânea como atributo identificador de horizontes, além da primeira derivada direcional do traço complexo, como o coeficiente de preservação de falhas. Os resultados apresentados mostraram, quantitativamente e qualitativamente, que o método foi eficaz ao remover ruído do dado sísmico preservando as feições sísmicas. A eficiência computacional do método proposto é um aspecto que pode ser explorado. Com base nas conclusões obtidas são sugeridas as seguintes extensões do método proposto nesta tese:

6.2.1

Resolução Numérica

No Capítulo 4 foi apresentada a formulação matemática para a implementação tridimensional do método proposto. Contudo, sua viabilidade depende ainda de aprimorar a resolução numérica do método proposto para filtragem através de difusão anisotrópica com preservação de arestas.

Neste sentido, é proposta como trabalho futuro, além da otimização da implementação desenvolvida, a resolução do sistema de equações através de uma abordagem explícita. Neste contexto, acredita-se que é necessário reduzir o passo de integração em função da solução explícita ser condicionalmente estável. Por outro lado, a solução explícita pode ser facilmente paralelizável. Uma análise comparativa entre as duas soluções, implícita e explícita, pode esclarecer questões de estabilidade e do tamanho do passo de integração que deve ser utilizado em cada uma das abordagens.

6.2.2

Implementação em 3D

Uma primeira extensão natural do trabalho desenvolvido é o desenvolvimento de uma estratégia escalável capaz de viabilizar a implementação tridimensional do método proposto. O custo computacional de tempo e de memória dificultam a implementação de uma versão do método de filtragem anisotrópica com preservação de feições sísmicas para dados volumétricos.

6.2.3

Experimentar Outros Atributos Identificadores de Feições Sísmicas

O método de filtragem anisotrópica proposto neste trabalho utiliza a fase instantânea como atributo de orientação e a primeira derivada como coeficiente de preservação de falhas. Uma possibilidade de trabalho futuro é experimentar e avaliar a utilização de outros atributos identificadores de feições sísmicas. Acredita-se que, aspectos como a continuidade do atributo de falha, podem influenciar na preservação destas estruturas durante o processo de filtragem. Contudo, deve-se atentar para o custo computacional do cálculo destes atributo, visto que, neste trabalho, o atributo de falha reutiliza informações já calculadas durante a construção do campo vetorial do gradiente da fase instantânea.

6.2.4

Análise Comparativa

Além das análises quantitativa e qualitativa apresentadas no Capítulo 5, é proposta uma análise comparativa com outros métodos de suavização direcional conhecidos na literatura. Um aspecto que pode ser avaliado é o comportamento do método de rastreamento de horizontes diante de diferentes abordagens de pré-condicionamento do dado sísmico.

Referências Bibliográficas

- [1] REPOSITORY, O. S. **Open seismic repository**, June 2015. <https://opendtect.org/osr/>.
- [2] CHOPRA, S.; MARFURT, K. J. **Seismic Attributes for Prospect Identification and Reservoir Characterization**. Society of Exploration Geophysicists and European Association of Geoscientists and Engineers, 2007.
- [3] GERSZTENKORN, A.; MARFURT, K. J. **Eigenstructure-based coherence computations as an aid to 3-d structural and stratigraphic mapping**. *Geophysics*, 64(5):1468–1479, 1999.
- [4] DE OLIVEIRA MARTINS, L.; SILVA, P. M. ; GATTASS, M. **A method to estimate volumetric curvature attributes in 3d seismic data**. In: EAGE, editor, EAGE 74TH CONFERENCE EXHIBITION, COPENHAGEN, Extended Abstracts. EAGE, EarthDoc, 2012.
- [5] KARIMI, P.; FOMEL, S. **Predictive coherency**, chapter 291, p. 1492–1497. Society of Exploration Geophysicists, 2013.
- [6] SILVA, P. M. **Visualização Volumétrica de Horizontes em Dados Sísmicos 3D**. Tese de Doutorado, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, 2004.
- [7] HASTINGS, R. **Ridge enhancement in fingerprint images using oriented diffusion**. In: DIGITAL IMAGE COMPUTING TECHNIQUES AND APPLICATIONS, p. 245–252, 2007.
- [8] CHOPRA, S.; MARFURT, K. J. **75th anniversary seismic attributes - a historical perspective**. *Geophysics*, 70(5):3SO–28SO, 2005.
- [9] BAHORICH, M.; FARMER, S. **3d seismic discontinuity for faults and stratigraphic features; the coherence cube**. *The Leading Edge*, 14(10):1053–1058, 1995.
- [10] MARFURT., K. J.; KIRLIN, R.; FARMER., S. ; BAHORICH, M. **3D seismic attributes using a semblance-based coherency algorithm**, volume 63. Society of Exploration Geophysicists, 1998.
- [11] VAN BEMMEL, P.; PEPPER, R. **Seismic signal processing method and apparatus for generating a cube of variance values**, Nov. 21 2000. <http://www.google.com/patents/US6151555>, US Patent 6,151,555.

- [12] LUO, Y.; HIGGS, W. G. ; KOWALIK, W. S. **Edge detection and stratigraphic analysis using 3d seismic data**. In: 66TH ANNUAL INTERNATIONAL MEETING, SEG, EXPANDED ABSTRACTS, p. 324–327, 1996.
- [13] YAN, Z.; GU, H. ; CAI, C. **Automatic fault tracking based on ant colony algorithms**. Computers & Geosciences, 51:269–281, Feb. 2013.
- [14] HALE, D. **Fault surfaces and fault throws from 3D seismic images**, chapter 206, p. 1–6. Society of Exploration Geophysicists, 2012.
- [15] SILVA, P. M.; MARTINS, L. ; GATTASS, M. **Horizon Indicator Attributes and Applications**, chapter 227, p. 1–6. Society of Exploration Geophysicists, 2012.
- [16] TANER, M. T.; KOEHLER, F. ; SHERIFF, R. E. **Complex seismic trace analysis**. Geophysics, 44(6):1041–1063, June 1979.
- [17] DE OLIVEIRA MARTINS, L. **Estimativas de Atributos Volumétricos de Curvatura em Dados Sísmicos**. Tese de Doutorado, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, 2012.
- [18] LINDBERG, T. **Scale-space theory: A basic tool for analysing structures at different scales**. Journal of Applied Statistics, p. 224–270, 1994.
- [19] LISLE, R. J. **Detection of zones of abnormal strains in structures using gaussian curvature analysis**. AAPG Bulletin, 78(12):1811–1819, 1994.
- [20] DONIAS, M.; BAYLOU, P. ; KESKES, N. **Curvature of oriented patterns: 2-d and 3-d estimation from differential geometry**. In: IMAGE PROCESSING, 1998. ICIP 98. PROCEEDINGS. 1998 INTERNATIONAL CONFERENCE ON, volume 1, p. 236–240 vol.1, Oct 1998.
- [21] HALE, D. **Structure-oriented smoothing and semblance**. Technical report, Center for Wave Phenomena, Colorado School of Mines, Golden CO, USA, 2009.
- [22] HÖCKER, C. F. W.; FEHMERS, G. C. **Fast structural interpretation with structure-oriented filtering**. The Leading Edge, 21(3):238–243, 2002.

- [23] FEHMERS, G. C.; HÖCKER, C. F. W. **Fast structural interpretation with structure-oriented filtering.** *Geophysics*, 68(4):1286–1293, 2003.
- [24] MARFURT, K. J.; SUDHAKER, V.; GERSZTENKORN, A.; CRAWFORD, K. D. ; NISSEN, S. E. **Coherency calculations in the presence of structural dip.** *Geophysics*, 64:104–111, 1999.
- [25] WANG, X.; GAO, J.; CHEN, W. ; SONG, Y. **An efficient implementation of eigenstructure-based coherence algorithm using recursion strategies and the power method.** *Journal of Applied Geophysics*, 82(0):11 – 18, 2012.
- [26] KLEIN, P.; RICHARD, L. ; JAMES, H. **3d curvature attributes: a new approach for seismic interpretation.** *First Break*, (8):105–112, 2008.
- [27] GOLDMAN, R. **Curvature formulas for implicit curves and surfaces.** *Computer Aided Geometric Design*, 22(7):632 – 658, 2005. *Geometric Modelling and Differential Geometry*.
- [28] FOMEL, S. **Predictive painting of 3d seismic volumes.** *Geophysics*, 75(4):A25–A30, 2010.
- [29] KARIMI, P.; FOMEL, S. **Computing volumetric-curvature attributes using predictive painting**, chapter 288, p. 1477–1482. *Society of Exploration Geophysicists*, 2013.
- [30] JING, Z.; YANQING, Z.; ZHIGANG, C. ; JIANHUA, L. **Detecting boundary of salt dome in seismic data with edge-detection technique**, chapter 282, p. 1392–1396. *Society of Exploration Geophysicists*, 2007.
- [31] AQRAWI, A.; BOE, T. **Improved fault segmentation using a dip guided and modified 3d sobel filter.** In: *SEG TECHNICAL PROGRAM EXPANDED ABSTRACTS 2011*, p. 999–1003. *Society of Exploration Geophysicists*, 2011.
- [32] AQRAWI, A. A.; BOE, T. H. ; BARROS, S. **Detecting salt domes using a dip guided 3d sobel seismic attribute.** In: *SEG TECHNICAL PROGRAM EXPANDED ABSTRACTS 2011*, p. 1014–1018. *Society of Exploration Geophysicists*, 2011.

- [33] AQRAWI, A. A.; WEINZIERL, W.; DABER, R. ; BOE, T. H. **Directional guided seismic attributes and their use in assisting structural, stratigraphic and lithological interpretation**. In: SEG TECHNICAL PROGRAM EXPANDED ABSTRACTS 2012, p. 1–5. Society of Exploration Geophysicists, 2012.
- [34] SONG, J.; MU, X.; LI, Z.; WANG, C. ; SUN, Y. **A faults identification method using dip guided facet model edge detector**, chapter 207, p. 1–5. Society of Exploration Geophysicists, 2012.
- [35] WEICKERT, J.; HEIDELBERGLAAN, E. **A review of nonlinear diffusion filtering**, 1997.
- [36] PERONA, P.; MALIK, J. **Scale-space and edge detection using anisotropic diffusion**. IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell., 12(7):629–639, July 1990.
- [37] BADDARI, K.; FERAHTIA, J.; AÏFA, T. ; DJARFOUR, N. **Seismic noise attenuation by means of an anisotropic non-linear diffusion filter**. Comput. Geosci., 37(4):456–463, Apr. 2011.
- [38] PAMPANELLI, P.; FAUSTINO, G.; MÁRIO, P.; KOLISNYK, A. ; GATTASS, M. **A new fault-enhancement attribute based on first order directional derivatives of complex trace**. In: EAGE, editor, 76TH EAGE CONFERENCE AND EXHIBITION 2014, AMSTERDAM, Extended Abstracts. EAGE, EarthDoc, 2014.
- [39] GOLDNER, E. L. **Um algoritmo de menor caminho em rastreamento de horizontes sísmicos**. Dissertação de Mestrado, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, 2014.

A

*A New Fault-Enhancement Attribute Based on First Order
Directional Derivatives of Complex Trace*

Introduction

Fault detection plays an important role in seismic interpretation, since knowing the location of faults is critical to better understand geological systems. However, manual fault picking is a labor-intensive and time-consuming task which requires well-trained interpreters. Thus, fault enhancement can be a useful tool for streamlining fault mapping and consequently improving the seismic interpretation process.

Coherence attributes are applied for the detection of faults, fractures and others stratigraphic features since the early to mid-1990s (Bahorich and Farmer (1995)). The Coherence Cube is known as the 1st generation of coherence attributes. It is followed by the semblance attribute (2nd generation) that has a better vertical resolution (Marfurt et al. (1998)). The 3rd generation of coherence attributes is obtained by calculating the eigen values of the covariance matrix (Gersztenkorn and Marfurt (1999)). In addition, a variety of others attributes have been proposed with the aim of enhancing faults in seismic data, such as variance cube (Pepper and Van Bemmelen (2000)), attributes based on dip-magnitude and dip-azimuth (Bendar (1998)), among others. Karimi and Fomel (Karimi and Fomel (2013)) propose a coherence attribute based on a structural prediction obtained by the predictive-painting algorithm (Fomel (2010)). Many works apply edge detection methods in order to enhance geological features in seismic data, such as faults and channels. In this context, the gradient magnitude of modified Sobel operators are widely used (Jing et al. (2007), Aqrawi and Boe (2011)). Song *et al.* (Song et al. (2012)) describe a modified edge-detection filter applied to seismic amplitude data and guided by the structural dip, which can be accomplished by gradient structural tensor, complex trace analysis or other algorithms. In order to reduce noise, the authors resample the seismic data using a bivariate cubic function. Moreover, orientation is a fundamental aspect of fault enhancement methods. In this context, horizon indicator attributes are relevant, since they represent the horizon as a level surface (Silva et al. (2012), Martins et al. (2012)).

In this extended abstract, we present a new fault-enhancement attribute based on image processing techniques for edge detection. We use the instantaneous phase gradient as the orientation of the edge-detection filter. In order to enhance faults, we look for maximums and minimums of the first-order directional derivative. Additionally, the proposed method combines the directional derivatives of the real (amplitude) and imaginary (hilbert transform) components of the complex trace. As we will show in our results, the directional derivative of the imaginary part of the complex trace improves the fault enhancement attribute continuity. In order to evaluate the proposed method, we use the volume of the Netherlands offshore F3 block downloaded from the Opendtect website and compare the obtained results with the results of the variance attribute. We conclude that our method is simple, sufficiently accurate, and detects faults without enhancing acquisition footprint. Furthermore, the results show that the instantaneous phase gradient provides consistent dip estimation.

Proposed Attribute for Fault Enhancement

In this section, we describe the proposed edge-detection-based method for enhancing faults in 2D seismic data. Faults can be viewed as discontinuities along horizons. Moreover, it is well known from image processing theory that the edges we are interested in appear as maximums and minimums when we use first-order derivatives. Thus, in order to highlight the discontinuities along the horizons in the seismic data, we apply the first directional derivative. The orientation vector is given by a horizon indicator attribute.

The method can be divided into two parts as shown in Figure 1. At the first part we compute the proposed fault enhancement attribute and in the second part we combine the obtained attribute for each input data. The first part (I) is composed of three steps: 1) compute the gradient of the input seismic attribute and the gradient of horizon indicator attribute, 2) compute the first directional derivative and 3) combine the directional derivatives. In the following, we describe each step of the proposed method in detail.

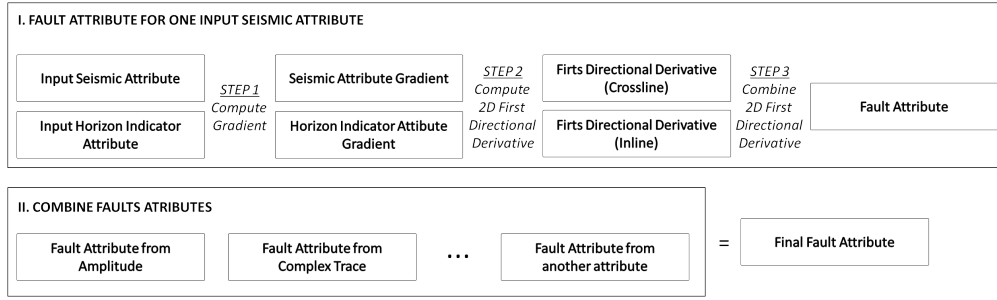


Figure 1: Overview of the proposed method.

The seismic amplitude is the input data of our method (Fig. 1). Generally, this kind of data has a high level of noise which interferes significantly in the visualization of the discontinuities. Consequently, some noisy regions are wrongly enhanced and may be misinterpreted as faults. Thus, in order to attenuate this shortcoming and improve the final result the input data can be preconditioned.

The first step of part I consists in computing the gradient of the input seismic attribute and the gradient of the horizon indicator attribute. It is done by applying a simple derivative operator, such as Sobel, Prewitt or central difference, among others. Here we use the instantaneous phase as horizon indicator attribute. The instantaneous phase is discontinued in π and $-\pi$, and these discontinuities appear as unwanted edges. However, as shown by Barnes (1996), this can be solved by using the analytical equations of the instantaneous phase gradient in directions x and t , respectively, as presented in equations 1. Therefore, the gradient of the horizon indicator attribute is a vector field that is tangential to the horizons.

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} = \frac{1}{X^2 + Y^2} (XY_t - X_t Y) \quad \frac{\partial \phi}{\partial x} = \frac{1}{X^2 + Y^2} (XY_x - X_x Y) \quad (1)$$

Note that the orientation vector is perpendicular to the instantaneous phase gradient vector. The orientation vector field represents the direction in which we detect the discontinuities. It is important to emphasize that the final result depends on the accuracy of the orientation vector field.

The first directional derivative can be obtained by the dot product between the two vectors that are functions of the same variables. Thus, in the second step of part I we compute the directional derivative $F = | \langle \nabla \phi^\perp, \nabla A \rangle |$ as the dot product between the input seismic attribute gradient ∇A in directions x and t , and the orientation vector $\nabla \phi^\perp$. Considering F as our fault attribute, the maximums and minimums of F represent the discontinuities detected in the perpendicular direction of the instantaneous phase gradient. As a result, if there is any discontinuity along the horizon it is detected as an edge.

The third step of part I consists in combining the attribute computed in inline and crossline directions. We combine these two seismic volumes getting the maximum value for each voxel $F_{final} = \text{MAX}(F_{inline}, F_{crossline})$. However, any other combination strategy can be used.

Considering the seismic amplitude as the input data, we observe that the dot product is zero when the amplitude gradient is zero. Since our method look for maximums and minimums, we do not have response where the gradient is zero. Thus, using the imaginary part of the complex trace which the gradient is non zero at in these regions, we are able to detect such discontinuities. Based on this, the part II of the proposed method consists in combine the obtained results from part I. We can use a variety of combination strategies, such as, arithmetic average, geometric average, maximum values, among others.

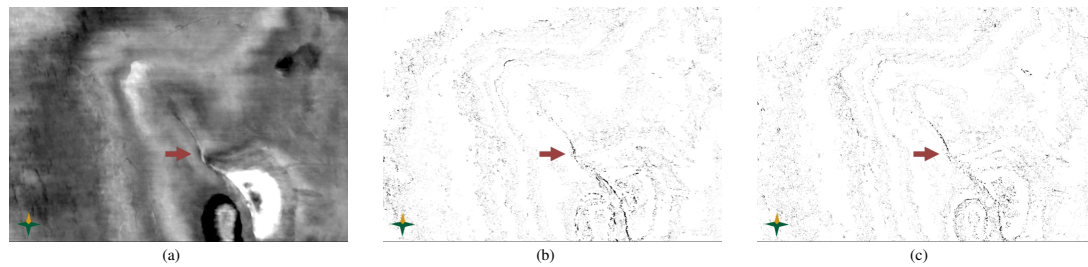


Figure 2: Results of the proposed attribute: (a) preconditioned seismic amplitude (input data); (b) obtained result using only the real (amplitude) component of the complex trace as seismic input attribute; and (c) obtained result using only the imaginary (hilbert transform) component of the complex trace as input seismic attribute. The red arrows indicate a fault region.

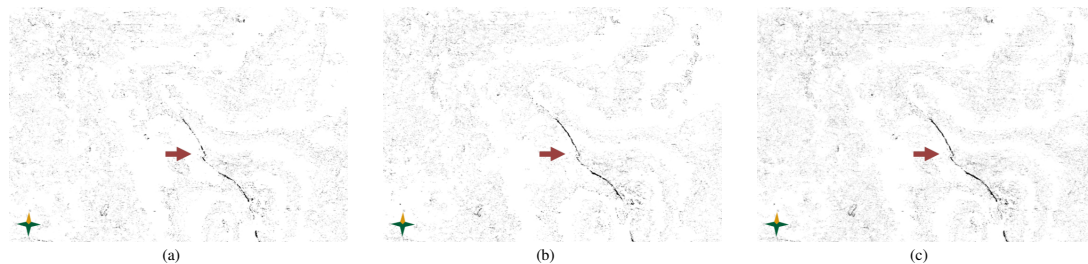


Figure 3: Proposed attribute for the time slice 404 obtained with the combination of different input seismic attributes: (a) seismic amplitude as input attribute; (b) imaginary component of the complex trace as input seismic attribute; and (c) result after combining the faults attributes computed from real and imaginary component of the complex trace by getting the maximum value between them. As we can observe, the result shown in (b) and (c) are clearly complementary.

Results

In this section we present some results and discussions. In order to evaluate the proposed attribute, we use the volume of the Netherlands offshore F3 block downloaded from the Opendtect website. We also compare the obtained results with variance attribute. The amplitude seismic volume was preconditioned. In order to reduce noise, the structural smoothing filter was applied. We used the same amplitude seismic volume to compute the variance and the proposed attribute. To compute the proposed attribute we used a 3x3 operator filter to calculate the seismic amplitude gradient (step 1) and the horizon indicator attribute (step 2). As described previously, we compute the first-order directional derivative by means of the dot product between the seismic attribute gradient and the orientation vector. In all results we used the instantaneous phase gradient as the orientation vector.

Figure 2 (a) shows the input seismic amplitude. Figure 2 (b) and (c) present the results for the time slice 552 obtained using only real (amplitude) and imaginary components of the complex trace as seismic input attribute, respectively. We can observe that our attribute highlighted correctly the fault. However, it can also be noted that there is some response along the horizons. We believe that this is due to the size of the Sobel operator used to compute the gradients. Figure 3 (c) shows that the results obtained using the real (Fig. 3 (a)) and the imaginary component of the complex trace (Fig. 3 (b)) are clearly complementary. Figure 4 compares the ant tracking outputs regarding variance (Fig. 4 (b)) and proposed attribute (Fig. 4 (c)). Despite faults have been identified correctly, it can be seen that several acquisition footprint are highlighted. On the other hand, the result of the proposed attribute shown in Figure 4 (c) indicates that our method is less susceptible to the acquisition footprint. This is a highly desirable feature when researching an attribute for fault detection.

Conclusions

Edge detection is a powerful tool used in the identification of geological features. We presented an edge-detection-based method for fault enhancement. The proposed method is simple to implement and

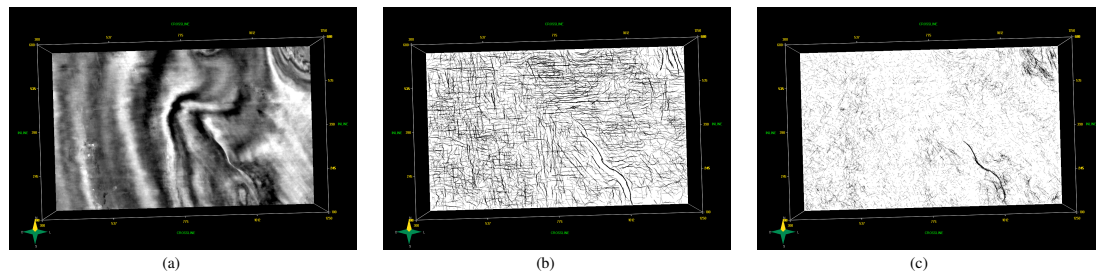


Figure 4: Result of proposed method and variance attribute: (a) preconditioned amplitude data. Result of the ant tracking applied to the variance attribute (b) and the output of the proposed attribute (c) at the time slice 640.

has a strong mathematical background. By applying the first-order directional derivative we are able to enhance faults, since they appear as discontinuities in the seismic data. In this work, the orientation is given by the vector perpendicular to the instantaneous phase gradient. It is worth mentioning that this orientation vector is calculated analytically.

Preliminary results suggest that this well-known concept of advanced calculus can be efficiently used to improve the visualization of fault systems. Another important contribution is that our attribute proved to be less sensitive to the acquisition noise and do not show response between the horizons. We also showed that the continuity of the fault attribute was considerably improved by combining the directional derivative of the imaginary part of the complex trace with the amplitude. These features are highly desirable for fault interpretation and make the fault visualization easier for the interpreter.

Future works involve studying other horizon indicator attributes, as well as evaluating their contribution for detecting faults in seismic data. We also intend to extend the proposed methodology to a multi scale approach to better control the continuity of faults, without enhancing noise.

Acknowledgements

The authors would like to thank the Computational Geophysics Group (Tecgraf/PUC-Rio) for discussions about the research hypothesis and Petrobras for the technical contributions. Patrícia Pampanelli would like to thank CNPq (National Research Council of Brazil) for scholarship support.

References

- Aqrabi, A. and Boe, T. [2011] Improved fault segmentation using a dip guided and modified 3d sobel filter. *SEG Technical Program Expanded Abstracts 2011*, 999–1003.
- Bahorich, M. and Farmer, S. [1995] 3d seismic discontinuity for faults and stratigraphic features; the coherence cube. *The Leading Edge*, **14**(10), 1053–1058.
- Barnes, A.E. [1996] Theory of 2-d complex seismic trace analysis. *Geophysics*, **61**(1), 264–272.
- Bendar, J. [1998] Least squares dip and coherency attributes. *The Leading Edge*, **17**(6), 775–778.
- Fomel, S. [2010] Predictive painting of 3d seismic volumes. *GEOPHYSICS*, **75**(4), A25–A30.
- Gersztenkorn, A. and Marfurt, K. [1999] Eigenstructure-based coherence computations as an aid to 3d structural and stratigraphic mapping. *GEOPHYSICS*, **64**(5), 1468–1479.
- Jing, Z., Yanqing, Z., Zhigang, C. and Jianhua, L. [2007] Detecting boundary of salt dome in seismic data with edge-detection technique. *SEG Technical Program Expanded Abstracts 2007*, 1392–1396.
- Karimi, P. and Fomel, S. [2013] *Predictive coherency*, chap. 291. 1492–1497.
- Marfurt, K., Kirlin, R., Farmer, S. and Bahorich, M. [1998] 3d seismic attributes using a semblance-based coherency algorithm. *GEOPHYSICS*, **63**(4), 1150–1165.
- Martins, L., Silva, P.M. and Gattass, M. [2012] A method to estimate volumetric curvature attributes in 3d seismic data. *EAGE 74th Conference Exhibition, Copenhagen*, Extended Abstracts, EAGE, EarthDoc.
- Pepper, R. and Van Bommel, P. [2000] Seismic signal processing method and apparatus for generating a cube of variance values. US Patent 6,151,555.
- Silva, P.M., Martins, L. and Gattass, M. [2012] Horizon indicator attributes and applications. *SEG Technical Program Expanded Abstracts 2012*, 1–6.
- Song, J., Mu, X., Li, Z., Wang, C. and Sun, Y. [2012] A faults identification method using dip guided facet model edge detector. *SEG Technical Program Expanded Abstracts 2012*, 1–5.