

UNIVERSIDADE FEDERAL DA BAHIA INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS CURSO DE GRADUAÇÃO EM GEOFÍSICA

GEO213 – TRABALHO DE GRADUAÇÃO

TÉCNICAS DE ANÁLISE ESPECTRAL E VOLUMÉTRICA APLICADAS À INTERPRETAÇÃO SÍSMICA

MARCELO PORTELA MOTTA

SALVADOR – BAHIA

AGOSTO – 2007

Técnicas de Análise Espectral e Volumétrica Aplicadas à Interpretação Sísimica

por

Marcelo Portela Motta

GEO213 – TRABALHO DE GRADUAÇÃO

Departamento de Geologia e Geofísica Aplicada

DO

Instituto de Geociências

DA

Universidade Federal da Bahia

Comissão Examinadora Geol. Marco Cesar Schinelli - Orientador Dr. Marco Antônio Barsottelli Botelho Geol. Cláudio Sarnelli

Data da aprovação: 29/08/2007

Aos meus familiares, namorada e amigos.

RESUMO

A investigação estratigráfica de dados sísmicos é uma importante ferramenta na pesquisa de reservatórios de hidrocarbonetos. Cada vez mais, técnicas avançadas têm sido utilizadas pela indústria para promover uma exploração bem sucedida em novos reservatórios de petróleo, assim como o desenvolvimento de campos existentes em áreas maduras.

O objetivo deste trabalho é apresentar os aspectos da interpretação estratigráfica de dados sísmicos 3D, utilizando um conjunto de metodologias e técnicas, como análises espectrais e volumétricas, para realçar áreas de interesse, visualizar subconjuntos do dado original e extrair geometrias como superfícies e feições sismoestratigráficas representando sistemas deposicionais.

O trabalho começa com uma descrição de métodos de investigação sismoestratigráfica. Depois, a execução das metodologias é detalhada, mostrando, assim, suas aplicações. Por fim, são apresentados alguns resultados e análises em dados reais, com suas respectivas conclusões finais.

O presente trabalho tem abordagem principalmente empírica, exigindo um amplo condicionamento e prévia análise de dados até a execução final em dados reais. Foram utilizados dados sísmicos processados e reprocessados, dados de poços e horizontes previamente interpretados. Todos os dados e recursos utilizados são da PETROBRAS S.A. e para efeito de preservação da confidencialidade dos dados, não foram identificados durante a condução desta pesquisa.

ABSTRACT

The research stratigraphic seismic data is an important tool in the search for hydrocarbon reservoirs. Increasingly, advanced techniques have been used by industry to promote a successful exploitation of new oil reservoirs, as well as the development of existing fields in mature areas.

The objective of this work is to present the aspects of the stratigraphic interpretation of seismic data 3D, using a range of methodologies and techniques, such as spectral analysis and volumetric, to highlight areas of interest, view subsets of the original data and extract geometry and surfaces.

The work starts with a description of methods of investigation stratigraphic. Then, the implementation of the methodology is detailed, showing thus their applications. Finally, some results are presented and analysis on real data, with their final conclusions.

This work is mainly empirical approach, requiring an extensive conditioning and analysis of data prior to the final implementation in actual data. It has been used seismic processed and reprocessed data, wells data and horizons previously interpreted. All data and resources used are from PETROBRAS S.A.

ÍNDICE

RESU	MO	iii
ABST	RACT	iv
ÍNDIC	${f E}$	v
ÍNDIC	E DE FIGURAS	vii
INTRO	DDUÇÃO	1
CAPÍ	FULO 1 Interpretação Estratigráfica	5
1.1	Sismoestratigrafia	5
	1.1.1 Conceitos Utilizados na Análise Sismo estratigráfica $\ .\ .\ .\ .\ .$	6
	1.1.2 Relações entre Estratos e Limites de Seqüências: Padrões Internos de	
	Reflexões Sísmicas	6
1.2	Reconhecimento de Superfícies Estratigráficas	9
1.3	Análise de Fácies Sísmicas	10
	1.3.1 Configuração dos Padrões de Reflexões Internos	11
	1.3.2 Tipos de Geometrias Externas das Sismofácies	12
CAPÍ	GULO 2 Visualização Volumétrica	18
2.1	Volume	18
2.2	Cor e Opacidade	20
2.3	Interação 3D em Volumes Sísmicos	23
	2.3.1 Planos de Corte	24
	2.3.2 Probes	28
	2.3.3 Especificação de Subvolumes	29
	2.3.4 Realidade Virtual	30
CAPÍ	FULO 3 Princípio das Metodologias Utilizadas	31
3.1	O Efeito Tuning	31
3.2	Decomposição Espectral	32
	3.2.1 Modelo de Camada em Cunha	35
	3.2.2 <i>Tuning</i> Cube	38
3.3	Reconhecimento de Formas Sísmicas	39
	3.3.1 Princípios da Metodologia	40

CAPÍTULO 4	4 Aplicação das Metodologias	42		
4.1 Decom	posição Espectral	42		
4.2 Análise	e da forma de Onda	43		
CAPÍTULO S	5 Análise e Interpretação	45		
5.1 Tuning	$g Cube \ldots \ldots$	45		
5.2 Análise	e de Forma de Onda	46		
CAPÍTULO 6 Conclusões				
Agradecimentos				
Referências Bibliográficas				

ÍNDICE DE FIGURAS

1.1	Padrões geométricos das reflexões e sua posição na seqüência	7
1.2	Relações de estratos em uma seqüência, em função da terminação de refletores.	9
1.3	Padrões internos de configurações de sismofácies	13
1.4	Geometrias externas características de algumas sismofácies	14
1.5	Padrões dos refletores internos de algumas sismofácies em montiforma (mod.	
	de Mitchum et al., 1977b)	16
1.6	Padrões de configurações internas dos refletores das sismofácies de preenchi-	
	mento (mod. de Mitchum et al., 1977b).	17
2.1	Elementos de Volume	19
2.2	Voxel contendo as cores primarias RGB	20
2.3	(a) Volume sísmico com 100% de opacidade; (b) Volume sísmico com 25% de	
	opacidade	21
2.4	Histograma de opacidade.	22
2.5	(a) Volume sísmico totalmente opaco;(b) Volume sísmico submetido a graus	
	de transparência.	23
2.6	Manipulador de planos de corte	24
2.7	Três sets ortogonais de planos de corte, seções verticais (in-line, crossline) e	
	horizontal (<i>Time Slice</i>) através do volume sísmico	25
2.8	Seqüência de zig-zag passando por alguns poços	26
2.9	Seções verticais e horizontal (<i>in-line, crossline eTime Slice</i>)	27
2.10	Probe de corte permitindo a visualização interna do volume	29
2.11	Subvolume sísmico	30
3.1	A amplitude da <i>wavelet</i> depende da espessura entre topo e base de uma camada.	31
3.2	O efeito de uma fina camada. (Partyka, 1999)	33
3.3	Janela temporal longa geralmente exibe um espectro de amplitude branca.	
	(Partyka, 1999)	34
3.4	Janela temporal curta, geralmente, exibe um espectro de amplitude não-	
	branca apresentando padrões de interferências. (Partyka, 1999)	34
3.5	Modelo de refletividade da cunha, O branco corresponde a amplitude positiva	
	enquanto o preto a negativa	35
3.6	Versão filtrada da refletividade.	36
3.7	Transformada discreta de Fourier dos traços, o branco representa a alta am-	
	plitude enquanto o preto a baixa.	36

Amplitude do tuning das camadas delgadas versus freqüência. (Partyka, 1999)	37
Amplitude do <i>tuning</i> das camadas delgadas <i>versus</i> espessura temporal. (Partyka	
1999)	38
Representação esquemática da metodologia decomposição espectral. (Johann,	
2002)	39
Slice de 105 Hz ressaltando as feições de paleo-duna.	48
Slice de 115 Hz ressaltando as feições de paleo-duna. \ldots \ldots \ldots \ldots	49
Slice de 113 Hz interpretado	50
Slice de 15 Hz mostra somente ruídos. \ldots \ldots \ldots \ldots \ldots \ldots \ldots	51
Slice de 45 Hz mostra somente ruídos. \ldots \ldots \ldots \ldots \ldots \ldots	52
Slice de 80 Hz ressaltando as feições de paleo-canal	53
Slice de 97 Hz ressaltando as feições de paleo-canal	54
Slice de 97 Hz interpretado. \ldots	55
Slice de 10 Hz mostra somente ruídos.	56
Slice de 25 Hz mostra somente ruídos. \ldots \ldots \ldots \ldots \ldots \ldots \ldots	57
Visão em perspectiva. (a) faixa de freqüência 97 Hz ; (b) Geobody do paleo-	
canal sobreposto a faixa de freqüência 97 Hz; (c) Geobody do paleo-canal.	58
As setas em amarelo indicam em: (a) o limite da superfície de escavação	
mostrado em um <i>Slice</i> de 27 Hz, (b) a superfície de escavação em uma seção	
vertical.	59
Mapa de formas de onda; e sua respectiva seção vertical da linha amarela,	
onde dentro das elipses estão evidenciados os lóbulos de arenito	59
A classe azul representa as falhas	60
	Amplitude do tuning das camadas delgadas versus freqüência. (Partyka, 1999) Amplitude do tuning das camadas delgadas versus espessura temporal. (Partyka 1999)

INTRODUÇÃO

A sísmica até meados dos anos 60 era muito limitada tecnologicamente. Os instrumentos eletrônicos e os registros por meios analógicos eram de baixa qualidade. Já no final dos anos 60 ocorreram algumas modificações muito significativas, a principal foi o registro digital que propiciou subitamente, fantásticos melhoramentos, marcados pelas técnicas de cobertura múltipla (CDP), a melhoria da qualidade dos registros e as enormes possibilidades de se processar o sinal registrado no campo, concomitantemente, melhorias contínuas nos equipamentos eletrônicos também viriam resultar em maior fidelidade do sinal sísmico.

Os métodos sísmicos anteriormente limitavam-se a uma aproximação bidimensional das imagens em sub-superfície (sísmica 2D), entretanto, o advento da sísmica 3D, veio proporcionar imagens mais fidedignas por apresentarem um adensamento dos dados imensamente superior.

Uma compreensão geométrica mais detalhada da sub-superfície pôdeio à contribuir significativamente com os problemas de exploração de petróleo, já que o contexto estrutural e estratigráfico dos reservatórios na naturezaesquisados passou a ser visualização de forma tridimensional. Foi então que em 1972 Walton apresentou o conceito de levantamento sísmico 3D. Em 1976, Bone, Giles e Tegland apresentaram essa nova tecnologia ao mundo.

A EXXON Production Research efetuou as primeiras experiências de sísmica 3D, ainda em 1963. Os excelentes resultados obtidos foram divulgados no Congresso Anual da SEG em 1970, assim como na revista Geophysics de junho de 1979. As técnicas 3D apesar dos seus altos custos, tornaram-se extremamente atrativas em todo o mundo por resultarem em redução do número de poços necessários na fase exploratória, e principalmente, nas fases de avaliação, desenvolvimento e produção dos campos.

Serão citados a seguir alguns aspectos que propiciaram uma contínua e significativa evolução no aprimoramento tecnológico da sísmica de reflexão, são eles:

- 1. Os instrumentos foram aperfeiçoando-se, as fontes aumentaram sua potência, seu conteúdo de freqüências, maior diresividade e redução das reverberações intrínsecas á fonte. Nos receptores, houve aumento do range dinâmico, sensibilidade, miniaturização, introdução de receptores vetoriais, assim como equipamentos mais leves e envio, sem fio, dos sinais para o registrador.
- 2. Os sismógrafos evoluíram ininterruptamente com o tempo acompanhando a evolução da eletrônica e da informática, propiciando mais sensibilidade, mais canais e melhores

técnicas de filtragem e registro do sinal.

- 3. O processamento dos dados sísmicos foi submetido a um grande salto durante essa evolução digital. Inicialmente os centros de processamento de dados sísmicos precisa-ram usar computadores cada vez mais poderosos chamados mainframes. Mais recentemente, a utilização de soluções mais "leves" com a aplicação de computadores de menor porte trabalhando em conjunto (*cluster*), veio prover uma melhora dramática na performance. Atualmente, o processamento dos dados sísmicos está se aproximando cada vez mais dos intérpretes, oferecendo soluções interativas em tempo real.
- 4. Com a introdução das workstations e dos softwares dedicados à interpretação ocorreu um grande salto na velocidade e na qualidade das interpretações dos dados sísmicos. Recentemente, as interpretações interativas com recursos de processamento permitem análises acuradas dos atributos do traço sísmico, enriquecendo sobremodo as possibilidades de interpretação.
- 5. No passado interpretar dados sísmicos significava elaborar "mapas topográficos de subsuperfície". Hoje são gerados mapas migrados em profundidade e podem ser representadas as características de porosidade do reservatório ou estimar-se a natureza dos fluidos nestes contidos.

A aplicação da interpretação estratigráfica de dados sísmicos na área de exploração e produção (E&P) da indústria de petróleo proporcionou um grande avanço no trabalho dos geocientistas. Essa tecnologia possibilita uma visualização simultânea e uma interpretação integrada de diferentes estruturas geológicas e indicativas de paleo ambientes deposicionais com maior acurácia e rapidez.

Explorar dados sísmicos compreende interagir empiricamente com as suas varias representações: examiná-las, aplicar ações que as altere, refutar, comparar resultados e classificar. O trabalho de interpretação destes dados requer recursos para realçar áreas de interesse, visualizar subconjuntos do dado original e extrair geometrias como superfícies representando uma interfácie entre camadas geológicas, feições litoestratigráficas, entre outros.

Essas atividades exigem um conjunto de ferramentas, aplicativos para visualização em fatias *slices* nas direções do volume, definição de subvolumes *probes* e manipulação de dados, conceitos de decomposição espectral, entre outros. Para tanto, utiliza-se aplicativos para realçar áreas de interesse, através da edição seletiva da cor e opacidade das amplitudes sísmicas.

A pesquisa apresentada a seguir, faz parte do trabalho de graduação em geofísica da UFBA e foi realizada durante estágio na PETROBRAS S.A no Setor de Caracterização e Estudos de Reservatórios da UN-BA (Unidade de Negócios da Bahia) com base em dados reais não georeferenciados e com os recursos da própria empresa. Não foi feita nenhuma localização ou especificação dos dados, pois não era necessário ao escopo do trabalho e também preserva a norma de sigilo da empresa.

Os softwares comerciais *SeisWorks* versão 2003.12.2.1, *SpecDecomp* versão 2003.12, *PostStack* versão 2003.12.1.1 e *GeoProbe*64 versão 3.3 concebidos pela *Landmark Graphics Corporation* foram utilizados na análise e interpretação dos diferentes volumes sísmicos 3D dos projetos "A", "B", "C" e "D".

A utilização destes aplicativos visou obter, superfícies de isotempos em relação a diferentes superfícies de referência, *Time Slice* e *Surface Slice*, classificação por segmentação de formas de ondas não-supervisionadas, assim como conjuntos de volumes sísmicos em diferentes faixas de freqüências *Tuning Cube*, já que, padrões de sismofáceis manifestam-se em diferentes domínios de freqüências sísmicas. Posteriormente, os resultados foram analisados e correlacionados com o modelo litoestratigráfico.

Reservatórios com pequenas dimensões, litoestratigráficamente complexos e exígua espessura, tornam mais desafiadora a caracterização sísmica. Desse modo, espera-se com os resultados deste trabalho apresentar o potencial das técnicas utilizadas, suas limitações e benefícios na exploração e desenvolvimento de reservatórios, diminuindo o risco exploratório, otimizando assim a localização de novas zonas produtoras reduzindo as incertezas na descrição e previsão do comportamento do campo.

CAPÍTULO 1

Interpretação Estratigráfica

1.1 Sismoestratigrafia

O aparecimento da Sismoestratigrafia, técnica de interpretação estratigráfica utilizando dados sísmicos, deveu-se em parte à revolução tecnológica introduzida pelos computadores, com um acelerado tratamento da sísmica e com a geração de uma grande quantidade de dados e seções sísmicas com qualidade crescente (Cainelli, 1997) . Esse fato motivou o desenvolvimento de uma tecnologia para a análise dos dados gerados.

Segundo (Karam, 2005) diversos trabalhos serviram de base para os enunciados da Sismoestratigrafia, dentre eles o de Sloss e Wheeler *apud* (Cainelli, 1997), que desenvolveram o conceito de seqüências sedimentares separadas por discordâncias em bacias intracratônicas. (Brown e Fisher, 1977), em projetos envolvendo técnicos da Petrobras, apresentaram os conceitos de sistemas deposicionais e tratos de sistemas, estes definidos como um conjunto de sistemas deposicionais contemporâneos. Tal conceito deu origem aos tratos de sistema de mar baixo, transgressivo, de mar alto e de margem de plataforma (Cainelli, 1997).

O refinamento teórico-prático da Sismoestratigrafia serviu de base para o aparecimento da Estratigrafia de Seqüências, definidas como o estudo de estratos sedimentares dentro de um arcabouço limitado por superfícies cronoestratigráficas formadas por discordâncias e suas conformidades relativas. A publicação especial da *Society of Economic paleontologists and Mineralogists*, número 42 (Wilgus e Van Wagoner, 1988) reuniu os principais trabalhos responsáveis pelo refinamento da sismoestratigrafia e, conseqüentemente, pela apresentação da estratigrafia de seqüências com a integração entre dados sísmicos e de superfície ou subsuperfície foi possível levar os conceitos e a nomenclatura da Estratigrafia de Seqüências para a interpretação de perfis elétricos de poços e testemunhos (Van Wagoner e Rahmanian, 1990).

Atualmente, a Estratigrafia de Seqüências e a Sismoestratigrafia podem ser feitas de maneira independente ou integradas. Em bacias onde não há dados sísmicos, podem se aplicar os conceitos da Estratigrafia de Seqüências utilizando-se dados de poços, perfis elétricos, testemunhos, afloramentos, etc.

1.1.1 Conceitos Utilizados na Análise Sismoestratigráfica

Os conceitos utilizados na análise sismoestratigráfica foram estabelecidos por Payton (1977) no Seismic Stratigraphy - applications to hydrocarbon exploration - Memoir 26 da American Association of Petroleum Geologists, sendo que posteriormente, alguns deles foram modificados.

Sismoseqüência é a seqüência deposicional identificada em uma seção sísmica (Vail e Thompson III, 1977). Esta sismoseqüência, a exemplo da seqüência deposicional, é limitada por discordâncias no topo e na base, as quais são identificadas a partir dos padrões de terminações de reflexões sísmicas.

Discordância, segundo (Van Wagoner e Rahmanian, 1990), é uma superfície que separa estratos mais jovens dos mais antigos, ao longo da qual há evidência de exposição subaérea ou de erosão subaérea, com significativo hiato de tempo associado. Esta definição modifica a de (Mitchum e Thompson III, 1977), que considerava discordância como "uma superfície de erosão ou não deposição que separa estratos mais novos dos mais antigos e representa um hiato de tempo significante".

O tipo de discordância é baseado na maneira que o estrato termina contra o limite discordante de uma seqüência deposicional ou uma sismosseqüência.

Hiato é o intervalo total do tempo geológico que não é representado pelos estratos em uma posição específica ao longo da superfície estratigráfica. O hiato pode ser atribuído ou à erosão ou à não-deposição de estratos ou a ambos os fatores (Mitchum e Thompson III, 1977).

Conformidade correlativa é uma superfície que separa estratos mais novos de estratos mais antigos e ao longo da qual não há evidências físicas de erosão ou de não deposição e nem há indicação de hiato de tempo (Mitchum e Thompson III, 1977). Os conceitos utilizados na análise sismoestratigráfica foram estabelecidos por Payton (1977) no Seismic Stratigraphy - applications to hydrocarbon exploration - Memoir 26 da American Association of Petroleum Geologists, posteriormente, alguns destes foram modificados.

1.1.2 Relações entre Estratos e Limites de Seqüências: Padrões Internos de Reflexões Sísmicas

A determinação de uma sismosseqüência é feita com a identificação e marcação de determinados padrões nas terminações das reflexões. Estas terminações são caracterizadas numa seção sísmica bidimensional pelas relações geométricas entre a reflexão e a superfície sísmica contra a qual ela termina. (Mitchum e Thompson III, 1977) introduziram os termos *lapout*, truncamento, *baselap*, *toplap*, *onlap* e *downlap* para descrever os estilos de terminações de reflexões (Fig. 1.1).



Figura 1.1: Padrões geométricos das reflexões e sua posição na seqüência.

A análise sismoestratigráfica pode ser realizada a partir das relações de terminações de refletores descritas a seguir e das características desses refletores, os quais compõem uma fácie sísmica.

Lapout é a terminação lateral de um refletor (geralmente um plano de acamamento) contra seu limite deposicional original. O *lapout* denomina-se *baselap* quando ocorre no limite inferior de uma unidade sísmica e o *toplap* no seu limite superior (Karam, 2005). O *baselap* é constituído por dois tipos de reflexões:

Downlap refere-se ao limite inferior de uma seqüência deposicional, quando este se configura em terminação sucessiva, mergulho abaixo, de estratos (refletores sísmicos), originalmente inclinados, sobre uma superfície discordante, horizontal ou inclinada, de natureza deposicional ou erosional. Visto comumente na base de clinoformas progradantes e usualmente representa a progradação de um sistema de talude de margem de bacia em direção às águas profundas. As terminações de reflexões interpretadas como downlap podem, em muitos casos, serem terminações aparentes, principalmente, onde os estratos distais são adelgaçados e estão abaixo da resolução sísmica (Emery e Myers, 1996). **Onlap** refere-se ao limite inferior de uma seqüência deposicional, quando este se configura em terminação sucessiva, mergulho acima, de estratos (refletores sísmicos) originalmente horizontais, sobre uma superfície discordante inclinada, de natureza deposicional ou erosional, é reconhecido nos dados sísmicos pelas reflexões de terminações de baixo ângulo contra uma superfície sísmica inclinada. Os estratos podem ser inclinados, desde que a inclinação seja no mesmo sentido e de menor magnitude que a inclinação da superfície discordante. Em um sentido mais abrangente, diz-se do recobrimento caracterizado pelo afinamento regular e progressivo, em direção às margens de uma bacia deposicional, das unidades sedimentares contidas dentro de uma mesma seqüência deposicional, no qual o limite de cada unidade é ultrapassado pela unidade seguinte, superposta.

A terminação de reflexões inclinadas (clinoformas) contra uma superfície de baixo sobrejacente, representando um limite deposicional proximal é definido como *toplap*(Fig. 1.2). É resultado de um hiato não deposicional refletindo uma zona de *bypass*, acompanhado ou não de pequena erosão.

Truncamento é a terminação lateral dos estratos, truncados por erosão de sua posição sindeposicional original. Em alguns casos, a distinção entre *toplap* e truncamento pode ser de difícil percepção.

Truncamento erosional é a terminação de estratos contra uma superfície erosional sobrejacente (Fig. 1.2). O truncamento erosional é mais erosivo do que o *toplap* e implica no desenvolvimento de um relevo erosional ou no desenvolvimento de estratos (Karam, 2005)(Fig. 1.2).

Truncamento aparente é a terminação de reflexões sísmicas de relativamente baixo ângulo abaixo de uma superfície sísmica inclinada (Fig. 1.2), onde esta superfície representa uma condensação marinha. Esta terminação representa um limite deposicional distal geralmente no topo das camadas, mas algumas vezes dentro de leques submarinos (Karam, 2005).

Truncamento estrutural representa a terminação lateral de reflexões de um estrato por interrupção estrutural. Este truncamento é mais facilmente reconhecido quando ele atravessa uma camada dentro de uma seqüência ou um grupo de seqüências. A interrupção estrutural pode ser produzida por um plano de falha sin ou pós-deposicional, escorregamento, deslizamento ou plano de intrusão ígnea. A terminação contra um antigo plano de falha é onlap (Karam, 2005)(Fig. 1.2).

Conformidade ocorre quando as reflexões de duas unidades sísmicas ou seqüências adjacentes apresentam-se paralelas com a superfície que as delimita (Emery e Myers, 1996).



Figura 1.2: Relações de estratos em uma seqüência, em função da terminação de refletores.

1.2 Reconhecimento de Superfícies Estratigráficas

As principais superfícies que dividem a estratigrafia em tratos de sistemas são limites de seqüências, superfícies transgressivas, superfícies de máxima inundação e superfícies de onlap marinho/downlap entre os leques de mar baixo e a cunha de mar baixo.

Um limite de seqüências pode ser reconhecido nos dados sísmicos de duas maneiras: a partir do desenvolvimento de uma superfície de truncamento de alto relevo, particularmente com erosão do topo das unidades mais antigas e por um deslocamento do *onlap* costeiro em direção à bacia através do limite.

O onlap costeiro se forma em/ou próximo ao nível do mar e ao alcance dos processos que ocorrem no ambiente marinho raso. O deslocamento em direção à bacia do onlap costeiro implica na queda do nível relativo do mar, consequentemente, expondo o topo das camadas a erosão decorrente da sua exposição subaérea. Onde o onlap costeiro cai abaixo da quebra do offlap o topset das reflexões "onlapa" clinoformas mais antigas formando um limite de seqüências do tipo 1 (caracterizado por exposição e erosão subaéreas, deslocamento de fácies e do onlap costeiro em direção à bacia (Van Wagoner e Rahmanian, 1990)).

Uma superfície transgressiva marca o fim da progradação do trato de mar baixo e o começo da transgressão. Esta superfície não precisa estar associada com nenhum padrão de terminação, mas marcará o limite entre um intervalo de clinoformas-*topset* e um intervalo de *topsets* somente (Emery e Myers, 1996).

A superfície de máxima inundação é reconhecida nos dados sísmicos como uma superfície onde as clinoformas "downlapam" os *topsets* subjacentes, os quais podem mostrar um padrão de empilhamento retrogradacional e truncamento aparente. Nem toda a superfície de *downlap* é uma superfície de máxima inundação. Uma importante superfície de *downlap* geralmente pode ser mapeada na base das clinoformas da cunha progradante de mar baixo. Esta é o topo da superfície dos leques de mar baixo. A diferença é que as fácies abaixo desta superfície de *downlap* são depósitos bacinais, não *topsets* (Emery e Myers, 1996).

Em ambientes bacinais, os pacotes de reflexões são limitados por superfícies de *onlap* marinho. Geralmente, estas podem ser correlacionáveis do continente em direção à bacia e identificadas como uma das superfícies acima. Isto nem sempre é possível, principalmente em ambientes retrogradacionais, onde antigos taludes formam zonas de *bypass* sedimentar. Num ambiente distal de uma bacia, onde a deposição consiste somente de leques de mar baixo, as superfícies de *onlap* marinho entre os leques representarão intervalos condensados equivalentes em tempo à cunha de mar baixo, sistemas de tratos de mar alto e transgressivo e conterão conformidades correlativas relacionadas com as superfícies descritas acima (Emery e Myers, 1996).

1.3 Análise de Fácies Sísmicas

Fácies sísmicas é uma unidade tridimensional, arealmente definida, constituída por reflexões sísmicas cujos parâmetros inerentes diferem das fácies adjacentes. O objetivo da análise de fácies sísmicas é o reconhecimento dos padrões de reflexões sísmicas e suas inter-relações dentro das unidades sísmicas, interpretando os seus significados geológicos.

A análise de fácies sísmicas não é uma tarefa simples, tampouco determinística, por não existir, ainda, consenso sobre uma forma padrão para análise, levando os interpretes a diversificar a forma de análise.

Uma vez que os dados sísmicos tenham sido divididos em pacotes deposicionais, a análise sismoestratigráfica pode ser iniciada a partir das relações de terminações de refletores e das características desses refletores, os quais compõem uma fácies sísmica, descritas por (?) como a interpretação de fácies deposicionais a partir de dados de reflexão sísmica. Isso envolve o delineamento e a interpretação da geometria da reflexão, continuidade, amplitude, freqüência, bem como a velocidade intervalar, além da forma externa e associações tridimensionais de grupos de reflexões. Cada um desses parâmetros contém informações de significado estratigráfico.

As formas de reflexão revelam, aproximadamente, os padrões de estratificação dos processos deposicionais, da erosão e da paleotopografia que podem ser interpretados. A continuidade do refletor está associada com a continuidade do estrato; refletores contínuos sugerem depósitos uniformemente estratificados que se estendem por uma ampla área. A amplitude dos refletores contém informações dos contrastes de densidade e velocidade de interfaces individuais e seu espaçamento. Ela é usada para predizer mudanças laterais no acamamento e ocorrências de hidrocarbonetos. A freqüência é uma característica natural do pulso sísmico, mas ela está relacionada também com fatores geológicos, como o espaçamento dos refletores ou mudanças laterais nos intervalos de velocidade, associadas com a ocorrência de gás. O agrupamento desses parâmetros em unidades de sismofácies permite sua interpretação em termos de ambientes deposicionais, fonte de sedimentos e ambiente geológico. A configuração dos estratos é interpretada a partir da configuração da reflexão sísmica e se refere aos padrões geométricos e às relações dos estratos dentro de uma unidade estratigráfica. Eles são indicativos dos processos e ambientes deposicionais e, posteriormente, da movimentação estrutural (Mitchum e Sangree, 1977).

1.3.1 Configuração dos Padrões de Reflexões Internos

A configuração interna das reflexões é o parâmetro de sísmofácies que melhor a caracteriza; portanto, é o mais utilizado para sua análise (Ribeiro, 2001). (Mitchum e Sangree, 1977) descreveram alguns padrões básicos de configurações internas de refletores, sumariados abaixo (Karam, 2005).

As configurações **paralelas**/**subparalelas** (Fig. 1.3(a)) indicam uma taxa de deposição uniforme dos estratos, sobre uma superfície estável (bacia) ou numa plataforma uniformemente subsidente.

A configuração **divergente** (Fig. 1.3(b)) pode indicar uma variação em área na taxa de deposição, inclinação progressiva do substrato ou os dois fatores associados.

As configurações *progradantes* (Fig. 1.3(c)) ocorrem em áreas de superposição lateral de estratos, constituindo-se em superfícies inclinadas denominadas de clinoformas. Os padrões das clinoformas diferem em função das variações na razão de deposição e profundidade da lâmina d'água. No padrão **oblíquo**, o ângulo de mergulho é relativamente alto, as terminações mergulho acima são em *toplap* e mergulho abaixo em *downlap*. O padrão das clinoformas oblíquas pode ser:

- **tangencial**, quando o mergulho do foreset diminui gradualmente na sua porção inferior, suavizando no bottomset (Fig. 1.3(c)).
- paralelo, quando a terminação mergulho abaixo se der em alto ângulo contra a superfície inferior da seqüência ou unidade sísmica (Fig. 1.3(c)).

Esse tipo de padrão combina condições de suprimento sedimentar relativamente alto, pouca ou nenhuma subsidência e nível do mar estacionário, indicando águas rasas e alta energia de deposição.

As clinoformas **sigmoidais** (Fig. 1.3(c)) caracterizam-se pela disposição lateral em forma de "S", através do crescimento progressivo em superfícies que mergulham suavemente para águas profundas. Esse tipo de clinoforma sugere baixa taxa de suprimento sedimentar, subsidência contínua ou subida relativa do nível do mar rápida num ambiente deposicional de baixa energia. O complexo sigmoidal-oblíquo combina os padrões sigmoidal e oblíquo dentro de uma fácies sísmica, originando-se num ambiente deposicional de alta energia, onde ocorre a alternância de processos construtivos (sigmóides) e *bypass* sedimentar nos *topsets* (oblíquo).

A configuração *shingled* (Fig. 1.3(c)) é um padrão progradante de pouca espessura, com os limites superior e inferior paralelos e cujos refletores internos apresentam mergulhos suaves terminando em *toplap* aparente e *downlap*. Este padrão está associado com ambientes deposicionais de águas rasas.

As configurações caóticas (Fig. 1.3(d)) consistem em reflexões discordantes e descontínuas, sugerindo um arranjo desordenado das superfícies de reflexão, podendo indicar um ambiente de energia alta e variável, deformações penecontemporâneas ou posteriores à deposição. Estas reflexões podem ser interpretadas em estratos com dobramentos, falhas pequenas, estruturas de escorregamento ou convolutas.

O padrão **sem reflexões** (*reflection free*) (Fig. 1.3(e)) indica intervalos livres de reflexões e pode caracterizar pacotes sedimentares intensamente dobrados ou com mergulhos íngremes, assim como litologias homogêneas para o método sísmico, sem contraste de impedância, ou não estratificadas, como alguns tipos de folhelhos, arenitos espessos, carbonatos maciços, camadas de sal ou corpos ígneos.

A configuração *hummocky* (Fig. 1.3(f)) consiste de segmentos descontínuos, subparalelos, formando um padrão randômico ondulado e segmentado. Este padrão grada lateralmente para padrões de clinoformas maiores e melhor definidos e, em direção ao topo, grada para reflexões paralelas. Esse tipo de padrão é interpretado, geralmente, como lobos de estratos interdigitados no prodelta ou leques ou numa posição interdeltaica.

1.3.2 Tipos de Geometrias Externas das Sismofácies

O entendimento das formas externas tridimensionais e as associações de fácies sísmicas são importantes na sua análise. Algumas das formas externas, como os *mounds* e o preenchimento, podem ser subdivididas em subtipos, dependendo de sua origem, do padrão de configuração interno das reflexões e das modificações na forma externa. (Karam, 2005) *apud*



Figura 1.3: Padrões internos de configurações de sismofácies

(Mitchum e Sangree, 1977) define estas geometrias, associando a elas os depósitos sedimentares mais freqüentes.

Lençóis, cunhas e bancos (Fig. 1.4) podem ser grandes e, de modo geral, são as unidades de fácies sísmicas mais comuns em plataforma. Padrões paralelos, divergentes e progradantes compõem as configurações internas destas unidades. O padrão lençol ondulado (*sheet drape*) consiste de reflexões paralelas interpretadas como estratos ondulados de acordo com a topografia subjacente num padrão que sugere deposição uniforme, baixa energia, deposição marinha-profunda independente do relevo do fundo. As lentes são as formas externas características de clinoformas progradantes. Os *mounds* e os tipos de preenchimento são grupos de formas sísmicas derivados de estratos de diferentes origens, formando saliências ou depressões preenchidas nas superfícies deposicionais.



Figura 1.4: Geometrias externas características de algumas sismofácies.

Os mounds são configurações de reflexões interpretadas como extratos que formam elevações ou saliências acima do nível geral das camadas circundantes. Muitos mounds são resultantes ou de processos deposicionais clásticos ou vulcânicos ou são construções orgânicas. Geralmente são de pequeno porte e seus limites externos podem ser definidos em seções sísmicas e são caracterizados por onlap e downlap dos estratos sobrejacentes os quais preenchem o espaço ao redor dos mounds. É feita uma subdivisão descritiva desse tipo de forma, baseada na configuração interna e geometria externa, a qual é considerada somente um passo preliminar na interpretação genética dos mounds. Leques de assoalho de bacia, lobos, escorregamentos, construções carbonáticas e recifes e cones vulcânicos têm este tipo de configuração bidimensional.

Os tipos de *mounds* são demonstrados na figura 1.5. A configuração de migração de onda é formada por reflexões superpostas em forma de onda e é interpretada como uma série de camadas depositadas por ondas que se movem através de uma superfície horizontal. Em alguns casos, o tamanho do *mound* é tão pequeno que não pode ser claramente definido ou mapeado sismicamente. O padrão de reflexão *hummocky* é o resultado do agrupamento destas pequenas feições.

Os padrões de reflexão de **preenchimento** são interpretados como estratos que preenchem feições de relevo negativo. As reflexões subjacentes podem mostrar truncamento erosional ou concordância ao longo da superfície basal da unidade de preenchimento. Unidades de preenchimento podem ser classificadas pela sua forma externa (Fig. 1.4).

Os padrões de preenchimento representam estruturas de origens variadas, como canais erosionais, preenchimento de cânion, leques, entre outros.

As grandes unidades estruturais de preenchimento podem ser mapeadas individualmente; no entanto, se o tamanho e a resolução diminuírem, estas feições podem ser tratadas como feições subordinadas de grandes unidades sísmicas (Fig. 1.6).



Figura 1.5: Padrões dos refletores internos de algumas sismofácies em montiforma (mod. de Mitchum et al., 1977b).



Figura 1.6: Padrões de configurações internas dos refletores das sismofácies de preenchimento (mod. de Mitchum et al., 1977b).

CAPÍTULO 2

Visualização Volumétrica

Visualização Volumétrica é um termo geral utilizado para descrever técnicas que permitem a projeção de um conjunto de dados no espaço tridimensional (conhecido também por dados volumétricos) em uma superfície de visualização bidimensional. Essas técnicas auxiliam o entendimento de propriedades e estruturas contidas dentro do volume, pois permitem a visualização do dado como um todo.

A Visualização Volumétrica ainda é um campo com grandes possibilidades de crescimento. Muitos algoritmos foram desenvolvidos e alguns aperfeiçoados visando melhorar a qualidade das imagens ou diminuir seu tempo de geração, permitindo o desenvolvimento de sistemas interativos.

Em geral, o dado volumétrico é amostrado ao longo de três eixos ortogonais, definindo um reticulado cartesiano. Esse reticulado pode ser regular, onde os intervalos são idênticos em todas as direções, ou retilíneo, onde os intervalos podem ser diferentes em cada direção, porém constantes em uma mesma direção. Entretanto, isso nem sempre acontece.

2.1 Volume

A coleta densa de dados sísmicos sobre uma área, permite um processamento tridimensional dos dados formando um volume. O conceito de volume é muito importante ao intérprete. Com dados 3D, o intérprete está trabalhando diretamente com um volume e não uma interpretação volumétrica por interpolação de linhas com malhas extensamente espaçadas. Uma das características do volume de dados sísmicos que permite a todo intérprete conceber um modelo mais fidedigno, é que as subsuperfícies do campo de onda sísmica têm amostragens bem adensadas em todas as direções, de modo que o interprete não necessite "amarrar" um *loop* em torno do *grid* cometendo um possível erro de amarração (*mis-tie*) muito comum em dados 2D, e sobre a qual deva presumir a subsuperfície estrutural e estratigráfica. Isto é uma oportunidade que um intérprete tem de usar todos os recursos. Porque as condições de amostragem para a interpretação são as mesmas para o processamento, todos os dados processados contêm uma informação única e devem assim ser usadas na interpretação. Deste modo, o

intérprete não deve decimar os dados disponíveis mesmo que ocorram operações computacionais demoradas. O intérprete deve usar métodos inovadores com seções horizontais, *slices* especialmente selecionadas, e *tracking* espaciais automatizados, a fim de compreender toda a informação contida nos dados. Desta maneira o intérprete gerará um mapa mais acurado e detalhado ou outro produto, que seu predecessor 2D obteria na mesma área.

Os *displays* 3D tem-se tornado recentemente uma realidade na interpretação de dados sísmicos, entretanto, não permite ao intérprete olhar dentro do volume de dado sísmico.

Os dados volumétricos são representados por um grid 3D de amostras contendo a amplitude sísmica em cada vértice do grid, denominada *voxel*. Este nome é uma abreviação de duas palavras "volume pixel" e equivale a um *pixel* 3D. *Voxels* são blocos, fortemente agrupados, formados pela divisão do espaço do objeto através de um conjunto de planos paralelos aos eixos principais x, y e z desse espaço, sendo a menor representação 3D que podemos obter em um volume sísmico.

Esses elementos não devem se interceptar, sendo de tamanho suficientemente pequeno se comparado às características representadas pelos dados volumétricos. Existe certa ambigüidade na literatura a respeito do que é o conjunto de pontos de um *voxel*. Em determinadas publicações, *voxel* é o hexaedro definido em torno do valor amostrado como ilustra a Fig. 2.1(a). Em outras, o *voxel* é entendido como sendo o hexaedro cujos vértices são os valores amostrados (Fig. 2.1(b)). Devido ao fato do *voxel* ser um hexaedro, podemos rotacionar o resultado das imagens 3D em qualquer ângulo e visualizá-los em qualquer direção.



Figura 2.1: Elementos de Volume

2.2 Cor e Opacidade

"A quantidade de informação gravada em uma linha sísmica é enorme. É virtualmente impossível apresentar toda esta informação ao usuário de uma forma compreensível." Esta citação de (Balch, 1971) é hoje mais verdadeira ainda do que era em 1971 e a cor tornou-se uma importante ferramenta na solução de problemas. O olho humano é muito sensível à cor e o intérprete pode empregar esta sensibilidade de diversas maneiras. (Taner e Sheriff, 1977) e (Lindseth, 1979) estavam entre os primeiros a apresentar as seções coloridas que demonstravam informações adicionais que a cor poderia trazer. De igual importância é o aumento do range dinâmico ótico de uma seção colorida comparada a seu traço equivalente monotônico área variável/wiggle. Ambas as propriedades são de grande importância na interpretação estratigráfica.

Alguma compreensão de princípios de cor ajudará ao intérprete maximizar o uso da cor. É útil visualizar cores como um sólido tridimensional que pode ser expresso em três cores primárias RGB (*Red, Blue, Green*), Fig. 2.2.



Figura 2.2: Voxel contendo as cores primarias RGB

O software de visualização volumétrica utilizado neste trabalho calcula e combinam as cores do voxel internamente como valores RGB. O display de cor de um voxel é gerado por um algoritmo de renderização¹ volumétrica que produz imagens associando cor e opacidade a cada voxel. Esta associação é feita indiretamente, isto é, uma tabela de cor e opacidade é criada para os valores armazenados nos voxels. O algoritmo quantiza as amostras para armazená-las como inteiros de 8 bits, usando-os para gerar tabelas de cor com 256 entradas.

¹No contexto deste trabalho, o termo "renderização" está relacionado ao processo de geração de imagens a partir de um conjunto de dados que descrevem a geometria e os atributos necessários para sua visualização, reforçando a idéia de varredura sobre o volume sísmico.

Os níveis de opacidade descrevem a quantidade de luz incidente absorvida pelo *voxel* e também têm um escala que varia de 0 a 100%, onde 0% está completamente transparente e 100% não deixa nenhuma luz passar através do *voxel*, Fig. 2.3.



Figura 2.3: (a) Volume sísmico com 100% de opacidade; (b) Volume sísmico com 25% de opacidade.

Apesar de existirem técnicas automáticas de classificação de volumes, na maioria dos casos ainda é necessária a interferência do intérprete para definir adequadamente as funções de cor e opacidade. O método utilizado para este fim é empírico e depende da sensibilidade visual de cada intérprete. Obviamente, existem ferramentas capazes de auxiliar o intérprete nesse processo. Uma das mais importantes é o histograma do volume (Fig. 2.4), onde é apresentada a distribuição dos valores escalares que ocorrem no volume. Com isso, o intérprete pode ter uma idéia mais precisa da distribuição estatística das amplitudes ali contidas.



Figura 2.4: Histograma de opacidade.

A modificação na opacidade permite ao intérprete visualizar determinadas estruturas do volume. Para isso, basta torná-las não transparentes e deixar as demais transparentes, ou quase transparentes. Com isso, o intérprete pode ter uma visualização das partes mais internas do volume. A Fig. 2.5 exibe um volume sísmico que está sendo submetido a diferentes graus de transparência permitindo que o intérprete possa realmente ver dentro do volume e visualizar as quatro superfícies interpretadas assim como dados semi-transparentes. Estes tipos de *displays* são muito úteis na visualização de dados.



Figura 2.5: (a) Volume sísmico totalmente opaco;(b) Volume sísmico submetido a graus de transparência.

2.3 Interação 3D em Volumes Sísmicos

Um dos principais objetivos de uma ferramenta de visualização científica é, sem dúvida, permitir que o usuário extraia informações relevantes a respeito do dado visualizado. Para isto, é necessário que a interface da ferramenta ofereça os recursos necessários para permitir o entendimento do dado.

A visualização volumétrica exploratória ainda é um campo de intensa pesquisa tendo em vista que a natureza e as dimensões do dado volumétrico estão se tornando cada vez mais complexas. Isto requer diversos recursos das ferramentas de análise e visualização, tais como capacidade de processamento para permitir respostas rápidas, controle interativo da visualização e um bom *display* 3D. A visualização do volume sísmico pode ser realizado através do uso de três ferramentas disponíveis no *software GeoProbe*:

- Planos de Corte. Permite que um corte plano vertical na direção *in-line* e/ou *crossline* seja extraída do volume sísmico, sendo facilmente visualizada, tendo em vista sua natureza bidimensional;
- *Slices* Sísmicos. Permite que várias superfícies de isovalores sejam extraídas do volume sísmico, sendo facilmente visualizada, as feições estratigráficas.
- Probes. Permite percorrer através do volume sísmico e investigar as informações contidas em seu interior.

2.3.1 Planos de Corte

Muitas técnicas para a visualização de uma região de interesse do volume têm o inconveniente de ocultar outras partes também importantes, devido a regiões de grande opacidade ou de superfícies que escondem o dado volumétrico. Isto ocorre devido a perda da dimensão de profundidade quando o dado volumétrico tridimensional é projetado em uma superfície bidimensional. Para resolver este problema, é bastante comum a utilização de planos de corte para visualizar apenas uma determinada fatia do volume, esquecendo-se das demais.



Figura 2.6: Manipulador de planos de corte.

A maioria das interpretações 3D é feita em planos de corte através do volume sísmico. Não há nenhuma limitação na escala dinâmica para a exposição de nenhum plano de corte, e conseqüentemente todos os recursos de cor e opacidade podem ser explorados. Os volumes 3D contem uma disposição ortogonal regularmente espaçada dos dados definidos previamente durante a aquisição e ajustados no processamento. As três principais direções da disposição dos dados que são representados por seções ortogonais, são mostrados na Fig. 2.7



Figura 2.7: Três *sets* ortogonais de planos de corte, seções verticais (*in-line, cross-line*) e horizontal (*Time Slice*) através do volume sísmico.

Os dados sísmicos 3D (volume sísmico), são formados por várias linhas sísmicas, possuindo duas direções preferenciais, uma seção vertical no sentido da direção das linhas de receptores chamada de *line* ou *in-line* e uma seção vertical perpendicular à direção das linhas anteriores chamada de *crossline*, além de uma seção temporal chamada *Time Slice*.

O software GeoProbe dispõe de um manipulador de planos de corte que permite a visualização interativas das fatias de um volume. Este manipulador é composto de oito componentes de arrasto de translação sobre linhas, posicionados três no canto superior, três no canto inferior e dois no ponto médio da fatia. A geometria dos componentes de arrastos sugere o comportamento de um slide, ou seja, indicam a possibilidade de movimentos unidimensionais (Fig. 2.6).

Três conjuntos de planos de corte ortogonais através do volume sísmico são considerados ferramentas básicas de um intérprete. Uma interpretação completa empregará alguma ou cada uma delas. Entretanto muito outros planos de corte através do volume sísmico são possíveis. Uma linha diagonal pode ser extraída para "amarrar" duas posições de interesse, um bom exemplo é a "amarração" de poços. Uma seqüência de zig-zag em segmentos de linhas diagonais pode ser necessária para juntar uma "amarração" de diversos poços em um prospecto Fig. 2.8. Um *loop* pode também ser feito. Todas elas são seções verticais e são apresentadas como linhas arbitrárias.



Figura 2.8: Seqüência de zig-zag passando por alguns poços.

Outro exemplo de planos de corte é apresentado na Fig. 2.9, ilustra bem o uso simultâneo de três planos de corte (*in-line, crossline e Time Slice*).

Slices mais complexos são possíveis em aplicações especiais. Um *slice* longitudinal ou paralelamente a um horizonte interpretado estatigráficamente, e conseqüentemente ao longo de um plano de camada, é denominado de *surface slice* ou *stratal slice*. *Slices* deste tipo, aplicados particularmente à interpretação estratigráfica, serão detalhados mais adiante.



Figura 2.9: Seções verticais e horizontal (*in-line*, crossline eTime Slice).

Slices Sísmicos

Os slices sísmicos são formas de apresentação horizontal dos dados sísmicos 3D e são definidos como fatiamentos horizontais de isovalores de tempo (*Time Slices*), isovalores paralelos a um horizonte (*Horizon ou Surface Slice*) ou mesmo fatiamentos paralelos entre linhas de tempo (*Stratal Slice*). Servem a vários propósitos e sua utilidade depende da qualidade do dado sísmico e da interpretação, no caso dos slices baseados em horizontes.

Os *Time Slices* são gerados com intervalo de amostragem normalmente múltiplo da amostragem usada na aquisição. São extremamente úteis na definição de feições estruturais, como fechamentos, domos de sal, entre outros. São úteis também para controle de qualidade de aquisição e do processamento, sendo comum a observação dos traços próximos (*near-traces*) para verificação de problemas de navegação em 3D marítimos.

Os *Surface Slices* são superfícies de isointervalo, em tempo ou profundidade, em relação a uma superfície de referência. Podemos imaginar que todo o cubo sísmico foi "flatenizado" em relação a um horizonte e, "horizontalmente fatiado" a partir dessa nova referência. Os *Surface Slices* são mais apropriados à identificação de sismofeições características do sistema deposicional do que os *Time Slices* convencionais.
Os Stratal Slices segundo (Zeng, 1998), correspondem a superfícies de isointervalo em relação às superfícies temporais de referência. Ao contrario do Surface Slice é mais apropriado para apresentação dos dados segundo "planos estratigráficos", pois os isointervalos são feitos aproximadamente de acordo som linhas de tempo reais. A transformação, assim como a representação de dados sísmicos em Stratal Slices é muito mais complexa do que a geração de Time ou Surface Slice, pois requer alguns requisitos básicos tais como: escolha do atributo sísmico adequado, qualidade sísmica, banda de freqüências, recomposição e/ou eliminação de fatores não estratigráficos (falhas, contatos, etc), além de boas superfícies de referência. A principal dificuldade deste processo é a identificação e interpretação dessas superfícies.

Manipulando os Slices

O fato da interpretação 3D ser executada em *slices* de dados e por ter um grande número de *slices* em um típico volume sísmico, diversas propostas inovadoras surgiram para manipulação dos dados. Segundo (Bone e Tegland, 1983), antigamente a reprodução de uma seqüência de seções horizontais era feita em um *diafilme* (seqüência de fotografias positivas dispostas em um filme para projeção) e animadas para obter um movimento no eixo z.

Os dados, seções horizontais ou verticais, eram projetados num *diafilme* de 35mm em uma tela grande. O intérprete fixava uma folha de papel transparente sobre a tela para traçar e então ajustar o tamanho da imagem dos dados, do foco, do avanço do *frame*, ou da velocidade do filme por simples controles. Hoje a interpretação 3D é realizada interativamente. O intérprete chama os dados do disco de uma *workstation* e as vê na tela de um monitor colorido.

A grande quantidade de dados regularmente organizados em um volume 3D traz benefícios enormes à interpretação interativa, por exemplo, a rápida resposta da visualização dos dados torna fácil a busca e conceitos de novas idéias. O intérprete pode rapidamente gerar novos mapas ou seções na busca de uma melhor interpretação.

2.3.2 Probes

Mecanismo bastante usual de visualização interativa. *Probes* nada mais são que objetos geométricos inseridos na cena. Através deles, pode-se investigar quantitativamente o que está acontecendo localmente naquela região. Como são objetos geométricos, os *probes* podem ser facilmente manipulados pelo intérprete. Aplicando-se transformações tais como translação, rotação e zoom, o intérprete pode percorrer com o *probe* por todo o volume para identificar falhas sutis, e adquirir uma nova compreensão a respeito das propriedades estratigráficas dos intervalos geológicos.

Um exemplo bastante simples de *probe* de corte é mostrado na Fig. 2.10 Através de translações, o intérprete pode posicionar o *probe* em qualquer ponto do volume e obter informações sobre aquele ponto, tais como cor, opacidade, etc. Apesar de ter sido colocado como uma outra forma de interação, os planos de corte também podem ser considerados *probes*.



Figura 2.10: Probe de corte permitindo a visualização interna do volume.

2.3.3 Especificação de Subvolumes

Através dos subvolumes, o intérprete pode especificar um subconjunto do volume original (Fig. 2.11). Este manipulador é bastante simples e o usuário pode interagir com as alças dos vértices do subvolume (alterando duas dimensões simultaneamente), alças do meio das arestas (alterando uma dimensão do subvolume) ou com a face do subvolume (alterando a dimensão perpendicular à face).



Figura 2.11: Subvolume sísmico

2.3.4 Realidade Virtual

Refere-se à experiência de interagir com sistemas de computação que apresentam um "mundo virtual" de sinais e sons simulados. Um ambiente tridimensional sintetizado em computador é criado a partir de gráficos tridimensionais e elementos de áudio. As técnicas de Realidade Virtual permitem a criação de aplicações onde uma pessoa pode estar imersa em um ambiente tridimensional simulando de maneira adequada o problema "real" e tendo uma sensação muito próxima da realidade. Um mundo virtual não é gravado previamente, é gerado em tempo real à medida que o intérprete navega e interage com ele. A representação da imagem reage de acordo com as ações que lhe são aplicadas: para onde se olha, em que direção se desloca, qual objeto se manipula. As experiências mais eficientes com a Realidade Virtual aproximam o intérprete dos dados de tal forma, que a identificação com o mundo real é instantânea.

A aplicação da Realidade Virtual a complexos sistemas de visualização volumétrica tem permitido obter melhores resultados de análises de problemas 3D multi-variáveis, pois além da facilidade de utilização proporcionada pela aplicação de técnicas, tornam a interface mais intuitiva e natural.

CAPÍTULO 3

Princípio das Metodologias Utilizadas

3.1 O Efeito Tuning

(Widess, 1973) em seu artigo "*How thin is a thin bed?*" demonstra a interação de reflexões densamente espaçadas debatendo como a espessura da camada influencia na assinatura sísmica. Para uma camada com espessura da ordem de um comprimento de onda ou mais, há uma pequena ou quase nenhuma interferência das *wavelets* entre topo e base da camada e cada uma é registrada sem modificação. Para camadas delgadas estas *wavelets* interferem construtiva e destrutivamente. Considerando *wavelets* de polaridade oposta a AMPLITUDE da *wavelet* composta atinge um máximo para espessura do *tuning*. Para camadas mais finas que isto a forma da *wavelet* composta permanece a mesma mas sua amplitude diminui Fig. 3.1. Claramente as espessuras das camadas em que estes fenômenos ocorrem dependem da forma da *wavelet*, dos dados e consequentemente de seu conteúdo de freqüência.



Figura 3.1: A amplitude da *wavelet* depende da espessura entre topo e base de uma camada.

Os efeitos *tuning* são de suma importância ao intérprete estratigráfico, pois podem ser usados para aumentar a visibilidade de camadas delgadas. Devem ser reconhecidas como efeitos da geometria da camada em contraste as variações das propriedades acústicas do meio.

3.2 Decomposição Espectral

A decomposição espectral é costumeiramente utilizada pela comunidade de geofísicos para a análise espectral dos dados sísmicos, definição de filtragens no processamento sísmico, definição de resolução, entre outros. Recentemente, o método da decomposição espectral passou a ser utilizado para fins de interpretação sísmica.

Neste trabalho, o método utilizado apresenta a decomposição espectral como uma ferramenta para mapear e delinear variabilidade de espessura temporal e para indicar descontinuidades geológicas. Esta metodologia foi desenvolvida originalmente por pesquisadores da Amoco (Partyka e Gridley, 1997), posteriormente, por pesquisadores da *British Petroleum* (Partyka e Lopez, 1999) e, mais recentemente, em parceria com o grupo *Halliburton/Landmark* o desenvolvimento do *software* SpecDecomp.

Este método foi devidamente desenvolvido para representar o efeito *tuning* como uma característica importante do espectro a ser revelada e não como um efeito a ser contornado por filtragens como nos métodos tradicionais de processamento sísmico.

O diferencial do método, na visão do intérprete, é a sua capacidade de auxiliar a revelação de feições sismo-estratigráficas e sismo-estruturais que, no domínio temporal ou na síntese de Fourier - freqüência dominante, estavam mascaradas. Pela análise das componentes discretas do espectro de amplitude este método permite colocar em evidência feições sismo-estratigráficas sutis.

Na prática, o intérprete habituado a trabalhar com as anomalias de amplitude sintetizadas, ou seja, em freqüência dominante do espectro, agora será colocado diante de uma riqueza de imagens, uma vez que, cada componente discreta de freqüência e/ou de fase estará disponível para revelar feições sismo-estratigráficas e/ou sismo-estruturais da área estudada.

A decomposição espectral é uma ferramenta que deve ser usada para:

- Delinear ambiente fácies / estratigráficos (como limites de planícies de inundação, limites de recife, canais e outras camas delgadas).
- Determinar a ordem de deposição.
- Mapeamento detalhado das disposições estruturais envolvidas por sistemas de falhas complexos (como compartimentalização de reservatório).

 Modelagem de reservatório (mapear mudanças de fluidos, mudanças de pressão e mudanças em aquisições 4D).

O método de decomposição espectral via os componentes discretos de Fourier apresentado neste trabalho baseia-se em uma abordagem qualitativa e quantitativa robusta, independente da fase da wavelet, para estimativa de espessura geológica baseada nos dados sísmicos (Partyka, 2001).

O conceito por trás da decomposição espectral é que as reflexões sísmicas, particularmente de uma camada delgada, possuem expressões características no domínio da freqüência. Estas expressões características são indicativas da espessura temporal do estrato considerado e podem ser resolvidas normalmente até $\frac{1}{4}$ do comprimento de onda. Por exemplo, uma simples camada fina e homogênea introduz uma sucessão previsível e periódica de *notches* no espectro de amplitude de uma reflexão composta (Fig. 3.2).



Figura 3.2: O efeito de uma fina camada. (Partyka, 1999)

Porém, a *wavelet* sísmica normalmente estende-se a múltiplas camadas, não só uma simples camada fina. Os espectros de amplitude delineiam a variabilidade das camadas finas por meio das interferências (*notches*).

A determinação do tamanho da janela de análise é importante para o cálculo, de tal modo que forneça um balanço entre a localização e o *tuning*. Se a janela de análise for muito grande, a quantidade de informação geológica, e conseqüentemente da função refletividade também o será, ficando o espectro muito semelhante ao espectro da *wavelet* (Fig. 3.3).



Figura 3.3: Janela temporal longa geralmente exibe um espectro de amplitude branca. (Partyka, 1999)

Mudar para uma janela de análise mais curta, no entanto, contém a assinatura da *wa-velet* e os padrões de interferência local representando as propriedades acústicas e espessuras das camadas geológicas (Fig. 3.4)



Figura 3.4: Janela temporal curta, geralmente, exibe um espectro de amplitude não-branca apresentando padrões de interferências. (Partyka, 1999)

O caráter local não randômico da geologia resulta em um filtro da assinatura da wavelet.

Não sendo branco o espectro de amplitude em uma janela de análise curta, o espectro do sinal apresenta interferências.

3.2.1 Modelo de Camada em Cunha

A decomposição espectral e o efeito *tuning* em uma camada delgada pode ser ilustrada por um simples modelo em cunha (Fig. 3.5)



Figura 3.5: Modelo de refletividade da cunha, O branco corresponde a amplitude positiva enquanto o preto a negativa.

O modelo consiste de dois *spikes* de igual magnitude, porém com refletividades opostas. O topo do modelo é marcado por um coeficiente de reflexão negativo enquanto e sua base é marcada por uma um coeficiente de reflexão positivo. O modelo é constituído por 50 traços e aumenta progressivamente de espessura da esquerda (0 ms) para direita (50 ms). Passando um filtro Ormsby (8-10-40-50 Hz) no modelo de refletividade, ilustra o efeito *tuning* causado pela mudança da espessura (Fig. 3.6).

O topo e base das reflexões são visivelmente diferenciáveis em uma camada mais espessa, contudo aproximando-se da camada delgada as reflexões misturam-se a tornando unívoca. Calculando o espectro de amplitude para cada traço de refletividade via transformada discreta de Fourier, e plotando as freqüências no eixo vertical teremos a Fig. 3.7 seguir:



Figura 3.6: Versão filtrada da refletividade.



Figura 3.7: *Transformada discreta de Fourier* dos traços, o branco representa a alta amplitude enquanto o preto a baixa.

Analisando a Fig. 3.8 percebemos que a espessura temporal do modelo (t) determina o período do *notch* no espectro de amplitude (Pf = 1/t), ou seja, o número de *notch* aumenta quando a espessura aumenta. Isto porque às interferências construtivas ocorrem quando as camadas são maiores que $\frac{1}{4}$ do comprimento de onda, e as altas freqüências têm pequenos comprimentos de onda. Percebe-se também, que para uma camada com zero de espessura a freqüência não pode ser retratada.



Figura 3.8: Amplitude do *tuning* das camadas delgadas *versus* freqüência. (Partyka, 1999)

Uma outra maneira de ilustrar é com o valor da componente de freqüência (f) que determina o período do *notch* no espectro de amplitude (Pt = 1/f) com respeito à espessura da camada (Fig. 3.9).



Figura 3.9: Amplitude do *tuning* das camadas delgadas *versus* espessura temporal. (Partyka 1999)

O modelo em cunha que foi demonstrado ilustra a aplicação destas aproximações para um simples modelo de refletividade bipolar. Aumentando a complexidade do modelo de refletividade tornará mais confuso os padrões de interferência.

3.2.2 *Tuning* Cube

O caminho mais comum para caracterizar reservatórios usando a decomposição espectral é via a zona de interesse do cubo de interferências "*Tuning Cube*". O método, na prática, consiste na escolha de um intervalo de interesse no domínio do tempo e transformá-lo, via transformada discreta de Fourier, para o domínio da freqüência criando um *Tuning Cube* (Fig. 3.10). Após esta transformação o cubo pode ser visualizado em seções verticais ou *frequency slices*, em seguida faz-se um balanceamento espectral para cada *slice* de freqüência, minimizando a assinatura da *wavelet* e possibilitando que as amplitudes de diferentes freqüências possam ser comparadas.



Figura 3.10: Representação esquemática da metodologia decomposição espectral. (Johann, 2002)

O intérprete utilizará *slices* de freqüência para identificar os padrões de interferência de camadas delgadas que aparecem como variações coerentes de amplitude. A animação das diversas sub-bandas de freqüência através do *Tuning Cube*, das baixas para as altas freqüências, por exemplo, fornece uma visão abrangente da característica de tuning da zona de interesse. O mesmo procedimento pode ser utilizado para gerar o espectro de fase. A fase torna-se instável na presença de descontinuidades, possuindo aplicação na indicação de feições estruturais. Feições sismo-estratigráficas, falhamentos complexos e/ou sutis são então revelados. O *Tuning Cube* de amplitude é chave para o mapeamento de heterogeneidades e mudanças na espessura do reservatório, bem como falhas sutis difíceis de serem reveladas no procedimento clássico (Partyka e Lopez, 1999).

3.3 Reconhecimento de Formas Sísmicas

A análise de fácies sísmica não é uma tarefa simples, tampouco determinística. Pois, não existe, ainda, um ponto pacífico sobre uma forma padrão para estudo, levando os interpretes a diversificar a forma de análise.

Os métodos estatísticos utilizados no reconhecimento de formas sísmicas se beneficiam do fato que os objetos a serem classificados (morfologia dos traços) muda de uma classe a outra. Eles supõem que as descrições dos objetos de uma mesma classe se dispersam respeitando uma estrutura específica de cada classe (Johann, 2002). Há duas metodologias de reconhecimento de formas sísmicas: não-supervisionada, quando as informações sobre a geologia da região forem incompletas ou inexistentes; e supervisionada, quando existem dados suficientes da região para se depurar a análise.

No presente trabalho, o método estatístico utilizado no reconhecimento das formas sísmicas foi o do reconhecimento de formas não-supervisionado.

3.3.1 Princípios da Metodologia

Independente de a análise ser supervisionada ou não, geralmente, a sua realização se dá de acordo com as seguintes etapas (Johann, 2002):

- 1. Segmentação espacial e temporal dos dados sísmicos 3D com orientação geológica;
- 2. Seleção dos atributos sísmicos que serão utilizados;
- 3. Escolha do número de classes, fácies ou padrões, e o número de iterações que serão utilizados pelo algoritmo;
- 4. Treinamento e classificação dos atributos selecionados utilizando alguma ferramenta estatística ou redes neurais;
- 5. Construção e Interpretação dos mapas de fácies sísmica.

Na Etapa 1, a segmentação dos dados é realizada através da interpretação sísmica dos horizontes que revelam a área de interesse no volume de dados 3D. Normalmente, as segmentações temporal e espacial devem ser realizadas cuidadosamente, pois quaisquer erros de interpretação podem levar a resultados de fácies muito ruidosos.

Na Etapa 2, os atributos sísmicos que melhor representem aspectos geologicamente importantes da região devem ser selecionados. Tal tarefa é bastante empírica. Eventuais correlações estatísticas devem ser verificadas entre os atributos sísmicos escolhidos, evitando a redundância de informação.

Na Etapa 3, o número de formas sísmicas é arbitrado de forma empírica ou através de algum conhecimento da região quando existente.

A escolha do algoritmo usado para a classificação dos atributos sísmicos é função do conhecimento geológico da região em análise.

Neste trabalho, o algoritmo utilizado na análise não-supervisionada foi o *K-means*, presente no *software SeisWorks*, pois fornece a agrupamento dos dados que tenham características em comum.

Na Etapa 4 é realizado o treinamento e a classificação das fácies sísmicas, que são devidamente analisadas na etapa 5.

O resultado da análise de fácies sísmica é chamado de mapa de fácies sísmicas. Através deste mapa, podem-se avaliar características em comum existentes na região analisada. Associando informações de poços é possível calibrar o mapa para a característica geológica desejada.

Na abordagem não-supervisionada, a interpretação geológica das unidades de fácies sísmicas é feita a *posteriori*, por comparação com as litologias dominantes nos poços, as medidas petrofisicas, o conhecimento geológico, etc (Johann, 1999). Pode-se verificar facilmente, que apesar de sua comprovada eficácia (Johann, 1999), todo o processo descrito deve ser realizado com bastante cautela, pois pequenos erros em qualquer etapa podem levar a resultados totalmente diferentes da realidade.

CAPÍTULO 4

Aplicação das Metodologias

4.1 Decomposição Espectral

O método de decomposição espectral tem como principal objetivo escolher um intervalo de interesse no domínio do tempo e transformá-lo, via DFT, para o domínio da freqüência.

A realização da técnica de decomposição espectral foi feita através do *software* Spec-Decomp.

O método segue as seguintes etapas:

1. Interpretação do horizonte-guia

A escolha de um intervalo de interesse no domínio do tempo, conceito de *Surface Slice*, é imprescindível para a extração do sub-volume.

2. Extração do sub-volume

Situa-se paralelo ao horizonte-guia, no qual será feita a decomposição espectral.

3. Cálculo do espectro

O método de decomposição usado pelo programa é a Transformada Discreta de Fourier (DFT), normalmente indicado, para janelas de comprimento maior ou igual a 30 ms e análise além da espessura de *tuning*.

4. Interpretação

O intérprete utilizará os horizontes de freqüência para identificar os padrões de interferência de camadas delgadas. A animação dos mapas através de diferentes sub-bandas de freqüências permitirá o mapeamento de diferentes descontinuidades geológicas laterais. Alguns aspectos importantes devem ser considerados:

- O sismograma sintético pode também ajudar na investigação da visibilidade sísmica da feição estudada, devido ao fato do método ser baseado na polaridade oposta entre topo e base da camada analisada;
- 2. Baixa razão sinal/ruído inibe a obtenção de bons resultados;
- 3. A janela de conversão não deve ser muito grande, tampouco pequena demais para a amostragem temporal disponível. Dados com banda muito limitada podem remover feições estratigráficas de interesse;
- 4. A não estacionariedade da *wavelet* pode ser um falseador do processo;
- 5. Havendo controle baseado em poços pode ser usado um horizonte-guia fora do intervalo de interesse;
- 6. Recomendável repetir o processo a cada nova versão do dado sísmico;
- 7. Testar cubos de *tuning* de variadas espessuras; e
- Feições sismoestratigráficas não identificáveis com a decomposição espectral, normalmente, também não são reveladas por outras técnicas de análise estratigráfica baseada em atributos sísmicos.

4.2 Análise da forma de Onda

A análise da forma de onda pressupõe uma íntima relação entre a estratigrafia e a forma da onda, com isso permite medir estatisticamente sua similaridade.

No software PostStack/PAL, o atributo usado para medir estatisticamente a similaridade da wavelet foi o Wavelet Classification que permite fazer uma análise supervisionada – o usuário fornece uma wavelet de referência – ou não-supervisionada, onde o programa se encarrega de definir a wavelet de referência a partir do próprio dado.

O PAL calcula os valores dos atributos em um intervalo areal e em tempo especificado, em seguida apresenta os resultados em forma de horizontes ou mapas.

Uma vez carregados os dados de entrada, os dados sísmicos convencionais e os horizontes interpretados, é definida uma janela para análise.

O processo para computar o atributo é muito simples: basta selecionar na janela de análise um horizonte-guia, e sobre ele atribuir um valor de tempo; escolher o numero de classes e atribuir um nome de saída. Foram aplicados filtros nos mapas de atributos finais, para melhorar a correlação visual, no sentido de distinguir melhor as similaridades das *wavelets*.

Este processo funciona como uma análise espacial de correlação, ou cubo de coerência, revelando pequenas ou grandes variações de comportamento estrutural e estratigráfico. Podem destacar presença de falhas, indicar áreas com ausência de reflexões ou ainda variações na qualidade do dado provocada por variações litológicas e/ou estratigráficas.

Convém destacar que outras situações também podem apresentar anomalias de similaridade como por exemplo os *footprints*.ou regiões de artefatos do processamento como franjas de migração e áreas de traços ruidosos.

CAPÍTULO 5

Análise e Interpretação

Neste capítulo, demonstraremos as análises e interpretações dos resultados obtidos através da técnica de análise espectral e reconhecimento por forma de onda.

O presente trabalho consistiu em aplicar as metodologias em áreas distintas, as quais, para manterem suas discrições e confidencialidades foram nomeadas de Projeto A, Projeto B, Projeto C e Projeto D.

Os projetos B e C, apresentaram os resultados mais animadores, onde foram obtidos através da decomposição espectral principalmente no Projeto C onde foram observadas imagens marcantes que sugerem um ambiente fluvial e eólico associados.

Para os projetos A e D, os resultados mais satisfatórios foram obtidos pelo reconhecimento da forma de onda principalmente o Projeto D, no qual foram detectados padrões de arenitos em uma área onde as informações de poços eram ínfimas ou quase não existiam.

5.1 Tuning Cube

A interpretação dos Projetos B e C puderam ser feitas por animação na direção z através do cubo de interferência, isto é, por diferentes *slices* de freqüência. O comprimento da janela de tempo e posição no espaço foram os parâmetros mais sensíveis testados com estes *set* de dados.

No projeto C, inicialmente utilizou-se uma janela de 40ms centrada no horizonte e um intervalo de 0 a 125 Hz. Os resultados foram transferidos e analisados, procurando-se identificar feições geológicas de interesse nas diversas bandas de freqüência. Foram selecionadas algumas faixas de freqüências que apresentaram feições mais representativas do modelo geológico esperado.

A cada faixa de freqüência, são ressaltadas, feições geológicas distintas de acordo com a espessura relacionada aos eventos, ou seja, efeitos de *tuning* provocados por eventos mais delgados serão revelados em faixas de freqüência maiores. As figuras 5.1 e 5.2 mostram visões em planta de *slices* gerados para diferentes freqüências. Os *slices* escolhidos são relativos às freqüências de 105 e 115 Hz, que são próximos da freqüência dominante esperada. Notam-se diversos eventos na direção aproximada NW-SE, consistentes com o modelo geológico da área, relativos à existência de paleo-dunas. Nota-se ainda que as imagens são diferentes, ou seja, freqüências diferentes mostram informações também diferentes, provavelmente relacionadas a espessuras distintas.

O range de freqüência escolhido foi devido a uma prévia análise espectral, onde foi constatado que as faixas de freqüência abaixo de 50 Hz eram muito ruidosas (fig. 5.4 e fig. 5.5).

As faixas de freqüências foram analisadas minuciosamente, pois a interpretação não é trivial, uma vez que deve ser consistente com o modelo geológico da área em estudo, não só em termos de distribuição espacial, como também em termos de espessura.

Com base nos resultados desta etapa, os passos acima foram repetidos, porém agora com um *shift* de 12 ms abaixo do horizonte e com mesmo tamanho de janela (40ms).

As figuras 5.6 e 5.7 mostram visões em planta de *slices* gerados para diferentes freqüências, para essa nova análise. Os *slices* escolhidos são relativos às freqüências de 80 e 97 Hz, que são próximos da freqüência dominante esperada. Nota-se um evento principal, praticamente, de direção N-S, também consistentes com o modelo geológico do intervalo estudado, relativos à existência de um paleo-canal.

Aqui também nota-se diferentes imagens para freqüências distintas com faixas de freqüência muito ruidosas abaixo de 50 Hz (fig. 5.9 e fig. 5.10).

No projeto B, os procedimentos descritos anteriormente foram também aplicados a este projeto.

A figura 5.12 mostra uma visão em planta do *slice* com sua respectiva seção vertical. O *slice* escolhidos é relativos à freqüência 27 Hz, que são próximos da freqüência dominante esperada. Assim como no Projeto C o range de freqüência escolhido foi devido a uma prévia análise espectral, onde neste caso foi constatado que para freqüências acima de 60 Hz os dados apresentavam muitos ruídos. Pode-se inferir a essa característica que anomalias de amplitude reveladas nas freqüências mais baixas podem estar relacionadas à maiores espessuras.

5.2 Análise de Forma de Onda

A interpretação dos Projetos A e D foram feitas através de mapas de fáceis sísmica concebida por reconhecimento das formas de onda não-supervisionada utilizando o algoritmo *K-means*. O número de classes e a janela de tempo foram os parâmetros mais sensíveis testados com estes *set* de dados. No projeto D, inicialmente utilizou-se entre 4 a 6 número de classes com uma janela de 40ms centrada no horizonte. Os resultados foram transferidos e analisados, procurando-se identificar feições geológicas de interesse. Após teste e prévias análises, decidiu-se trabalhar com 5 classes, por alcançar melhores resultados.

O curioso nos resultados de aproximação do reconhecimento das formas de onda nãosupervisionada é a boa correlação entre as classes e a interpretação de fácies deposicionais do campo em estudo. Na figura 5.13 a classe verde é associada a sedimentos arenosos.

No projeto A, os procedimentos descritos anteriormente foram também aplicados a este projeto, porém os melhores resultados alcançados foram com 4 classes. Na figura 5.14 a classe azul está associada a falhas.



Figura 5.1: Slice de 105 Hz ressaltando as feições de paleo-duna.



Figura 5.2: *Slice* de 115 Hz ressaltando as feições de paleo-duna.



Figura 5.3: Slice de 113 Hz interpretado.



Figura 5.4: *Slice* de 15 Hz mostra somente ruídos.



Figura 5.5: Slice de 45 Hz mostra somente ruídos.



Figura 5.6: Slice de 80 Hz ressaltando as feições de paleo-canal.



Figura 5.7: Slice de 97 Hz ressaltando as feições de paleo-canal.



Figura 5.8: Slice de 97 Hz interpretado.



Figura 5.9: Slice de 10 Hz mostra somente ruídos.



Figura 5.10: Slice de 25 Hz mostra somente ruídos.



Figura 5.11: Visão em perspectiva. (a) faixa de freqüência 97 Hz ; (b) Geobody do paleo-canal sobreposto a faixa de freqüência 97 Hz; (c) Geobody do paleo-canal.



Figura 5.12: As setas em amarelo indicam em: (a) o limite da superfície de escavação mostrado em um *Slice* de 27 Hz, (b) a superfície de escavação em uma seção vertical.



Figura 5.13: Mapa de formas de onda; e sua respectiva seção vertical da linha amarela, onde dentro das elipses estão evidenciados os lóbulos de arenito.



Figura 5.14: A classe azul representa as falhas.

CAPÍTULO 6

Conclusões

A decomposição espectral é inovadora no tratamento do efeito *tuning*. Além disso, abre uma nova abordagem na interpretação de dados sísmicos. As imagens obtidas pelo método, usualmente exibem mais fidelidade do que as imagens baseadas em amplitude convencional passando de uma análise "estática" em tempo, em freqüência dominante, para animações de imagens de freqüências e fases com incremento escolhido pelo intérprete.

O método demonstrou ser uma ótima ferramenta na identificação e individualização de feiccões sismoestratigráficas. Essas individualizações são importantes para estudar e otimizar a exploração das reservas de hidrocarbonetos, pois permite um melhor entendimento da distribuição espacial das rochas-reservatório.

O reconhecimento de formas de onda permitiu fazer um mapeamento automático e muito rápido da fácies sísmicas presentes na área estudada. Este mapeamento auxiliou a definir a distribuição espacial e entendimento da sismoestratigrafia da área estudada.

Outras técnicas de interpretação como a transformada *wavelet* e freqüência instantânea foram aplicadas em alguns projetos do trabalho, porém ficou inviável dar prosseguimento aos projetos com estas metodologias, devido ao curto período de estágio na PETROBRAS S.A. Já que os resultados, obtidos empiricamente, requerem muitos testes e procedimentos.

Uma metodologia que também deve ser explorada para trabalhos futuros é a conversão da onda, pois no âmbito da sísmica multicomponente, quando se refere a energia registrada pelos geofones horizontais, acredita-se que, para *zero-offset*, esta é nula. Apesar disto, alguns autores têm mostrado a presença significativa de energia para *zero-offset/near-offset* associada à reflexão da onda convertida em dados de campo, ou seja, esperar-se encontrar casos de refletividade não nula.

Agradecimentos

Esta monografia não é resultado unicamente do esforço individual do autor e por isso agradecemos a todos aqueles que de alguma forma ajudaram nesta árdua empreitada.

À PETROBRAS, por todo suporte e oportunidade oferecida, sem as quais este trabalho não poderia ter sido desenvolvido e concluído.

Ao meu orientador, Marco Cesar Schinelli por ter aceito este desafio, pela orientação objetiva, criteriosa e pelo exemplo de dedicação e entusiasmo na condução deste trabalho.

Aos profissionais da PETROBRAS S.A. Gino Passos, Claudio Sarnelli, Jaciara Barreto, Aurino Aragão, Sandro Menegatti, Fernando Cezar, Nilton Lima, que me receberam com muita gentileza, e se mostraram sempre dispostos a solucionar dúvidas e principalmente por me fornecerem novos ensinamentos.

À minha namorada Ana, agradecimentos mais que especiais pelo incentivo, carinho, compreensão, apoio e companheirismo.

A todos os amigos e amigas que de alguma forma contribuíram para a realização deste trabalho, em especial Fábio Barros e Felipe Terra.

Aos professores e colegas do curso de graduação que contribuíram para o meu aprendizado.

Finalmente, agradeço aos meus pais Lourival Motta e Maria da Conceição, aos meus avós Wilson Portela e Noêmia Portela pela educação recebida, carinho, cuidado e amparo de sempre. Ao meu irmão Danilo Portela, grande amigo Fábio Gonçalves, tios, primos e toda minha família pelo ótimo ambiente no qual cresci e vivo até hoje.

Referências Bibliográficas

- Balch, A. (1971) Colors sonograms: a new dimension in seismic data interpretation, Geophysics, pp. 1074–1098.
- Bone, M. R., G. B. F. e Tegland, E. (1983) Analysis of seismic data using horizontal crosssection, Geophysics, pp. 1172–1178.
- Brown, L. e Fisher, L. (1977) Seismic-stratigraphic interpretation of depositional systems: examples from brazilian rift and pull-apart basins, American Association of Petroleum Geologists, **12**:213–248.
- Cainelli, C. (1997) Curso de sismoestratigrafia/estratigrafia de seqüências. apostila da disciplina de sismoestratigrafia ministrada para o curso de pós graduação em geociências, UFRGS/Petrobras.
- Emery, D. e Myers, K. (1996) Sequence stratigraphy, Blackwell Science Ltd.
- Johann, P. (1999) Inversion sismo-stratigraphique et simulations stochastiques: reservoir turbiditique, offshore du brésil., Ph. D. Thesis.
- Johann, P. (2002) Reconhecimento de formas sísmicas, fácies sísmicas, abordagem qualitativa.
- Karam, M. R. K. (2005) Integração de ferramentas multidisciplinares para o estudo de feições tectônicas e sismoestratigráficas na seqüência pós-rifte da bacia de Camamu-Almada., Ph. D. Thesis, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.
- Lindseth, R. O. (1979) Synthetic sonic logs a process for stratigraphic interpretation.
- Mitchum, R. M.; Vail, P. e Sangree, J. (1977) Seismic stratigraphy and global changes of sea level, part 6: Stratigraphic interpretation of seismic reflection patterns in depositional sequences, American Association of Petroleum Geologists, pp. 177–133.
- Mitchum, R. M.; Vail, P. e Thompson III, S. (1977) Seismic stratigraphy and global changes of sea level, part 2: The depositional sequence as a basic unit for stratigraphic analysis, American Association of Petroleum Geologists, pp. 53–62.
- Partyka e Gridley (1997) Interpretational aspects of spectral decomposition.
- Partyka, G. (2001) Seismic thickness estimation: Three approaches, pros and cons, pp. 180–191.
- Partyka, G.A., G. J. e Lopez, J. (1999) Interpretational applications of spectral decomposition in reservoir characterization, The Leading Edge, **18**:353–360.
- Payton, C. (1977) Seismic stratigraphy applications to hydrocarbon exploration-memoir 26: American association of petroleum geologists.
- Ribeiro, H. (2001) Estratigrafia de seqüências: Fundamentos e aplicações, EDUSINOS.
- Taner, M. T. e Sheriff, R. E. (1977) Application of amplitude, frequency and other attributes to stratigraphic and hydrocarbon determination.
- Vail, P.R.; Mitchum, R. e Thompson III, S. (1977) "seismic stratigraphy and global changes of sea level,part3:relative changes of sea level fom coastal onlap"., Tulsa:American Association of Petroleum Geologists, pp. 63–81.
- Van Wagoner, J.C.; Mitchum, R. C. H. e Rahmanian, V. (1990) Siliciclastic stratigraphy in well logs, cores and outcrops: concepts for high resolution correlation of time and facies, American Association of Petroleum Geologists, 7.
- Widess, M. B. (1973) How thin is a thin bed?
- Wilgus, C.K.; Hastings, B. K. C. P. H. R. C. e Van Wagoner, J. (1988) Sea-level changes: an integrated approach, American Association of Petroleum Geologists, pp. 42–407.
- Zeng, H. (1998) Stratal slicing, part i: Realistic 3d seismic model, Geophysics, pp. 502–513.