



UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS

INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOCIÊNCIAS - ÁREA DE
GEOENGENHARIA DE RESERVATÓRIOS

MARISA BUENO DOS SANTOS

MODELAGEM ESTOCÁSTICA BASEADA EM OBJETOS DE
RESERVATÓRIOS TURBIDÍDICOS CANALIZADOS

Dissertação apresentada ao Instituto de Geociências como
parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em
“Geociências – Área de Geoengenharia de Reservatórios”.

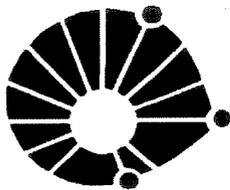
Orientador: Dr. Wilson Luiz Lanzaolini

Co-Orientador: Prof. Dr. Geovan Tavares

Esta dissertação foi aceita para publicação
redigida por Marisa Bueno dos Santos
e aprovada em 17/11/1998
W. Lanzaolini
ORIENTADOR

CAMPINAS - SÃO PAULO

SETEMBRO - 1998



UNICAMP

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS/ÁREA DE GEOLOGIA DE
PETRÓLEO

PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOCIÊNCIAS - ÁREA DE
GEOENGENHARIA DE RESERVATÓRIOS

MARISA BUENO DOS SANTOS

MODELAGEM ESTOCÁSTICA BASEADA EM OBJETOS DE
RESERVATÓRIOS TURBIDÍTICOS CANALIZADOS

Dissertação apresentada ao Instituto de Geociências como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Geociências – Área de Geoengenharia de Reservatórios.

Orientador: Dr. Wilson Luiz Lanzarini – PETROBRÁS /CENPES

Co-Orientador: Prof. Dr. Geovan Tavares- PUC-RIO/DEPT^O. DE MATEMÁTICA.

CAMPINAS - SÃO PAULO

SETEMBRO - 1998

9912.588



UNIDADE	BC
N.º CHAMADA:	
V	37970
	229,99
	D <input checked="" type="checkbox"/>
PREÇO	R\$ 11,00
DATA	18/06/99
N.º CPD	

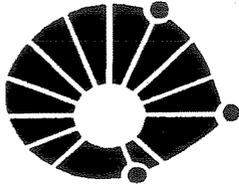
FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA
BIBLIOTECA I.G. - UNICAMP

CM-00124337-B

Santos, Marisa Bueno dos
SA59m Modelagem Estocástica Baseada em Objetos de Reservatórios
Turbidífticos Canalizados. / Marisa Bueno dos Santos.-
Campinas, SP.: [s.n.], 1998.

Orientador: Wilson Luiz Lanzarini
Dissertação (mestrado) Universidade Estadual de Campinas,
Instituto de Geociências

1. Reservatórios Turbidífticos. 2. Modelagem geométrica.
3. Métodos de Simulação. I. Lanzarini, Wilson Luiz. .II.
Universidade Estadual de Campinas, Instituto de Geociências. III. Título.



UNICAMP

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS/
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS/ÁREA DE GEOLOGIA DE
PETRÓLEO
PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOCIÊNCIAS - ÁREA DE
GEOENGENHARIA DE RESERVATÓRIOS

AUTOR: MARISA BUENO DOS SANTOS

**TÍTULO DA DISSERTAÇÃO: MODELAGEM ESTOCÁSTICA BASEADA EM
OBJETOS DE RESERVATÓRIOS TURBIDÍTICOS CANALIZADOS**

ORIENTADOR: Dr. Wilson Luiz Lanzarini

Aprovada em: ____/____/____

PRESIDENTE: Dr. Wilson Luiz Lanzarini

EXAMINADORES:

Prof. Dr. Wilson Luiz Lanzarini **Presidente**

Wilson Lanzarini
Prof. Dr. Carlos Henrique Lima Bruhn

Carlos Henrique Lima Bruhn
Prof. Dr. Armando Zauppa Remacre

Armando Zauppa Remacre

Campinas, 30 de Setembro de 1998.

*Aos meus pais,
Alcinda e Onofre (que saudades, pai!),
com amor.*

AGRADECIMENTOS

À Petrobrás S/A, através de seus gerentes GERSON FERNANDES, VAGNER BERALDO E PAULO CÉZAR AMARO AQUINO, pela oportunidade, incentivo e apoio financeiro, a ALADINO CÂNDIDO (E&P/ES) pela colaboração na obtenção dos dados de campo e a SEVERINO XAVIER DE MENEZES, pelas condições oferecidas, facilitando a conclusão deste trabalho.

Aos meus orientadores WILSON LUIZ LANZARINI e GEOVAN TAVARES pela paciência, incentivo e proveitosas discussões.

Ao amigo MILTON JOSÉ DE SOUZA pela ajuda na escolha do campo a ser estudado e pelas longas conversas, que me auxiliaram a superar os momentos difíceis.

Ao professor ARMANDO ZAUPA REMACRE pelas conversas, críticas e sugestões, que tanto facilitaram delinear o enfoque dado a este trabalho.

A HÉLIO LOPES e SINÉSIO PESCO pela amizade, apoio e suporte técnico.

Aos professores e funcionários do Instituto de Geociências, do Departamento de Petróleo e do Cepetro - Unicamp, pela colaboração e participação na minha formação técnica.

Aos colegas de mestrado JOÃO, JÚLIO, MARCELO, MÁRCIO E MÁRIO SÉRGIO, a turma J²M⁴ (e suas famílias), pelo carinho, compreensão e, principalmente pelo afeto e amizade, que felizmente continuam entre nós, apesar do término do curso.

Aos amigos do E&P-RNCE, principalmente o pessoal da antiga área do Alto de Mossoró, que desde o meu ingresso na Gerência de Reservas e Reservatórios sempre me incentivaram e contribuíram para a minha formação pessoal e profissional.

Aos colegas da E&P/ES pelas informações recebidas, principalmente ao ALCIDES PALHARES JÚNIOR, ANTÔNIO CELSO GUIRRO, ANTÔNIO COSME DEL REY, FRANCISCO HENRIQUE DE O. LIMA, JOSÉ HENRIQUE DE CASTRO NEGREIROS E SILVIO JOSÉ MOREIRA.

Ao pessoal da GECOR, pelo carinho e compreensão.

Ao CAMPOS, pela confecção das seções e mapas.

Em especial, agradeço a CARLOS HENRIQUE BRUHN e OLINTO SOUZA JR., pela contribuição inestimável no enriquecimento deste trabalho e pelo privilégio de tê-los como amigos.

Agradeço a Deus por ter me dado a oportunidade de conviver com uma família cujo maior laço de união é o amor, muito acima de qualquer relação consanguínea. Isto me faz forte para superar a saudade e aceitar as perdas... e acreditar que a vida é realmente muito boa.

SUMÁRIO

1. Introdução	1
1.1. Objetivos	1
1.2. Metodologia	2
1.3. Organização da dissertação	2
2. Caracterização e modelagem de reservatórios	4
2.1. Resumo histórico	4
2.2. Caracterização de reservatórios	6
2.3. Escalas de heterogeneidades	10
2.4. Modelagem de reservatórios	16
3. Arquitetura de sistemas deposicionais turbidíticos	18
3.1. Modelos turbidíticos	18
3.2. Elementos de arquitetura e unidades genéticas	22
4. Simulação Estocástica	30
4.1. Conceitos básicos	30
4.2. Modelo booleano	33
4.3. Classificação geral dos modelos de simulação	37
4.4. Aplicações de modelos estocásticos em estudos de reservatório	39
4.5. Evolução dos modelos baseados em objetos	43
4.5.1. Modelo de Haldorsen (1983)	43
4.5.2. Modelo de Matheron, Beucher, de Fouquet & Galli (1987)	44
4.5.3. Modelo de Chessa (1995)	45
4.5.4. Modelo de Deustsh & Wang (1996)	49
4.5.5. Modelo de Lia, Tjelmeland & Kjellesvik (1997)	51
5. Algoritmo e programa de simulação utilizado	54
5.1. Características gerais	54
5.2. Algoritmo de simulação	55
5.3. Adaptações efetuadas no algoritmo para a simulação de canais turbidíticos	57
5.4. Informações iniciais para a simulação	60
5.5. Curvas de proporção vertical	65
5.6. Obtenção de seções e apresentação dos resultados das simulações	67

6. Levantamento e tratamento estatístico dos dados	72
6.1. Geologia regional	72
6.2. Geologia de detalhe das áreas análogas e do campo estudado	76
6.2.1. Afloramentos da Bacia de Almada	76
6.2.2. Campo de Lagoa Parda	81
6.2.3. Campo estudado	84
6.3. Estatística básica dos dados utilizados	96
6.3.1. Afloramentos da Bacia de Almada	96
6.3.2. Campo de Lagoa Parda	108
6.3.3. Campo estudado	119
6.3.4. Comentários sobre as correlações obtidas	121
7. Simulações	128
7.1. Tratamento dos dados para a simulação	128
7.1.1. Dados de entrada	128
7.1.2. Escolha dos parâmetros	129
7.1.3. Curvas de proporção para simulação de canais turbidíticos	130
7.1.4. Arquivos de entrada para o simulador	132
7.2. Parametrização e ajuste de correlações	132
7.3. Simulações finais	151
8. Conclusões	159
9. Anexos	164
10. Referências bibliográficas	167

LISTA DE FIGURAS

Figura 2. 1- Geometria potencial dos corpos arenosos	6
Figura 2. 2 - Sistema deposicional e unidade genética	8
Figura 2. 3 - Escalas de heterogeneidades	11
Figura 2. 4 - Classificação de heterogeneidades	12
Figura 2. 5 - Classificação geral dos tipos e escalas de heterogeneidades	15
Figura 2. 6 - Hierarquia das superfícies delimitantes	17
Figura 3. 1 - Estilos de sedimentação turbidítica das bacias da margem leste brasileira	21
Figura 3. 2 - Elementos de arquitetura	23
Figura 3. 3 - Classificação da geometria dos elementos de arquitetura	25
Figura 3. 4 - Classificação das formas deposicionais	26
Figura 3. 5 - Hierarquia das superfícies limitantes em afloramentos	26
Figura 3. 6 - Modelo de canais submarinos antigos	28
Figura 3. 7 - Continuidade lateral e a conectividade vertical dos corpos turbidíticos	29
Figura 4. 1 - Distribuição e processo de Poisson	32
Figura 4. 2 - Representação gráfica de uma função booleana	34
Figura 4. 3 - Representação de um modelo booleano	35
Figura 4. 4 - Ajuste proposto por Chessa (1995) para o algoritmo de Haldorsen (1983)	47
Figura 4. 5 - Exemplo de simulação seqüencial	52
Figura 4. 6 - Realizações de modelos com tendências espaciais variadas	53
Figura 4. 7 - Realizações de um modelo com interação entre os objetos simulados	53
Figura 5. 1 - Posicionamento do objeto canal em relação ao poço	57
Figura 5. 2 - Janelas iniciais do programa usado, representação <i>wire-frame</i>	62
Figura 5. 3 - Janelas iniciais do programa usado, representação <i>flat-shading</i>	63
Figura 5. 4 - Detalhe do cubo contendo o intervalo a ser simulado	64
Figura 5. 5 - Representação dos dados de poços para confecção da curva de proporção	68
Figura 5. 6 – Curva de proporção vertical não-normalizada	68
Figura 5. 7 – Representação do traço do plano vertical para confecção de seções	69
Figura 5. 8 – Plano vertical contendo os corpos gerados	69
Figura 5. 9 – Representação gráfica do plano de corte horizontal	70
Figura 5.10 – Representação em planta dos objetos gerados	70
Figura 5.11 – representação gráfica de cortes horizontal e vertical simultâneos	71

Figura 6. 1 - Seção geológica generalizada das bacias da margem leste brasileira	73
Figura 6. 2 - Principais <i>canyons</i> preenchidos por sedimentos da Formação Urucutuca	75
Figura 6. 3 – Perfil tipo e mapa dos afloramentos da Bacia de Almada	79
Figura 6. 4 - Seção transversal esquemática e perfil tipo dos canais de Lagoa Parda	83
Figura 6. 5 – Correlação rocha-perfil e perfil tipo do campo estudado	89
Figura 6. 6 – Seções geológica do campo estudado	91
Figura 6. 7 – Mapa de distribuição dos canais 21, 22, 27, 29 a 32 e 34 do complexo CC2 ..	94
Figura 6. 8 - Histogramas de largura e extensão, dados iniciais, Afl. Almada	96
Figura 6. 9 - Diagrama de probabilidade normal, dados iniciais de largura e extensão, Afloramentos de Almada	97
Figura 6.10 - Diagrama de caixa dos dados iniciais de largura e extensão, afl. Almada	97
Figura 6.11 - Histograma dos dados iniciais de direção e sinuosidade, afl. Almada	98
Figura 6.12 - Diagrama de caixa dos dados iniciais de direção e sinuosidade, afl. Almada ..	98
Figura 6.13 - Diagrama de probabilidade dos dados iniciais de direção e sinuosidade, afl. de Almada	98
Figura 6.14 - Diagrama de dispersão entre largura e extensão, dados iniciais, afl. Almada..	99
Figura 6.15 - Diferença entre valores observados e calculados, dados iniciais, extensão, afl. de Almada	99
Figura 6.16 - Histogramas de largura, extensão, direção e sinuosidade, dados reinterpretados, afl. de Almada	100
Figura 6.17 - Diagramas de caixa dos dados finais de largura, extensão, direção e sinuosidade, afl. de Almada	101
Figura 6.18 - Diagrama de probabilidade, largura, extensão, direção e sinuosidade, dados finais, afl. de Almada	101
Figura 6.19 - Diagrama de dispersão dos dados finais de largura e extensão, afl. Almada..	102
Figura 6.20 - Extensão, dados finais: valores observados e calculados.....	103
Figura 6.21 - Extensão, dados finais: correlação com interseção na origem, valores observados, calculados e diferença	103
Figura 6.22 – Extensão: correlação entre os dados selecionados	104
Figura 6.23 - Diagrama de dispersão e linhas de tendências não-lineares, dados finais	105
Figura 6.24 - Correlações com linhas de tendência não-lineares, dados selecionados	106
Figura 6.25 - Extensão: valores medidos, calculados com as equações de mais alto R^2 da Fig. 6.23 e diferença entre estes	107

Figura 6.26 - Extensão: medida, calculada (equações da Fig. 6.24) e diferença	107
Figura 6.27 – Histograma dos dados iniciais de largura e espessura de Lagoa Parda	109
Figura 6.28 - Diagramas de probabilidade normal e de caixa, dados iniciais de largura e espessura de Lagoa Parda	109
Figura 6.29 – Comparação entre a distribuição lognormal e os dados iniciais de largura e espessura de Lagoa Parda	110
Figura 6.30 - Diagrama de dispersão entre largura e espessura; valores observados, calculados e diferença, dados iniciais de espessura, Lagoa Parda.....	111
Figura 6.31 - Diagrama de dispersão de largura e espessura sem os dados inferidos de Lagoa Parda	111
Figura 6.32 - Diagrama de dispersão entre largura e espessura de Lagoa Parda, sem os canais do Complexo CC1	112
Figura 6.33 - Histogramas de largura e espessura, dados selecionados, L. Parda.	113
Figura 6.34 - Diagramas de probabilidade normal, dados selecionados de Lagoa Parda. ...	113
Figura 6.35 - Diagrama de caixa dos dados selecionados de Lagoa Parda	114
Figura 6.36 – Comparação entre a espessura de Lagoa Parda, dados selecionados e a distribuição lognormal	114
Figura 6.37 - Comparação entre a largura de Lagoa Parda, dados selecionados e a distribuição lognormal	114
Figura 6.38 – Diagrama de dispersão e comparação entre espessura observada e calculada dos dados selecionados de Lagoa Parda	115
Figura 6.39 - Diagrama de dispersão dos dados iniciais de Lagoa Parda, correlações com linhas de tendência não-lineares	116
Figura 6.40 - Correlações com linhas de tendência não-lineares, sem dados	116
Figura 6.41 - Correlações com linhas de tendência não-lineares, dados de Lagoa Parda Sem os canais do Complexo CC1	117
Figura 6.42 – Correlações com linhas de tendência não-lineares, dados selecionados de Lagoa Parda	117
Figura 6.43 – Largura de Lagoa Parda: observada e calculada com correlação para canais fluviais	118
Figura 6.44 - Histograma da espessura dos intervalos arenosos, campo estudado	120
Figura 6.45 - Diagrama de caixa e gráfico de probabilidade normal, espessura dos intervalos arenosos do campo estudado	120

Figura 6.46 - Histograma da espessura dos intervalos não-reservatórios, campo estudado .	121
Figura 6.47 - Gráfico de probabilidade normal e diagrama de caixa, espessura dos intervalos não-reservatórios, campo estudado	121
Figura 6.48 - Correlação entre a largura e logaritmo da extensão de Almada, dados finais .	122
Figura 6.49 – Simulações condicionais iniciais	123
Figura 6.50 - Forma final dos canais turbidíticos	124
Figura 6.51 - Curva de proporção vertical e horizontal, dados do campo estudado	114
Figura 7. 1 - Parâmetros de um canal turbidítico no espaço tridimensional	133
Figura 7. 2 - Forma inicial do objeto canal	135
Figura 7. 3 - Forma final do objeto canal	135
Figura 7. 4 - Esquema gráfico do Método da Inversão	136
Figura 7. 5 - Curvas de frequência acumulada dos dados amostrais dos afl. de Almada	137
Figura 7. 6 - Simulação não-condicional com proporção global de 0,02%	138
Figura 7. 7 - Simulação condicional: proporção global inicial de 0,02% e final de 7,0%	138
Figura 7. 8 – Simulações com proporção global de 7,0%, condicional e não-condicional ..	140
Figura 7. 9 – Distribuição no espaço 3D dos corpos gerados	141
Figura 7.10 - Simulação condicional com proporção final de 7,0%	142
Figura 7.11 - Plano vertical contendo os poços da Figura 7.10	142
Figura 7.12 - Simulação condicional, mesmos parâmetros da Fig. 7.10, mas com proporção global de 20%	143
Figura 7.13 - Plano vertical contendo os poços da figura anterior	143
Figura 7.14 - Corpos gerados abaixo da superfície basal	146
Figura 7.15 - Superfície basal delimita o cálculo do volume dos corpos gerados	146
Figura 7.16 - Simulações iniciais usando o histograma de largura de Lagoa Parada como variável independente	147
Figura 7.17 - Simulações iniciais usando o histograma da largura inicial de Almada como variável independente	147
Figura 7.18 - Simulações efetuadas com comprimento constante para os canais gerados ...	148
Figura 7.19 - Simulação com linhas de tendência não-lineares	149
Figura 7.20 - Forma e correlações usadas nas simulações finais	150
Figura 7.21 - Intervalo estratigráfico simulado e poços condicionantes	155

Figura 7.22 - Simulação dos estágios de desenvolvimento do campo	156
Figura 7.23 - Simulação condicional: diferentes sementes	157

LISTA DE TABELAS

Tabela 3. 1 - Classificação dos tipos de canais turbidíticos	24
Tabela 3. 2 - Definição da hierarquia das superfícies delimitantes	27
Tabela 6. 1 - Estatística básica dos dados iniciais de Almada	96
Tabela 6. 2 - Estatística básica dos corpos reinterpretados do afloramentos de Almada	100
Tabela 6. 3 - Correlações obtidas entre os dados de largura e extensão, afl. de Almada	108
Tabela 6. 4 - Estatística básica dos dados iniciais do Campo de Lagoa Parda	108
Tabela 6. 5 - Estatística básica dos dados selecionados de Lagoa Parda	113
Tabela 6. 6 - Correlações obtidas com os dados de largura e espessura, Lagoa Parda	118
Tabela 6. 7 - Estatística básica dos dados de poços utilizados	120
Tabela 6. 8 - Estatística básica das extensões calculadas	125
Tabela 6. 9 - Estatística básica das espessuras calculadas	125
Tabela 6.10 - Espessura calculada para os afloramentos de Almada	127
Tabela 6.11 - Extensões calculadas para os canais de Lagoa Parda	127
Tabela 7.1 - Estágios simulados do desenvolvimento do campo	151
Tabela 7.2 - Resultados obtidos com a variação da semente	153
Tabela 7.3 - Cálculo de volume dos corpos gerados	153
Tabela 7.4 - Variações no volume poroso	153



UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS/
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS/ÁREA DE GEOLOGIA DE
PETRÓLEO

PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOCIÊNCIAS - ÁREA DE
GEOENGENHARIA DE RESERVATÓRIOS

MODELAGEM ESTOCÁSTICA BASEADA EM OBJETOS DE RESERVATÓRIOS
TURBIDÍTICOS CANALIZADOS

RESUMO

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

Marisa Bueno dos Santos

O mapeamento das unidades geológicas que caracterizam os reservatórios é uma etapa fundamental no planejamento do desenvolvimento e nas análises de desempenho e de viabilidade econômica de um campo de petróleo. Com a aplicação de métodos matemáticos pode-se quantificar as variáveis geológicas e, através da simulação estocástica baseada em objetos, efetuar-se uma abordagem probabilística das dimensões e distribuição espacial dos corpos arenosos que constituem um reservatório de petróleo.

A parametrização e modelagem geométrica efetuadas baseiam-se na análise de dados análogos (turbiditos do Afloramento de Almada e do Campo de Lagoa Parda). A forma geométrica utilizada corresponde a uma simplificação das formas observadas no Afloramento de Almada, ou seja, canais cujas seções transversais e longitudinais são dadas por semi-elipses, onde o eixo menor equivale à espessura e o eixo maior, à largura ou comprimento. Essas seções mostram largura e espessura diminuindo gradualmente de tamanho, em direção às extremidades do canal. As dimensões, no espaço tridimensional, da forma utilizada baseiam-se nas correlações obtidas a partir das medidas efetuadas nos corpos arenosos dos dados análogos.

O modelo baseado em objetos aqui utilizado descreve o processo estocástico através das relações estruturais que compõem as formas geométricas: os objetos são identificados pelas equações paramétricas e implícitas das superfícies que o delimitam e pelo cálculo da interioridade, garantindo o condicionamento simultâneo aos dados de vários poços. A estrutura de dados e os operadores topológicos permitem representar o empilhamento lateral e vertical de objetos e a arquitetura tridimensional resultante.

A obtenção de várias imagens, tanto através da variação dos parâmetros quanto em função da semente escolhida, facilita o cálculo de diferentes volumes, possibilitando um planejamento mais adequado da exploração, assim como uma avaliação das incertezas envolvidas e seus reflexos da avaliação econômica do processo de desenvolvimento e produção de um campo de petróleo.



UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS/
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS/ÁREA DE GEOLOGIA DE
PETRÓLEO

PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOCIÊNCIAS - ÁREA DE
GEOENGENHARIA DE RESERVATÓRIOS

**OBJECT-BASED STOCHASTIC MODELING OF TURBIDITIC CHANNELS
RESERVOIRS**

ABSTRACT

MASTER DISSERTATION

Marisa Bueno dos Santos

Geologic modeling of reservoir genetic units is worldwide recognized as an important step for a successful reservoir development plan. It also leads to reliable reservoir performance predictions and to adequate economic analyses of petroleum fields. Mathematical methods and object-based stochastic modeling allow a probabilistic approach to the size, shape, and spatial distribution of reservoir units such as channelized sand-bodies.

In this work, turbidite channel reservoirs of a real petroleum field are described using object-oriented modeling based mainly on previous geological studies and well data analyses. Some three-dimensional models are built representing reservoir heterogeneities and sand-bodies geometries.

The parametrization and geometric modeling are based on analog data from the Almada Outcrop and the Lagoa Parada Field. The geometric shape chosen to represent the main reservoir bodies is a simplification of those observed in the Almada Outcrop. That is, cylinder-like objects with semi-ellipsoidal cross- and longitudinal- sections are used. The semi-ellipsoidal section minor axis is associated with channel thickness, and the main axis to channel width or length. To reproduce channel limits, both width and length decrease in size towards the cylinder-like extremities. The simulated 3-D object dimensions are based on correlations obtained from measurements of sandstone bodies on analog data.

The object-based method is carried on with an algorithm that describes the stochastic processing by using geometric structural relations among bounding surfaces, corners, and axes of the simulated object. The enveloping surface is identified by its parametric and implicit equations and by the interior point calculations, which guarantee the various well data simultaneous conditioning. The applied data structure and topological operators enable the representation of lateral and vertical stacking channels and the resulting 3-D reservoir architecture. The volume calculation from different scenarios allows uncertainty evaluation and its implication on the economics of the development and production phases of a petroleum field.

1. Introdução

1.1. Objetivos

Os principais objetivos deste trabalho compreendem a modelagem geológica, parametrização, modelagem geométrica e simulação estocástica baseada em objetos, de canais turbidíticos. Essa técnica foi aplicada em um campo de petróleo situado no *Canyon* de Fazenda Cedro, porção emersa, no nordeste do Brasil, onde foram perfurados cerca de 90 poços em uma malha aproximadamente regular, com um espaçamento médio entre poços de 300 m e cujo reservatório principal corresponde a canais turbidíticos.

Através da modelagem geológica pretende-se caracterizar os reservatórios turbidíticos, principalmente em relação à descrição tridimensional dos tipos e escalas das heterogeneidades do reservatório e a identificação das unidades genéticas, ou seja, geometria, dimensões e distribuição espacial da principal fácies reservatório geneticamente associada a depósitos turbiditos canalizados, baseando-se em dados de estudos preexistentes e na análise dos dados do campo de petróleo estudado.

Com a parametrização e modelagem geométrica, visa-se estabelecer a forma e dimensões da unidade genética correspondente aos principais corpos arenosos que constituem o reservatório. A partir das medidas provenientes de dados análogos, constituídos pelos dados do Afloramento de Almada e Campo de Lagoa Parda, pretende-se obter correlações que possibilitem a simulação do objeto canal turbidítico. Com as correlações obtidas, deseja-se efetuar várias simulações usando os dados do campo estudado e definir as variáveis independentes e/ou dependentes para a simulação do objeto canal, de tal forma que os corpos gerados estejam coerentes com o observado nos dados análogos e nos dados de literatura.

Através da simulação estocástica baseada em objetos pretende-se obter diferentes imagens da distribuição, no espaço tridimensional, dos canais turbidíticos do campo estudado, bem como as resultantes variações no cálculo do volume dos reservatórios. Deseja-se avaliar, também, as possíveis vantagens da simulação estocástica baseada em objetos nos diferentes estágios da exploração de um campo.

Secundariamente, pretende-se analisar visualmente a validade das imagens obtidas nas diferentes simulações e o condicionamento dos objetos aos dados de poços.

1.2. Metodologia

A metodologia utilizada consiste de levantamento de: dados bibliográficos sobre caracterização, escalas de heterogeneidades e modelagem de reservatórios; conceitos básicos, aplicações e modelos relativos à simulação estocástica baseada em objetos e características do programa utilizado (Petbool - Simulador estocástico/booleano da geometria e arquitetura de reservatórios), além do levantamento dos dados e estudos preexistentes do campo estudado.

A delimitação do intervalo estratigráfico contendo o reservatório baseia-se em estudos anteriores, análise de dados biocronoestratigráficos existentes e correlação de perfis. A identificação dos corpos arenosos e dos intervalos não-reservatório do campo estudado emprega as técnicas de correlação rocha-perfil, análise dos padrões das curvas de perfis, análise e interpretação de seções estratigráficas.

A análise dos dados análogos compreende a estatística básica dos corpos mapeados e a obtenção de correlações entre as três dimensões do objeto canal, para evitar distorções nos corpos gerados, tais como objetos com grande espessura e com largura e/ou comprimento pequenos.

A simulação estocástica dos canais turbiditos é condicionada à geometria dos canais e aos dados de poços.

1.3. Organização da dissertação

O Capítulo 2 apresenta um resumo histórico dos trabalhos publicados sobre quantificação de parâmetros geológicos e as variações observadas nos modelos geológicos utilizados os quais, inicialmente, eram voltados para a exploração e, posteriormente, passaram a descrever as características do reservatório que interferem na produção de hidrocarbonetos. Apresenta também as características gerais da geometria provável dos corpos arenosos portadores de hidrocarbonetos, a definição de fácies e unidade genética, escalas de heterogeneidades e modelagem de reservatórios, os quais permitem a caracterização de reservatórios.

No Capítulo 3 encontra-se uma revisão bibliográfica sobre reservatórios turbidíticos, características deposicionais, faciológicas e unidades genéticas com ênfase em turbiditos

canalizados, além da hierarquia das superfícies limitantes e modelo genérico para esses turbiditos.

O Capítulo 4 apresenta os conceitos básicos utilizados neste trabalho relativos a simulação estocástica, processo de pontos, modelo booleano, classificação geral dos modelos de simulação, algumas aplicações de modelos estocásticos em estudos de reservatórios e a evolução observada nos modelos baseados em objetos.

No Capítulo 5 mostra-se as características gerais do simulador Petbool, as informações iniciais necessárias para a simulação, a obtenção de seções e apresentação dos resultados da simulação, as curvas de proporção disponíveis e o algoritmo de simulação. São também apresentadas as adaptações feitas no algoritmo para a simulação de canais turbidíticos, além de uma comparação entre o processo germe-grão clássico e as operações excetuadas pelo algoritmo utilizado.

No Capítulo 6 estão apresentados os dados de geologia regional e de detalhe das áreas análogas e do campo estudado. Inclui também a estatística básica dos dados utilizados e comentários sobre as correlações entre os parâmetros geológicos, bem como o critério de seleção para obtenção das correlações usadas nas simulações finais. Apresenta também a escolha dos parâmetros de simulação, as curvas de proporção para simulação de canais turbidíticos e os arquivos de entrada para o simulador.

O Capítulo 7 inclui as características da forma usada para a simulação dos canais turbidíticos e os testes efetuados com as correlações usadas. Apresenta como é feita a distribuição dos corpos gerados nos poços e nas áreas entre poços, a estocasticidade na distribuição desses corpos, analisada visualmente através de simulações efetuadas com dez sementes diferentes e os cálculos de volume efetuados, tanto em relação a variações na proporção global final usada quanto em relação às diferentes imagens obtidas através de variações na semente.

No Capítulo 8 estão apresentadas as conclusões e recomendações deste trabalho.

2. Caracterização e modelagem de reservatórios

2.1. Resumo histórico

A necessidade de quantificar os parâmetros geológicos que caracterizam o reservatório é antiga e ficou bem evidente na década de 60, quando foram efetuadas medidas integrando dados de afloramento com dados de testemunho, perfis geofísicos de poços e de pressão (Dupuy & Pottier, 1963; Montadert, 1963; Grout *et al.*, 1965; Verrien *et al.*, 1967). A análise das medidas efetuadas em sedimentos recentes, análogos, permitiu um melhor entendimento da distribuição espacial das propriedades dos reservatórios (Oomkens, 1967; Weber *et al.*, 1972; Pryor, 1973).

A preocupação em identificar os parâmetros do reservatório que mais interferem no escoamento de fluidos e modelá-los numa escala compatível com a simulação de fluxo também é antiga. Desde a década de 70 sentiu-se a necessidade de descrever adequadamente esses parâmetros e vários modelos e escalas de heterogeneidade foram propostos com o objetivo de definir as heterogeneidades do reservatório, cujo termo com frequência era usado abrangendo também as incertezas inerentes ao conhecimento do reservatório (Alpay, 1972; Harris, 1975).

Inicialmente, o estudo de reservatórios baseava-se em modelos deposicionais cuja ênfase era a geometria do conjunto de corpos arenosos considerados como reservatórios potenciais (Finley & Tyler, 1986,1991). Por isto, esses modelos eram essencialmente voltados para a exploração, o que é evidenciado pela escassez de artigos sobre geologia de desenvolvimento, conforme constatou-se em pesquisa efetuada nos boletins da AAPG (*American Association of Petroleum Geologists*), desde o início da década de 80. Destacam-se os trabalhos de Galloway (1986), Tyler & Ambrose (1986), Mancini *et al.* (1987), Woock & Kin, (1987), Johnston & Johnson (1987), Eubanks (1987), Tyler, Gholston & Ambrose (1987), Jennings (1987), Tankard & Welsink (1987), Krause *et al.* (1987), Longman *et al.* (1987), Chowdhary & Taha (1987), Rojas (1987), Alsharhan (1987), Dickey, George & Barker (1987), Miall (1988) e Luthi & Banavar (1988).

O avanço das técnicas de obtenção de dados de poços e desenvolvimento de novas ferramentas incentivou a publicação de novos trabalhos (Luthi & Banavar, 1988) e

possibilitou estudos de reconstituição paleoambiental e detalhamento de fácies (Reinson *et al.*, 1988; Walker & Eyles, 1988; Larue & Martinez, 1989).

A necessidade de se informar e quantificar os diferentes níveis de heterogeneidades detectados e a importância de uma modelagem geológica compatível com a simulação numérica de reservatórios foi evidenciada com a publicação dos clássicos trabalhos de van de Graaff & Ealey (1989), Slatt & Hopkins (1990), Weber & van Geuns (1990). Destacam-se também os trabalhos de Kerr & Jirik (1990), Höcker *et al.* (1990), Dreyer *et al.* (1990), Borer & Harris (1991), Hopkins, Wood & Krause (1991), Jordan & Pryor (1992), Øvreberg *et al.* (1992), Davies *et al.* (1993).

Damsleth *et al.* (1993) comentaram a resistência encontrada na comunidade científica quanto à aplicação de métodos estocásticos na modelagem de reservatórios. Elsayed *et al.* (1993) enfatizaram a necessidade de equipes multidisciplinares atuarem na modelagem de reservatórios e Damsleth & Omre (1997) discutiram sobre os diferentes pontos de vista entre os geoestatísticos e os usuários de métodos estatísticos para a modelagem estocástica de reservatórios.

Em 1993 foi pela primeira vez publicado pela AAPG um trabalho referente à modelagem estocástica de reservatórios, intitulado “*Sedimentology and Shale Modeling of a Sandstone-Rich Fluvial Reservoir: Upper Staffjord Formation, Staffjord Field, Northern North Sea*” (MacDonald & Halland, 1993); a modelagem estocástica utilizada corresponde a um processo de pontos marcados e funções de interação *pairwise* e os autores salientaram a importância da modelagem estocástica para a obtenção de modelos mais flexíveis, permitindo a obtenção de várias imagens das diferentes interpretações geológicas e das premissas assumidas na construção de um modelo geológico do reservatório. Bosence *et al.* (1994) apresentaram a modelagem de uma plataforma carbonática através de um modelo numérico desenvolvido por Waltham (*apud* Bosence *et al.*, 1994).

A continuidade dos estudos sobre caracterização de reservatórios não resultou numa utilização maciça da modelagem estocástica na comunidade geológica. Persistiu o estudo de reservatórios a partir de afloramentos análogos (Eisenberg *et al.*, 1994; Kerans *et al.*, 1994) e dados do recente, associada ao avanço do conhecimento de estratigrafia de seqüências, à análise detalhada da hierarquia das diferentes heterogeneidades observadas e à identificação dos limites de correlação destas em função do espaçamento dos poços (Doyle & Sweet, 1995), a análise integrada de dados de poço e de sísmica (Bryant *et al.*, 1995; Zeng *et al.*,

1996), apesar de se tornar mais freqüente o uso da simulação estocástica de litofácies, associado a estudos de simulação numérica (North & Taylor, 1996; Sweet *et al.*, 1996).

2.2. Caracterização de reservatórios

Segundo Bruhn (1996), a caracterização de reservatórios corresponde, essencialmente, à descrição tridimensional das heterogeneidades do reservatório. Os principais níveis de heterogeneidade compreendem o arcabouço estrutural, as unidades genéticas ou elementos de arquitetura, textura e granulometria dos sedimentos, *baffles*, estruturas sedimentares, ocorrência ou não de camadas delgadas, heterogeneidades em escala microscópica e presença de fraturas.

Em termos de caracterização, a distinção entre geometria interna e externa dos reservatórios é importante (Finley & Tyler, 1991). Os modelos geológicos baseados na geometria externa são muito utilizados na exploração de hidrocarbonetos, nos quais comprimento, largura, fácies lateralmente relacionadas e sua distribuição espacial são os elementos-chave na identificação dos reservatórios. Os limites internos de um reservatório, geralmente relacionados com a geometria dos componentes deposicionais individuais, controlam a distribuição de fluidos e produção de hidrocarbonetos. A eficiência da drenagem depende da relação entre as variações e dimensões dos componentes individuais e o espaçamento entre os poços (Finley & Tyler, 1991; Fig. 2.1).



Figura 2.1 - Geometria potencial dos corpos arenosos portadores de hidrocarbonetos, dependendo do sistema deposicional original. As dimensões, forma e continuidade dos corpos baseiam-se no espaçamento entre poços, neste caso de 20 acres (Galloway & Cheng *apud* Finley & Tyler, 1991).

Vários conceitos básicos estão envolvidos na caracterização do reservatório, como fácies e suas relações estratigráficas, sistemas deposicionais e associação de fácies litogenéticas (Fisher & McGowen, 1967; Fisher & Brown *apud* Finley & Tyler, 1991; Walker, 1984, entre outros).

Le Blanc Sr. (1977) estabeleceu, a partir de diversos estudos do Recente, critérios para a identificação dos diferentes tipos de arenitos em subsuperfície e uma classificação genética dos ambientes deposicionais terrígenos. A classificação proposta utiliza-se de modelos conceituais dos principais ambientes deposicionais, os quais condicionam a distribuição, continuidade, características internas dos diferentes corpos arenosos e suas relações entre si, refletindo a origem penecontemporânea dos depósitos formados, daí a denominação de genética. O principal objetivo desse trabalho foi fornecer elementos que permitissem reconhecer e prever a distribuição e continuidade de reservatórios arenosos, utilizando-se dados de subsuperfície. Esse autor propôs que os estudos de reservatórios de hidrocarbonetos fossem baseados na correlação entre corpos arenosos geneticamente relacionados, salientando que o contato entre arenitos de diferentes ambientes poderia atuar como barreira ao fluxo de hidrocarbonetos e, desta forma, o zoneamento dos reservatórios, no qual baseavam-se os projetos de produção e injeção, deveria refletir as características genéticas dos diferentes corpos arenosos.

Sneider (1977), a partir principalmente dos estudos de Le Blanc Sr. (1977), definiu uma unidade arenosa genética como “um corpo arenoso depositado durante uma única ocorrência de um determinado processo deposicional” e uma unidade arenosa ampliada como ... “um corpo arenoso agradacional constituído de arenitos superpostos, depositados durante a recorrência de um determinado processo deposicional”.

O enfoque genético na análise de fácies engloba estudos tridimensionais estratigráficos e sedimentológicos das diferentes fácies e processos deposicionais que ocorrem associados em ambientes sedimentares modernos (Fisher & Brown *apud* Finley & Tyler, 1991). Envolve a compreensão da fácies como uma unidade de rocha tendo características distintas e do sistema deposicional como uma assembléia de fácies com origem semelhante. Esse enfoque permite ao geólogo e engenheiro de reservatório uma melhor caracterização das áreas entre poços, através do uso do conceito de unidades de rocha fundamentais, as quais apresentam similaridades de uma área para outra, permitindo a extrapolação dos dados disponíveis para áreas sem informações. Pressupõe a utilização de um modelo definido como um sumário geral das características de um ambiente sedimentar

específico (Walker, 1984), possibilitando uma predição razoável em uma área pequena. Estudos de caracterização de reservatórios dependem do reconhecimento de unidades genéticas deposicionais e um bom entendimento das heterogeneidades presentes e suas magnitudes, o que permite inferir a continuidade do reservatório e os padrões de fluxo a ele relacionados.

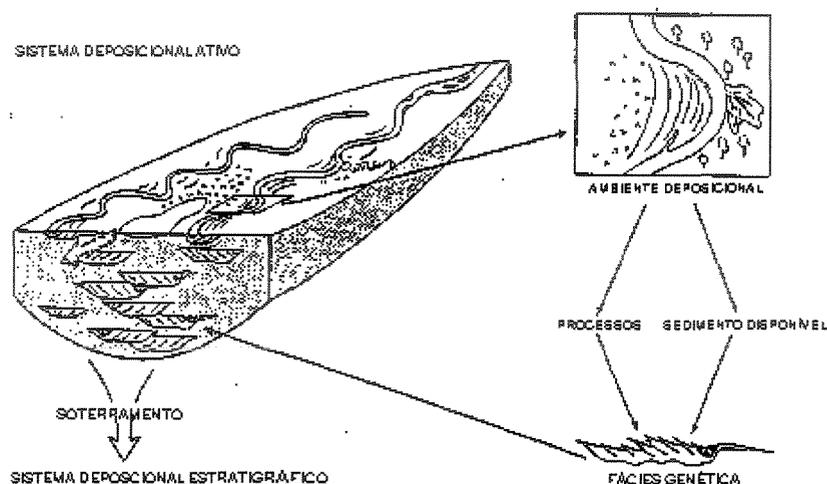


Figura 2.2 - Componentes de um sistema deposicional ativo (recente), derivado de ambientes geneticamente relacionados, os quais constituem um sistema deposicional estratigráfico (Galloway *et al.*, 1978).

Em termos de produção, três conceitos são básicos na análise de um reservatório: a arquitetura do reservatório, escalas e estilos de heterogeneidade e unidades de fluxo (Finley & Tyler, 1991).

A arquitetura do reservatório é definida pelos parâmetros dimensões, orientação e relação mútua entre as fácies deposicionais e diagenéticas. É consequência do estilo da acumulação dos sedimentos e controla a distribuição de fluidos e a produção de hidrocarbonetos em um reservatório. A arquitetura externa, descrita pelos primeiros modelos de fácies, define variações sub-regionais ou de campo (heterogeneidade megascópica). A arquitetura interna, descrita pela segunda geração de modelos de fácies, define variabilidades internas interrelacionadas do reservatório (heterogeneidade macroscópica), numa escala poço a poço. A arquitetura complexa é responsável pela compartimentação dos reservatórios, drenagem ineficiente e trapeamento de óleo móvel dentro do reservatório (Finley & Tyler, 1991; Ambrose, Tyler & Parsley, 1991).

Miall (1988) descreveu os elementos de arquitetura de depósitos fluviais como ... “um conjunto de litofácies que caracteriza uma unidade representativa dos diferentes processos fluviais, identificadas a partir da assembléia de litofácies, geometrias, escalas e relações de contato”. A partir de litofácies individuais identificadas em afloramentos e testemunhos propôs oito elementos básicos, envolvendo assembléias dessas litofácies, os quais apresentam escalas e geometria variadas. Os elementos de arquitetura em depósitos fluviais, segundo Miall (1988) são canais, barras e camadas de granulometria grossa, barras arenosas, macroformas de acreção, depósitos de acreção lateral, fluxo gravitacional de sedimentos, lâminas de arenitos e depósitos de *overbank*.

O conceito de elementos de arquitetura em turbiditos foi introduzido por Mutti & Normark (1987) e incluem apenas feições de larga escala como canais, depósitos de *overbank*, lobos e estruturas de corte e preenchimento, que podem ter grandes dimensões.

Weber & van Geuns (1990) analisaram a arquitetura do reservatório em função do tipo de reservatório e densidade de poços. Os reservatórios foram classificados em três tipos: *layer - cake* (camadas distintas com grande continuidade lateral e variações graduais em espessura); *jigsaw puzzle* (corpos arenosos diferentes justapostos, predominantemente conectados e com barreiras locais de baixa permeabilidade); *labyrinth* (lentes e corpos arenosos em arranjo complexo, freqüentemente mostrando-se descontínuos em seções verticais).

Kerr & Jirik (1990) estudaram a arquitetura das fácies fluviais e seu reflexo na compartimentação. Dividiram os reservatórios em três tipos: empilhamento lateral (grandes canais arenosos amalgamados), mistos e empilhamento vertical (pequenos canais arenosos dispersos em depósitos de sedimentos finos). O grau de compartimentação aumenta à medida que os reservatórios apresentam empilhamento vertical. Van Wagoner *et al.* (1990) apresentam uma definição, características e classificação hierárquica dos estratos sedimentares, em unidades que variam de seqüência à lâmina.

A hierarquia das unidades de arquitetura de depósitos clásticos estabelecida por Miall (1991) baseia-se nas unidades propostas por Mutti & Normark (1987) para leques submarinos, englobando macroformas, lobos menores e associação canais-*levee*, grandes lobos, sistema deposicional e complexo de leques foram classificadas por Miall nos grupos 6 a 10, envolvendo processos durando de 10^2 - 10^3 a 10^6 - 10^7 anos, respectivamente.

Tyler & Finley (1991) analisaram os controles da arquitetura na recuperação de hidrocarbonetos, através da correlação entre heterogeneidades vertical e lateral dos

reservatórios e os diferentes sistemas deposicionais. A análise das hierarquias deposicionais depende das escalas de tempo e espaço utilizadas e as heterogeneidades dos reservatórios variam de acordo com a escala em estudo.

2.3. Escalas de heterogeneidades

A partir da análise conjunta de estudos de escoamento de fluidos, modelos faciológicos e processos sedimentares (como em Pryor, 1973), foram propostas várias escalas de heterogeneidades, envolvendo classificação dos eventos deposicionais e, em alguns casos, sua duração (Brookfield, 1977; Eyles, 1983; Bridge & Diemer, 1983; Allen, 1983; Mutti & Normark, 1987, entre outros), além da análise de formas individuais de camadas, através de uma subdivisão hierárquica das unidades deposicionais (como em Allen, 1980; Dott & Bourgois, 1982; Miall, 1985, 1988, 1989). São mais frequentemente citados na literatura os estudos de Jackson (1975), Haldorsen & Lake (1984), Weber (1986), Miall (1988), van de Graaff & Ealey (1989) e Miall (1991).

Pettijohn, Porter & Siever (1973; Fig.2.3) propuseram uma escala de heterogeneidades na qual o reservatório é analisado partindo-se das feições maiores até a escala de grãos e poros.

Jackson (1975) definiu três classes de formas de camadas: microformas, mesoformas e macroformas. As microformas são resultantes de eventos que duram de segundos a horas (p. ex., *ripples*), as mesoformas são estruturas de média escala, produzidas por eventos dinâmicos como furacões, enchentes ou tempestades de areia (como dunas e *sand waves*) e as macroformas são eventos de maior duração, com controle tectônico, geomórfico e climático (como barras em pontal compostas e cinturões meandrantés).

Haldorsen & Lake (1984) definiram quatro escalas de propriedades médias do reservatório: microscópica (poros individuais), macroscópica (escala de *plugs* individuais, mesoformas), megascópica (tamanho de blocos num modelo de campo, macroformas) e gigascópica (formação ou reservatório como um todo).

Weber (1986) salientou o grande efeito que as heterogeneidades presentes no reservatório exercem sobre a recuperação de hidrocarbonetos. Baseado na escala de heterogeneidades de Pettijohn, Porter & Siever (1973) propôs uma classificação dos tipos de heterogeneidades, a partir da subdivisão dos reservatórios em falhados, não-falhados e fraturados (Fig. 2.4).

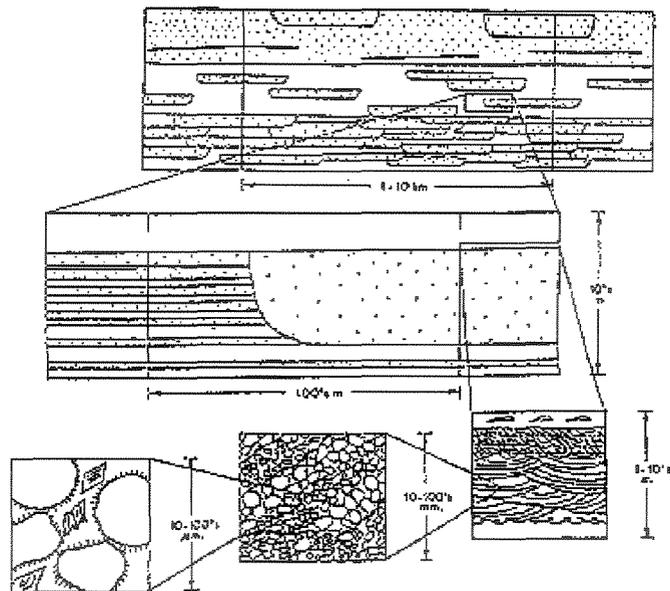


Figura 2.3 - Escalas de heterogeneidade (Pettijohn, Porter & Siever, 1973).

Nos reservatórios não-falhados, os limites de corpos permeáveis geralmente coincidem com variações de fácies, ou seja, com limites de unidades genéticas (Le Blanc Sr., 1977; Sneider, 1977), as quais podem apresentar um padrão típico de distribuição de permeabilidade. Weber (1986) estabeleceu uma análise qualitativa (efeito forte ou moderado) dos tipos de heterogeneidades em relação à continuidade do reservatório, eficiência de varrido, interação rocha-fluido e os dados de reservatório (dados sísmicos, de pressão, de produção, de perfis, amostras de rocha e afloramentos análogos) necessários para a identificação das heterogeneidades.

Segundo Weber (1986), a modelagem deve representar as principais heterogeneidades identificadas e está diretamente relacionada aos objetivos da caracterização do reservatório (simulação de fluxo ou locação de poços de adensamento de malha, por exemplo). Salientou, também, a influência dos dados disponíveis sobre a qualidade do modelo obtido, inclusive a importância do espaçamento entre os poços, em função da geometria das unidades genéticas.

Lasseter, Waggoner & Lake (1986) dividiram as escalas de heterogeneidades em três classes: pequena, média e grande. A classe média corresponde à escala da unidade deposicional, definida como um corpo formado a partir de um único evento deposicional

significativo; a escala pequena está relacionada a eventos sub-deposicionais (feições sedimentares como estratificação, por exemplo) e a grande engloba mais de um evento, inclusive de ambientes deposicionais diferentes. A descrição do reservatório em termos de unidades deposicionais baseia-se, segundo esses autores, na premissa de que estas tem propriedades homogêneas, resultante das características similares.

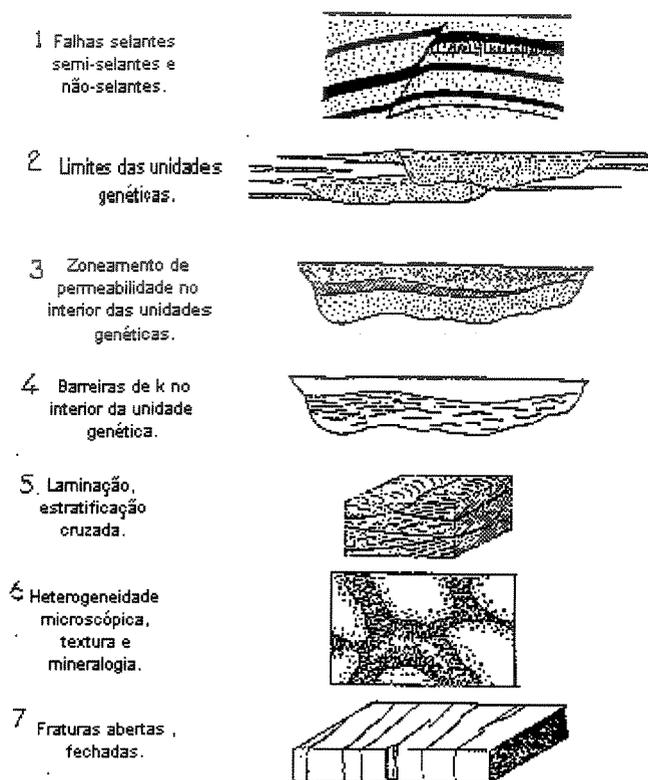


Figura 2.4 - Classificação dos tipos de heterogeneidades do reservatório (Weber, 1986).

Segundo van de Graaff & Ealey (1989), após uma avaliação dos dados disponíveis e uma vez definido o objetivo de simulação, o parâmetro mais importante a ser definido é o comportamento da permeabilidade no reservatório, o que envolve o conhecimento da conectividade entre os corpos arenosos, presença e distribuição de barreiras internas (*baffles*), perfil de distribuição vertical e tendências de distribuição areal e vertical da permeabilidade em diferentes escalas:

a) heterogeneidades em escala de campo (1 x 10 km): reflete as grandes feições de extensão regional ou semi-regional. Corresponde a um estágio inicial do estudo do

reservatório, onde os dados disponíveis são poucos e muito espaçados e tem como objetivo principal avaliar a continuidade espacial (horizontal e, principalmente, vertical) dos corpos arenosos e das rochas não-reservatório. É identificada através da correlação de perfis e dados sísmicos e é útil no planejamento do desenvolvimento de um campo e na avaliação de possíveis projetos de injeção;

b) heterogeneidades em escala de reservatório (0,25 x 10 km): o objetivo principal é avaliar a continuidade lateral dos corpos arenosos. Permite um melhor conhecimento do reservatório, requer estudos sedimentológicos de dados de testemunhos e, se possível, de afloramentos e é importante para estudos de eficiência de recuperação e varrido em projetos de injeção. A distribuição areal só é passível de identificação quando existe uma malha densa de poços e/ou sísmica 3D;

c) heterogeneidades em escala de reservatório/ unidades genéticas dos corpos (0,01 x 0,5 km): reflete as variações permoporosas dos diferentes reservatórios, associadas às variações laterais de fácies, tais como arenitos de canal (alta permeabilidade relativa) em continuidade com arenitos de *crevasse* (baixa permeabilidade relativa) e às variações verticais de permeabilidade, associadas, por exemplo, a variações nas estruturas sedimentares (arenitos de canal com estratificação cruzada na base e estratificação plano-paralela no topo). Pode representar grandes corpos arenosos amalgamados resultantes de repetições cíclicas de um mesmo evento deposicional, como cinturões meandantes com canais empilhados lateral ou verticalmente. É possível a individualização dos corpos arenosos através da tomografia sísmica associada à análise de testemunhos e afloramentos;

d) heterogeneidades em pequena escala (1 cm a 1 m): utilizada em projetos-piloto para simular reservatórios nos quais os padrões de estratificação, associados a variações granulométricas, são responsáveis pelo trapeamento de quantidades consideráveis de óleo móvel. Esse estudo tem como objetivo estabelecer pseudo-propriedades (pseudo-capilaridade e pseudo-permeabilidade), as quais serão extrapoladas para a análise global do reservatório. Geralmente relacionam-se a projetos de EOR (*enhanced oil recovery*).

Lake, Carroll Jr. & Wesson (1991) sugerem a subdivisão das heterogeneidades em três classes: microscópica, a escala de centenas de grãos ou de diâmetro de poros, usualmente analisada com microscópio; mesoscópica, a escala de camadas, tipos de estratificação e feições geológicas de pequena escala, comumente inferida a partir de perfis elétricos e radioativo de poços e megascópica, a escala que começa com o espaçamento entre poços e estende-se até as dimensões do campo, correspondendo ao domínio da análise geofísica.

Smith (1991) analisou a influência de heterogeneidades de pequena escala na permeabilidade e sua relação com a pressão capilar. Worthington (1991) estudou a modelagem de reservatórios em escala mesoscópica, enfocando os parâmetros fornecidos pelos diferentes dados disponíveis, principalmente testemunhos e perfis de poços.

Cross (1991) comentou que as descrições em escala de campo possibilitam determinar a compartimentação do reservatório e a subdivisão em zonas de produção. Para reservatórios com múltiplos compartimentos, a descrição em escala de campo, envolvendo a distribuição de fácies e propriedades do escoamento de fluidos, permite caracterizar os componentes do reservatório, ou seja, os compartimentos litohidráulicos homogêneos e as unidades litológicas heterogêneas. A compartimentação do reservatório envolve, em escala de campo, a análise de três elementos essenciais: o primeiro corresponde ao arranjo espacial das fácies sedimentares no reservatório como um todo, o segundo refere-se à avaliação da contribuição de heterogeneidades litológicas de escalas e características variadas na compartimentação do reservatório e o terceiro relaciona-se à metodologia usada para converter unidades litoestratigráficas em unidades litohidráulicas, as quais permitem descrever o escoamento de fluidos no reservatório (Cross, 1991).

Ringrose *et al.* (1994) analisaram a distribuição do óleo remanescente no reservatório, sua relação com as diferentes escalas e padrões de heterogeneidade e as variações medidas na saturação de óleo de um mesmo reservatório, em função das variações de escala da amostra (*plug*, perfis e campo) utilizada. As unidades geológicas, consideradas elementos básicos na construção da arquitetura do reservatório, baseiam-se na análise de estratos e princípios da estratigrafia de seqüências. Os tipos de heterogeneidade são analisados em escala de lâmina, de camadas e de reservatório, em função dos diferentes ambientes deposicionais e geometria das unidades genéticas (Fig. 2.5).

As principais características das várias escalas disponíveis podem ser resumidas em quatro escalas de heterogeneidades, presentes no reservatório: microscópica (função da variabilidade dos poros e gargantas, os quais controlam a saturação de óleo); mesoscópica (reflete a variabilidade das características litológicas e petrofísicas em uma camada); macroscópica (é consequência dos processos envolvidos na composição e deposição das litofácies e subseqüentes modificações durante o soterramento com uma variação poço a poço) e megascópica (é determinada pelas variações inerentes aos sistemas deposicionais e abrange extensões de campo ou baciais).

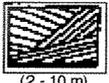
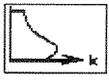
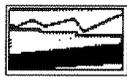
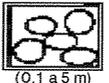
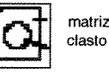
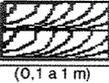
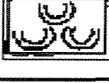
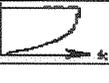
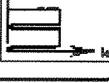
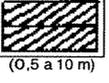
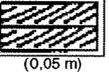
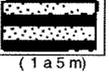
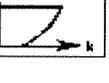
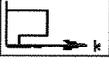
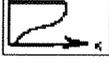
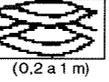
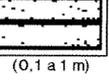
TIPOS DE HETEROGENEIDADES		ESCALA DE LÁMINA	ESCALA DE CAMADA		ESCALA DE RESERVATÓRIO	
Ambiente deposicional	Unidade genética	Contrastes típicos de permeabilidade	Geometria (altura da camada)	Trends de permeabilidade	Geometria do reservatório	Características dos padrões de empilhamento
Eólico	Dunas (barcanas, <i>seif</i>) Depósitos interdunas (<i>wind-ripples</i>) Lençóis fluviais	Contraste alto entre lâminas (em geral 1 ou 2 ordens de magnitude)	 (2 - 10 m)			Dunas formando conjuntos com <i>laminasets</i> de diferentes ângulos limitados por camadas interdunas
Leques Aluviais	Lençóis (brechas, conglomerados, <i>debris flow</i> , lençóis arenosos)	Clastos e matriz podem estar internamente laminados. Permeabilidades altamente variáveis.	 (0,1 a 5 m)	 matriz clasto		Camadas lateralmente extensivas. Espessura da camada variável.
Fluvial	Estratificação (cruzada, tabular, caótica) Estratos de baixo ângulo Camadas convolutas (e estruturas de escape de fluidos)	Contraste moderado (em geral 10:1) Ocorre gradação normal e tangencial. Escape de fluidos aumenta o contraste entre as lâminas.	 (0,1 a 1 m) 	 		Empilhamento de canais (<i>braided</i> , meandros, etc) Relações entre canais e depósitos de <i>overbank</i> /planície de inundação.
Deltaicos	Estratificação (tabular) Barras (de desembocadura, <i>swash</i>) Lençóis arenosos <i>ripple-bedded</i> (prodelta) Lençóis arenosos, carvão, solos, etc. (planície deltaica)	Contraste moderado entre lâminas (em geral 10:1) Baixo contraste entre lâminas (5:1) Camadas em geral maciças, mas o contraste de permeabilidade entre camadas é muito alto.	 (0,5 a 10 m)  (0,05 m)  (1 a 5 m)	  		Unidades de extensão moderada cortadas por canais distributários. Morfologia de barras e frente deltaica.
Marinho raso	Estratificação cruzada <i>hummocky</i> Barras de maré Bioturbação	Contraste entre lâminas moderado a baixo (10:1 a 5:1)	 (0,2 a 1 m)			Unidades bastante extensas, fortemente afetadas por variações na lâmina d' água.
Clásticos de água profunda	Turbiditos <i>Debris flows</i> Escorregamento Contornitos	Geralmente camadas maciças.	 (0,1 a 1 m)			Unidades lateralmente extensas, cortadas por canais (muito) erosivos.

Figura 2.5 - Classificação geral dos principais tipos e escalas de heterogeneidades em reservatórios arenosos (Ringrose et al., 1994).

2.4. Modelagem de reservatórios

Segundo Bryant & Flint (1993), a modelagem de reservatórios baseia-se em conceitos estratigráficos e no contexto bacinal. A metodologia para modelagem de reservatórios clásticos envolve:

- a) a definição do espaço ocupado pelo intervalo estratigráfico contendo o reservatório;
- b) o reconhecimento das unidades geológicas dentro desse espaço;
- c) a identificação da geometria dessas unidades;
- d) o arranjo (arquitetura) dessas unidades dentro do espaço definido.

O espaço ocupado pelo reservatório é dado pela sísmica e correlação de poços, integrando feições regionais (marcos sísmicos) com feições locais (marcos elétricos e radioativos de perfis). O reconhecimento das unidades compreende o reconhecimento das fácies genéticas e a identificação de folhelhos contínuos e estocásticos.

A modelagem geométrica equivale a atribuir dimensões e formas simplificadas às unidades geológicas genéticas e geralmente tem dois enfoques: a modelagem de objetos discretos e a modelagem com variações contínuas.

Os dados são oriundos de reservatórios densamente perfurados, afloramentos análogos, poços rasos em ambientes sedimentares do recente, sísmica rasa, dados de reservatório correlacionados com dados sísmicos e extrapolações de dados do recente.

A modelagem das propriedades do reservatório reflete as variações internas da qualidade deste. Dreyer *et al.* (1993), para embasar a descrição sistemática da geometria dos corpos arenosos e sua semelhança com as unidades de fluxo, estabeleceram um resumo da hierarquia de superfícies limitantes adotadas no estudo de reservatórios fluviais (Fig. 2.6).

Para a modelagem estocástica de canais fluviais, Hirst *et al.* (1993) estudaram a geometria da seção plana transversal do canal, através da espessura e largura do corpo arenoso (cinturão de canais) e forma da seção. Através da análise da geometria plana, estabeleceram variações de largura e espessura ao longo do canal, comprimento amostrado do canal, ângulo e frequência na bifurcação ou união entre diferentes canais e orientação do sistema no espaço. Foi também analisada a frequência de corpos arenosos no intervalo estudado (volume *net/gross*) e padrão de empilhamento.

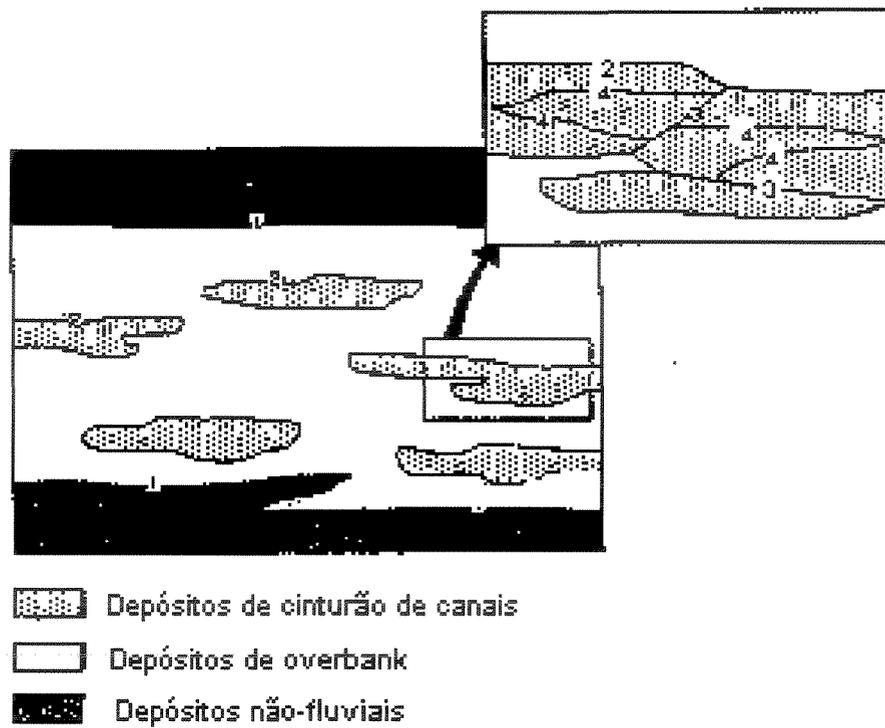


Figura 2.6 - Hierarquia das superfícies delimitantes, onde: (1) sistema fluvial; (2) cinturão de canais; (3) canais; (4) macroformas; (5) camadas com estratificação cruzada (Dreyer *et al.* 1993).

3. Arquitetura de sistemas deposicionais turbidíticos

3.1. Modelos turbidíticos

Correntes de turbidez foram utilizadas por Forel (1885) para explicar a entrada das águas do Rio Rhone no Lago Geneva. Daly (1936) foi o primeiro a empregar o conceito de correntes de turbidez para explicar a gênese de *canyons* submarinos, mais tarde apoiado por Kuenen (1937, 1950), o qual estudou o mecanismo das correntes de turbidez experimentalmente e as relacionou à erosão de *canyons* submarinos.

A origem das correntes de turbidez está relacionada ao contato entre dois fluidos de diferentes densidades, em que o fluido mais denso é composto por uma mistura de água e sedimentos. Essas correntes são bastante conhecidas nos oceanos por estarem associadas a variações de temperatura e/ou salinidade da água. A ocorrência de correntes de turbidez está também relacionada a variações na carga de sedimentos transportados em suspensão. A existência de fluidos com alta carga em suspensão em contato com águas claras, menos densas, dá origem a correntes de turbidez, conforme identificado por Forel (1885).

Há vários estudos sobre turbiditos salientando aspectos sedimentológicos (Dzulinsky & Walton, 1965; Kuenen, 1965; Hsu, 1970; Selley, 1970), alguns com ênfase no processo deposicional (Moore, 1969; Reineck & Singh, 1975). A primeira descrição de camadas gradacionais foi feita por Bailey (1936). Segundo Pettijohn (1975), camadas gradacionais, uma feição típica de depósitos turbidíticos, são “unidades sedimentares marcadas por uma graduação no tamanho dos grãos, de grosso a fino, no sentido ascendente, da base para o topo”. São depositadas por correntes cuja aceleração é decrescente, produzindo depósitos com espessura centimétrica a métrica. As partículas gradacionais podem ser silte, areia ou cascalho. Geralmente as camadas gradacionais são constituídas de arenito. Em geral, quanto mais espessa a camada gradacional, mais grosso é o material da base (Potter & Scheidegger, 1966). A espessura dessas camadas geralmente apresenta distribuição lognormal e pode ser resultante de um ou mais eventos deposicionais empilhados.

Bruhn (1993) elaborou um resumo histórico dos principais eventos que marcaram a evolução do conhecimento científico sobre turbiditos. A terminologia “sistemas de canais e diques marginais” foi introduzida por Damuth *et al.* (1983) para designar ... “um canal deposicional-erosivo que ocorre associado a um largo *levee* natural, o qual se desenvolve para

cima e lateralmente através do tempo, por extravasamento (*overbank spilling*)". São equivalentes à "unidade lenticular acústica" (Droz & Bellaiche, 1985) e "fanlobo" (Bouma *et al.*, 1985b). Os vários sistemas de canais e diques marginais freqüentemente se sobrepõem, coalescem ou interdigitam-se lateralmente, formando grandes corpos em forma de língua ou alongados, denominados complexos de canais e diques marginais.

Segundo Bruhn (1993), a recente intensificação dos estudos sobre turbiditos é devida aos avanços tecnológicos das ferramentas usadas em estudos oceanográficos, tanto para obtenção quanto para a interpretação de dados, tais como equipamentos de alta resolução, perfis contínuos de reflexão sísmica, imagens de sonar *side-looking* e técnicas de testemunhagem de maior qualidade. Essa intensificação é também decorrente do crescimento da importância econômica dos sistemas turbidíticos como reservatórios de petróleo, conforme se observa em várias bacias sedimentares do Brasil, África, Golfo do México e Mar do Norte.

Embora muitos canais submarinos sejam preenchidos preferencialmente por sedimentos finos (Goodwin & Prior, 1989; Galloway *et al.*, 1991), há depósitos correspondentes a espessas seqüências de turbiditos areno-conglomeráticos (Morris & Busby-Spera, 1988; Reading & Richards, 1994; Emery & Myers, 1996; Bruhn & Walker, 1997) ou depósitos de cascalhos (Malinverno *et al.*, 1988; Hughes Clark *et al.*, 1990). Esses depósitos não foram incorporados nos modelos *channel-feeding-lobe* (Mutti & Ricci-Luchi, 1972; Walker, 1978), nos modelos derivados de variações eustáticas do nível do mar (Mutti, 1985), nem nos modelos deduzidos a partir dos princípios da estratigrafia de seqüências (van Wagoner *et al.*, 1990; Posamentier *et al.*, 1991).

Os complexos canal-*levee* ricos em sedimentos finos foram intensamente estudados em leques submarinos do recente (Damuth *et al.*, 1988; Weimer, 1989; Clark & Pickering, 1996a, 1996b); correspondem aos sistemas do tipo III (Mutti, 1985) ou *slope fans* (van Wagoner *et al.*, 1990; Vail *et al.*, 1991) nos depósitos antigos. Os complexos canais-*levees* com granulometria grossa ainda não foram descritos nos sedimentos modernos (Bruhn, 1993); os dados de literatura correspondem a depósitos antigos (Walker, 1985; Bruhn & Moraes, 1989; Morris & Busby-Spera, 1990; Bruhn, 1993). Os sistemas turbidíticos tendem a estar parcialmente preservados em afloramentos (especialmente as seqüências ricas em *levees* formados por sedimentos finos), o que dificulta a reconstituição de sua geometria interna (Bruhn, 1993).

Os modelos tradicionais (Mutti & Ricci-Lucchi, 1972; Walker, 1978, entre outros) geralmente utilizam-se ou do controle autocíclico ou do controle alocíclico (Mutti, 1985) na

deposição de turbiditos. Modelos turbidíticos envolvendo uma análise dos efeitos combinados dos controles autocíclicos e alocíclicos na sedimentação foram apresentados, primeiramente, por Bruhn (1993), o qual, após um estudo detalhado dos turbiditos encontrados nos campos de Carapeba e Pargo (Bacia de Campos) e Lagoa Parda (Bacia do Espírito Santo), propôs um modelo de distribuição espacial e temporal para a sedimentação turbidítica da megaseqüência transgressiva da margem leste brasileira, típica de bacias de margem passiva imaturas (Fig. 3.1).

As sucessões de turbiditos desenvolveram-se em resposta a fases de aumento no suprimento de sedimentos, através de sistemas de *fan-deltas* ou deltaicos, os quais, por sua vez, estão associados à reativação de falhas e soerguimento das áreas fontes e margens da bacia (caso de Carapeba/Pargo) ou devido à flutuações climáticas (caso dos intervalos menores de recorrência, identificados em Lagoa Parda). Essas variações na taxa de aporte de sedimentos poderiam deslocar o depocentro costeiro em direção ao mar, devido às dimensões da plataforma (estreita e íngreme), e possivelmente induzir quedas relativas do nível do mar, de pequena duração, as quais poderiam acarretar no desenvolvimento de discordâncias regionais ou superfícies de erosão locais.

As sucessões de fácies estudadas por Bruhn (1993) mostram granodecrescência e adelgaçamento ascendentes bem definidos. Isto poderia ser conseqüência das variações no aporte de sedimentos, resultante dos efeitos combinados de uma subida eustática generalizada do nível do mar, associada ao decréscimo da atividade tectônica nas margens ou na área fonte da bacia (caso de Carapeba/Pargo) ou ao decréscimo das taxas de denudação na área fonte, controladas pelas variações climáticas (caso de Lagoa Parda). A elevação do nível do mar, associada a um aumento mínimo do gradiente do fundo da bacia, tanto por contração termal quanto pela carga sedimentar, pode ter sido responsável pelo empilhamento retrogradacional dos turbiditos, confinados ao interior do *canyon*, encontrados em Carapeba/Pargo. Esse tipo de empilhamento não foi identificado em Lagoa Parda, provavelmente devido a sua situação muito proximal e à deposição em área estruturalmente confinada, em decorrência do comportamento de falhas ativas durante a deposição desses sedimentos. Os depósitos estudados, em sua maioria, ocorrem preenchendo *canyons* profundamente incisos e controlados por falhas ou calhas mais largas e rasas, desenvolvidas em ambiente nerítico profundo ou batial inferior (200 - 2000 m de profundidade), englobando estilos distintos de sedimentos turbidíticos (Fig. 3.1).

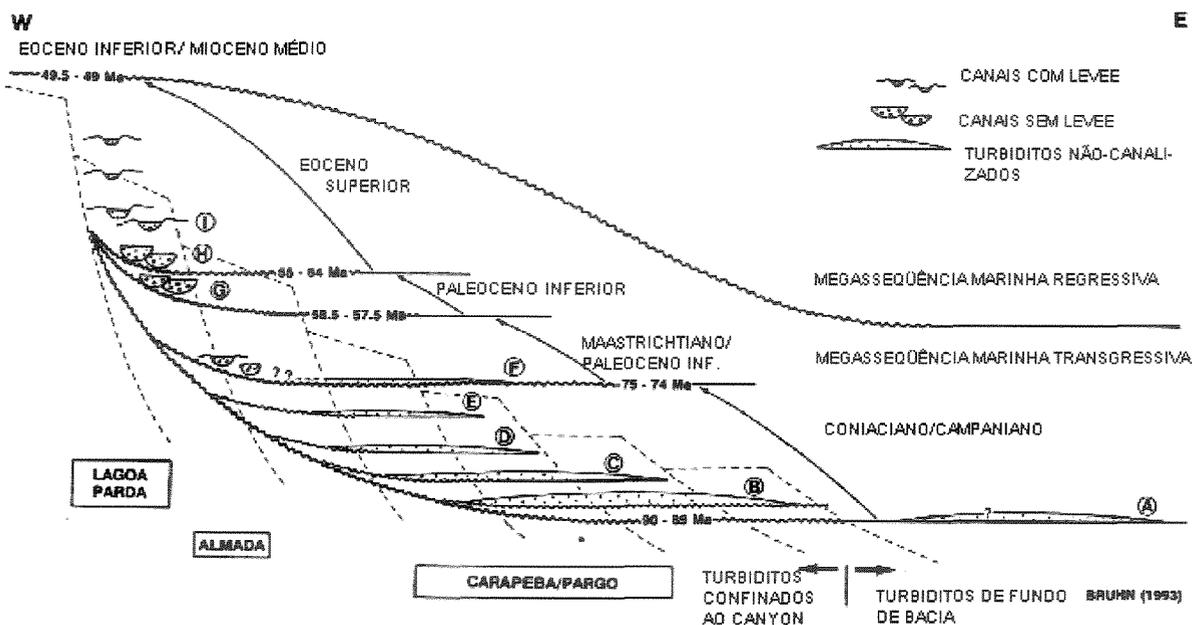


Figura 3.1 - Distribuição no tempo e no espaço dos mais importantes estilos de sedimentação turbidítica encontrada nas bacias da margem leste brasileira, durante o nível de mar alto de longa duração (Coniaciano ao Eoceno Inferior). (1) canais turbidíticos com *levee*; (2) canais turbidíticos sem *levee*; (3) turbiditos não canalizados; (A) a (I) sucessões turbidíticas (Bruhn, 1993).

Uma síntese dos avanços nos estudos de turbiditos foi apresentada em vários livros (como por exemplo, Nelson & Nilsen, 1984; Bouma *et al.*, 1985a; Wilgus *et al.*, 1988; Pickering *et al.*, 1989; Brown *et al.*, 1990; Weimer & Link, 1991; Mutti, 1992; Walker & James, 1992; Clark & Pickering, 1996a; Emery & Myers, 1996), além de vários artigos mais recentemente publicados (Reading & Richards, 1994; Clark & Pickering, 1996b, entre outros). Shanmugan *et al.* (1994, 1995) e Shanmugan & Moiola (1995, 1997) reinterpretaram alguns depósitos marinhos anteriormente descritos como turbiditos e questionaram o uso do termo turbidito, o qual, segundo esses autores, está sendo empregado para descrever depósitos marinhos profundos cuja origem não estaria relacionada a correntes de turbidez. Essa polêmica reacendeu o interesse sobre esses depósitos principalmente porque, após mais de quarenta anos de pesquisa em correntes turbidíticas e turbiditos, não se dispõe de uma classificação geral para a descrição, interpretação e predição da grande variedade de modelos encontrada nesses sistemas, observada em bacias modernas e antigas.

3.2. Elementos de arquitetura e unidades genéticas

Reading & Richards (1994) salientaram a influência de vários fatores controladores dos depósitos submarinos como taxa, tipo e área fonte dos sedimentos, tectônica regional e flutuações do nível do mar e propuseram uma classificação para os sistemas turbidíticos de água profunda baseados na granulometria e sistema alimentador.

Segundo Reading & Richards (1994) a variação granulométrica dos sedimentos (parâmetro facilmente observável e mensurável) é um dos fatores controladores da geometria e tipo de fácies dos depósitos turbidíticos. Os depósitos são inicialmente separados quanto ao tipo de sistema alimentador (leques submarinos com uma área fonte, rampas submarinas com múltiplas áreas-fonte e leques submarinos com área fonte linear) e granulometria dominante (lama, lama/areia, areia e cascalho). Posteriormente, são analisados quanto ao tamanho dos depósitos, gradiente do talude, forma, comprimento, área fonte, sistema alimentador, mecanismo de suprimento, tamanho dos fluxos, sistemas de canais, sedimentos distais e depósitos baciais associados.

Esses autores estudaram também os principais elementos de arquitetura, a geometria dos corpos arenosos, fácies turbidíticas, grau de heterogeneidade dos reservatórios, comunicação lateral e vertical dos corpos arenosos, entre outros. Para cada um dos tipos analisados foram apresentados modelos tridimensionais dos depósitos, bem como um sumário dos principais elementos de arquitetura dos sistemas deposicionais de água profunda (Fig. 3.2).

Clark & Pickering (1996a, 1996b) apresentaram as principais características de depósitos submarinos canalizados, envolvendo a identificação de elementos de arquitetura, processos sedimentares e modelos deposicionais, a partir de estudos do recente, análise de afloramentos e de subsuperfície. Esses autores apontaram critérios para a classificação dos canais, baseados nos estudos de Normark (1970, 1978), considerando as características dos depósitos de preenchimento (Tabela 3.1).

Para canais antigos, a arquitetura varia em função do tipo de depósito de preenchimento e a forma geométrica em planta, dada pela sinuosidade dos canais, a qual nem sempre é possível de ser determinada; as mudanças em função das variações relativas do nível do mar podem ser dadas pela morfologia e sedimentologia dos depósitos (Clark & Pickering, 1996a).

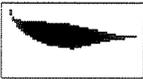
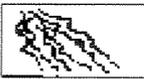
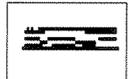
TIPO DE SISTEMA	CUNHAS	CANAIS	LOBOS	LENÇÓIS
SISTEMAS GRAVEL-RICH		 CHUTES		
SISTEMAS SAND-RICH		 BRAIDED	 LOBOS CANALIZADOS	
SISTEMAS MUD-SAND RICH		 CANAL/LEEVE	 LOBOS DEPO-SICIONAIS	
SISTEMAS MUD-RICH		 CANAL/LEEVE	 LOBOS DEPO-SICIONAIS	

Figura 3.2 - Elementos de arquitetura de reservatórios resultantes de sistemas deposicionais de águas profundas (Reading & Richards, 1994).

Na modelagem do preenchimento de canais antigos devem ser considerados os seguintes problemas (Clark & Pickering, 1996a): tipo de bacia e área fonte (tamanho e controle tectônico), estágio de desenvolvimento (pode ser erosivo, de deposição ou ciclos repetidos), escala de observação (é afetada pela falta de uma correlação precisa, não permitindo uma comparação segura de dados antigos e do recente, pela compactação diferencial, deformações estruturais, existência de afloramentos em geral de pequenas dimensões e visão unidimensional dos testemunhos).

Clark & Pickering (1996a, 1996b) estabeleceram parâmetros para a análise de canais turbidíticos. Estes envolvem as dimensões dos canais, geometria do meandro e variações de profundidade, largura e seção transversal ao longo do canal, correlações entre largura e espessura, comprimento de onda do meandro com largura e raio de curvatura e comportamento da sinuosidade em função das variações do gradiente do talude.

A análise quantitativa efetuada por esses autores compreendeu sedimentos antigos e do recente, apesar das dificuldades de identificar em detalhe os elementos de arquitetura e suas dimensões, nos depósitos antigos. Para depósitos antigos, essa análise geralmente baseia-se nas dimensões das fácies mais grossas, levando a dados subestimados das dimensões dos canais, cuja razão largura/espessura varia entre 3.5 a maior que 100, predominando valores menores que 40 (Clark & Pickering, 1996a, 1996b).

Clark & Pickering (1996a) denominam elementos de arquitetura a caracterização interpretativa de feições sedimentares definidas pela geometria (incluindo orientação), escala e fácies; são identificados a partir de suas superfícies delimitantes, em um processo semelhante ao proposto por Miall (1985) para canais fluviais antigos. Em termos de geometria, a arquitetura dos depósitos turbidíticos em seção é dada por formas de canais, lençóis, lentes, sigmóides, irregular, onda e corte-e-preenchimento. Em planta os elementos identificáveis são canais, canais amalgamados, *mound/lobos*, *mounds* amalgamadas, forma irregular, camada e corte (*scour*). O canal é um elemento de arquitetura que pode conter todas as outras geometrias (figs. 3.3 e 3.4).

Tabela 3.1 - Classificação dos tipos de canais turbidíticos
(Clark & Pickering, 1996a).

TIPO DE CANAL	OBSERVAÇÃO
1. Em função da arquitetura: deposicional deposicional-erosional erosional	modernos e antigos
2. Quanto à posição no leque: talude leque superior leque médio leque inferior sem leque	modernos e antigos
3. Quanto à sinuosidade (s): reto (s menor que 1,1) sinuoso (s entre 1,1 e 1,5) meandrante (s maior que 1,5) <i>braided</i> anastomosado	geralmente só para canais modernos
4. Em relação a variações no nível do mar: mar baixo transicional mar alto	geralmente só para canais antigos

As superfícies limitantes podem ser classificadas pelo tipo e pela ordem (hierarquia), tanto em seção quanto em planta (Fig. 3.5 e Tabela 3.2).

O modelo geral proposto para sedimentos antigos baseia-se na classificação de Normark (1970), o qual divide os canais nos tipos erosional, deposicional e misto ou

erosional/deposicional. Esses critérios permitem a identificação e modelagem dos canais em relação a aspectos intra-baciais, tectonismo, controle do nível do mar e variações autocíclicas do canal. Segundo Clark & Pickering (1996a, 1996b) os canais antigos podem ser divididos em erosional/deposicional e erosional (Figura 3.6), nos quais são identificadas três fases principais.

Na primeira fase predomina a erosão, os canais são relativamente retos e atuam como condutores de sedimentos; os sedimentos mais comuns são depósitos de talvegue. A segunda compreende a principal fase de preenchimento do canal, com fácies de granulometria grossa, *back-filling* e agradação de barras arenosas. A terceira fase é transicional com a anterior, gera seqüências de granulometria descendente para o topo e corresponde ao abandono do canal, com predominância de sedimentos finos. Estas fases podem ser repetidas várias vezes em um mesmo canal, os quais apresentam sinuosidade de moderada a alta, no final. Os canais com baixa sinuosidade geralmente estão associados a taludes com alto gradiente, plataformas estreitas em áreas tectonicamente ativas e a predição dos depósitos arenosos é mais difícil.

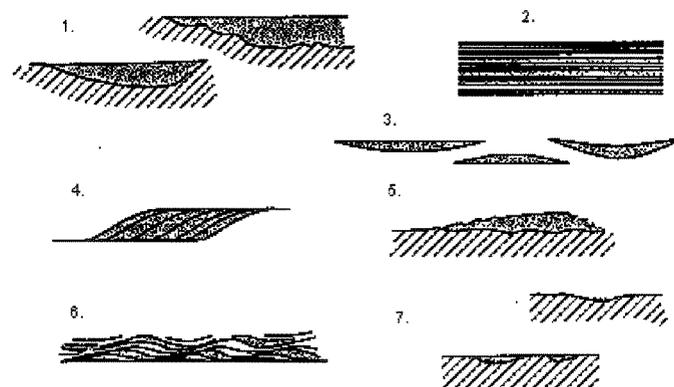


Figura 3.3 - Classificação da geometria dos elementos de arquitetura de depósitos de água profunda, em função das dimensões da seção vertical. (1) canais (CH); (2) lençóis (SH); (3) lentes (LE); (4) sigmóides (SI) e inclinados (I); (5) irregular (IRR), incluído feições de injeção; (7) corte (SC)/corte e preenchimento (S&F; Pickering *et al.* apud Clark & Pickering, 1996a).

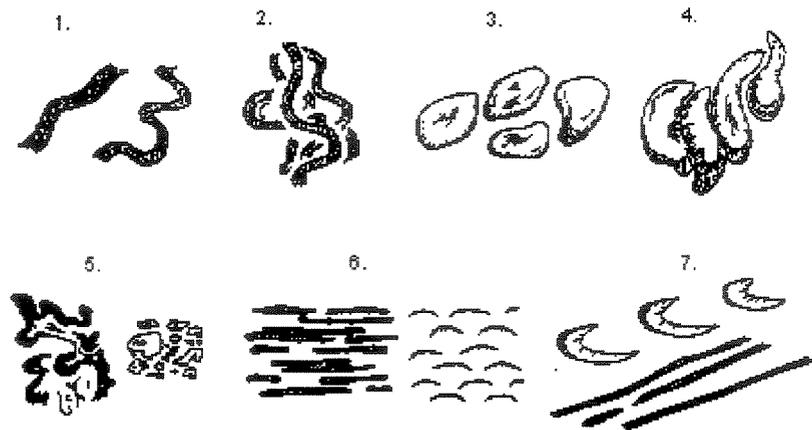


Figura 3.4 - Classificação das formas deposicionais em planta da geometria dos elementos de arquitetura de depósitos de águas profundas. (1) canais (CH); (2) canais amalgamados (N CH); (3) *mounds/lobos* (M/L); (4) *mounds* amalgamados (N M); (5) irregular (IRR); (6) forma de leito (BF); (7) corte (SC; Pickering *et al.* apud Clark & Pickering, 1996a).

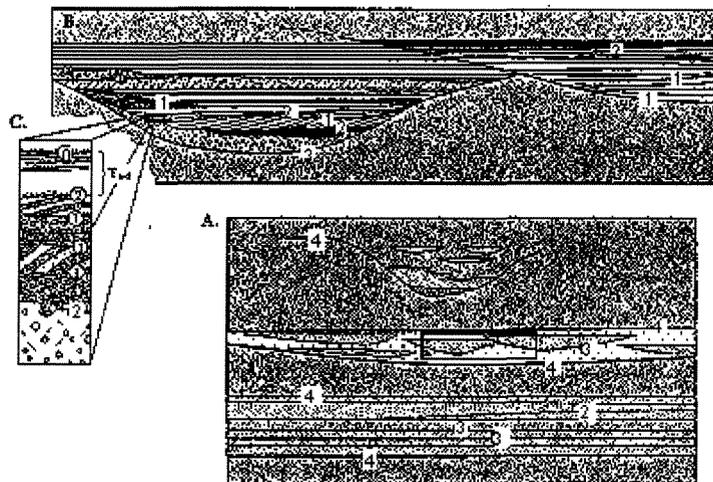


Figura 3.5 - Figura esquemática da hierarquia das superfícies limitantes em afloramentos de depósitos marinhos de água profunda (Pickering *et al.* apud Clark & Pickering, 1996a; veja Tabela 3.2 para a definição das superfícies).

A geometria dos reservatórios baseia-se nas dimensões dos corpos e no tipo de empilhamento dos canais, o qual determina a continuidade lateral e conectividade vertical dos corpos arenosos (Figura 3.7). A primeira é dada pela razão largura/espessura e a segunda é uma estimativa da fração do perímetro de um elemento que está em contato com elemento semelhante.

A correlação entre espessura e largura aproxima-se de uma distribuição lognormal e os canais de sedimentos antigos tendem a apresentar dimensões menores que os atuais, mas com razão arenito/folhelho semelhantes (Clark & Pickering, 1996a, 1996b). Canais com alta razão arenito/folhelho apresentam alto grau de migração lateral e com baixa razão, alto grau de agredação vertical. Canais pouco confinados apresentam grande interconectividade. As relações entre canais e *levees* são às vezes de difícil identificação nos sedimentos antigos, onde os *levees* são geralmente denominados depósitos de *overbank*.

Tabela 3.2 - Definição da hierarquia das superfícies delimitantes (Clark & Pickering, 1996a).

ORDEM	OBSERVAÇÕES
0	Contato concordante entre estratos e lâminas.
1 ^a .	Limita pacotes de <i>sets</i> com estratificação cruzada ou camadas concordantes.
2 ^a .	Limita unidades (complexos sedimentares distintos, de fácies geneticamente relacionadas) definidas por superfície de 1a. ordem.
3 ^a .	Feições erosionais maiores, que dividem as unidades de 2a. ordem; limitam sedimentos geralmente denominados corpos deposicionais.
4 ^a .	Expressam contatos deposicionais cujas dimensões podem ter escala bacial, como grupo de canais e paleovales.
5 ^a .	Definem leques individuais de um sistema.
6 ^a .	Delimitam seqüências de preenchimento de bacias e supergrupos.

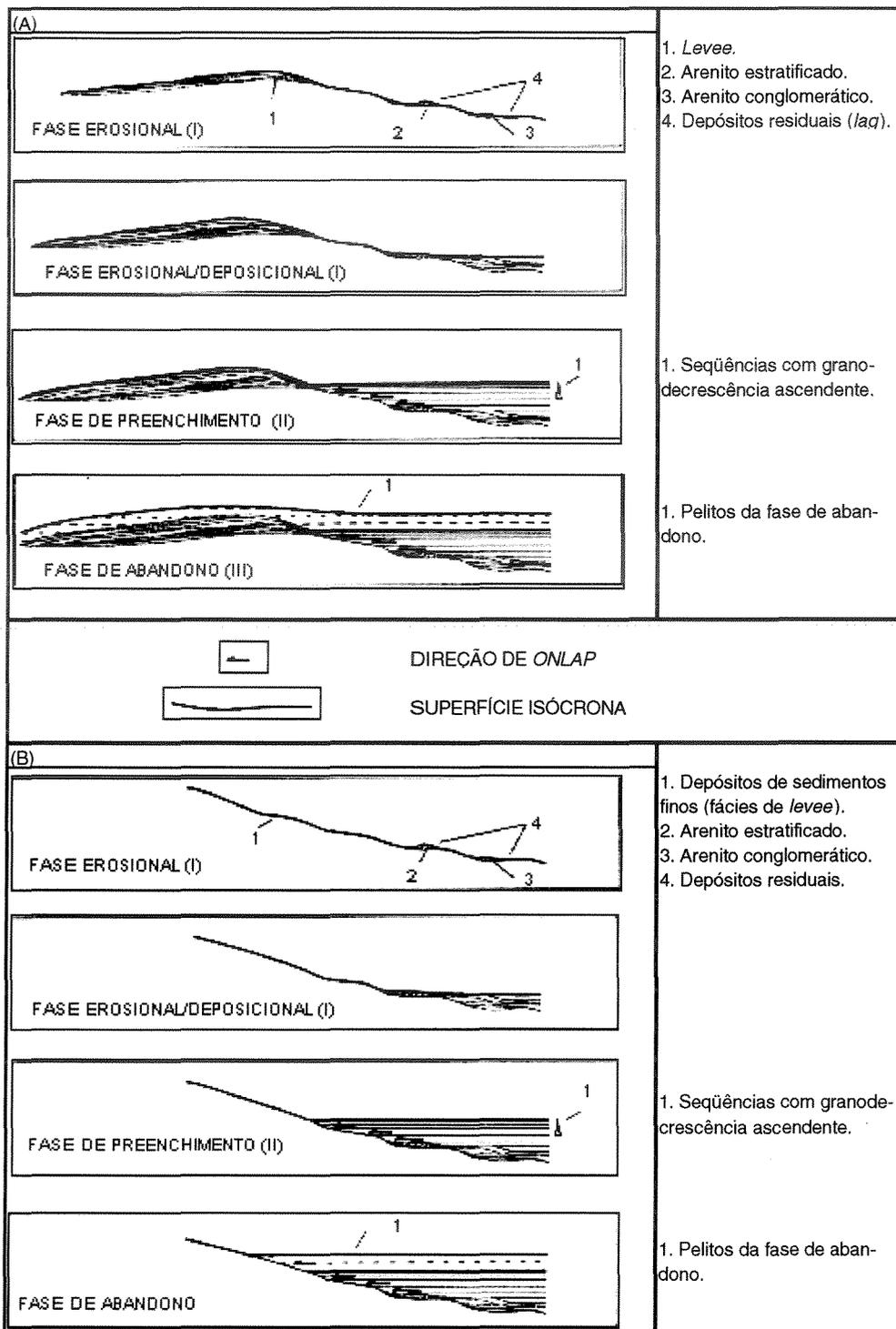


Figura 3.6 - Modelo generalizado para erosão e preenchimento de canais submarinos antigos, mostrando as diferentes fases de desenvolvimento; (A) canais deposicionais/erosionais; (B) canais erosionais, onde os depósitos de preenchimento de canal são isolados dos *levees* (Clark & Pickering, 1996a).

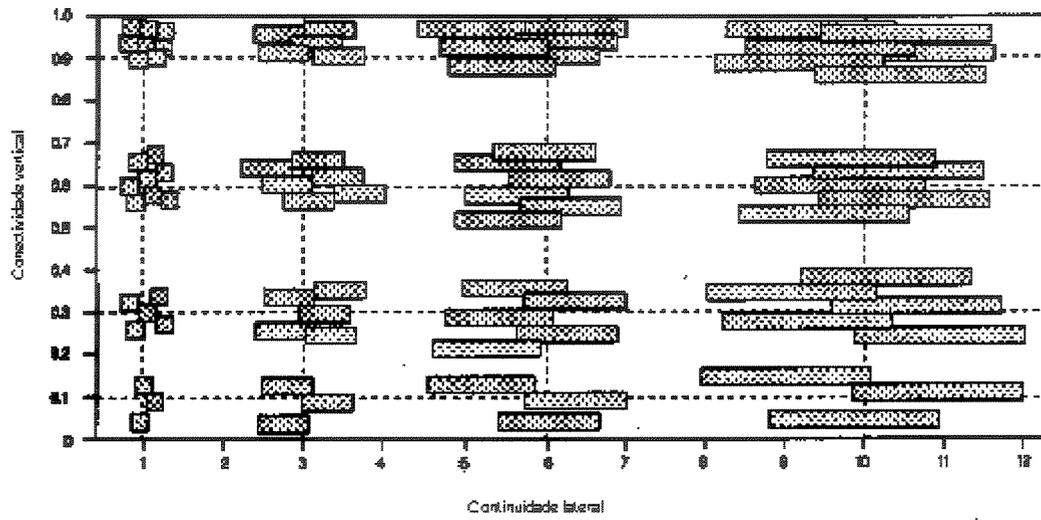


Figura 3.7 - Esquema gráfico mostrando como os elementos de arquitetura podem formar corpos individuais ou amalgamados, a continuidade lateral e a conectividade vertical desses corpos (Clark & Pickering, 1996a).

4. Simulação estocástica

4.1. Conceitos básicos

Simular, segundo Ripley (1987), corresponde a “imitar as condições de um problema através de um modelo”. De acordo com Perin Filho (1995), a simulação de sistemas, um método numérico de resolução de problemas, envolve modelagem, programação e experimentação em computador e tem como objetivo estimar a distribuição de variáveis, testar hipóteses estatísticas, comparar cenários representando diferentes soluções, avaliar o comportamento de uma solução analítica e avaliar um processo de tomadas de decisão em tempo real.

A simulação baseia-se em modelos e a escolha do modelo para representar um determinado reservatório depende dos objetivos e dos dados disponíveis. Esses objetivos podem ser, entre outros, uma avaliação visual da possível geometria do reservatório, a análise do impacto das incertezas na quantificação dos parâmetros envolvidos, a representação das heterogeneidades geológicas identificadas, o mapeamento das unidades de fluxo e/ou propriedades das rochas ou avaliação conjunta de dados de reservatório de natureza diferente, como a integração de dados sísmicos com dados petrofísicos e dados de produção. Essa escolha depende também do grau de conhecimento, tanto geológico quanto de produção, que se tem do evento em estudo, bem como dos equipamentos e *softwares* disponíveis.

Segundo Perin Filho (1995), há duas classes básicas de modelos: mecanicistas e convenientes. Os modelos mecanicistas são aqueles que conseguem reproduzir os mecanismos do evento estudado e podem ser ou não determinísticos. Os últimos correspondem a uma representação conveniente, mas simplificada, do fenômeno em estudo.

O modelo pode ser estocástico ou determinístico e as variáveis aleatórias que representam o problema podem ser discretas ou contínuas. Se o modelo tem um elemento estocástico, a simulação é dita estocástica (Ripley, 1987; Law & Kelton, 1991). As principais exigências para uma simulação estocástica são uma fonte de aleatoriedade e um modelo que reproduza, da melhor maneira possível, as características do evento a ser simulado. A modelagem é feita para resumir os dados e predizer observações.

Os modelos baseiam-se em princípios e expressões matemáticas envolvendo, entre outros, cálculo diferencial de funções a várias variáveis, geometria, estereologia, topologia, operações em subconjuntos do espaço euclidiano e morfologia matemática.

A estereologia é um ramo da geometria estocástica que se fundamenta, em termos matemáticos, em operações com conjuntos, topologia e morfologia matemática (Stoyan *et al.*, 1987); permite a obtenção de informações tridimensionais a partir de dados uni ou bidimensionais (Cressie, 1991; Lantuéjoul, 1995). Uma topologia num conjunto X é uma coleção \mathfrak{T} de partes desse conjunto com propriedades específicas e um espaço topológico é um par (X, \mathfrak{T}) onde X é um conjunto e \mathfrak{T} é uma topologia em X (Lima, 1977). Segundo Cressie (1991), o objeto de estudo da morfologia matemática, conforme o enfoque dado por Matheron e Serra (*apud* Cressie, 1991), compreende o uso de transformações as quais utilizam elementos estruturados para realizar uma análise de imagens.

A pressuposição básica para a modelagem é considerar os dados independentes e identicamente distribuídos, aleatoriamente amostrados (Cressie, 1991). Os dados podem ser contínuos ou discretos, podem constituir agregados espaciais ou observações em pontos do espaço, a localização pode ser regular ou irregular e essa localização pode ser oriunda de um *continuum* espacial ou de um conjunto discreto.

Simulação também pode ser definida como realizações de um processo estocástico representante das características do fenômeno em estudo (Ripley, 1981).

Um processo estocástico, segundo Perin Filho (1995) é “uma seqüência de variáveis aleatórias independentes e identicamente distribuídas”. De acordo com Daley & Vere-Jones (1972), um processo de pontos estocástico é “uma abstração matemática que ocorre quando se considera o fenômeno estudado como uma população aleatoriamente localizada ou como uma seqüência aleatória de eventos no tempo”. Uma definição formal de processo estocástico pode ser encontrada em Lamperti (1977). O nome geral “processo de pontos” foi primeiramente usado por Wold em 1948 (*apud* Lewis, 1972) e há vários tipos de processos, cuja designação varia conforme o autor, tais como univariado, multidimensional, multivariado, de linhas, marcado (Bartlett, 1967; Hanan, 1970; Lewis, 1972; Cox e Lewis, 1972; Krickeberg, 1982).

O processo de pontos mais básico é o processo de Poisson (Ripley, 1981) e corresponde a uma coleção de pontos de um subconjunto do espaço considerado, os quais seguem uma distribuição de Poisson. Uma distribuição de probabilidade é dita de Poisson quando apresenta as características: o número de ocorrências de um fenômeno estudado, em uma determinada região do espaço analisado, independe do número de ocorrências em qualquer outra região (isolada da primeira) desse espaço; a probabilidade de realização de

uma única ocorrência desse fenômeno numa região pequena é proporcional ao tamanho da região e a probabilidade de que mais de uma realização venha a ocorrer em uma região pequena é insignificante. A distribuição de Poisson, matematicamente, é dada por:

- suponha-se X uma variável aleatória discreta, com range 0,1,2,... e

$$p_i = \Pr [X = i] = (\lambda^i e^{-\lambda}) / i!, i = 0,1,2, \dots$$

$$p_i = 0, \text{ caso contrário}$$

onde λ é uma constante positiva denominada intensidade e fornece o número de pontos esperado por unidade de área. O conjunto $\{p_i\}$ é dito uma função densidade de probabilidade de Poisson, com esperança e variância igual a λ , ou seja: $E(X) = \text{Var}(X) = \lambda$ (Fig. 4.1a).

Os processos de Poisson são muito convenientes e podem ser considerados como “tijolos” para construir outros processos de pontos. São análogos à premissa “observações independentes” da Teoria da Probabilidade e freqüentemente são denominados apenas de aleatórios. Há vários tipos de processos e conforme suas características, um processo de Poisson pode ser, por exemplo, homogêneo e constante (Fig. 4.1b). Outros exemplos de processos de Poisson podem ser encontrados em Pereira (1997).

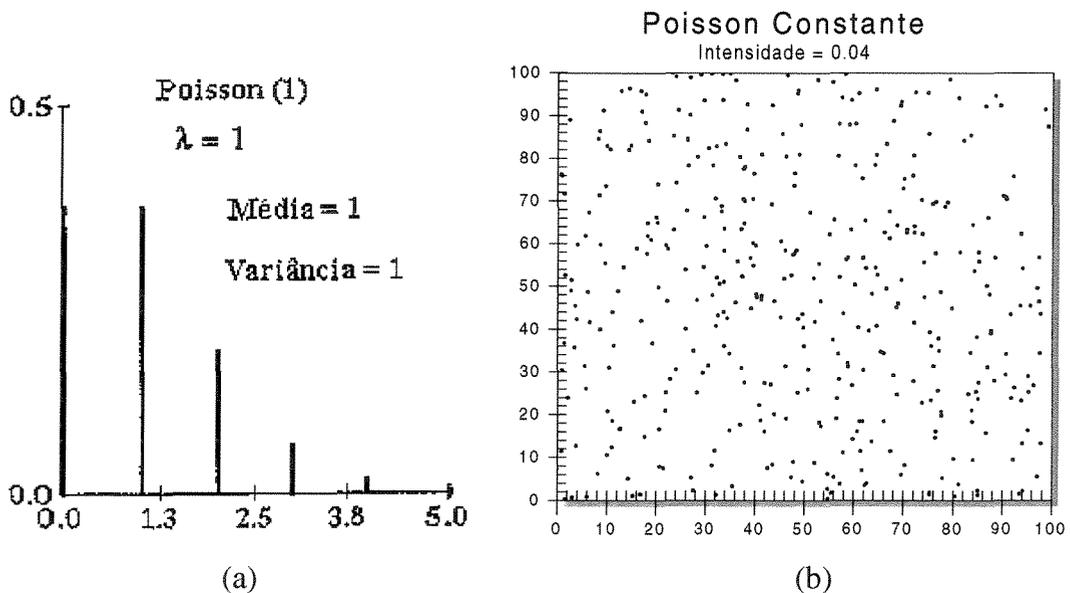


Figura 4.1 - (a) Distribuição de Poisson com intensidade constante $\lambda=1$ e média=variância=1; (b) Processo de Poisson com intensidade igual a 0,04 (Pereira, 1997).

Segundo Lantuéjoul (1995) um processo de pontos é uma classe particular de conjuntos aleatórios. Conjuntos aleatórios fechados (*random closed sets*) servem como modelos matemáticos de padrões de pontos aleatórios (Cressie, 1991). Adler (1981) considera um conjunto aleatório um caso especial de uma função aleatória, no qual a função assume valores 0 ou 1. A definição geral de um conjunto aleatório fechado, segundo Matheron (*apud* Cressie, 1991) é “um mapeamento mensurável de um espaço de probabilidades no conjunto de todos os conjuntos fechados do P^d que possuem a topologia *hit-or-miss*”.

A teoria *hit-or-miss* pode ser exemplificada considerando-se dois conjuntos A e B. Neste contexto “ $A \cap B \neq \emptyset$ ” ou “ $A \uparrow B$ ” significa A atinge B (*A hits B*) e, usando-se a teoria da função indicatriz, pode-se calcular as probabilidades dos eventos do tipo $\{K \subset A, K \uparrow A\}$, onde K e K' são conjuntos compactos, ou seja, conjuntos com fronteira e que contém a fronteira (Stoyan *et al.*, 1987; Lantuéjoul, 1995).

Exemplos de conjuntos aleatórios são pontos aleatórios, esferas fechadas com centros e raios aleatórios, cubos fechados com posições dos cantos e comprimento das arestas aleatórios. Há também conjuntos mais complicados, obtidos através de operações com conjuntos. Um exemplo importante de conjuntos aleatórios fechados gerados desta forma é o modelo booleano, que se utiliza das operações união e translação de conjuntos.

4.2. Modelo booleano

O modelo booleano, também conhecido como modelo de Poisson de grãos, é um exemplo importante e relativamente simples de um conjunto aleatório (Stoyan *et al.*, 1987).

A maneira mais simples de construir uma função aleatória booleana, segundo Chautru (1989), é utilizando o método desenvolvido por Jeulin (*apud* Chautru, 1989), apesar de Serra (*apud* Chautru, 1989) apresentar uma versão mais formal e geral. Para construir uma função aleatória Booleana no P^d são necessárias três etapas (Chautru, 1989): considera-se um processo de Poisson no P^d e, a cada ponto desse processo associa-se uma forma aleatória, cujo centro coincide com os pontos do processo, denominada função primária, a qual não depende da vizinhança e pode estar interpenetrada com formas próximas. Na última etapa identifica-se a função aleatória booleana, que corresponde ao envelope dado pelas funções primárias (Fig. 4.2). Embora às vezes seja difícil, é possível calcular a distribuição de

probabilidade para essa função, tanto para os casos uni e bivariado como para o caso multivariado, mas isto implica em resolver um sistema de matrizes que, para o caso multivariado necessita de muito tempo de processamento (Chautru, 1989). A distribuição de probabilidade para o caso univariado, por exemplo, é dada por:

$$F(z) = P(Z(x) < z) = \exp \{-\theta A_{\text{med}}(X'z)\}$$

onde:

θ é a densidade do processo de Poisson e $A_{\text{med}}(X'z)$ é a medida média da seção horizontal da função primária no nível z .

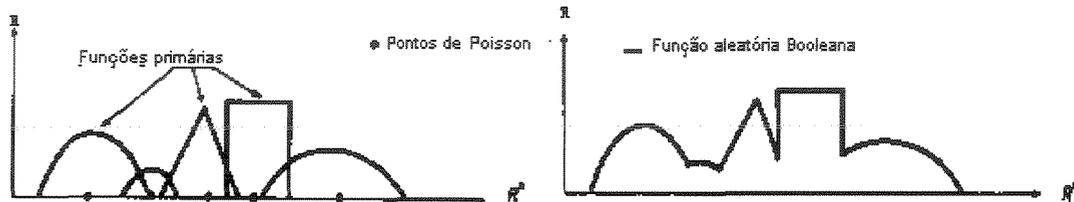


Figura 4.2 - Representação gráfica (à direita) de uma função booleana, a partir de um processo de pontos e funções primárias (à esquerda; Chautru, 1989).

As principais propriedades dessa função são: se θ é constante, a função é estacionária; supondo-se um *cut-off* arbitrário para z , a função indicatriz de $Z \geq z$ é um conjunto aleatório booleano (Matheron, *apud* Chautru, 1989).

Matheron (1967, 1975) apresentou uma definição teórica do modelo booleano, baseada na generalização de uma função booleana, dada pela teoria dos conjuntos aleatórios fechados (*random closed sets* - RAC), os quais seriam gerados por um processo estocástico Z , definido no espaço d -dimensional. A distribuição desse processo estocástico Z especificaria a probabilidade de ocorrência de eventos envolvendo conjuntos e, a partir de operações definidas entre esses conjuntos (Serra, 1982), poder-se-ia conhecer a distribuição dos eventos correlacionáveis, por exemplo, à distribuição e geometria de fácies reservatórios.

O modelo booleano clássico é caracterizado por uma função booleana dada pelo envelope resultante da união das funções primárias que a constituem (Chautru, 1989); possui uma formulação teórica que permite fazer inferências estatísticas e calcular a distribuição de probabilidade da função aleatória booleana, o que possibilitaria, através do uso de distribuições conjuntas, condicionar os objetos gerados aos dados de poços (Stoyan *et al.*,

1987; Cressie, 1991, entre outros).

Matheron (*apud* Ripley, 1981) especificou o processo estocástico Z que gera um conjunto A , contido em um espaço X , através de uma função indicatriz $I_A(x)$, da definição de conjuntos compactos e da teoria *hit-or-miss*. Neste caso, se Z é uma função de X que assume valores 0 ou 1, pode-se definir o conjunto correspondente A por:

$$A = \{ x \mid Z(x) = 1 \}$$

A distribuição do processo estocástico Z então especifica a probabilidade dos eventos da forma:

$$\begin{aligned} & \{ z(x) = 1 \forall x \in K, Z(x) = 0 \forall x \in K' \} \\ & = \{ A \supset K, A \cap K' = \emptyset \}, \text{ para conjuntos finitos } K \text{ e } K'. \end{aligned}$$

Os conjuntos finitos K e K' são conjuntos compactos e as operações básicas entre os conjuntos envolvidos foram desenvolvidos por Serra, cuja publicação teve início com o artigo “*The texture analyser*” (Klein e Serra, *apud* Ripley, 1981).

O modelo booleano clássico pode ser dado por um processo de pontos de Poisson estacionário, distribuídos num plano, de intensidade λ , no qual, em cada um desses pontos, é colocado um disco de raio fixo r . A união de todos esses discos é um exemplo de um modelo booleano, onde os pontos do processo de Poisson são chamados germes do modelo, enquanto os discos são os grãos primários (Stoyan *et al.*, 1987; Lantuéjoul, 1995; Fig. 4.3).

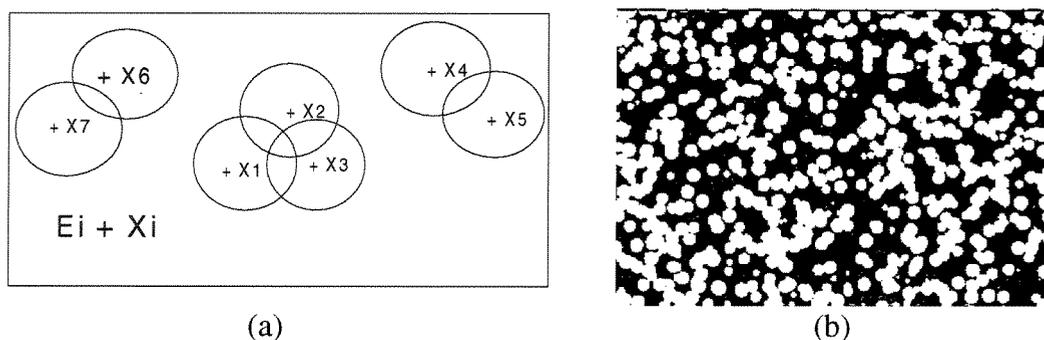


Figura 4.3 - Representação de um modelo booleano (a) X_i = germes; discos = grãos (Stoyan *et al.*, 1987); (b) simulação do modelo Booleano (Lantuéjoul, 1995).

Matheron (*apud* Ripley, 1981) definiu o modelo booleano como uma generalização de um processo de Poisson *cluster*. A partir de um processo de Poisson com medida média Λ , a cada ponto do processo associa-se um disco ou esfera cujo raio é independentemente desenhado e dado por uma distribuição específica. O conjunto aleatório fechado A é a união

de todos os discos (ou esferas).

O modelo booleano assim definido apresenta formas não-correlacionáveis (Matheron *et al.*, 1987). Não é um modelo realístico para representar uma rocha pois não se assume nenhuma interação entre os discos e há outros modelos mais genéricos que aceitam essa possibilidade. Uma outra classe de modelos é baseada em divisões aleatórias do espaço, como os modelos descritos por Pielou (*apud* Cressie, 1991) para mosaicos de vegetação. As células da divisão são preenchidas independentemente com um dos tipos possíveis de vegetação. Os modelos de divisão aleatória do espaço foram desenvolvidos por Miles (*apud* Cressie, 1991).

No modelo booleano estacionário generalizado (Stoyan *et al.*, 1987) os grãos primários, que podem ser discos de raios aleatórios, segmentos de comprimento e orientação aleatórios e agrupamentos finitos aleatórios de pontos, são substituídos por realizações independentes de um conjunto compacto.

O modelo booleano generalizado, conhecido como modelo germe-grão (Hanisch, *apud* Cressie, 1991), implica em assumir-se premissas menos rígidas, tais como a utilização de um processo de pontos geral para os germes (Stoyan *et al.*, 1987) ou um processo de Poisson não necessariamente homogêneo (Cressie, 1991) e a não exigência de conjuntos aleatórios compactos independentes (Cressie, 1991).

Uma definição formal do modelo germe-grão, conforme Hanisch (*apud* Stoyan *et al.*, 1987) é dada por um processo de pontos marcados ψ , expresso por:

$$\psi = \{[x_n; \Xi_n]\}$$

onde:

x_n são os pontos do P^d

Ξ_n são subconjuntos compactos do P^d

O processo estocástico Ξ é dado por:

$$\Xi = \cup_n (\Xi_n + x_n) = (\Xi_1 + x_1) \cup (\Xi_2 + x_2) \cup \dots$$

Este modelo pode ser ou não estacionário. Quando o processo é estacionário usa-se o conceito de grão típico Ξ_0 , que corresponde a um conjunto aleatório fechado possuindo a mesma distribuição que o conjunto de grãos primários $\{\Xi_n\}$, mas independentes entre si e dos germes.

Os grãos primários são caracterizados pela sua distribuição M . Como eles são

conjuntos aleatórios, esta distribuição é uma medida de probabilidade em K (uma família de conjuntos compactos do P^d , todos não-vazios) e corresponde à distribuição marca (*mark*) de um processo de pontos marcados (*marked point process*). Se os grãos primários forem conjuntos convexos (isto é, um subconjunto do P^d no qual, para todo o par de pontos x, y em P^d , a linha que une os dois pontos também pertence ao subconjunto; Lantuéjoul, 1995), pode-se efetuar médias estatísticas de várias medidas numéricas, o que só ocorre em alguns casos para grãos não-convexos.

A análise estatística do modelo booleano corresponde à determinação dos estimadores dados pela fração de volume ou de área, covariância e função de distribuição dos conjuntos (grãos). O principal objetivo da análise estatística é a determinação das características associadas ao modelo propriamente dito: λ (intensidade) e medidas médias de perímetro, área, área superficial e volume (Stoyan *et al.*, 1987).

O conhecimento claro dos germes primários facilita a determinação das características do modelo. Os germes podem ser definidos de maneira sistemática, levando ao estudo separado dos grãos primários e do padrão de pontos dos germes. Segundo Stoyan *et al.* (1987) o estudo dos grãos é um problema da estatística de conjuntos aleatórios (*random sets*), enquanto o estudo dos germes envolve a estatística dos processos de pontos (*point process*).

Atualmente, diversos autores consideram o modelo booleano como uma classe, denominada modelos baseados em objetos (*object-based models*), a qual engloba o modelo clássico, cuja formulação teórica do processo estocástico e inferências estatísticas foram desenvolvidas por Matheron (1967, 1975) e Serra (1982), além de outros modelos que usam o mesmo princípio, mas para os quais ainda não foi desenvolvido um suporte teórico, também referidos na literatura como modelos do tipo Booleano (*Boolean-like models*). As referências bibliográficas mais recentes usam apenas a denominação processo de pontos marcados.

4.3. Classificação geral dos modelos de simulação

Dubrulle (1989) agrupou os diferentes métodos estocásticos em duas categorias: métodos baseados em objetos (*object-based* ou Booleano) e métodos seqüenciais (*sequence-based*). Os métodos baseados em objetos geram corpos discretos com geometria externa aleatória (*random shape*) e com localização no espaço também aleatória. Os métodos

seqüenciais geram distribuições de valores (por exemplo, de permeabilidade) por blocos de um *grid*, as quais satisfazem a um certo variograma ou a uma distribuição condicional de probabilidades; incluem uma grande variedade de métodos, entre eles a simulação condicional, modelos de fractais e métodos de Markov.

Haldorsen & Damsleth (1990) atribuíram ao rápido desenvolvimento das técnicas de caracterização de reservatórios baseadas em teorias probabilísticas, a atual confusão existente entre termos como modelo, método e algoritmo. Esses autores denominam modelo estatístico aquele que “descreve os mecanismos probabilísticos que definem as características estocásticas do fenômeno em estudo”, explicitando de que maneira uma probabilidade é associada a cada realização; método “é um princípio, uma técnica ou um procedimento utilizado no modelo como, por exemplo, estimar parâmetros ou simular realizações” (p.ex., simulação condicional); algoritmo “é uma especificação do método, isto é, um conjunto de regras de computação”. Dividiram os modelos estocásticos em duas grandes classes: discretos e contínuos. Os modelos discretos descrevem as feições geológicas de natureza discreta (geometria dos corpos e sua localização; distribuição, orientação e extensão de fraturas e falhas e modelagem de fácies). Os modelos contínuos descrevem a distribuição espacial de um fenômeno que assume valores distintos mas tem variação contínua (como permeabilidade, porosidade e saturação residual, por exemplo) e pertencem à teoria das variáveis regionalizadas.

Srivastava (1994) descreve oito métodos estocásticos por ele considerados os mais comuns: simulação seqüencial, simulação Booleana (ou *marked-point process* ou *object-based*), estimativa mais erro simulado, simulação *Annealing*, simulação de campos de probabilidade (*P-Field*), métodos de decomposição de matriz, métodos iterativos e métodos híbridos.

De acordo com Chessa (1995), os modelos probabilísticos que descrevem a arquitetura do reservatório podem ser subdivididos em duas classes: modelos *object-based* e modelos *grid-based*. Os primeiros compreendem a representação de um corpo geológico como um objeto com uma localização de referência, aleatoriamente distribuída no espaço, ao qual são atribuídas características geométricas tais como forma, tamanho e orientação. A esta classe pertencem os métodos processos de pontos e conjuntos aleatórios. Nos últimos, a subsuperfície é discretizada num certo número de blocos num *grid* e para cada bloco do *grid* é associada uma cor, que corresponde a uma características geológica como unidades

genéticas ou distribuição de folhelhos num arcabouço arenoso. Esta classe inclui os campos aleatórios.

Neste trabalho adotou-se a definição de Chessa (1995) para a classificação dos métodos estocásticos, porém associados em três grandes grupos: métodos baseados em objetos, métodos baseados em *pixels* (ou *grid*) e métodos híbridos. Os primeiros incluem os modelos booleanos, estão associados a modelos estocásticos discretos e permitem representar variáveis discretas (aleatórias ou não) aleatoriamente distribuídas no espaço. Os segundos estão relacionados a modelos de variáveis contínuas regionalizadas e sua distribuição espacial, e os últimos compreendem uma mistura dos dois primeiros, onde a simulação é feita em mais de uma etapa, com diferentes métodos em cada etapa.

4.4. Aplicações de modelos estocásticos em estudos de reservatórios

O modelo booleano, usado pelo menos desde a década de 40, foi primeiramente aplicado em escala macroscópica por Dupuy & Lefebvre du Prey (*apud* Dubrule, 1989), com o objetivo de avaliar o efeito de folhelhos descontínuos de pequena extensão no escoamento de hidrocarbonetos (Campo Hassi-Messaoud, Algéria). Para isto, usaram um modelo booleano para representar as camadas delgadas de folhelho aleatoriamente distribuídas no espaço. A distribuição dos folhelhos observada nos poços era coerente com o modelo Booleano teórico e o comprimento dos intervalos entre as ocorrências de folhelhos ao longo do poço seguiam uma distribuição exponencial cuja média, de acordo com os resultados obtidos por Matheron (1966), é uma função de θ (densidade do modelo, corresponde ao número de objetos aleatórios por unidade de volume) e da área horizontal média dos folhelhos.

Delhomme & Giannesini (1979) desenvolveram o modelo de Dupuy & Lefebvre du Prey usando um filtro numérico “passa-baixa” no logaritmo da permeabilidade, para separar reservatório de não-reservatório (Campo de Hassi-Messaoud, Algéria). Este procedimento permitiu um melhor ajuste com os dados de produção e injeção do campo, pois resultou num modelo mais realista das heterogeneidades do reservatório.

Haldorsen (1983) desenvolveu uma metodologia para descrição geral do reservatório, tratamento de dados e geração de folhelhos estocásticos, a partir da relação entre a distribuição de folhelhos e os diferentes ambientes deposicionais. Propôs um método automático para descrição numérica dos folhelhos presentes no reservatório baseado na

análise estatística (dos dados de poços, de afloramentos análogos e do conhecimento geológico do reservatório) e condicionado aos dados de poços.

O “esquema de geração de folhelhos” proposto por Haldorsen (1983) produz seções geológicas sintéticas geradas a partir de uma distribuição espacial aleatória dos folhelhos estocásticos, semelhantes, segundo o autor, ao observado nas seções com dados de poços. Haldorsen (1983) apresentou seu modelo de geração de folhelhos (em diferentes escalas) como um modelo totalmente estocástico onde as dimensões dos corpos gerados, representados por retângulos, são provenientes de distribuições empíricas obtidas de dados de poços e conhecimento geológico do reservatório.

Haldorsen & Lake (1984) modelaram folhelhos estocásticos e determinísticos para descrever um reservatório e mostraram os efeitos dessas heterogeneidades na porosidade efetiva e permeabilidade. Os folhelhos, condicionados aos dados de poços, foram representados por retângulos cujas dimensões correspondiam a medidas aleatórias, obtidas a partir da distribuição de frequência de dados amostrais de comprimento e largura dos folhelhos. Foram efetuadas modelagens bi e tridimensionais e, neste último caso, os folhelhos têm largura e comprimento iguais. Os resultados encontrados foram confrontados com os perfis verticais de pressão do Campo Montrose, o que salientou a influência dos folhelhos nas propriedades petrofísicas dos blocos utilizados para simulação de fluxo. Este trabalho corresponde, basicamente, a uma aplicação prática do modelo de Haldorsen (1983), utilizando dados do Campo de Montrose.

A partir do final da década de 80, foram feitas aplicações do modelo booleano, segundo o enfoque dado por Haldorsen (1983) para simular heterogeneidades e descrever quantitativamente a arquitetura interna dos reservatórios, especialmente em reservatórios do Mar do Norte. Foram desenvolvidos programas de computador para simular estocasticamente o reservatório, como o SISABOSA (Augedal *et al. apud* Poletto, 1996; Henriquez *et al.*, 1990), onde o reservatório é representado por paralelepípedos de arenito envolvidos por sedimentos finos impermeáveis, segundo uma proporção reservatório/não-reservatório preestabelecida.

Haldorsen & MacDonald (1987) modelaram a arquitetura interna em escala macroscópica e a compartimentação de reservatórios em duas e três dimensões, através de algoritmos que geram representações do reservatório, efetuaram computações volumétricas e transferiram as informações para um simulador de fluxo. Os corpos arenosos gerados apresentam seção transversal elíptica, têm extensão infinita dentro do domínio simulado e

apresentam sinuosidade variada, mas nas representações tridimensionais dos corpos não se identifica condicionamento a poços, os quais estão presentes nas seções transversais, onde os corpos são representados por retângulos.

Matheron *et al.* (1987) propuseram um método geoestatístico que compreende a simulação condicional de conjuntos aleatórios usando funções aleatórias normais truncadas para representar a geometria de reservatórios flúvio-deltaicos e sua distribuição de permeabilidade. Esses autores alertaram que o uso de conjuntos booleanos para representar a geometria dos reservatórios não é apropriado, porque os conjuntos booleanos (os quais podem ter uma forma pré-determinada como lentes, elipses ou retângulos) aleatoriamente distribuídos no espaço são não-correlacionáveis e isto implica que nenhuma lente seria atravessada por mais de um poço, por definição. Desta forma, os autores acima citados sugerem o uso de conjuntos booleanos generalizados, ou seja, os modelos aleatórios genéticos, os quais correspondem aos conjuntos aleatórios fechados na terminologia formal de Matheron (1967, 1969). A metodologia proposta neste trabalho compreende o uso de uma função indicatriz para simular o tipo de fácies presente e de conjuntos aleatórios para representar a geometria das fácies, dados estes facilmente condicionáveis às informações dos poços, segundo os autores.

Journel & Alabert (1990) utilizaram a Simulação Seqüencial Indicatriz como uma alternativa para simular numericamente as heterogeneidades dos reservatórios, respeitando dados de poços e o conhecimento geológico prévio do reservatório, além de reproduzir os padrões de conectividade espacial observados. O método foi aplicado no conjunto de dados do Arenito Berea (Journel & Alabert, 1990) e num complexo turbidítico *offshore* Gabão (Alabert & Massonnat, 1990; Alabert & Corre, 1991; Massonnat *et al.*, 1992; Alabert & Modot, 1992; Giudicelli *et al.*, 1992).

Damsleth *et al.* (1990) apresentaram um modelo estocástico de simulação em dois estágios: na primeira etapa foram simuladas as heterogeneidades de grande escala, representadas pela arquitetura das diferentes fácies presentes, com parâmetros oriundos de dados sísmicos, dados de poços e estudos de afloramentos análogos. Na segunda etapa, as propriedades das rochas foram modeladas como campos gaussianos multivariados contínuos. O modelo de fácies foi simulado através do programa SESIMIRA, baseado no modelo de processo de pontos marcado (Gundesø & Egeland, 1990) e a modelagem das propriedades petrofísicas foi efetuada através do programa DESIRE (Halvorsen *et al. apud* Damsleth *et al.*, 1990). Os resultados da simulação estocástica foram utilizados para simulação de fluxo no

reservatório com o programa ECLIPSE. A geração e distribuição de fácies, efetuada através do programa SESIMIRA, baseia-se no modelo de Delhomme & Giannesini (1979).

A partir dos anos 90 intensificaram-se as publicações sobre simulação estocástica de reservatórios, às vezes concomitantes com a elaboração de novos programas de computador para a execução da simulação. Hoiberg *et al.* (1990) modelaram folhelhos estocásticos de distribuição aleatória no reservatório; Clemetsen *et al.* (1990), Henriquez *et al.* (*apud* Dubrule, 1992), Hirst *et al.* (1992) simularam a distribuição de canais fluviais; Gundesø & Egeland (1990) modelaram a distribuição de *crevasses* e canais flúvio-deltaicos; Damsleth *et al.* (1990), reservatórios de um complexo *fan-delta*; Dubrule *et al.* (*apud* Dubrule, 1992), reservatórios de planície costeira e Fält *et al.* (1991) modelaram reservatórios marinhos costeiros.

Schuppers (1993) modelou as unidades litofaciológicas, distribuição das litofácies e comprimento dos folhelhos em reservatórios turbidíticos. Bridge & Mackey (1993) simularam o comprimento e largura de canais fluviais e estabeleceram uma relação entre a proporção de canais existentes e a conectividade dos corpos: se a proporção for baixa, os corpos são não-conectados; se alta, todos os cinturões estão conectados.

Tyler *et al.* (1994) efetuaram uma modelagem das heterogeneidades em ambientes fluviais; MacDonald & Aasen (1994) modelaram a distribuição de trato de fácies em ambiente parálico; Hatløy (1994) desenvolveu uma modelagem numérica de fácies, combinando modelos estocásticos e determinísticos.

Herweijer & Dubrule (1995) realizaram uma análise combinada de modelos geoestatísticos de reservatórios e resultados de testes de pressão, concluindo que essa análise reduz as incertezas em relação à conectividade dos corpos e distribuições de permeabilidade; apesar das limitações dos dados de testes, estes podem ser usados para avaliar os modelos estatísticos construídos a partir de dados em pequena escala (variações de permeabilidade em *plugs*) e informações geológicas qualitativas (incorporadas em modelos baseados em objetos).

Poletto (1996) simulou os reservatórios fluviais da Formação Açú através de modelagem baseada em objetos. O simulador utilizado é o mesmo empregado neste trabalho.

Além dos trabalhos já mencionados, diversos programas para modelagem baseada em objetos foram desenvolvidos ou estão em desenvolvimento, como FLUREMO, MONARCH 3D, SIRCH, GOCAD, STORM, SEDSIM3, MOHERES e FLUVSIM, os quais são descritos em linhas gerais por Poletto (1996).

4.5. Evolução dos modelos baseados em objetos

4.5.1. Modelo de Haldorsen (1983)

O algoritmo de simulação baseada em objetos desenvolvido por Haldorsen (1983) pressupõe, como condições iniciais, a existência de um poço vertical, a simulação de um tipo genético de corpo arenoso disperso em uma matriz argilosa, o conhecimento prévio da interseção dos corpos arenosos individuais, obtido dos dados de poço e a área de interesse é uma seção 2D da subsuperfície que contém o poço.

As premissas básicas compreendem a representação dos corpos por grãos retangulares no espaço bidimensional, cujas marcas são espessura e largura, independentes entre si e os grãos estão orientados paralelamente ao eixo horizontal. Os corpos arenosos são classificadas em dois tipos: areias de poço e areias entre poços. A proporção de arenito no intervalo simulado, calculada no poço, é extrapolada para toda a região simulada, o que corresponde a uma restrição imposta a cada realização.

As etapas de simulação são dadas por (Chessa, 1995):

1. Calcula a proporção de arenito no poço (p_{well});
2. Gera uma areia no poço:
 - a) gera uma largura w condicional à espessura observada no poço, tal que a espessura gerada é igual a espessura observada;
 - b) sorteia um número u da distribuição Unif ($[0, u]$);
 - c) coloca a coordenada x na locação de referência igual a $x_{well} - u$; a coordenada y dessa locação é dada pelo poço;
 - d) esta etapa termina após a geração de todas as areais do poço.
3. Gera areia entre poços:
 - a) gera uma locação aleatória uniforme contida numa área maior;
 - b) gera uma largura e uma espessura;
 - c) se o corpo gerado obedece aos dados de poços ele é aceito, caso contrário, é rejeitado;
 - d) uma vez aceito o corpo, é calculada a proporção p até então obtida;
 - e) se $p \geq p_{well}$ a simulação é concluída, caso contrário, novo corpo é gerado.

O algoritmo desenvolvido por Haldorsen (1983) também pode ser usado quando o condicionamento envolve dados de mais de um poço. Neste caso, se um corpo de um poço intercepta outro poço e não respeita os dados desse poço, o corpo é rejeitado. As correlações entre poços são previamente informadas através do estudo geológico. Para simulações no espaço tridimensional basta acrescentar comprimento e orientação como parâmetros de entrada. Caso se queira simular mais de um tipo genético de areia, é necessário estabelecer um modelo para cada tipo, mas isto é pouco prático, pois em geral requer a interferência do geólogo no resultado final.

4.5.2. Modelo de Matheron, Beucher, de Fouquet & Galli (1987)

Esses autores fizeram uma revisão dos métodos existentes e apontaram as limitações encontradas no modelo booleano, conforme a definição de Matheron, Serra e Jeulin. Segundo Matheron *et al.* (1987), o modelo booleano é um modelo matemático para representar padrões espaciais apresentado por meios heterogêneos formados, por exemplo, por lentes arenosas distribuídas numa matriz argilosa. Consiste em associar corpos com uma forma predeterminada (por exemplo, elipses ou retângulos em 2D) a pontos aleatoriamente distribuídos no domínio em estudo, o que implica que os pontos apresentam uma distribuição uniforme no espaço, estatisticamente.

As vantagens desse modelo são dadas pelo seu uso fácil, tanto em 2D quanto em 3D e depende de poucos parâmetros, ou seja, o número de sementes dos pontos por unidade do espaço (densidade), a forma dos corpos (fixa ou variável), seus tamanhos e orientação. A desvantagem é que não pode ser condicionado a valores experimentais, a não ser que se assuma, por exemplo, que os corpos são atravessados apenas por um poço já que, por definição, os corpos são não-correlacionáveis.

O modelo booleano generalizado, denominado por esses autores de modelos aleatórios genéticos, corresponde aos estudos de Matheron (*apud* Matheron *et al.*, 1987) e foi proposto para representar a acumulação de sedimentos em função de parâmetros deposicionais, tais como: profundidade da água e taxa de aporte dos sedimentos. São chamados genéticos porque reproduzem o processo sedimentar, mas pouco práticos devido ao grande número de parâmetros requeridos e os resultados, segundo os autores, geralmente têm pouco significado geológico.

Para contornar os problemas encontrados com os modelos disponíveis até então, esses autores propuseram um modelo de simulação condicional de conjuntos aleatórios usando funções aleatórias normais truncadas, onde as fácies correspondem a um processo estocástico dado por uma função indicatriz (associada aos conjuntos aleatórios que representam as fácies) no ponto x , um valor gaussiano nesse ponto x e um limiar para os valores gaussianos, calculado a partir das proporções das fácies. Isto permite calcular a covariância experimental do modelo. Esse método apresenta a vantagem de envolver um número limitado de parâmetros, pois baseia-se numa análise geoestatística estrutural, em 2D ou 3D e não apresenta problemas de condicionamento.

4.5.3. Modelo de Chessa (1995)

A partir da análise dos problemas estatísticos apresentados pelo algoritmo desenvolvido por Haldorsen (1993), Chessa (1995) propôs um novo enfoque para a simulação de modelos baseados em objetos. No enfoque convencional, o modelo booleano (Chessa, 1995) é caracterizado por um processo de pontos de Poisson, representando a localização dos centros dos corpos reservatórios e pela distribuição de probabilidade para as dimensões e orientação dos corpos arenosos. Os corpos são representados por $\Xi_1, \Xi_2, \dots, \Xi_N$, os centros são dados por z_1, z_2, \dots, z_N , onde N é igual ao número de Poisson para os corpos. O modelo Booleano assim caracterizado é dado por:

$$\Xi = \cup_i (\Xi_i + z_i), \quad i = 1, 2, \dots, N, \text{ onde}$$

$$\Xi_i + z_i = \{ x + x_i : x \in \Xi_i \}$$

As dimensões e orientação de um corpo são independentes das dimensões e orientações de qualquer outro corpo e são independentes do processo de pontos de Poisson do centro dos corpos, ou seja, independem da localização do corpo arenoso no reservatório. A simulação é feita a partir de um processo de Poisson homogêneo, com as propriedades:

- o número de pontos de uma região com fronteira $B \subset P^d$, $d = 1,2,3$ tem uma distribuição de Poisson com média $\lambda l_d(B)$, onde λ é uma constante não negativa e $l_d(B)$ é um volume d-dimensional de B ;
- os pontos estão dispersos independentemente uns dos outros e o número de pontos de k regiões disjuntas forma k variáveis aleatórias independentes;

- λ é a intensidade do processo e corresponde ao número de pontos em uma região com área ou volume unitário.

As etapas da simulação comumente compreendem a simulação dos corpos atravessados por poços (através da amostragem de w , l , orientação e coordenadas da interseção) e a simulação dos corpos entre poços (a partir da mesma distribuição de probabilidade anteriormente usada). O corpo que não respeitar os dados é rejeitado. A união dos corpos simulados corresponde a uma realização do modelo booleano.

Pela teoria clássica, o condicionamento do modelo booleano só era possível aos dados de um poço (Matheron *et al.*, 1987). Para permitir o condicionamento a dados de vários poços, Chessa (1995) redefiniu algumas propriedades dos processos de pontos, a partir da teoria clássica (*Palm theory*). Propôs um algoritmo estatisticamente ajustado para simulações baseadas em objetos, o qual fornece valores de conectividade e proporção global (*net-to-gross*) mais próximos dos dados reais, a partir dos estudos efetuados por Haldorsen (1983).

Segundo Chessa (1995) o algoritmo desenvolvido por Haldorsen (1983) apresenta problemas estatísticos, como: o condicionamento para as areias de poços e entre poços é independente e, conseqüentemente, a espessura das areias de poço erodidas em função do empilhamento de corpos arenosos difere da espessura inicial do corpo gerado, o que não é considerado quando do condicionamento e do cálculo das proporções. Além disso, as areias de poço e entre poços são simuladas a partir da mesma distribuição, o que implica em viés nos corpos simulados, devido à natureza do processo de pontos homogêneo de Poisson (as distribuições e as médias calculadas para os intervalos amostrados e intervalos adjacentes são diferentes; *waiting-time paradox*). As areias simuladas entre poços apresentam a estatística correta pois são distribuídas segundo um processo marcado de Poisson (não homogêneo), resultante de uma diluição (*thinning*) de um processo de Poisson homogêneo (Stoyan *et al.*, 1987; Chessa, 1995; Fig. 4.4).

A estatística da coordenada x das locações de referência não é correta, porque está relacionada com a largura e o condicionamento à proporção global (*net-to-gross*) não é representativo em relação à conectividade dos corpos, porque assume que a fração arenosa obtida nos poços permanece a mesma em toda a área simulada, o que tende a estar superestimado.

O ajuste proposto por Chessa (1995) para o algoritmo desenvolvido por Haldorsen (1983) considera que as areias entre poços apresentam uma distribuição de acordo com um

processo germe não-homogêneo, obtido por diluição do processo de germe do modelo booleano, cuja função intensidade reflete a probabilidade de estar ou não coerente com os dados de poços, devido às propriedades independentes do modelo germe-grão Ξ e da aceitação-rejeição dos corpos.

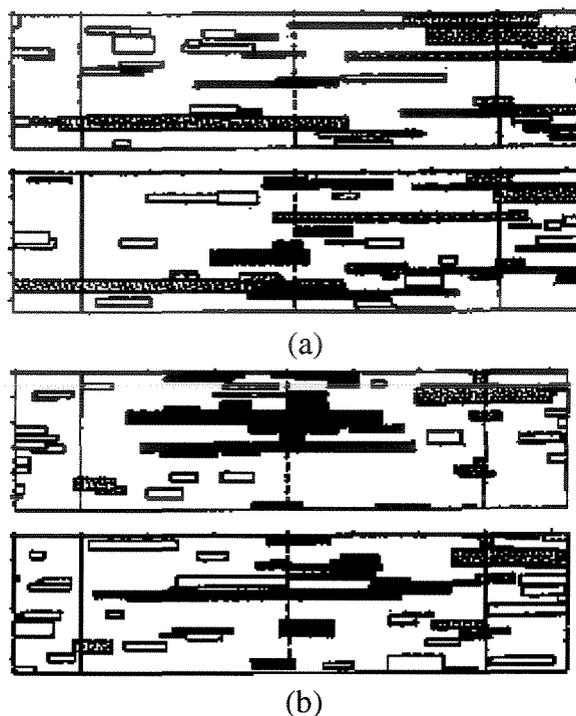


Figura 4.4 - Ajuste proposto por Chessa (1995) para o algoritmo de Haldorsen (1983). (a) simulações efetuadas com o algoritmo ajustado e (b) simulações com o algoritmo original. Observa-se que os corpos atravessados por poços (linha vertical cheia) são menores com o algoritmo original e a conectividade dos corpos entre poços (linha tracejada), assim como o tamanho dos corpos é maior que o obtido com o algoritmo ajustado (Berkhout *et al.*, 1996).

As areias dos poços são simuladas segundo uma distribuição condicional da locação de referência e da largura do corpo, sempre que um corpo é atravessado por um poço. O condicionamento aos dados baseia-se na aceitação ou rejeição do corpo simulado, dependendo dos dados dos poços, através das seguintes etapas:

- a) simula-se a coordenada x da locação de referência (x_{ref}) uniformemente distribuída no intervalo $[x_{well} - w_{máx}, x_{well}]$, $w_{máx}$ equivale à largura máxima do corpo;
- b) se a areia do poço é erodida, simula a espessura (h) condicional à espessura total dos corpos empilhados;

- c) simula uma largura (w) condicional à espessura;
- d) se $x_{ref} + w \geq x_{well}$ o corpo é aceito, caso contrário, é rejeitado.
- e) repete-se as etapas até que todas as areais de poço tenham sido geradas.

Para condicionar os dados a mais de um poço segue-se as mesmas etapas anteriores, acrescidas de duas condições adicionais: areias com a mesma espessura e coordenada y são condicionadas simulando-se um corpo que respeite simultaneamente todos os poços, com probabilidade 1 e os corpos que não respeitem todos os dados são rejeitados.

Os critérios de validação da simulação envolvem cálculo da conectividade dos corpos, proporção global de todo o intervalo simulado e comparação dos valores médios simulados com dados de campos densamente perfurados ou afloramentos, análogos.

Para o condicionamento de modelos no \mathbb{P}^d é necessário considerar o modelo booleano no \mathbb{P}^d com intensidade λ para o processo homogêneo dos germes e representar os grãos por conjuntos aleatórios compactos e convexos. O modelo booleano é considerado um processo de Poisson Ξ no espaço produto e sua medida de intensidade resulta de operações com conjuntos e funções de conjuntos. As expressões para cálculo da média μ e da distribuição H da espessura dos corpos arenosos que interceptam o poço foram desenvolvidas por Matheron (1975), para o condicionamento a dados de um poço. O condicionamento a dados de dois poços é mais complexo e corresponde a um mapeamento de um subconjunto do espaço produto, além do cálculo das probabilidades de um mesmo corpo interceptar mais de um poço (Chessa, 1995). Desta forma, é possível estimar a fração de volume p do processo de grãos do modelo booleano dado pelo processo Ξ e a intensidade do modelo.

Segundo Chessa (1995) e Berkout *et al.* (1996), o modelo booleano condicionado corresponde à união de dois modelos germe-grão independentes: um modelo descreve a distribuição espacial dos corpos entre poços e o outro, dos corpos atravessados por poços. A independência dos dois modelos baseia-se na premissa de independência do modelo booleano e a localização do germe e tamanho de um grão individual, em ambos os casos, depende das restrições impostas pelos dados de poços, as quais também condicionam os corpos entre poços. O modelo germe-grão para os corpos entre poços é obtido descartando-se os grãos que não respeitam os dados de poços, o que é independente do modelo de geração dos corpos nos poços (*thinning* independente). O estimador, usado para obter a intensidade do processo de Poisson e que apresentou os melhores resultados, baseia-se no volume esperado dos corpos

simulados no espaço tridimensional. A intensidade λ do processo de Poisson para as locações de referência são estimadas, para o caso 2D, a partir de (Chessa, 1995; Berkhout *et al.*, 1996):

$$\lambda_{\text{estim}} = - [\ln (1 - p_{\text{estim}})] / E \text{ (LT)}$$

onde:

E (LT) representa a esperança da área do corpo;

p_{estim} é um estimador da fração de volume do modelo Booleano.

Um valor para p_{estim} é obtido determinando-se a proporção vertical de corpos atravessados pelos poços.

O estimador para a intensidade do processo apresenta um viés, que pode ser minimizado usando-se uma proporção global dos corpos, nas simulações condicionadas a vários poços (Berkhout *et al.*, 1996).

A validação dos algoritmos baseados em objetos, utilizada por Chessa (1995) para simular reservatórios fluviais, baseia-se na comparação dos dados simulados com os dados de afloramento análogo e dados de um campo densamente perfurado. Compreende a análise da conectividade de corpos com baixa continuidade lateral e os critérios de comparação envolvem proporção global de corpos arenosos, conectividade dos corpos atravessados por poços e a conectividade dos corpos entre poços (analisada simulando-se um poço *infill* fictício). A simulação baseia-se da distribuição empírica de largura e espessura dos dados de afloramento, os corpos são representados por barras retangulares orientadas segundo o eixo paralelo ao plano horizontal, os canais têm comprimento infinito e a estimativa da intensidade do processo de Poisson não considera o caso no qual um corpo arenoso é atravessado por mais de um poço.

4.5.4. Modelo de Deutsch & Wang (1996)

Deutsch & Wang (1996) propuseram um novo enfoque para a simulação baseada em objetos, aplicada a canais fluviais. A metodologia sugerida compreende:

- a) transformações reversíveis de coordenadas verticais (estruturais) para coordenadas estratigráficas, o que permite modelar, de maneira independente, as diferentes seqüências estratigráficas identificadas nos dados;

- b) controle geológico na forma e tamanho dos canais;
- c) controle geológico nas variações de proporção das diferentes fácies;
- d) geometrias assimétricas (mais realistas) para os canais fluviais;
- e) melhor representatividade da superfície dos canais;
- f) modelos de porosidade e permeabilidade obedecendo às direções de maior continuidade dos canais.

Primeiramente foram identificadas e hierarquicamente classificadas as principais heterogeneidades da área estudada, tais como heterogeneidades de 1^a. ordem (definidas por superfícies cronoestratigráficas de erosão ou não-deposição, de acordo com os critérios de van Wagoner *et al.*, 1990), heterogeneidades de 2^a. ordem (delimitação de complexos de canais e depósitos de *overbank*) e heterogeneidades de 3^a. ordem (distribuição de canais individuais nos complexos de canais).

A modelagem é seqüencial e independente para cada unidade estratigráfica mais significativa. Primeiro é estabelecida a distribuição dos complexos de canais, inseridos no sistema previamente definido, em coordenadas estratigráficas. Após, são simulados os canais individuais dentro de cada complexo, através de uma transformação no sistema de coordenadas. No final, são simuladas as propriedades petrofísicas, através de algoritmos baseados em *pixel*, dentro dos limites estabelecidos para as diferentes fácies (Fig. 4.5).

As transformações nos sistemas de coordenadas incluem rotação, translação, retificação do traçado dos canais e são necessárias várias transformações, dependendo da hierarquia das heterogeneidades observadas. A construção e geometria dos canais é definida pelos parâmetros dimensões, localização e funções unidimensionais (linha central das coordenadas, largura, espessura e posição relativa da espessura máxima do canal). Um canal tridimensional é construído como um empilhamento horizontal de várias seções transversais bidimensionais ao longo da direção da coordenada y e posteriormente preenchido pelas porosidade e permeabilidade, independentemente simuladas.

A proporção de cada tipo de fácies é dada por uma curva de proporção vertical, um mapa de proporção em área e uma proporção global de referência.

Esta metodologia corresponde a um modelo híbrido, no qual as feições geológicas mais expressivas são simuladas através de modelos baseados em objetos e as propriedades petrofísicas, de modelos baseados em *pixels*.

4.5.5. Modelo de Lia, Tjelmeland & Kjellesvik (1996)

Lia, Tjelmeland & Kjellesvik (1996) desenvolveram um modelo estocástico baseado num processo de pontos marcados, para a modelagem de fácies. O modelo proposto permite a incorporação de tendências espaciais de parâmetros como tamanho, orientação, intensidade e forma dos objetos simulados. O condicionamento a dados de vários poços é efetuado através da combinação de processos de pontos marcados com campos gaussianos, para definir topo e base dos objetos individuais.

Os dados para a obtenção dos parâmetros provém de testemunhos e perfis de poços, afloramentos análogos, campos densamente perfurados similares ou dados sísmicos. Os parâmetros típicos do modelo são especificados como tendências espaciais oriundas do conhecimento geológico da área.

A parametrização de cada objeto individual envolve uma posição de referência, dimensões, orientação, tipo de fácies e sua forma geométrica associada e dois campos gaussianos para o topo e a base dos objetos. A principal propriedade do modelo caracteriza-se por duas partes: a primeira descreve um sistema de objetos independentes dados por uma distribuição de intensidade e uma distribuição de probabilidade para as dimensões, orientação, tipo de fácies e forma geométrica dos objetos. A segunda descreve uma relação biunívoca que depende da posição e fácies de cada par de objetos do modelo. Esse modelo possui também uma função indicatriz, com valores 0 e 1, que dependem da fração de volume especificada para cada uma das fácies.

A simulação é efetuada em duas etapas principais. Primeiro são simulados os objetos resultando numa localização próxima às restrições impostas pelos dados de poços, mas geralmente não obedecendo completamente a esses dados. A diferença entre os corpos simulados e as restrições dos dados são consideradas como campos gaussianos residuais dos dados observados. A segunda etapa corresponde à simulação gaussiana condicional para cada objeto, de tal forma que os dados de poços sejam respeitados.

A principal contribuição deste modelo refere-se à flexibilidade da distribuição espacial das distribuições de probabilidade para a maior parte dos parâmetros utilizados, associada a um maior grau de liberdade introduzido pelos campos gaussianos do topo e da base dos objetos (figs. 4.6 e 4.7).

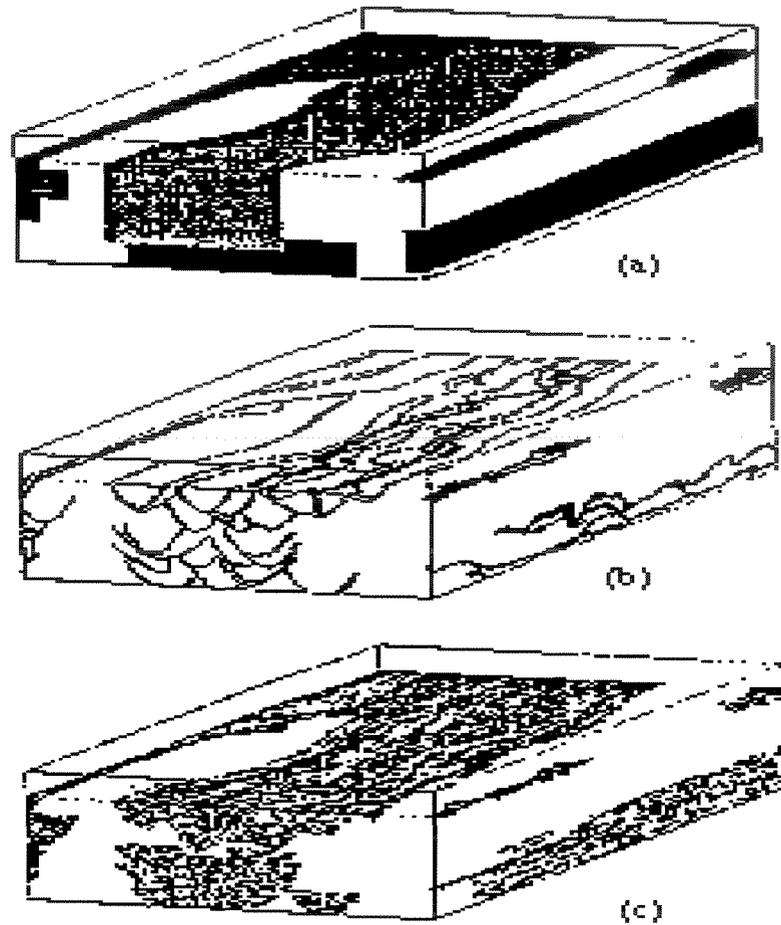


Figura 4. 5 - Exemplo de simulação seqüencial. (a) distribuição de complexos de canais; (b) distribuição de canais; (c) distribuição de porosidade. Os canais individuais são simulados nos limites estabelecidos pelos complexos de canais e a porosidade é distribuída ao longo dos canais individuais através de um método baseado em *pixels* (Deutsch & Wang, 1996).

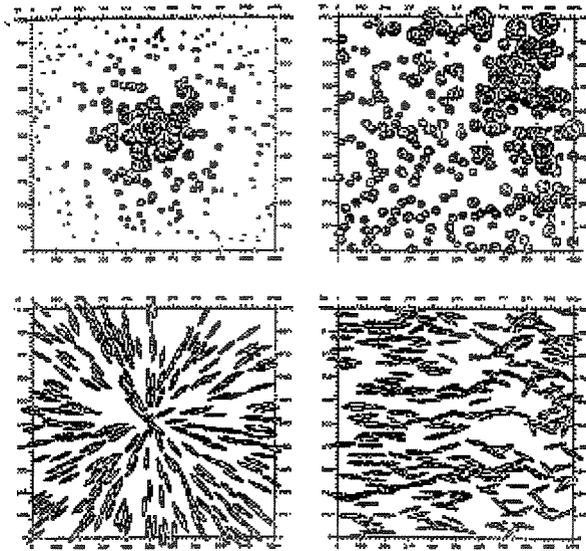


Figura 4.6 - Exemplos de realizações de modelos com funções mostrando tendências espaciais variadas para a esperança e o desvio padrão das dimensões e orientação (Lia *et al.*, 1997).

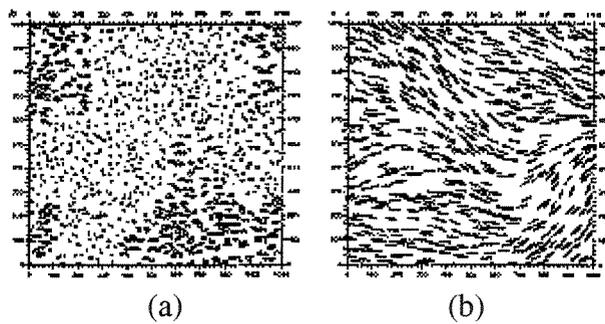


Figura 4.7 - Realizações mostrando (a) um modelo com interação interna entre fácies iguais e entre objetos representando fácies diferentes; a distância entre objetos representando fácies diferentes é maior; (b) função de interação mostrando um ângulo de rotação horizontal tal que objetos vizinhos são paralelos (Lia *et al.*, 1997).

5. Algoritmo e programa de simulação utilizado

5.1. Características gerais

O programa Petbool possui como núcleo gráfico o programa ModVis (Pesco & Tavares, 1994; Lopes *et al.*, 1995), o qual baseia-se na técnica de modelagem geométrica discreta (MGD; Tavares *et al.*, 1992).

Um objeto no espaço pode ser considerado como um conjunto de superfícies. As superfícies podem ser expressas através de equações paramétricas e implícitas. As equações paramétricas resolvem o problema da visualização e são definidas por:

$$X(u,v) = (x(u,v), y(u,v), z(u,v)), (u,v) \in A$$

onde A é um domínio planar (o espaço dos parâmetros) e $x(u,v)$, $y(u,v)$, $z(u,v)$ são funções bem comportadas.

As superfícies implícitas, que resolvem o problema da interioridade, são definidas por uma função:

$$F(x,y,z) = 0$$

onde $(x,y,z) \in D$, um domínio qualquer.

Uma superfície que possui simultaneamente a formulação paramétrica e implícita pode ser representada graficamente, pode-se calcular sua área e volume e determinar se um ponto qualquer do espaço pertence ou não a essa superfície (se é interior ou não à superfície, corresponde ao problema da interioridade).

A representação de uma superfície é constituída de dois elementos básicos: uma estrutura de dados e operadores topológicos. A técnica MGD considera que uma superfície é estruturada em componentes básicos, os quais constituem um complexo celular, cujos elementos básicos são vértices, arestas e faces (Tavares *et al.*, 1996a; Lanzarini *et al.*, 1996a; Poletto, 1996). No sistema ModVis a estrutura dos dados é a *handle-edge* (orientação pela mão direita, com o polegar apontando para cima) e os operadores topológicos são os operadores de Morse.

Na estrutura de dados *handle-edge* pode-se representar tanto superfícies fechadas quanto abertas e uma face é definida por um ciclo fechado de semi-arestas, ou seja, o ponto

inicial da primeira aresta (dado pelo vértice 1) coincide com o ponto final da última aresta e a identificação das arestas e vértices obedece à orientação dada pela regra da mão direita.

Os operadores topológicos definidos sobre a estrutura *handle-edge* são os operadores de Morse os quais, conceitualmente, são capazes de construir ou destruir superfícies de maneira eficiente. Podem criar e modificar qualquer um dos elementos básicos da estrutura: corpo, superfície, aresta, face e vértice (Tavares *et al.*, 1996a). Os sistemas de modelagem são constituídos de aspectos geométricos e da estrutura de dados associados à representação dos componentes básicos. Os operadores de Morse separam esses dois aspectos, constituindo-se numa linguagem intermediária em sistemas de modelagem e mantém sob controle a consistência topológica durante todo o processo de modelagem.

O programa ModVis possui recursos avançados de modelagem geométrica e visualização, os quais possibilitam transformações espaciais (escalonamento, rotação e translação), visualização e manipulação de objetos no espaço tridimensional, interação com objetos (cortes por planos), iluminação e sombreamento de imagens (Lanzarini *et al.*, 1996b).

5.2. Algoritmo de simulação

O algoritmo usado neste simulador foi desenvolvido por uma equipe multidisciplinar e interinstitucional, formada por geólogos e engenheiros de reservatório e matemáticos (Tavares *et al.*, 1996b). Segundo Poletto (1996), baseia-se em modelagem geométrica discreta (MGD), formulações paramétrica e implícita de superfícies, cálculo de interioridade, estratégia dos corpos compostos, perturbações aleatórias do posicionamento lateral e funções de distribuição experimentais de parâmetros.

Lanzarini *et al.* (1997) descreveram o processo estocástico como dado por:

$$\Xi \in W, W \subset \mathbb{R}^3$$

para uma distribuição condicional de N objetos geológicos num reservatório de domínio W , onde:

$$\Xi_1, \Xi_2, \dots, \Xi_N \subset W$$

e os objetos (germes), dados por:

$$G_i(x_i, y_i, z_i) \subset \Xi_i$$

têm uma distribuição aleatória.

Esses autores consideraram o processo homogêneo, condicionado aos dados de poços e cuja densidade corresponde à densidade global p ou a uma densidade intervalar ip , dada pela curva de proporção vertical de fácies.

Poletto (1996) descreveu detalhadamente o processo de geração do objeto canal, cálculo da interioridade e ajuste do objeto canal ao poço condicionante. Esse processo pode ser pensado, de maneira bastante simplificada, como constituído de três etapas: a primeira corresponde à geração do objeto canal no espaço tridimensional; a segunda, a translações do objeto gerado para “encaixá-lo” nos intervalos arenosos dados pelos poços condicionantes e a terceira etapa compreende a aceitação do corpo ou sua rejeição e conseqüente exclusão (quando o objeto gerado não satisfaz o condicionamento dado pelos poços). O posicionamento do canal em relação ao poço (isto é, qual a região da seção transversal do canal a ser atravessada pelo poço) é obtido através de dois sorteios aleatórios: um é condicionado à largura e espessura do canal e o outro estabelece se o canal está à direita ou à esquerda do poço. Desta forma, o poço pode localizar-se aleatoriamente em qualquer ponto pertencente à região central do canal, dada por 80% da largura do canal gerado e 50% da espessura do canal gerado, ou seja, a partir do centro do canal, a distância entre a margem até 10% da largura do canal, em cada uma das margens, é desconsiderada quando do posicionamento do canal e, concomitantemente, a região central tem de ter no mínimo 50% da espessura do canal gerado.

A espessura do objeto gerado pode ser maior, igual ou menor que a espessura do intervalo arenoso, obtida dos poços condicionantes. Caso a espessura do corpo gerado seja igual à espessura do intervalo arenoso, o objeto é posicionado tal que o poço localiza-se no centro do canal. Quando a espessura do intervalo arenoso é menor que a espessura do corpo gerado, mas pertence à região central do canal, o corpo pode ser posicionado à esquerda ou à direita do poço; caso contrário, o corpo é eliminado. Se a espessura do intervalo arenoso for maior que a espessura do objeto gerado, o poço atravessa o primeiro canal numa posição qualquer, dentro dos limites de largura e espessura e novos objetos são gerados, posicionados à direita ou à esquerda do poço, conforme sorteio aleatório, até que todo o intervalo arenoso esteja preenchido por canais. Caso o objeto gerado não pertença a nenhuma das situações acima mencionadas, o objeto é rejeitado e excluído, sendo gerado um novo objeto até que todos os intervalos arenosos de todos os poços sejam preenchidos por canais. Este processo é iterativo, geralmente compreendendo 10.000 iterações; se as condições favoráveis acima mencionadas não forem alcançadas após essas iterações, o corpo é rejeitado e excluído.

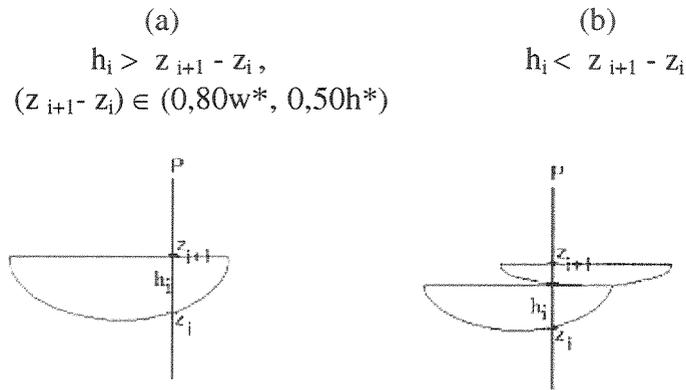


Figura 5.1 - Posicionamento do objeto canal em relação ao poço; $z_{i+1} - z_i =$ intervalo arenoso no poço, $h_i =$ espessura do corpo gerado, $w^* =$ largura do canal gerado, $h^* =$ espessura do canal gerado. (a) o objeto gerado pode estar à direita ou à esquerda, dependendo do sorteio aleatório; (b) a posição do poço em relação à largura do canal é aleatória, assim como a posição do canal em relação ao poço (se à direita ou à esquerda do poço; modificado de Poletto, 1996).

Os corpos são “encaixados” nos poços sempre a partir da base para o topo do intervalo estratigráfico simulado, seguindo a seqüência deposicional, de acordo com os dados de estratigrafia (Tavares & Lanzarini, 1996).

5.3. Adaptações efetuadas no algoritmo para a simulação de canais turbidíticos

O programa Petbool é um simulador estocástico baseado em objetos, constituído de um processo de pontos, aos quais é anexada a forma básica, representante da geometria da unidade genética simulada.

Na simulação de canais turbidíticos, o processo de pontos é definido no espaço tridimensional dado pelo intervalo estratigráfico (I_E) selecionado, é aleatoriamente gerado no início da simulação e varia conforme a semente informada. Os pontos desse processo pertencem ao eixo da curva geratriz do objeto gerado e constituem o centróide da forma a ser simulada. São descritos por:

$$G_i(x_i, y_i, z_i) \subset I_E, I_E \in P^3$$

onde x_i, y_i, z_i são as coordenadas do pontos gerados.

A forma básica é dada por:

$$\Xi_1, \Xi_2, \dots, \Xi_N \subset I_E$$

onde N corresponde ao número total de objetos contidos no intervalo simulado.

O processo estocástico é construído unindo-se os pontos G_N e as formas Ξ_N :

$$\Xi = (\Xi_1 + G_1) \cup (\Xi_2 + G_2) \cup \dots \cup (\Xi_N + G_N)$$

até que a proporção p de unidades genéticas seja atingida. A proporção p pode ser informada através da proporção global de fácies genéticas ou pode ser um número arbitrário qualquer. Quando o número informado p é menor que a proporção dada pelos poços, o processo continua até que o condicionamento dado pelos poços seja satisfeito. Quando o número informado p é maior que o condicionamento dado pelos poços, o processo continua até que p seja atingido.

Pode-se fazer uma comparação entre a simulação de canais turbidíticos através do Petbool e a simulação descrita pelo modelo germe-grão genérico (Hanisch *apud* Stoyan *et al.*, 1987), de acordo com as etapas demonstradas por Chessa (1995). Por analogia, a simulação efetuada pelo Petbool é caracterizada por um processo estocástico que pode ser associado a um modelo germe-grão genérico, dado por um processo de pontos marcados.

O processo de pontos gerados no início da simulação é relacionado a um processo de Poisson, cuja intensidade é constante, dada por uma função da proporção de fácies genética informada, constituindo os germes G_N do processo Ξ . A marca corresponde à forma previamente selecionada e pode ser planar, cunha, elipsóide, lobo, sigmóide, canal (fluvial ou turbidítico) ou duna. Os grãos Ξ_N corresponderiam a translações dessa forma no P^3 , ao longo do eixo da curva geratriz (Tavares *et al.*, 1996a), com posição espacial aleatória dada pelo processo de pontos inicial.

As marcas têm forma constante, com seções transversal e longitudinal correspondendo a uma semi-elipse, cujo eixo maior é, respectivamente, a largura ou o comprimento e o eixo menor é a espessura do canal. Têm dimensões aleatórias e são obtidas, neste trabalho, através do método da inversão, do histograma experimental da largura e da correlação entre esta com a espessura e extensão do canal.

As marcas são descritas por suas equações paramétricas e implícitas, sem explicitar a função aleatória definida no espaço métrico, correspondente ao envelope resultante da união dos objetos gerados, o que também ocorre com o modelo germe-grão generalizado (Radchenko *apud* Cressie, 1991). A reconstituição tridimensional do objeto representativo da geometria do reservatório baseia-se em operações com conjuntos, dadas por relações

topológicas, enquanto que no modelo clássico as marcas são descritas por realizações independentes de um conjunto compacto e caracterizadas pela sua distribuição M .

No modelo generalizado, as operações entre os conjuntos seguem o enfoque dado por Serra (1982) envolvendo, por exemplo, erosão e dilatação entre conjuntos. No programa utilizado, o processo estocástico é descrito através das relações estruturais que compõem as formas, ou seja, sua topologia e compreende uma estrutura de dados e operadores topológicos. A estrutura de dados (neste caso, *handle-edge*) e os operadores topológicos (neste caso, operadores de Morse) executam as operações entre os conjuntos permitindo, por exemplo, que um canal mais antigo seja erodido por um canal mais jovem. Desta forma, os objetos podem ser correlacionáveis a subconjuntos aleatórios compactos e convexos no P^3 , definidos pela região do espaço tridimensional ocupada pelos objetos gerados.

O condicionamento aos dados de poços que, no modelo clássico é dado por uma função de distribuição de probabilidades conjunta, é garantida, no programa usado, pelo cálculo da interioridade, obtido através das equações implícitas, cujo domínio inclui os intervalos identificados como reservatório, nos dados de poços previamente informados. Quando um objeto gerado possui em seu interior intervalos identificados em poços como não reservatório, esse objeto é rejeitado e um novo objeto é gerado.

O processo de aceitação-rejeição dos objetos gerados no Petbool é semelhante ao descrito por Berkout *et al.* (1996). Segundo esses autores, se o modelo germe-grão é constituído por um processo de germes dado por um processo de Poisson homogêneo e se os grãos são independentes e identicamente distribuídos, então o modelo germe-grão é um modelo booleano. Nesse caso, é possível, de acordo com o demonstrado por Chessa (1995), Berkout *et al.* (1996) e Chessa & Meester (*apud* Berkout *et al.*, 1996), dividir a geração de canais em dois modelos germe-grão independentes: o primeiro corresponde à geração dos corpos atravessados pelos poços e o segundo é relativo à geração dos corpos entre poços. Este último está relacionado a um processo germe não-homogêneo, consequência da diluição (*thinning*) do processo de pontos de Poisson, devido à rejeição dos corpos que não atendem ao condicionamento dado pelos poços e cuja função intensidade reflete esse condicionamento.

Baseando-se na formulação de Chessa (1995), Berkout *et al.* (1996) e Chessa & Meester (*apud* Berkout *et al.*, 1996) para o caso bidimensional, a intensidade do processo de Poisson é dada por:

$$\lambda_{\text{estim}} = - [\ln (1-p_{\text{estim}})] / E(LT)$$

p_{estim} = proporção areal dos corpos

Por analogia com as etapas de simulação apresentadas por esses autores, é possível descrever o algoritmo usado através de dois modelos germe-grão, já que na realização do processo são gerados primeiro os corpos que atendem ao condicionamento dos poços e, posteriormente, os corpos entre poços, resultando também numa diluição do processo de pontos, em função dos corpos rejeitados.

O condicionamento aos dados de poços no modelo germe-grão generalizado é dado pela matriz de distribuição de probabilidade conjunta, cujo cálculo é atualizado para cada corpo gerado. Isto resulta num grande incremento no tempo de simulação e muitas vezes impossibilita o condicionamento a dados de vários poços. Como no programa utilizado o condicionamento é dado pelo cálculo da interioridade e equações implícitas, é possível efetuar-se simulações condicionais a dados de muitos poços. No caso estudado, foram utilizados dados de 54 poços, envolvendo um tempo médio de trinta minutos para a simulação e reconstituição da imagem tridimensional dos objetos gerados (em média 300 objetos), o que demonstra a agilidade do processo de condicionamento empregado.

Acredita-se, no caso do programa utilizado, que o processo de germe inicial constitua um processo de Poisson homogêneo e que os corpos gerados sejam independentes e identicamente distribuídos. Entretanto, isso ainda não foi formalmente demonstrado, impossibilitando caracterizar esse programa como realizações de um modelo booleano e impedindo a estimativa da intensidade do processo resultante através da formulação matemática demonstrada e desenvolvida pelos autores anteriormente citados. Desta forma, apesar das semelhanças apontadas, não está matematicamente demonstrado a validade das comparações feitas entre o programa usado e o modelo germe-grão genérico.

5.4. Informações iniciais para a simulação

Para iniciar o processo, é necessário escolher o tipo de simulação a ser executada. As simulações podem ser não-condicionais, condicionadas a dados de poços, condicionadas à curva de proporção vertical de fácies e condicionada às superfícies de topo e base. Exceto em relação às duas primeiras, que são excludentes, pode-se combinar as operações citadas, numa

mesma simulação, como por exemplo as opções mostradas na Figura 5.2, onde a simulação realizada é condicional aos dados de poços e às superfícies de topo e base, simultaneamente.

O domínio da simulação é dado pelos planos ortogonais que passam pelos poços localizados nos extremos da área. Caso se queira simular uma área diferente dessa, deve-se informar os valores de X (máximo e mínimo) e Y (máximo e mínimo), em coordenadas UTM, da área que se deseja simular. Esta informação deve ser fornecida após as leituras do arquivo de poços, pois o domínio é automaticamente determinado quando essa leitura é efetuada. Deve-se indicar também a proporção desejada e o exagero vertical a ser usado na apresentação visual dos resultados da simulação (Fig. 5.3).

Precisa-se, também, de um conhecimento prévio das características deposicionais do reservatório, não só para selecionar topo e base do intervalo estratigráfico a ser simulado, mas também para decidir a forma do objeto a ser gerado. O programa dispõe das formas: camadas planares, cunhas, elipsóides, lobos, sigmóides, canais fluviais, canais turbidíticos e dunas. A diferença entre canais fluviais e turbidíticos está nas extremidades do objeto; nos canais fluviais, o objeto é considerado de comprimento infinito dentro do domínio simulado, nos canais turbidíticos ocorre um acunhamento do canal nas extremidades.

Após a escolha da forma do objeto, são informados os dados dos histogramas das variáveis independentes e as correlações das variáveis dependentes com as primeiras. Os parâmetros iniciais incluem largura, espessura, comprimento, direção e sinuosidade. O uso de correlações entre duas das três dimensões do objeto simulado evita distorções na forma gerada, como por exemplo canais muito rasos e largos ou muito estreitos e profundos.

Pode-se escolher também o tipo de representação desejada, do objeto gerado. Na representação *wire-frame*, por exemplo, tanto os dados dos poços quanto a superfície basal e os objetos gerados são representados pelo contorno de cada um dos complexos celulares básicos empregados na visualização dos objetos (Fig. 5.2). Na representação *flat-shading* têm-se a reprodução da superfície externa dos objetos gerados, tanto em planta quanto em corte (Fig. 5.3). Nas imagens das simulações efetuadas neste trabalho usou-se, quase que exclusivamente, a opção *flat-shading*.

O programa apresenta, inicialmente, os dados de poços inseridos em um cubo, além da projeção dos dados nos planos ortogonais laterais e basal. A posição relativa do cubo pode ser alterada conforme a escolha do usuário, através da opção *camera*, que permite escolher os ângulos de visada que se deseja e realizar operações de *zoom*. (Fig. 5.2 a 5.4).

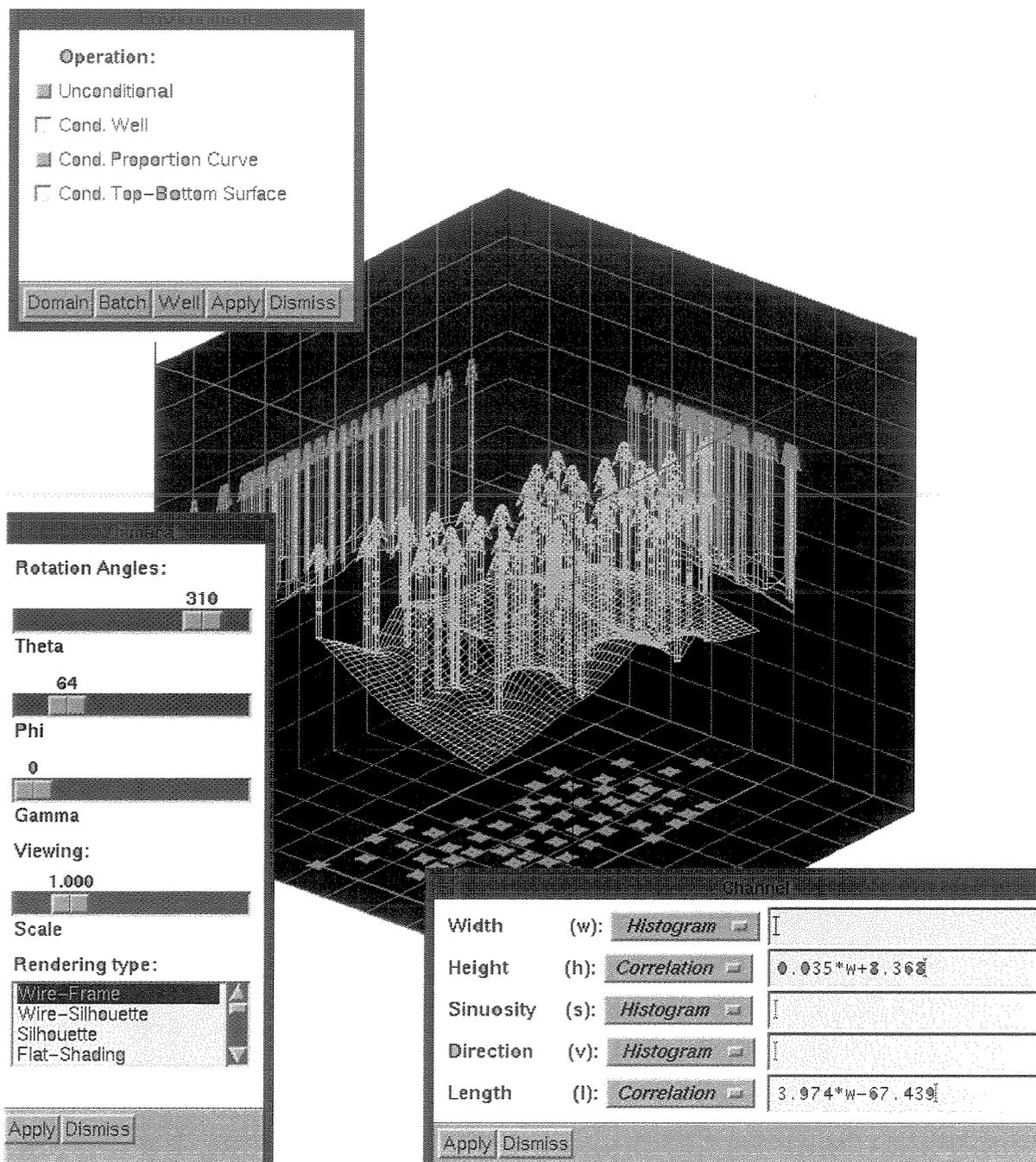


Figura 5.2 - Janelas iniciais do programa utilizado, incluindo: *Environment* - escolha do tipo de simulação; *camera* - ângulo de visada e tipo de representação do objeto simulado; *channel* - forma e parâmetros do objeto simulado; cubo com os dados de poços horizontalizados pelo topo, superfície basal do intervalo estratigráfico, projeções laterais e basal dos poços, na representação *wire-frame*.

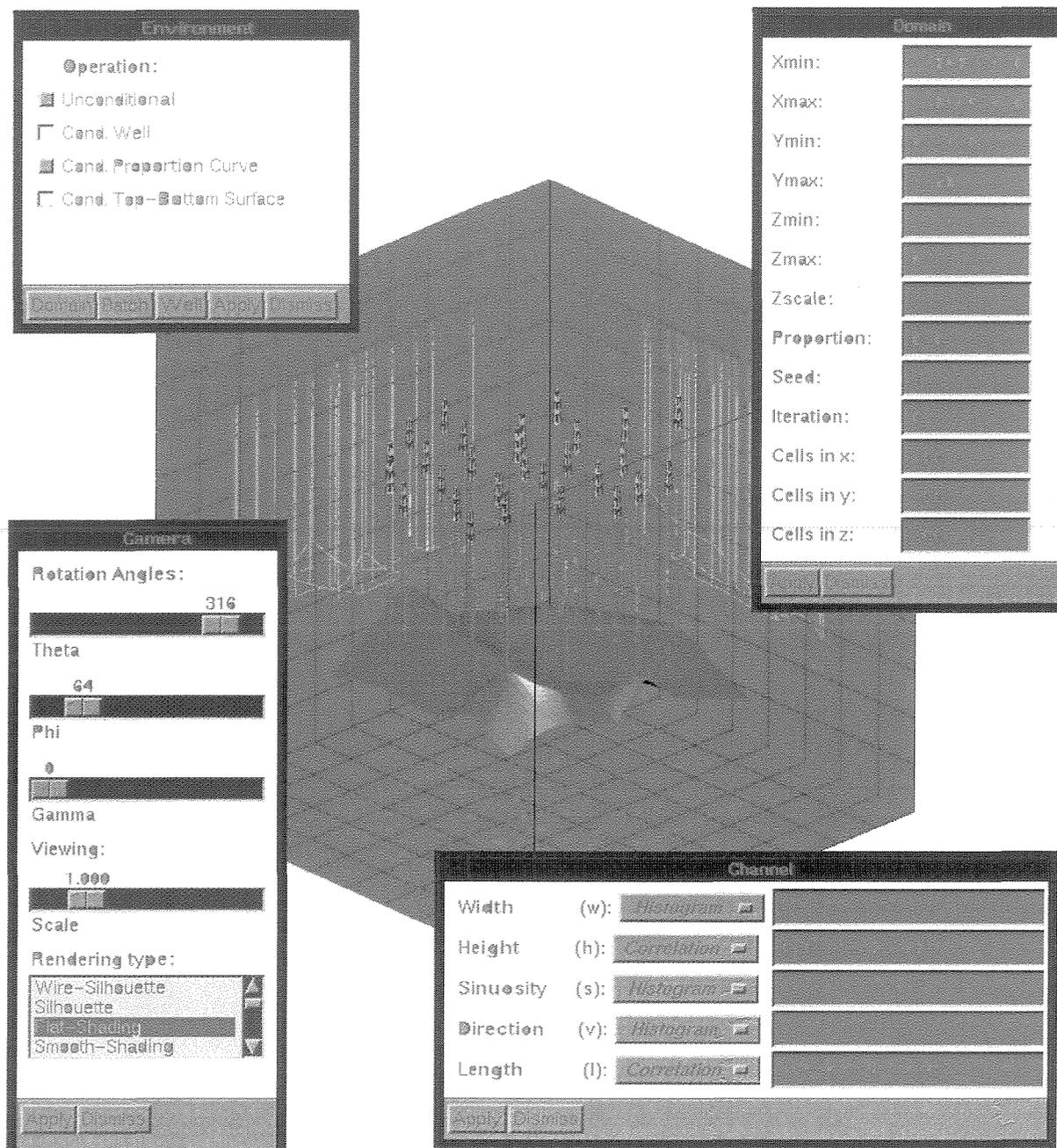


Figura 5.3 - Janelas iniciais do programa utilizado, incluindo: *Environment* - escolha do tipo de simulação; *camera* - ângulo de visada e tipo de representação do objeto simulado; *channel* - forma e parâmetros do objeto simulado; cubo com os dados de poços, superfície basal do intervalo estratigráfico, projeções laterais e basal dos poços na representação *flat-shading*; *domain* - coordenadas UTM do domínio simulado, profundidades dos poços em relação ao *datum* estratigráfico escolhido, exagero vertical, proporção inicial da fácies genética, semente, número de iterações e número de células.

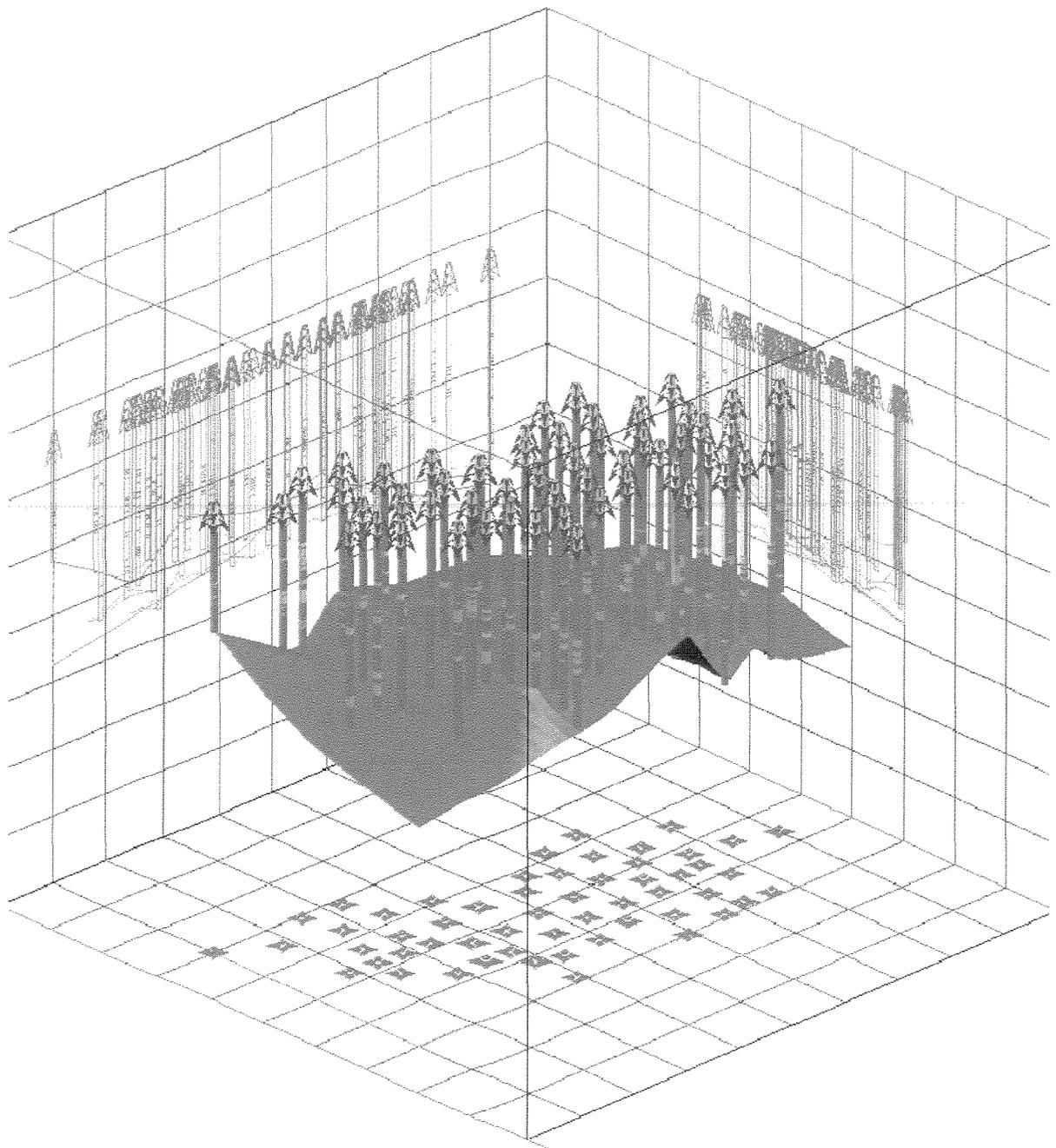


Figura 5.4 - Detalhe do cubo contendo o intervalo estratigráfico a ser simulado, as projeções laterais e basais dos poços condicionantes e a superfície basal delimitante, na representação *flat-shading*.

Para não sobrecarregar em demasia as imagens das simulações, foi usada a opção *cube out*, ou seja, o cubo não é representado nas figuras.

5.5. Curvas de proporção vertical

A curva de proporção vertical é um diagrama normalizado ou não de barras empilhadas, as quais representam a distribuição vertical das percentagens dos intervalos arenosos identificados nos poços.

Devido aos fatores inerentes ao processo deposicional, tais como taxa de aporte de sedimentos, taxa de subsidência e espaço de acomodação dos sedimentos, a espessura do intervalo estratigráfico, o qual delimita o domínio vertical da simulação, é geralmente variável. Disto resulta que o intervalo simulado compreende, além dos sedimentos depositados e preservados, hiatos erosivos e/ou não deposicionais e fácies diversas, com taxas de sedimentação diferentes, dependendo do processo deposicional envolvido. Portanto, numa área em escala de reservatório pode-se ter fácies com grandes variações de espessura e/ou variações laterais de fácies, onde a espessura amostrada corresponde a 100% do intervalo estratigráfico estudado, mas a unidade genética representativa do reservatório, por exemplo, estar ausente. Para representar essas variações e seus reflexos no cálculo de proporções, pode-se construir três tipos de curvas: estratigráfica, proporcional normalizada e proporcional não-normalizada e o *datum* escolhido, que representa uma linha isócrona, pode estar no topo, na base ou em qualquer parte interior ao intervalo estratigráfico em estudo. O cálculo da proporção global varia conforme o tipo de curva escolhida.

A curva de proporção vertical estratigráfica considera que todos os poços contêm 100% do intervalo selecionado, mas com espessura variada e, em todos os poços utilizados, esse intervalo é subdividido num mesmo número de subintervalos. O *grid* resultante é proporcional à espessura do intervalo, assim como às proporções calculadas (*grid* estratigráfico).

Para a construção da curva de proporção vertical não-normalizada, todos os poços são divididos em subintervalos com espessura constante, mas o número de subintervalos em cada poço varia conforme a espessura total do intervalo simulado, ou seja, nos poços onde a espessura do intervalo é menor, o número de subintervalos amostrados também é menor (*grid* regular). No cálculo da proporção de cada subintervalo considera-se sempre a razão entre o número de ocorrência da fácies genética e o número total de poços. Isto implica em atribuir

proporção zero para um subintervalo erodido ou não depositado, ou seja, equivale a considerar todos os poços com a mesma espessura total e naqueles em que a espessura real do intervalo estratigráfico é menor, a fácies selecionada é considerada ausente (proporção igual à 0%). Neste caso, a proporção acumulada das fácies é menor que 100% para os subintervalos basais (caso o *datum* esteja no topo do intervalo simulado) ou para os subintervalos do topo e da base (quando o *datum* está no interior do intervalo simulado).

A curva de proporção vertical normalizada baseia-se no mesmo *grid* regular da anterior, mas para o cálculo da proporção dos subintervalos, são computados apenas os poços que efetivamente atingiram aquele subintervalo. Caso apenas um dos poços atravesse esse subintervalo e apresente a fácies selecionada na base, a proporção desta para esse subintervalo é de 100% e este valor é extrapolado para toda a área simulada. A proporção acumulada é sempre 100%, mas isto implica em atribuir proporção de 100% para uma fácies erodida ou não depositada.

A construção das curvas de proporção baseia-se nos dados de poços e pode incluir todos os poços da área estudada, só os poços de uma determinada região ou poços previamente selecionados, considerados como mais representativos da distribuição de unidades genéticas. A curva de proporção é construída para o intervalo estratigráfico a ser simulado e isto reforça a necessidade de uma boa delimitação do topo e da base do intervalo, bem como da escolha de um *datum* de ocorrência regional na área em estudo. Desta forma, a curva obtida permite uma avaliação da distribuição vertical das fácies sedimentares geneticamente relacionadas.

Para a construção das diferentes curvas de proporção, pode-se utilizar ou não todos os poços da área em estudo, mas uma vez definida uma curva de proporção, ela é aplicada a todo o domínio da simulação.

Neste trabalho foram efetuadas algumas simulações condicionadas à curva de proporção vertical de unidades genéticas, não-normalizada, utilizando-se os poços da área simulada (figs. 5.5 e 5.6).

As simulações condicionadas à curva de proporção vertical de fácies necessitam de um tempo muito maior de máquina. Para contornar esse problema Poletto (1996) definiu um erro absoluto de $\pm 12\%$ no cálculo das proporções por intervalo de classe, no condicionamento dos dados.



Na simulação de canais turbidífticos, para acelerar a convergência dos dados, o erro admitido para cada intervalo de classe é de $\pm 20\%$.

5.6. Obtenção de seções e apresentação dos resultados das simulações

O programa permite que sejam efetuados cortes nas imagens geradas em qualquer posição, a partir de planos previamente definidos no espaço. Para a confecção de seções estratigráficas são feitos cortes segundo um plano vertical. Para que se possa representar mais de dois poços em uma mesma seção é preciso que os pontos dados pelas coordenadas dos poços pertençam à mesma reta, num plano horizontal (Fig. 5.7). Como nem sempre os poços de um campo possuem essa precisão de alinhamento, isto dificulta a obtenção de seções com vários poços, pois pequenas variações resultam na exclusão do poço na imagem do corte (Fig. 5.8).

Pode-se efetuar cortes selecionando-se um plano horizontal, o que permite uma visualização em planta dos objetos gerados (figs. 5.9 e 5.10). É também possível efetuar-se cortes verticais e horizontais em uma mesma imagem, o que facilita a visualização espacial dos objetos gerados (Fig. 5.11).

Durante a execução das simulações a maior parte do tempo é consumido na reconstituição gráfica dos objetos gerados. A confecção de seções é um processo demorado, em relação ao tempo gasto para a geração dos corpos, porque requer, além da apresentação da imagem final da simulação, a imagem da interseção de todos os corpos gerados com o plano vertical, o que é um processo graficamente lento. Esse problema, para ser minimizado, não depende diretamente do programa, mas sim do equipamento utilizado.

A apresentação dos resultados é feita através das imagens das simulações efetuadas. Pode-se obter informações sobre o número de corpos gerados, volume conectado e dados de alguns parâmetros dos corpos gerados, consultando-se os arquivos criados durante a simulação.

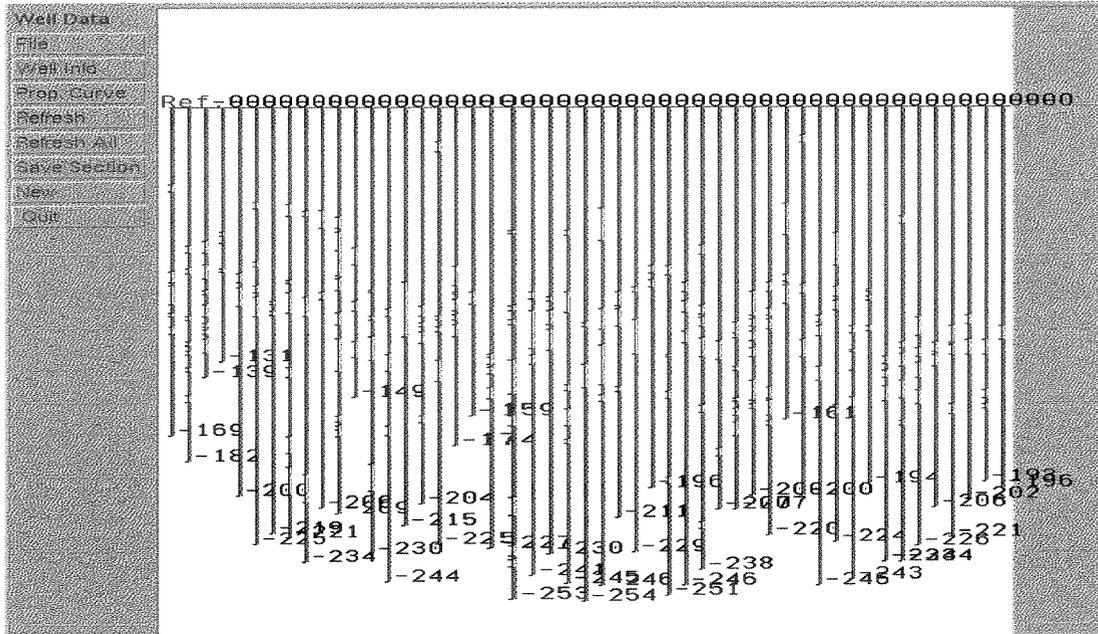


Figura 5.5 – Representação dos dados de poços utilizados na construção da curva de proporção vertical. Intervalos arenosos em amarelo.

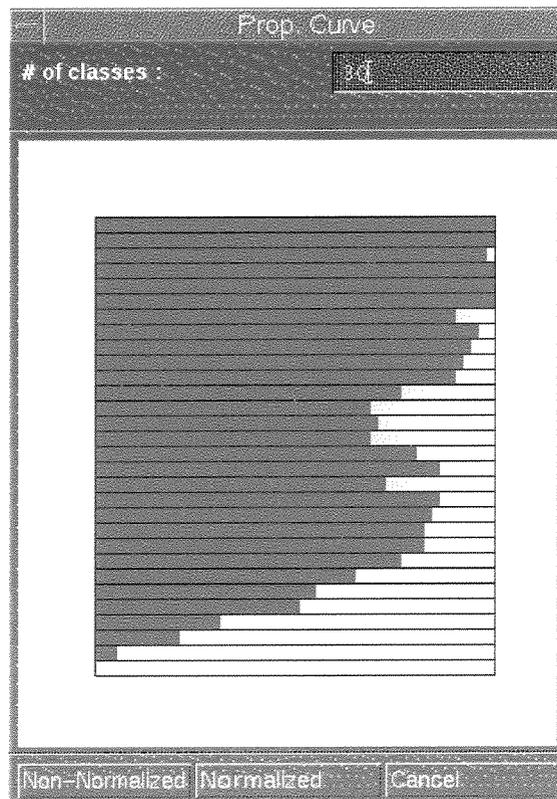


Figura 5.6 - Curva de proporção vertical não-normalizada da unidade genética canal (em amarelo).

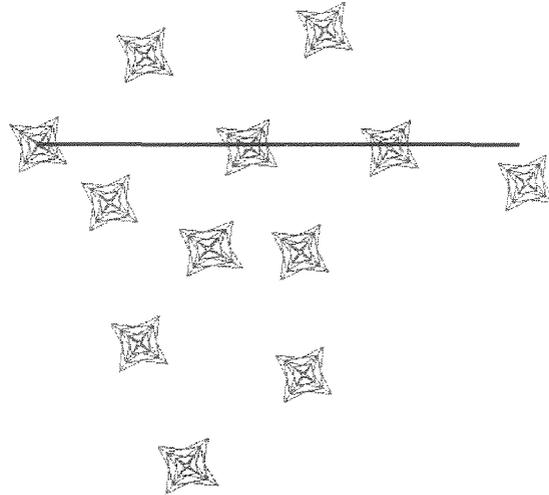


Figura 5.7 - Representação do traço do plano vertical que corta os objetos gerados (linha horizontal), originando as seções. O centro da figura que representa o poço, à direita, não está contido na linha que identifica o plano de corte, por isso esse poço não será representado na seção (Fig. 5.8).



Figura 5.8 - Representação gráfica dos corpos gerados contidos no plano vertical que passa pelos poços à esquerda e ao centro da linha horizontal da figura anterior. Como esta figura foi gerada com doze poços condicionantes, o corte efetuado mostra corpos atravessados por outros poços, que não pertencem ao plano vertical escolhido.

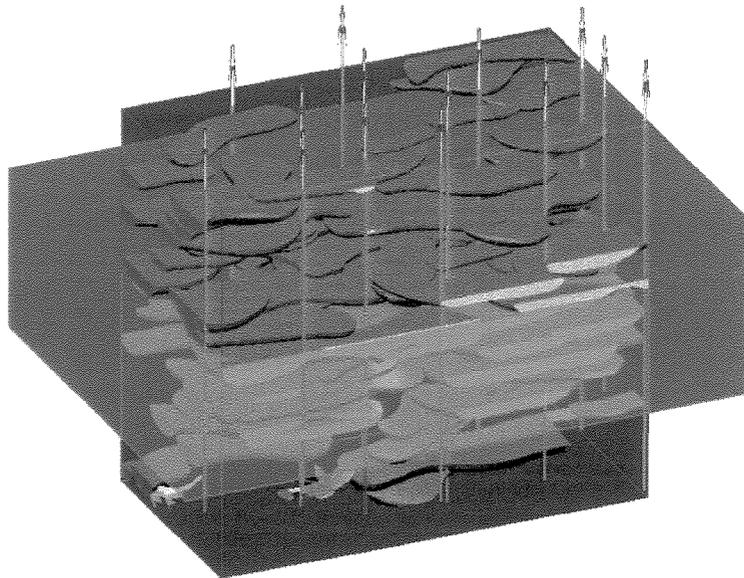


Figura 5.9 – Representação gráfica do plano horizontal selecionado para a visualização em planta dos objetos gerados.

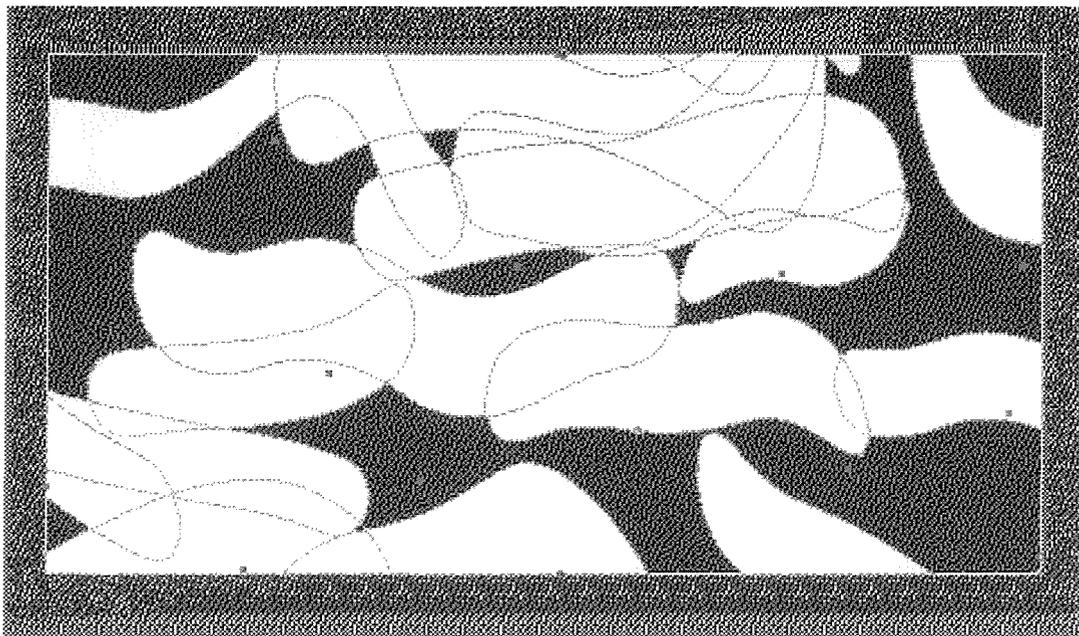


Figura 5.10 – Representação em planta dos objetos gerados que atravessam o plano horizontal selecionado. Os pontos em verde representam os poços onde não ocorrem canais e os pontos em marrom os poços onde ocorrem os canais.

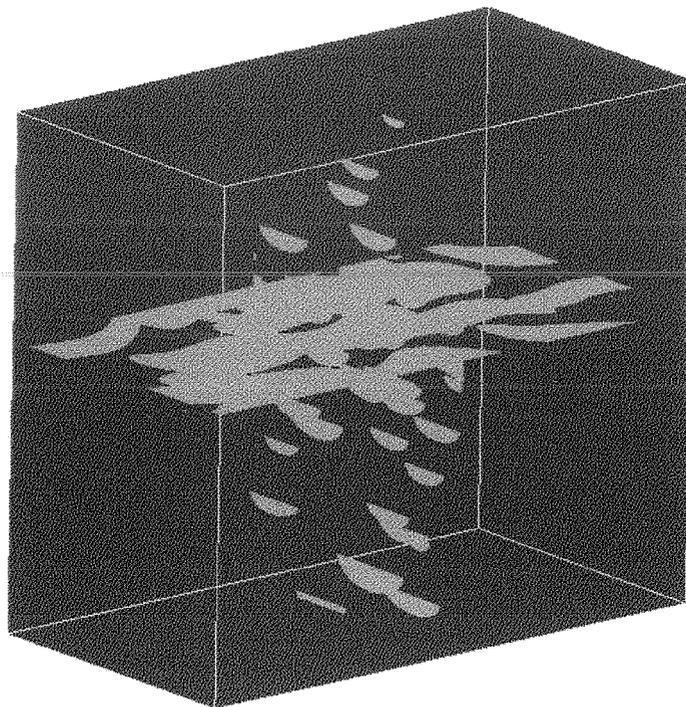


Figura 5.11 – Representação gráfica de cortes verticais e horizontais simultâneos.

6. Levantamento e tratamento estatístico dos dados

6.1. Geologia regional

A costa leste brasileira engloba várias bacias sedimentares, típicas de margem passiva (McKenzie, 1978), as quais foram iniciadas como *rift* (como por exemplo Sergipe-Alagoas, Bahia Sul, Espírito Santo, Campos, Santos e Pelotas; Chang *et al.*, 1992) e apresentam uma evolução tectono-sedimentar associada à separação do continente Gondwano, no Neocomiano. Os sedimentos depositados (do Jurássico Superior ao Recente) podem ser agrupados em seis megasseqüências: continental pré-*rift*, continental *rift*, transicional evaporítica, plataforma carbonática rasa, marinha transgressiva e marinha regressiva (Bruhn, 1993) e atingem até 10 km de espessura (Fig. 6.1).

Apresentam intensa atividade tectônica contemporânea à sedimentação (Ponte & Asmus, 1978) e extensos *canyons* submarinos, os quais atingem até 25 km de largura e 100 km de comprimento, escavados ao longo da margem leste brasileira, após o Albiano Médio (Bruhn, 1993). Essas grandes feições erosivas são preenchidas por sedimentos marinhos de água profunda, em sua maioria do Maastrichtiano Inferior, Paleoceno Superior e Eoceno Inferior, com até 1000 m de espessura.

A área estudada localiza-se nas bacias do Espírito Santo e Mucuri, geologicamente de difícil divisão e abrangem quase 218 000 km². Em função do estilo tectônico atuante quando da sua deposição, as rochas sedimentares e vulcânicas da Bacia do Espírito Santo podem ser divididas em duas fases: *rift* e margem passiva, separadas por uma fase de transição (Vieira *et al.*, 1994). A seqüência *rift* apresenta rápida variação de fácies, com conglomerados junto às falhas ativas e pelitos distais. A transição para a sedimentação marinha engloba os sedimentos neo-aptianos e eoalbianos. No Neo-albiano começa a sedimentação marinha, relacionada, primeiramente, a sedimentos clásticos e carbonáticos, culminando com sedimentos marinhos profundos correspondentes, litoestratigraficamente, à Formação Urucutuca.

A partir do final do Eoceno passam a predominar sistemas progradantes, quando o aporte de sedimentos na Bacia do Espírito Santo suplantou os efeitos da subsidência tectônica e da elevação eustática de longa duração do nível do mar, originando-se a megasseqüência marinha regressiva (Bruhn, 1993).

Os reservatórios estudados neste trabalho compreendem depósitos turbidíticos da Formação Urucutuca, cuja idade abrange desde o Cenomaniano até o Eoceno Superior em terra, sendo mais nova na plataforma continental. Essa formação foi inicialmente definida na Bacia do Rio Almada (Carvalho, 1965) e engloba folhelho cinza-escuro com intercalações de conglomerado, calcário e arenito na região emersa, predominando folhelho cinza-escuro a preto, arenito acinzentado fino a conglomerático, conglomerado cinza claro e calcilitito cinza na plataforma continental, que corresponde às porções mais distais.

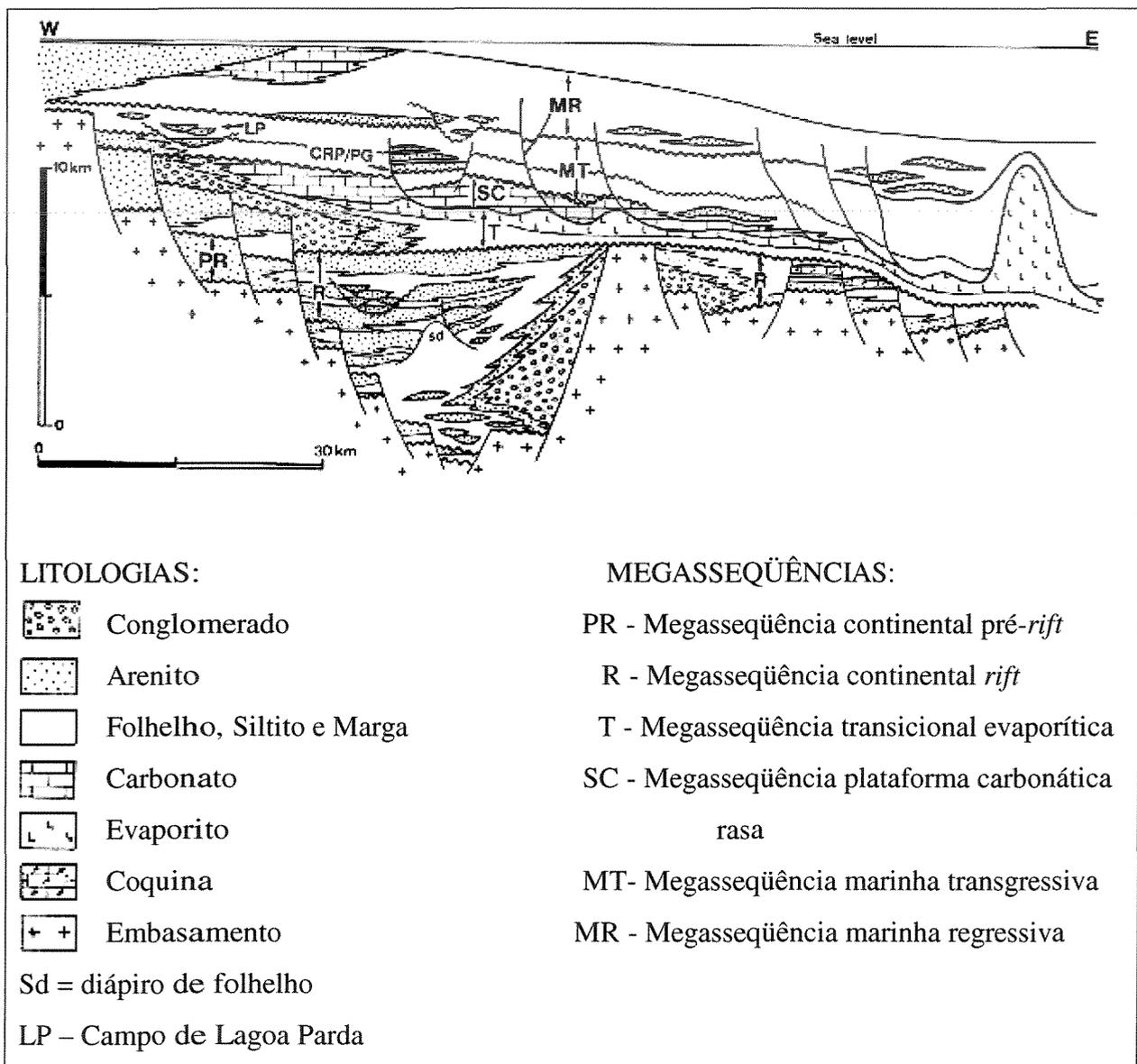


Figura 6.1 - Seção geológica generalizada das bacias da margem leste brasileira (Bruhn & Walker, 1997).

Os depósitos turbidíticos da Formação Urucutuca apresentam características pouco exploradas na literatura, principalmente os sedimentos de granulometria grossa, associados a complexos canais-*levee* e preenchimento de *canyon*. Essa sedimentação turbidítica, representativa da margem leste brasileira, está relacionada a flutuações do nível do mar, a modificações tectônicas e variações no aporte de sedimentos (Bruhn, 1993).

Foram identificados seis principais *canyons* submarinos preenchidos por sedimentos da Formação Urucutuca (Ponte & Asmus, 1978; Bruhn & Moraes, 1989), incluindo Almada, Regência e Fazenda Cedro, no qual localiza-se a área estudada (Fig. 6.2).

O *Canyon* de Almada foi identificado pela primeira vez por Ferradaes & Souza (1972), a partir do mapeamento da superfície discordante pré-Urucutuca, na porção marítima da Bacia de Almada, a qual situa-se na margem continental do estado da Bahia. Apresenta uma porção emersa com 200 km² de extensão, onde afloram turbiditos areno-conglomeráticos e folhelhos ricos em foraminíferos planctônicos do Campaniano/Maastrichtiano. Na área submersa, essa grande feição erosional pós-cenomaniana é preenchida também por sedimentos do Terciário, pertencentes à Formação Urucutuca. Foi escavado e preenchido durante um período de longa duração de mar relativamente alto, relacionado à passagem Campaniano/Maastrichtiano. Entretanto, está associado a períodos de curta duração de rebaixamento do nível do mar, identificados no início da escavação do *canyon* (Bruhn & Moraes, 1989). Segundo esses autores, a declividade acentuada favoreceu a implantação de complexos de canais com baixa sinuosidade e, provavelmente, inibiu o desenvolvimento de lobos deposicionais. A granulometria muito grossa dos turbiditos indica que a cabeça do *canyon* situava-se próxima à linha de costa, facilitando a captação desses sedimentos. No interior do *canyon*, a ocorrência de canais foi estimulada pelo elevado gradiente do seu talvegue e pela ação erosiva e deposicional de correntes de turbidez de alta densidade. Com a elevação progressiva do nível do mar e redução no aporte de sedimentos, o preenchimento final do *canyon* é feito essencialmente por depósitos pelíticos.

O *Canyon* de Regência foi escavado após o Albiano Médio. A sedimentação foi controlada por diversos fatores de grande magnitude, tais como grandes flutuações do nível do mar, variações climáticas e área-fonte, tectonismo e aporte de sedimentos (Bruhn, 1993). A evolução deposicional e ocorrência de eventos erosivos é semelhante para esses *canyons*, como é o esperado, devido à sua proximidade espacial e temporal. A sedimentação em ambos os casos teve início no Turoniano Superior/Santoniano, mas parece ter sido mais expressiva a partir do Maastrichtiano Inferior no *Canyon* de Regência, enquanto que

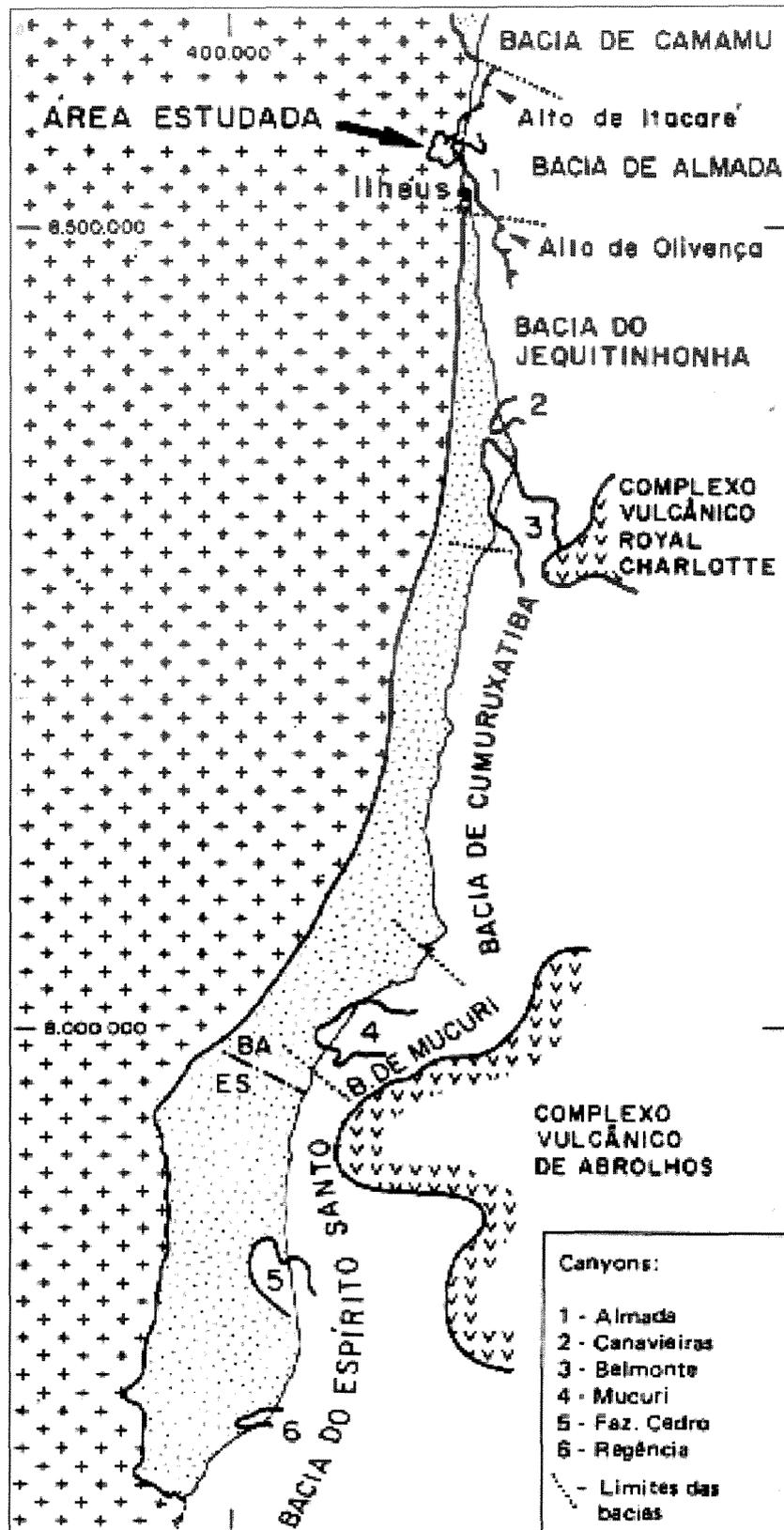


Figura 6.2 – Mapa de localização da Bacia de Almada e principais *canyons* preenchidos por sedimentos da Formação Urucutuca (Bruhn & Moraes, 1989).

no *Canyon* de Fazenda Cedro espessos pacotes sedimentares são encontrados a partir do Campaniano. As espessuras apresentadas pelos sedimentos sugere que, enquanto a sedimentação era intensa em uma das áreas, na outra área o aporte de sedimentos era pouco expressivo. Isto também foi observado por Antunes (1984) para os sedimentos do Eoceno Inferior/Médio, os quais são bastante espessos no *Canyon* de Regência, correspondendo à principal fase de assoreamento deste *canyon*, enquanto que no *Canyon* de Almada a sedimentação desse período é inexpressiva.

O *Canyon* de Fazenda Cedro localiza-se cerca de 40 km ao norte do *Canyon* de Regência, numa zona de alinhamentos estruturais N-S, sugerindo um forte controle tectônico na sua gênese e evolução. O assoreamento do *canyon* teve início no Turoniano Superior/Santoniano, com sedimentos da Formação Urucutuca, associado a vários eventos erosivos, responsáveis pela erosão geralmente parcial e localizada dos sedimentos que o preenchem (Antunes, 1984). No Eoceno Superior, o *Canyon* de Fazenda Cedro encontrava-se totalmente preenchido.

A correlação com eventos globais, para ambas as áreas, conforme as observações efetuadas por Antunes (1984, 1990) e Bruhn (1993), em termos gerais é possível, mas difícil por tratar-se da correlação de eventos de 3ª ordem, não só devido à atribuição de diferentes idades para as mesmas biozonas, o que depende do autor estudado, mas também ao intervalo de tempo envolvido nesses eventos, às vezes menor do que o erro resultante do método bioestratigráfico utilizado para a datação.

Os turbiditos de Lagoa Parda, encontrados no *Canyon* de Regência, são do Eoceno Inferior, enquanto que os turbiditos analisados neste trabalho, situados próximo ao *Canyon* de Fazenda Cedro, pertencem ao Campaniano Superior/ Maastrichtiano Inferior.

6.2. Geologia de detalhe das áreas análogas e do campo estudado

6.2.1. Afloramentos da Bacia de Almada

Os sedimentos aflorantes da Bacia de Almada compreendem parte da seção de preenchimento do *Canyon* de Almada. As condições climáticas da região favoreceram uma erosão diferencial dos sedimentos, observando-se feições topográficas positivas associadas aos depósitos de clásticos grossos, ressaltados pela planície quase ao nível do mar, associada à erosão dos folhelhos. Esta situação facilitou o mapeamento, a partir de fotografias aéreas

em escala 1:25.000 (GEOFOTO-CEPLAC, Obra 205, 1965), dos arenitos e conglomerados canalizados (Bruhn & Moraes, 1989). Em planta, os clásticos grossos constituem corpos alongados com orientações variadas e grande descontinuidade lateral, resultando em cristas alongadas de baixa sinuosidade. O conjunto de canais ocupa uma faixa alongada, com 1,5 km de largura e orientação S 65-75° E, em continuidade e com a mesma orientação de um dos talwegues principais do *Canyon* de Almada.

Os depósitos constituem-se essencialmente de duas associações de fácies: de canal, onde predominam sedimentos mais grossos e associação de fácies intercanal, incluindo diques marginais, com predominância de sedimentos finos (Bruhn & Moraes, 1989). A associação de fácies de canal engloba conglomerado seixoso maciço ou intraclástico e arenito grosso, maciço ou estratificado. A associação de fácies intercanal compreende as fácies arenito com seqüência de Bouma, sedimentos de escorregamento, *slumps* e zonas de diques de areia, diamictito e folhelho.

Foram observadas seqüências em granodecrescência ascendente, resultantes do empilhamento de fácies conglomeráticas e arenito grosso maciço sobrepostas por arenito grosso estratificado. Comumente formam lentes descontínuas, truncadas por cortes erosivos.

Nos depósitos intercanal predominam espessas camadas de folhelhos, geralmente bioturbados, também encontrados em níveis delgados intercalados com arenitos no interior de canais e em diques marginais.

Esses turbiditos areno-conglomeráticos foram transportados e depositados em canais escavados num substrato pelítico por correntes de turbidez de alta densidade. Os canais são de baixa sinuosidade (entre 1,1 e 1,3) e talvegue assimétrico, provavelmente resultante dos efeitos da força de Coriolis (Bruhn & Moraes, 1989). O preenchimento dos canais turbidíticos é, principalmente, por agradiação vertical e os sedimentos foram depositados a partir da carga suspensa das correntes de turbidez de alta densidade, rapidamente desaceleradas, resultando em depósitos bastante descontínuos.

As seções verticais descritas por Bruhn & Moraes (1989) mostram que as cristas arenosas englobam também sedimentos finos da fácies intercanal e que a fácies de canal pode ser constituída de depósitos de canais centimétricos a métricos, amalgamados ou separados entre si por depósitos de intercanal (Fig. 6.3a). Desta forma, nas medições efetuadas nas cristas topograficamente ressaltadas, esse conjunto litológico foi considerado

como depósito de canal e as medidas assim obtidas foram utilizadas nas correlações efetuadas para a simulação estocástica.

Para a obtenção de parâmetros de simulação, os canais turbidíticos da Bacia de Almada foram remapeados. A metodologia utilizada na identificação dos canais baseia-se nos seguintes critérios:

- (1) a partir de imagens do recente e de dados de literatura (C.H.L. Bruhn, informações verbais) os canais turbidíticos preenchidos por sedimentos grossos normalmente apresentam baixa sinuosidade, portanto margens muito entrecortadas foram consideradas como consequência de eventos erosivos recentes e tentou-se reconstituir as margens esperadas para os canais;
- (2) os canais foram individualizados considerando-se suas características geométricas, ou seja, largura, extensão, sinuosidade e direção; este critério foi necessário para evitar medidas em locais onde os canais apresentavam bifurcações ou dimensões anômalas, sugerindo uma subdivisão da corrente e/ou empilhamento lateral;
- (3) as medidas de largura correspondem a valores médios, obtidos através da análise visual do comportamento do canal;
- (4) em relação às medidas de direção e extensão, procurou-se identificar as tendências gerais dos corpos e efetuar medições que refletissem essa tendência;
- (5) procurou-se medir apenas as feições maiores associadas a depósitos de canais, para dar consistência aos resultados das simulações.

Foram identificados vinte e três canais principais (Fig. 6.3b).

(a) Seção vertical do afloramento 4 -

Bacia de Almada

Litologias:

-  Conglomerados e arenitos conglomeráticos maciços
-  Conglomerados intraformacionais
-  Arenitos maciços
-  Arenitos com estratificação horizontal
-  Arenitos com estratificação cruzada de médio porte
-  Arenitos com ripples
-  Folhelhos
-  Folhelhos bioturbados
-  Folhelhos com diques de areia
-  Bioturbação em arenitos
-  Stumps
-  Diamictitos

(Bruhn & Moraes, 1989)

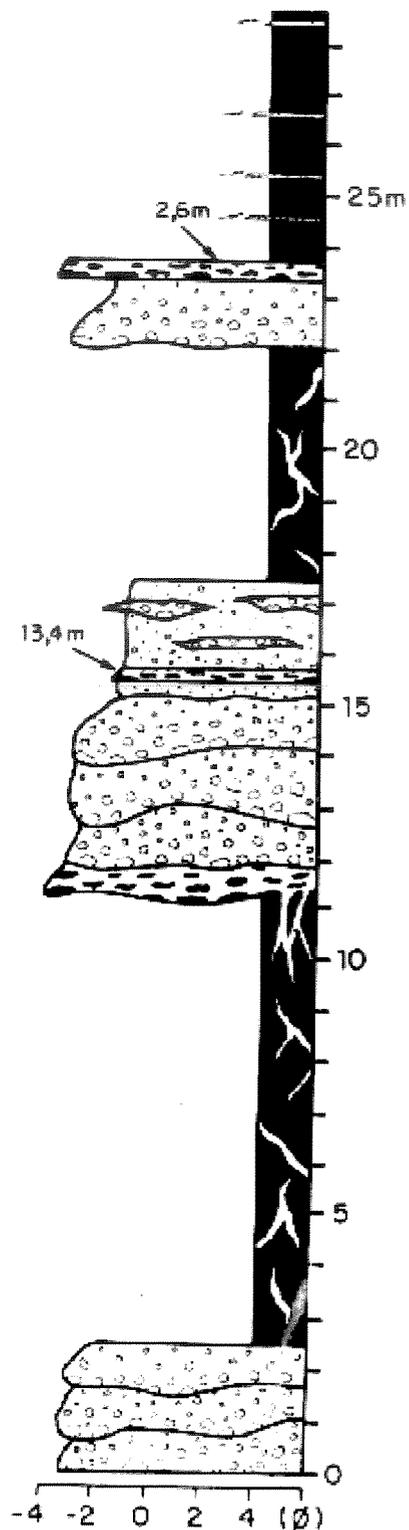


Figura 6.3 – Afloramentos da Bacia de Almada. (a) Perfil tipo (Bruhn & Moraes, 1989); (b) Mapa dos canais reinterpretados.

(b) Canais reinterpretados dos afloramentos da Bacia de Almada.

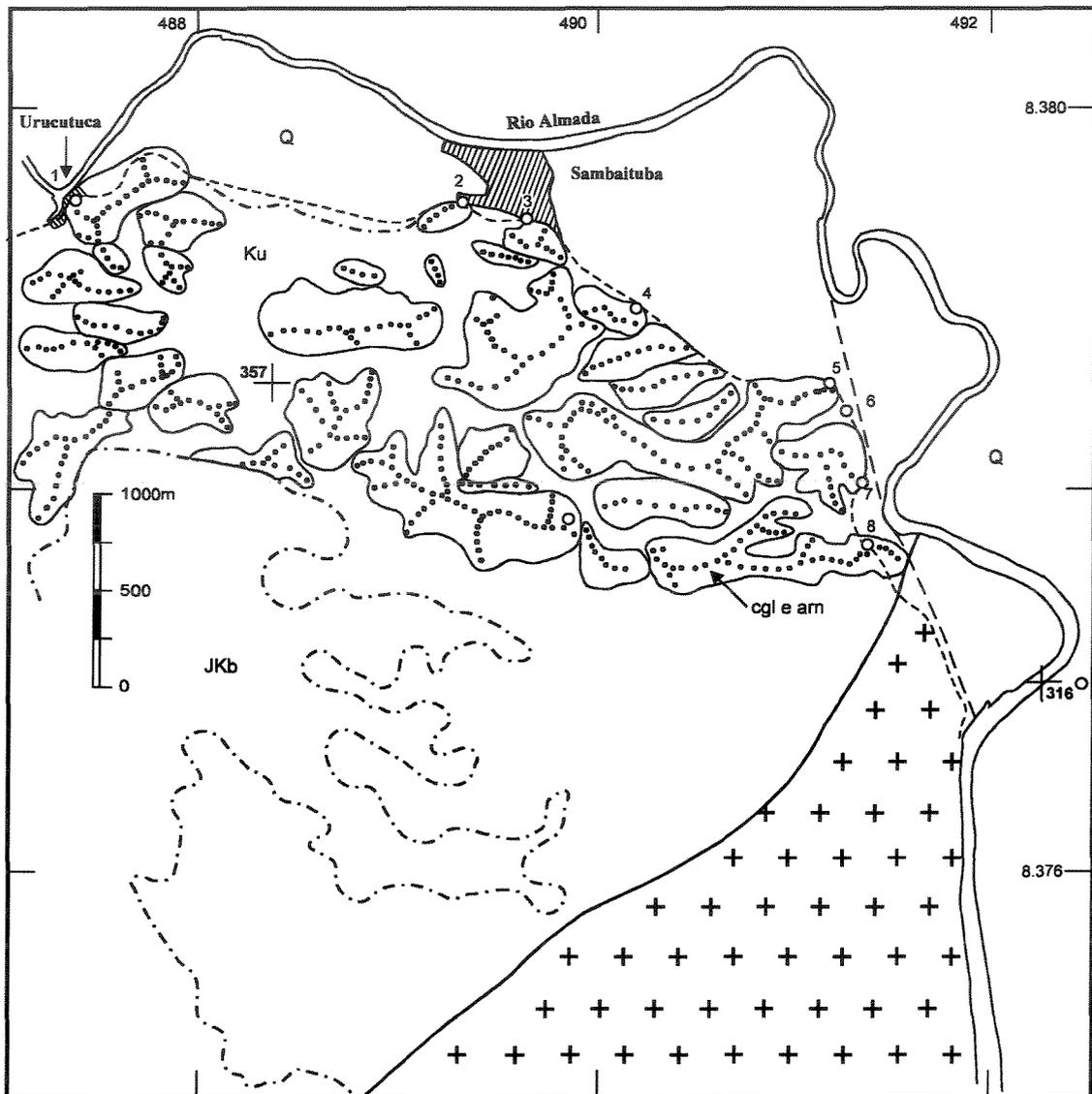


Figura 6.3 – (continuação).

6.2.2. Campo de Lagoa Parda

Os dados relativos ao Campo de Lagoa Parda, mencionados neste trabalho, foram levantados, analisados e interpretados por Bruhn (1993).

O Campo de Lagoa Parda, localizado no *Canyon* de Regência, ocupa uma área aproximada de 7 km², onde foram perfurados 70 poços com espaçamento médio de 200-250m. Os reservatórios correspondem a turbiditos areno-conglomeráticos, pertencentes a megasequência marinha transgressiva. Estão contidos num espesso pacote sedimentar constituído de turbiditos grossos do Eoceno Inferior, depositados no *Canyon* de Regência.

A imaturidade textural e a composição dos turbiditos de Lagoa Parda indicam que os sedimentos são oriundos de áreas próximas, rapidamente soerguidas, com pouca ou nenhuma abrasão por transporte ou retrabalhamento, sugerindo que deltas e/ou *fan*-deltas carregavam sedimentos para uma plataforma falhada, relativamente estreita, resultando em depósitos turbidíticos bastante proximais, conforme deduz-se pela presença de fácies muito grossas. Esse sistema turbidítico caracteriza-se por canais profundamente escavados, preenchidos em grande parte por conglomerados ricos em matacões, calhaus e seixos. A parte proximal do *canyon* provavelmente foi escavada na plataforma, o que possibilitou a captura de sedimentos grossos, os quais teriam sido introduzidos diretamente no *canyon*, a partir de deltas e/ou *fan*-deltas, conforme indica a alta proporção de restos vegetais.

A partir de dados de perfis radioativos e elétricos e dados de sete testemunhos, foram identificadas quatro fácies principais, com base na análise da textura, estruturas sedimentares, espessura das camadas e bioturbação. A Fácies 1 compreende conglomerado e arenito muito grosso a grosso, geralmente distribuídos num padrão de granulometria decrescente para o topo; é associada a turbiditos depositados por correntes de turbidez de alta densidade e ocorrem preenchendo depósitos de canais, conforme a correlação de detalhe efetuada em subsuperfície.

A Fácies 2 consiste de arenito formando camadas gradacionais, intercaladas com finas camadas de lamitos bioturbados; as camadas de arenito apresentam um contato basal brusco e gradação normal. A Fácies 2 apresenta-se em pacotes empilhados geralmente com 5 a 25 m de espessura e distingue-se da Fácies 1 pela ausência de clastos exogênicos e pela presença abundante de arenito estratificado. É comum a presença de intraclastos lamosos, localmente ocorrendo camadas com arenitos intraclásticos, maciços ou conglomerados. Corresponde a depósitos de preenchimento de canais transportados por correntes de densidade mais baixa

que os anteriores, devido à sua granulometria mais fina e à presença de estratificação cruzada.

A Fácies 3, intensamente bioturbada, compreende folhelho cinza escuro intercalado com arenito fino a muito fino. A Fácies 4 consiste de folhelho cinza escuro com poucas intercalações de finas camadas de arenito muito fino e corresponde aos depósitos de preenchimento do *Canyon* de Regência, às vezes erodidos pelas correntes de turbidez.

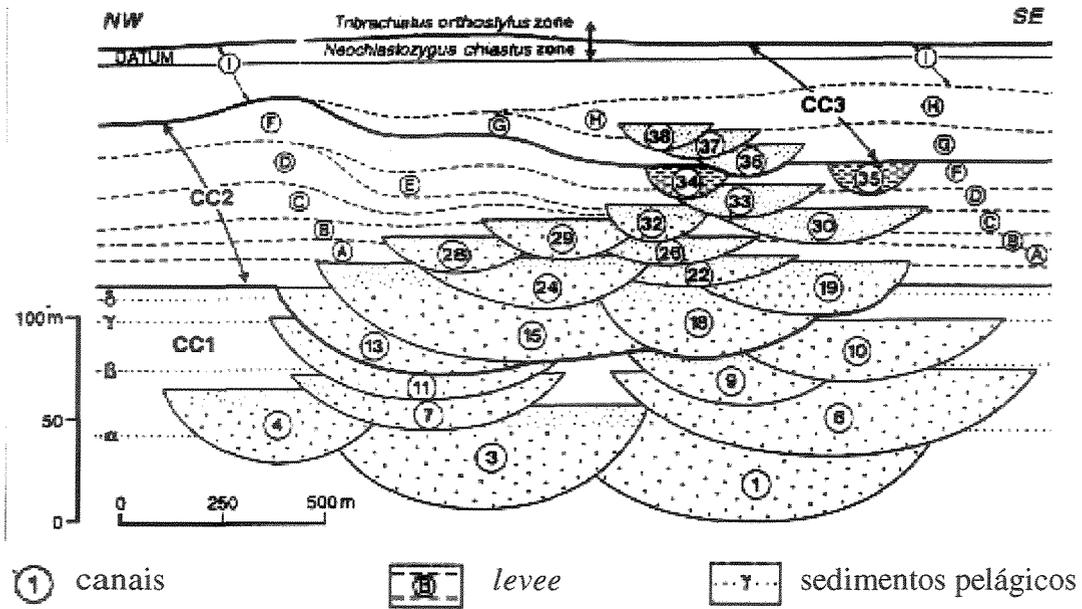
Nesse campo, foram mapeados 38 canais utilizando-se dos seguintes critérios: (1) mudança abrupta de fácies, identificada a partir do padrão de curvas de perfis e sua correlação com a descrição dos testemunhos; (2) diferente posição estratigráfica dos sedimentos do topo: como os canais apresentam topos praticamente horizontais, isto sugere que os efeitos de compactação diferencial foram mínimos e, desta forma, a posição estratigráfica dos sedimentos do topo dos canais pode ser utilizada como critério para a individualização dos canais; (3) orientação dos corpos arenosos, identificada a partir de mapas de isópaca de arenito, os quais foram efetuados para os diferentes canais. Esses canais podem ser agrupados em três complexos de canais, termo proposto pelo autor para descrever complexos que podem ou não estar associados a desenvolvimento de *levees* (Fig. 6.4).

Os complexos de canais descritos apresentam a tendência geral de tornarem-se mais estreitos, menos espessos e de granulometria mais fina para o topo. O complexo de canais CC1 engloba os primeiros doze canais identificados, da base para o topo; compreende os canais mais espessos (33 m em média) e mais largos (690 m, em média) do Campo de Lagoa Parda; no preenchimento dos canais predomina a Fácies 1.

O Complexo de canais CC2 compreende 23 depósitos de preenchimento de canais com uma espessura média de 22 m e uma largura média de 390 m. É geralmente separado do complexo anterior por sedimentos finos com até 48 m de espessura e construído, quase que exclusivamente, por canais originados de pequenos vales tributários na margem norte do *Canyon* de Regência; difere do anterior por apresentar desenvolvimento de *levees*, os quais são assimétricos e proeminentes durante e após o preenchimento dos canais.

O Complexo CC3 compreende três depósitos de preenchimento de canais, é o mais estreito e menos espesso dos depósitos identificados. A espessura média é de 14 m e a largura média é de 260 m. Estão geralmente separados do anterior por sedimentos finos com espessura de até 24 m. Aparentemente, este complexo foi construído por correntes de turbidez provenientes de tributários menores localizados na margem norte do *Canyon*.

(a) COMPLEXOS DE CANAIS DE LAGOA PARDA



(b) Padrão de perfis do Sistema Turbidítico de Lagoa Parada

Padrão típico dos perfis
raios gama (à direita) e
resistividade (à esquerda)

CC1-CC3 – Complexos de
Canais

(Bruhn & Walker, 1997)

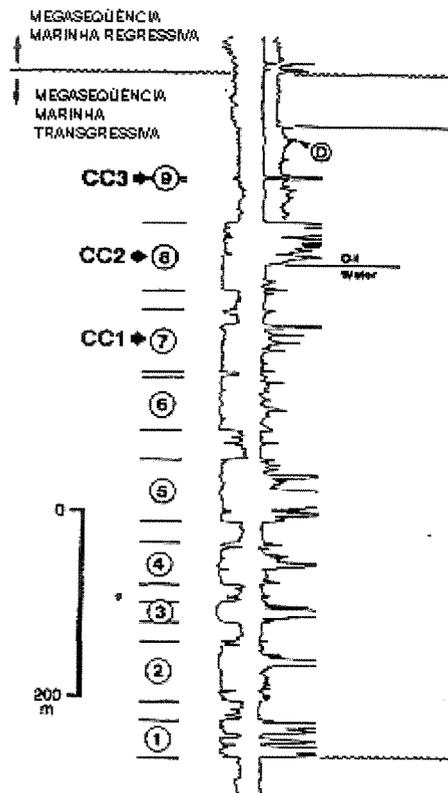


Figura 6.4 – (a) Seção transversal esquemática do Sistema Turbidítico de Lagoa Parada; (b) perfil tipo dos canais e complexos de canais identificados.

O empilhamento desses três complexos de canais, com depósitos de preenchimento de canais mais estreitos, menos espessos e de granulometria mais fina para o topo parece refletir uma diminuição na atividade tectônica e conseqüente redução no aporte de sedimentos, além das variações eustáticas do nível do mar.

Os turbiditos de Lagoa Parda compreendem uma associação de camadas gradacionais com até 6 m de espessura, intercaladas por sedimentos finos bioturbados, geralmente menores que 0,70 m de espessura. Os canais mais jovens erodiram pelo menos parcialmente tanto os canais mais antigos quanto os depósitos de *levee*, resultando numa geometria complexa de canais e complexos de canais. As espessuras variam entre 9 a 50 m e 20 a 100 m, as larguras de 0,2 a 1 km e 0,3 a 1,2 km e os comprimentos são maiores que 1 km e 2 km, para canais e complexos de canais, respectivamente. Formam sucessões de sedimentos com afinamento e granodecrescência ascendentes, depositados no interior de um *canyon*. Correspondem a depósitos relativamente restritos, com espessura, largura e orientação variadas, conseqüência da amalgamação de depósitos de preenchimento de canais, resultando numa geometria composta por corpos arenosos empilhados lateral e verticalmente.

6.2.3. Campo Estudado

O campo petrolífero estudado foi descoberto em 1976, localiza-se no extremo norte do *Canyon* de Fazenda Cedro, porção emersa, no nordeste do Brasil. Foram perfurados cerca de 90 poços na área e os principais reservatórios são arenitos turbidíticos pertencentes à Formação Urucutuca, do Cretáceo Superior (Maastrichtiano), que se distribuem num intervalo de 300m, entre as profundidades de 1300 e 1600m e área total de cerca de 3,5 km². A estrutura é suave, com forma alongada na direção NW/SE, coincidente com o eixo do *paleocanyon* e o traçamento é essencialmente estratigráfico (Palhares Jr., informações verbais).

Nessa seção foram identificados, entre outros, nanofósseis calcários pertencentes às biozonas N-280 (*Quadrum trifidum*), N-270 (*Aspidolithus parvus*) e N-265 (*Eiffelithus eximius*; F.H.O . Lima, inf. verbais).

A seção perfurada na área estudada apresenta uma espessura média de 1700 m e engloba rochas com diferentes níveis de radioatividade. Isto acarreta numa variação muito pequena das curvas do perfil de raios gama no intervalo estudado. Palhares Jr. (inf. verbais) realizou uma análise detalhada da escala utilizada nos perfis de raios gama, objetivando uma

melhor resolução dessas curvas, as quais foram reeditadas numa escala horizontal variável (API), compreendendo, para cada poço, os valores máximo e mínimo detectados, no intervalo correspondente à Formação Urucutuca, cuja espessura média é de 250 m. Desta forma, as feições tornaram-se mais perceptíveis, o que permitiu a individualização de quatro pacotes sedimentares, com espessura média de 30 m, responsáveis pelo assoreamento do *Canyon* de Fazenda Cedro.

Esses pacotes, empilhados numa seqüência retrogradante, englobam indistintamente depósitos de preenchimento de diferentes canais e apresentam duas áreas de concentração de arenitos, com alimentação a oeste e com direções principais noroeste-sudeste e oeste-leste. O reservatório principal é formado pela coalescência dos dois pacotes basais, colocando em contato hidráulico arenitos de idades diferentes. Os dados de pressão e produção corroboram a interpretação da geometria externa dos reservatórios, que corresponde a corpos arenosos com largura em geral inferior a 300m, espessura máxima em torno de 20 m e de pequena extensão (geralmente inferior a 1000m), resultando em depósitos bastante descontínuos em todas as direções.

O óleo produzido tem densidade de 26°API @ 60°F e viscosidade de 30 cp. O principal mecanismo de produção é por expansão de fluidos e a atuação do aquífero é muito limitada. Isto resultou num declínio acentuado da pressão original e, atualmente, está-se injetando água, objetivando aumentar o fator de recuperação do campo, estimado em 40% (Palhares Jr., inf. verbais).

No intervalo estudado foram cortados testemunhos em dois poços, os quais foram parcialmente recuperados, num total de cerca de 22 m. Foram identificadas quatro litofácies: conglomerado intraformacional, arenito maciço, arenito com laminação plano-paralela e folhelho, às vezes com intercalação de arenito fino, semelhante ao descrito nos afloramentos da Bacia de Almada. Os arenitos são arcossianos, geralmente com baixo teor de matriz e os eventos diagenéticos mais significativos são cimentação por calcita e caulinita, dissolução do cimento calcítico e substituição de constituintes do arcabouço por caulinita. Os arenitos apresentam boa permoporosidade e os valores de corte utilizados são de 10% para a porosidade, 50% para a argilosidade e 60% para a saturação de água. O principal reservatório constitui-se de arenito muito grosso, granuloso, com grandes intraclastos provavelmente desmoronados das paredes dos canais, sobrepostos por arenito médio, maciço ou com laminação plano-paralela, formando seqüências com granodecrescência ascendente. Em

testemunho, a espessura dos canais varia entre 0,5 e 4,0 m. (S. J. Moreira e J.H.C. Negreiros, informações verbais).

Previamente à simulação, para uma melhor caracterização do intervalo contendo os reservatórios e objetivando-se a individualização dos diferentes canais turbidíticos, foram confeccionadas e interpretadas vinte e quatro seções estratigráficas. Os perfis de raios gama utilizados apresentam escala horizontal 0-300 API, para facilitar a comparação dos padrões das curvas em todos os poços analisados, apesar da atenuação observada no intervalo estudado, resultante da escala empregada.

Na área estudada, independente da escala de raios gama usada, os folhelhos da Formação Urucutuca não apresentam marcos radioativos bem caracterizados e com extensão regional, semelhante aos observados no Campo de Lagoa Parada. Os raros marcos identificados têm ocorrência geralmente restrita ou não apresentam uma assinatura bem definida em perfis elétricos e radioativos, dificultando a correlação entre os vários poços perfurados. Além disso, nem todos os poços apresentam a suite completa de perfis em frente ao intervalo estudado.

Entretanto, no pacote de sedimentos pelíticos sobrejacente aos reservatórios, observa-se a ocorrência de um marco elétrico e radioativo, nem sempre de fácil identificação, caracterizado por uma variação relativa nos diferentes perfis analisados: o perfil SP (potencial espontâneo) apresenta um aumento relativo na linha base, o perfil raios gama mostra valores relativamente menores e os perfis elétricos R_{ILD} e SN (indução profunda e normal curta, respectivamente) apresentam valores relativamente mais baixos e com maior separação entre as curvas dos perfis. O topo da seção assim identificada, que engloba os canais turbidíticos analisados, corresponde ao topo do intervalo estudado e constitui o *datum* escolhido para as seções estratigráficas interpretadas (figs. 6.5 e 6.6). A análise conjunta dos dados de perfis e os dados biocronoestratigráficos permite associar as variações observadas nos perfis ao topo da biozona N-270 (*Aspidolithus parvus*), pertencente ao Campaniano Superior/Maastrichtiano Inferior (Tröelsen & Quadros, *apud* Oliveira, 1997). Os sedimentos sobrejacente geralmente contém fósseis da biozona N-280 (*Quadrum trifidum*), do Maastrichtiano (Brakry & Bramlett, *apud* Oliveira, 1997), mas essa biozona pode estar ausente e a seção estudada pode estar sobreposta por sedimentos mais recentes.

A base do intervalo estudado corresponde ao topo de uma seção com raios gama num patamar um pouco mais elevado que a seção estudada, apresentando também as curvas de resistividade num padrão mais serrilhado, geralmente com valores mais elevados e uma

diminuição na separação das curvas Rhob e Phin (perfis densidade e neutrônico, respectivamente; figs.6.5 e 6.6). Conforme a correlação com os dados biocronoestratigráficos os sedimentos sotopostos contém nanofósseis pertencentes à biozona N-265 (*Eiffellithus eximius*), do Campaniano (Tröelsen & Quadros, *apud* Oliveira, 1997).

Nesse intervalo, as principais heterogeneidades em escala de campo são consequência do arcabouço estratigráfico resultante da presença de uma seção relativamente espessa de sedimentos finos englobando corpos arenosos em geral descontínuos, com geometria de canais, às vezes amalgamados, com baixa razão arenito/folhelho e proporção vertical global dos corpos arenosos de 7%. As principais heterogeneidades internas compreendem heterogeneidades deposicionais e diagenéticas, caracterizadas pela ocorrência geralmente estocástica de sedimentos finos de espessura variada e intercalados aos arenitos, estruturas sedimentares, presença de intraclastos e, localmente, cimentação calcífera. O contato óleo/água dificilmente é identificado em um mesmo corpo.

A identificação dos depósitos de preenchimento de canais, nas seções estratigráficas interpretadas, baseia-se principalmente nos padrões das curvas dos perfis elétricos e radioativos disponíveis, já que os dados de testemunho são restritos. Os padrões de perfis, principalmente os perfis SP (potencial espontâneo) e R_{ILD} (indução), indicam a ocorrência de três eletrofácies (Serra, 1989) associadas a depósitos de canais: (1) com granodecrescência ascendente, (2) com granodecrescência descendente e (3) padrão serrilhado (Fig. 6.5).

A eletrofácies 1 apresenta um padrão em sino típico, com grande deflexão simultânea nos perfis SP e R_{ILD} , associada à presença de arenito grosso a muito grosso na base, gradando para arenito muito fino e/ou siltito no topo, conforme dados de testemunho. Esse padrão em sino nem sempre é bem caracterizado, principalmente quando o corpo arenoso é portador de água. O perfil RG (raios gama) tanto pode apresentar um padrão semelhante ao SP quanto pode mostrar valores muito altos, mais típico de folhelho. A correlação com dados de testemunhos mostra que esse comportamento anômalo do perfil RG pode estar associada a níveis com alta concentração de intraclastos argilosos e/ou níveis com abundância de feldspato potássico, já que os arenitos estudados são arcosianos (Fig. 6.5). A eletrofácies 2 apresenta características semelhantes à anterior, mas com padrão em sino invertido (Fig. 6.5).

A eletrofácies 3 corresponde a intervalos permoporosos que apresentam um padrão serrilhado no perfil SP e valores relativamente altos de R_{ILD} ou mesmo valores bastante altos, indicando a presença de hidrocarbonetos. Essa eletrofácies não apresenta correlação com os testemunhos disponíveis, geralmente apresenta valores altos no perfil RG e um

comportamento anômalo nos perfis Rhob (densidade) e Phin (neutrônico), os quais mostram uma deflexão indicativa de folhelho. É interpretada como resultante de intercalações delgadas de arenito médio a fino com siltito e folhelho ou mesmo como siltito, refletindo um estágio de mais baixa energia da corrente de turbidez. Essa eletrofácies foi também associada a depósitos de canais e constitui-se no intervalo produtor de hidrocarbonetos em alguns poços da área estudada.

Os intervalos não-reservatório estão representados pelas eletrofácies 4 e 5 (Fig. 6.5). A eletrofácies 4 apresenta um padrão relativamente mais alto nos perfis RG e R_{ILD} e pequena deflexão no perfil SP; está associada a depósitos de *levee*, por correlação com dados de testemunhos. A eletrofácies 5 apresenta valores intermediários de RG, baixos valores de R_{ILD} e nenhuma deflexão no perfil SP; às vezes contém intervalos com valores muito baixos para o RG, alto R_{ILD} e baixo Rhob e Phin, indicando a presença de carbonatos; é interpretada como depósitos pelágicos. A separação entre as eletrofácies 4 e 5 nem sempre é possível.

O comportamento geralmente atípico das curvas de perfis dificulta a identificação dos intervalos arenosos e, por isso, foram utilizados como dados condicionantes para a simulação estocástica apenas aqueles intervalos mais facilmente identificados como arenosos (figs. 6.5 e 6.6).

Foram identificados cinquenta e dois canais na área estudada, com largura variando entre 250 e 600 m, comprimento entre 800 e > 2800 m e espessura entre 2 a 44 m. Alguns desses canais estão representados na Figura 6.7. Esses canais podem ser agrupados em três complexos de canais: CC1, CC2 e CC3 (Fig. 6.6). O complexo de canais CC1, basal, compreende 17 depósitos de canais, geralmente preenchidos por sedimentos associados à eletrofácies 3, cujos reservatórios, de acordo com o padrão das curvas de perfis, são de baixa qualidade. No complexo de canal CC2 predominam canais com padrão de perfis mais característico de intervalos arenosos, compreende 34 depósitos de canais, engloba as eletrofácies 1, 2 e 3, às vezes empilhadas vertical e lateralmente e contém, segundo dados de perfis, os melhores reservatórios do campo estudado. O complexo de canais CC3 tem ocorrência restrita e seus limites são de difícil identificação; basicamente restringe-se a um expressivo canal encontrado em três poços a noroeste, próximo ao topo da seção estudada, portador de água.

(a) CORRELAÇÃO ROCHA x PERFIL DO INTERVALO ESTUDADO.

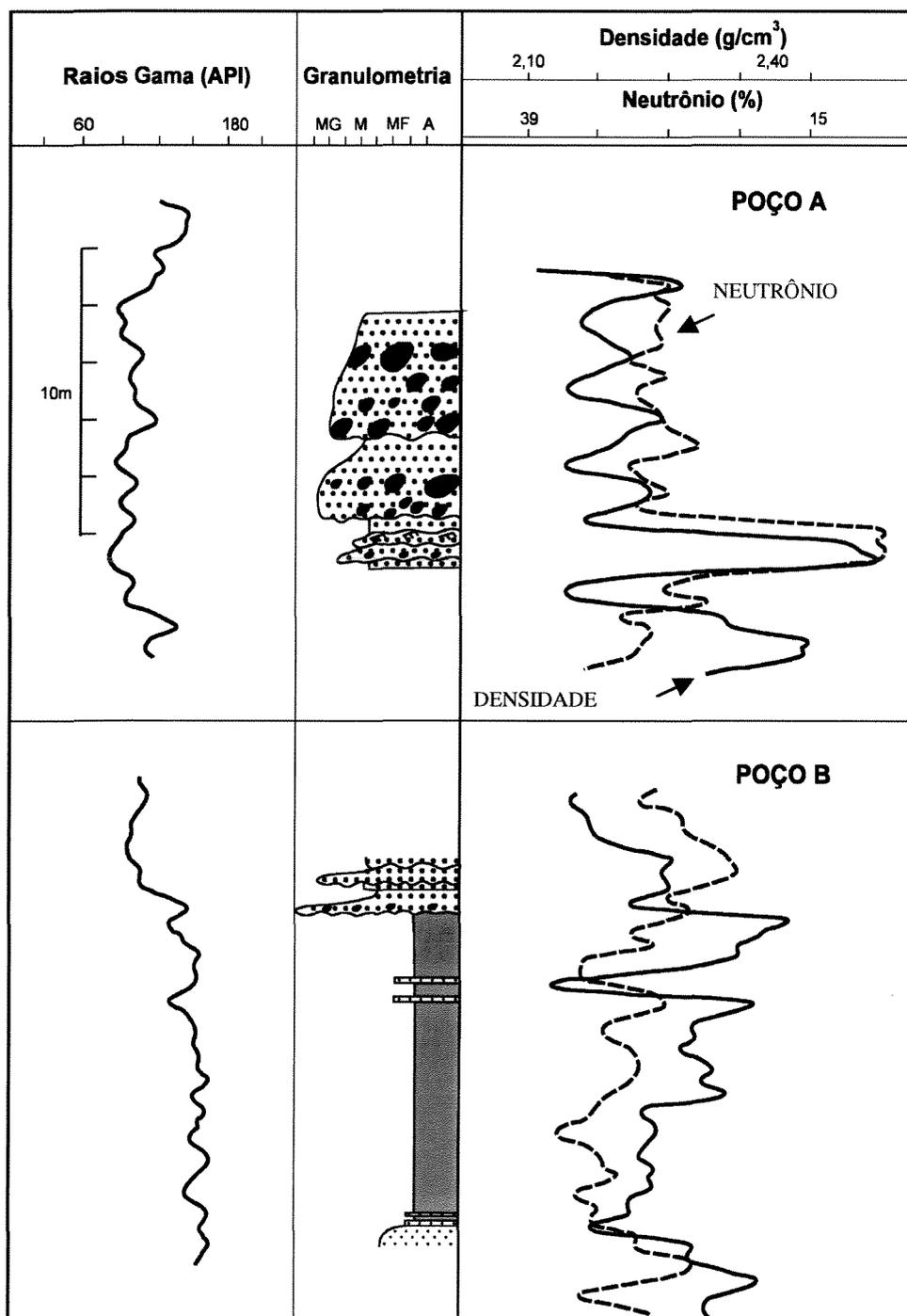


Figura 6.5 – Perfil tipo do intervalo estudado. (a) Correlação rocha-perfil. (b) Perfil tipo montado a partir de vários poços da área estudada, mostrando topo e base, os intervalos arenosos condicionantes da simulação estocástica e os complexos de canais identificados.

(a) ISÓLITAS DE ARENITO

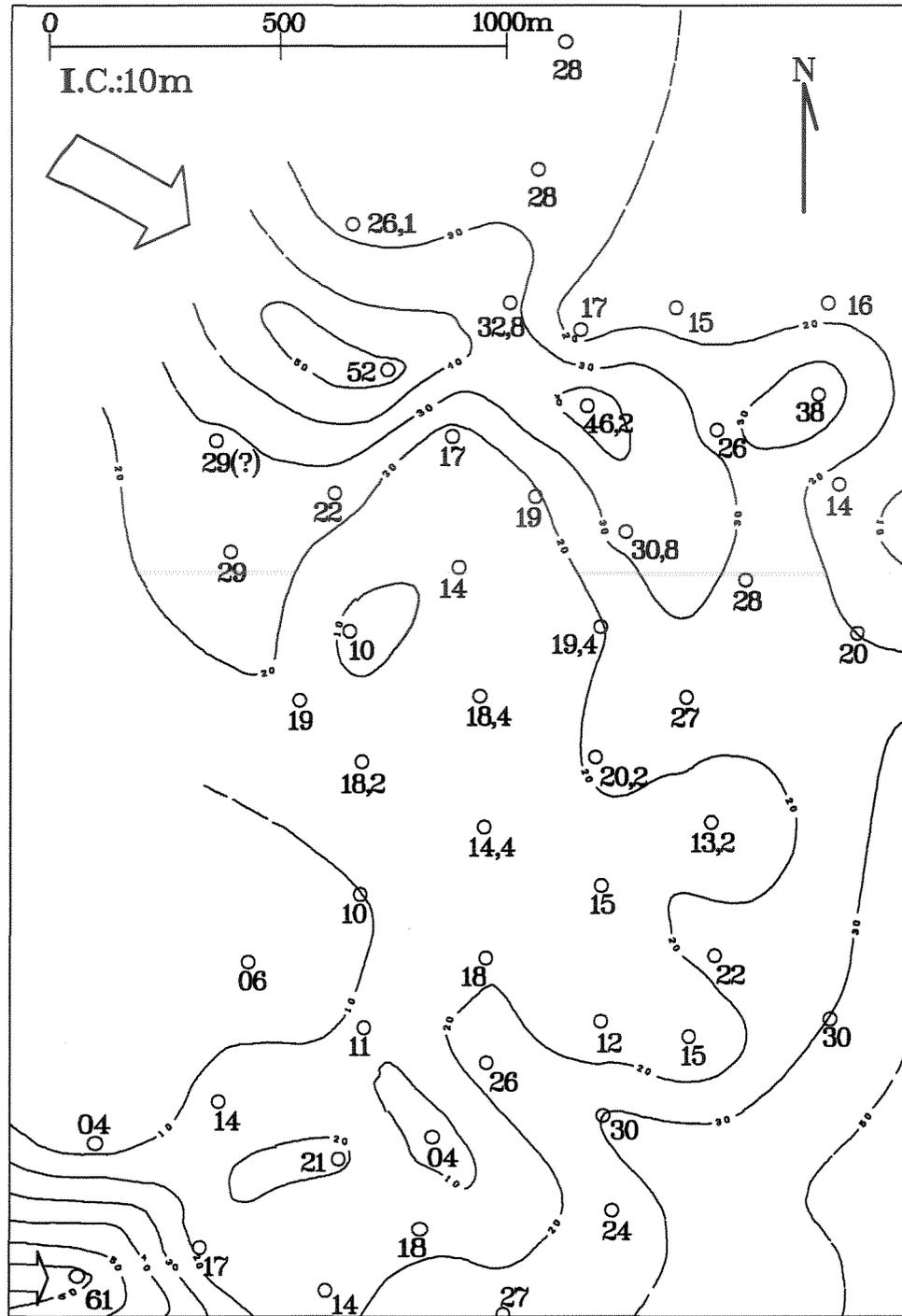


Figura 6.7 – (a) Isólitais de arenito do intervalo estudado. As setas indicam as principais direções de aporte dos sedimentos. (b) Mapa de distribuição dos canais turbidíticos 21 (mais velho), 22, 27, 29 a 32 e 34 (mais jovem), pertencentes ao complexo CC2. Os canais 22,29 e 31 erodem os canais 21,27 e 29, respectivamente. Os canais 22, 29 e 34 constituem os principais reservatórios do campo estudado. AA' a CC' correspondem à localização das seções geológicas de detalhe mostradas na Figura 6.6.

(b) CANAIS TURBIDÍTICOS

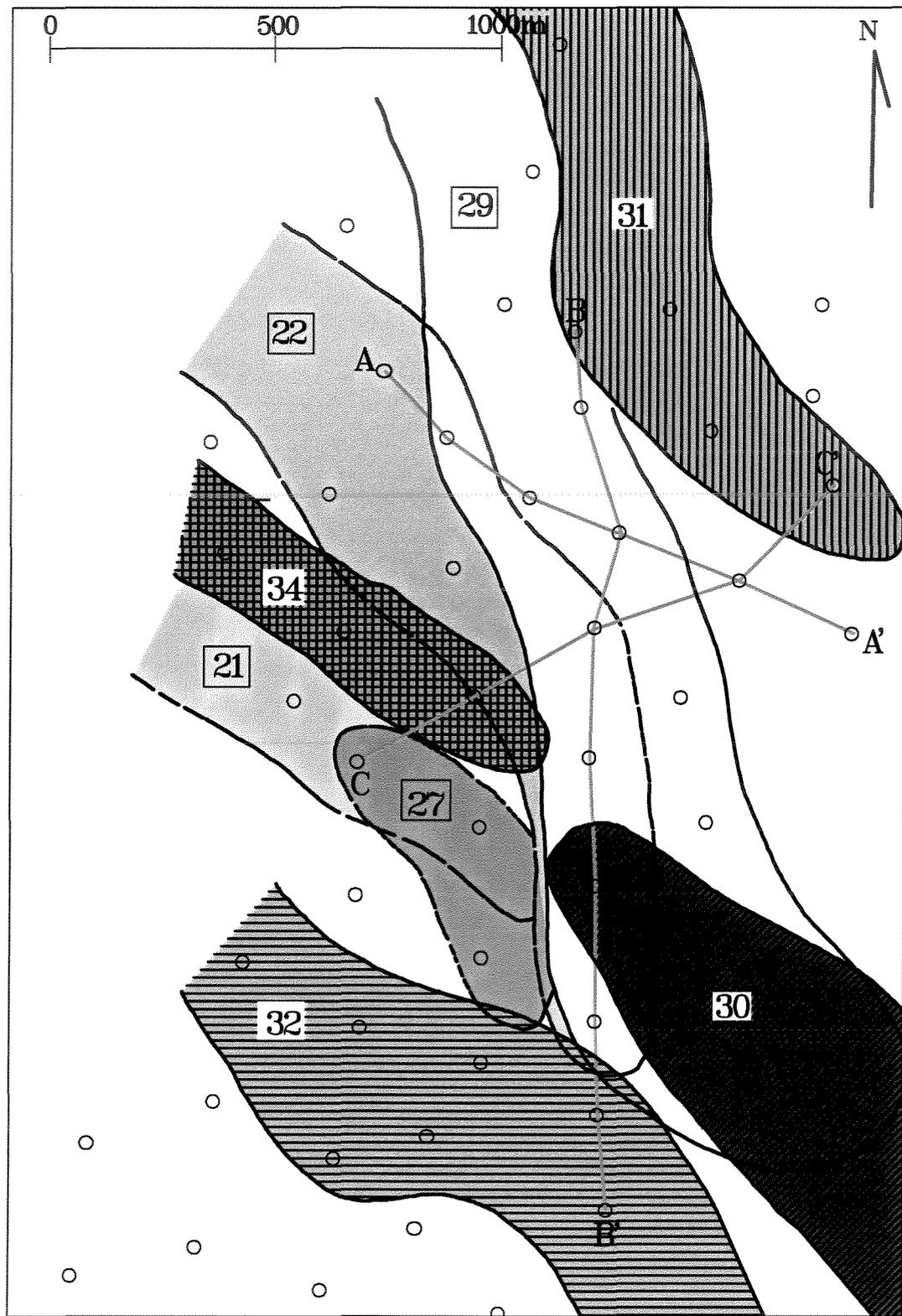


Figura 6.7 – (continuação).

6.3. Estatística básica dos dados utilizados

6.3.1. Afloramentos da Bacia de Almada

Os dados iniciais dos afloramentos da Bacia de Almada compreendem trinta e quatro canais turbidífticos, identificados por Bruhn & Moraes (1989). Nesses corpos foram efetuadas medidas de largura, extensão, direção e sinuosidade, cuja estatística básica está apresentada na Tabela 6.1.

Tabela 6.1 - Estatística básica dos dados iniciais do Afloramento de Almada.

	LARGURA (m)	EXTENSÃO (m)	AZIMUTE (°)	SINUOSIDADE
MÉDIA	163,2	558,5	108,0	1,06
MEDIANA	150,0	487,5	109,5	1,05
VARIÂNCIA	3538,1	74069,1	1481,2	0,00
DESVIO PADRÃO	59,5	272,1	38,5	0,07
MÁXIMO	325,0	1375,0	174,0	1,30
MÍNIMO	75,0	250,0	38,0	1,00
1o. QUARTIL	125,0	350,0	77,0	1,00
3o.QUARTIL	200,0	750,0	139,0	1,09
DIF. (3o.Q-1o.Q)	175,0	400,0	62,0	0,09
NÚM. DADOS	34	34	34	34

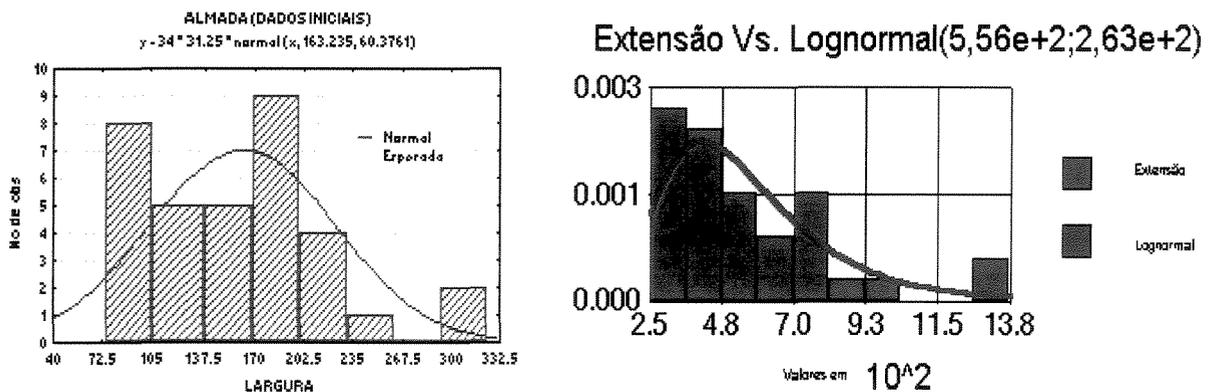


Figura 6.8 - Histogramas de largura e extensão, dados iniciais.

Observa-se que os dados de largura apresentam uma distribuição relativamente próxima da normal (figs. 6.8 e 6.9). Já os dados de extensão aproximam-se da distribuição lognormal e identifica-se a ocorrência de *outliers* (Fig. 6.10).

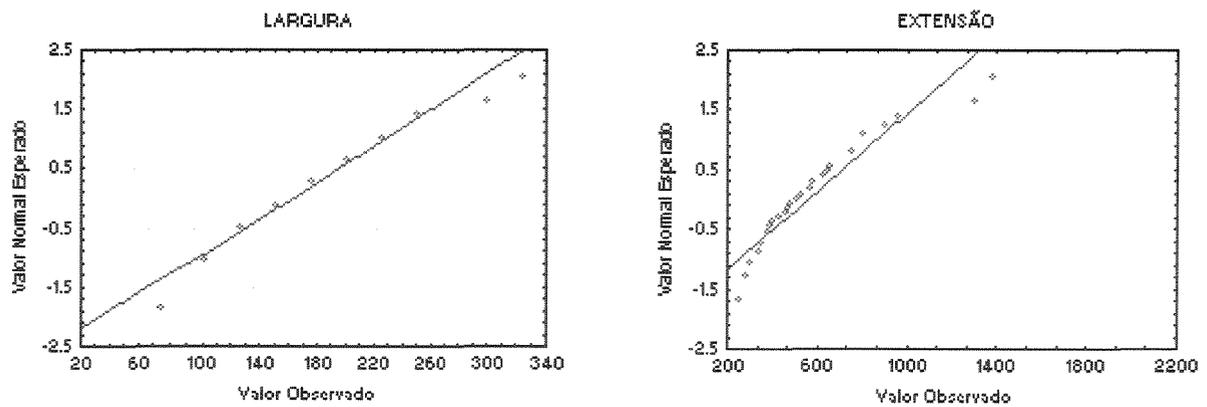


Figura 6.9 - Diagrama de probabilidade normal dos dados iniciais de largura e extensão.

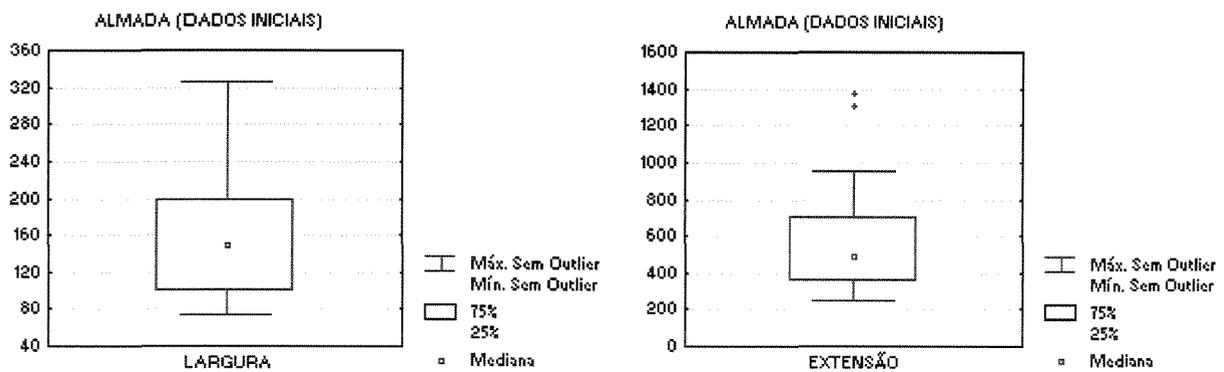


Figura 6.10 - Diagrama de caixa dos dados iniciais de largura e extensão.

As figuras 6.11, 6.12 e 6.13 mostram, respectivamente, os histogramas de frequência, os diagramas de caixa e de probabilidade dos dados iniciais de direção e sinuosidade dos afloramentos de Almada.

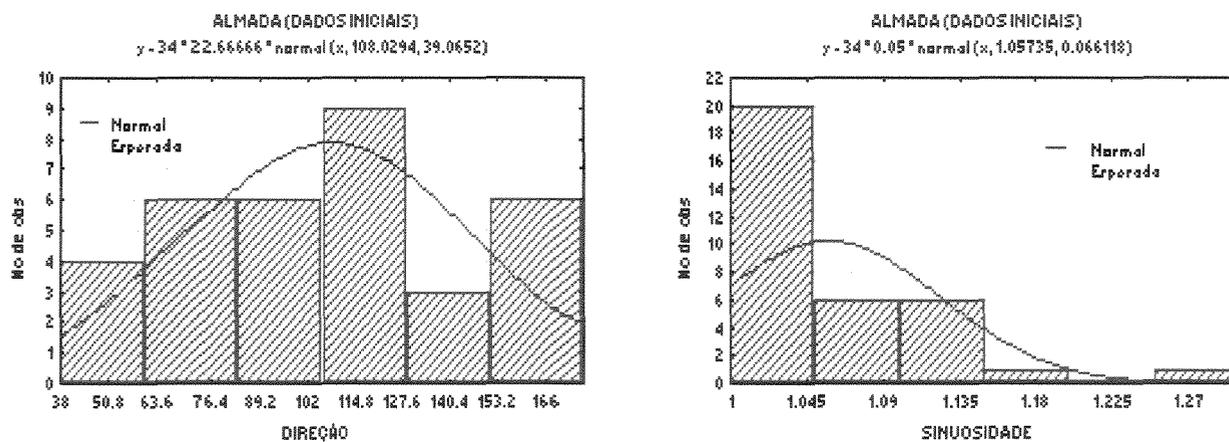


Figura 6.11 - Histograma dos dados iniciais de direção e sinuosidade.

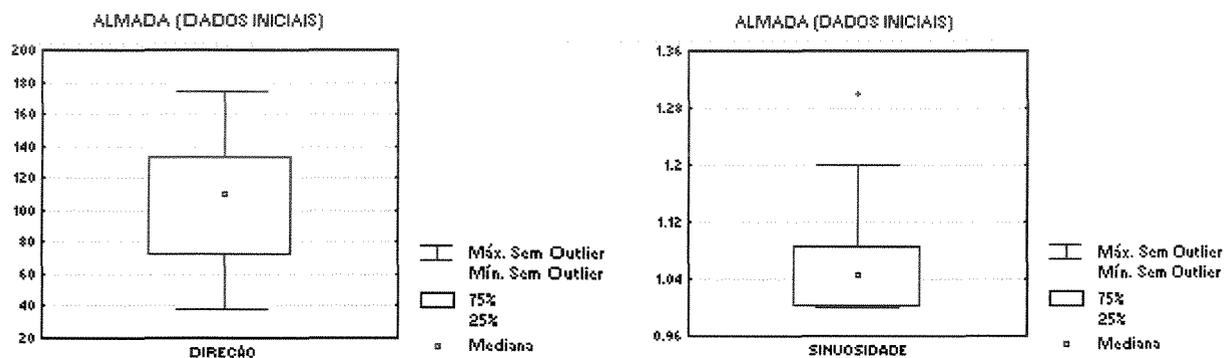


Figura 6.12 - Diagrama de caixa dos dados iniciais de direção e sinuosidade.

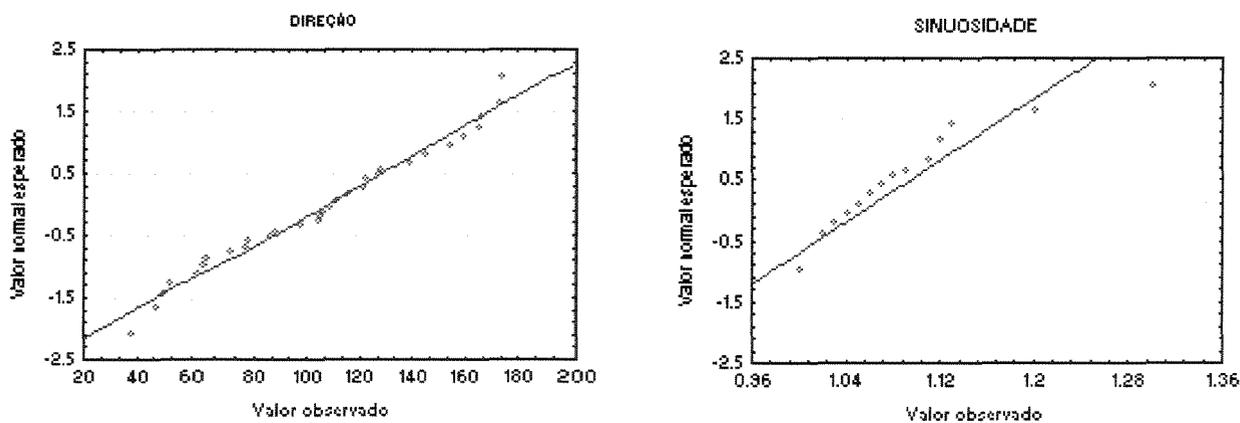


Figura 6.13 - Diagrama de probabilidade dos dados iniciais de direção e sinuosidade.

O diagrama de pontos de largura e espessura, apesar da dispersão relativamente acentuada, mostra uma tendência de corpos com maior largura apresentarem extensão maior, conforme o esperado, mas a correlação obtida entre esses dados apresenta um coeficiente baixo (Fig. 6.14).

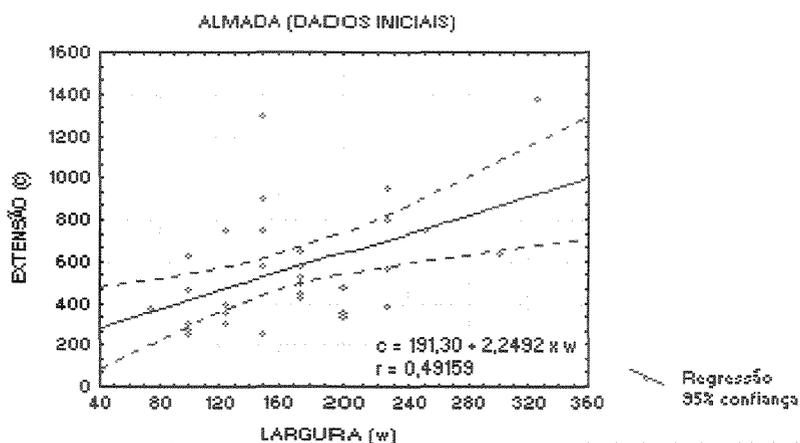


Figura 6.14 - Diagrama de dispersão entre largura e extensão, dados iniciais, afloramentos de Almada.

Os valores de extensão calculados a partir da correlação inicial, dada por:

$$c = 191,30 + 2,2492 * w \quad (\text{Eq. 6.1})$$

localmente reproduzem a variabilidade observada nos dados medidos, mas mostram uma tendência de aumento acentuado do erro com o aumento da largura (Fig. 6.15).

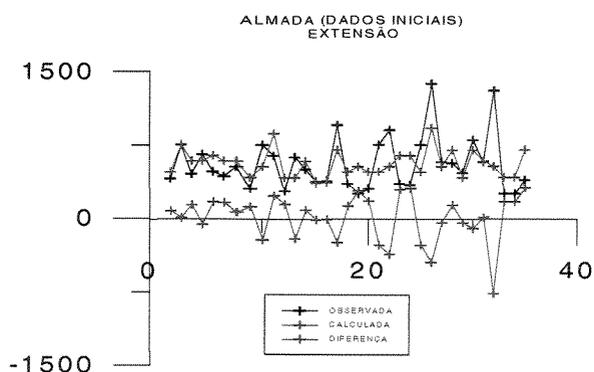


Figura 6.15 - Diferença entre os valores observados e os valores calculados para a extensão dos afloramentos de Almada, a partir da correlação inicial.

Verifica-se que os valores de extensão, calculados a partir dessa correlação (Eq. 6.1), são bem menores que o observado, principalmente para os corpos de maior extensão.

Objetivando a obtenção de uma melhor correlação, foram analisados os dados remapeados dos afloramentos de Almada (Fig. 6.4), cuja estatística básica está apresentada na Tabela 6.2.

Tabela 6.2 - Estatística básica dos corpos reinterpretados dos afloramentos de Almada.

	LARGURA (m)	EXTENSÃO (m)	SINUOSIDADE	AZIMUTE (°)
MÉDIA	202,2	736,1	1,123	88,0
MEDIANA	200,0	625,0	1,120	92,0
VARIÂNCIA	4538,7	177660,8	0,007	368,7
DESVIO PADRÃO	67,4	421,5	0,084	19,2
MÁXIMO	300,0	2050,0	1,270	115,0
MÍNIMO	40,0	275,0	1,000	38,0
1o. QUARTIL	160,0	425,0	1,040	77,0
3o. QUARTIL	240,0	750,0	1,180	99,0
DIF. (3o.Q-1o.Q)	80,0	325,0	0,140	22,0
NÚM. DADOS	23	23	22	23

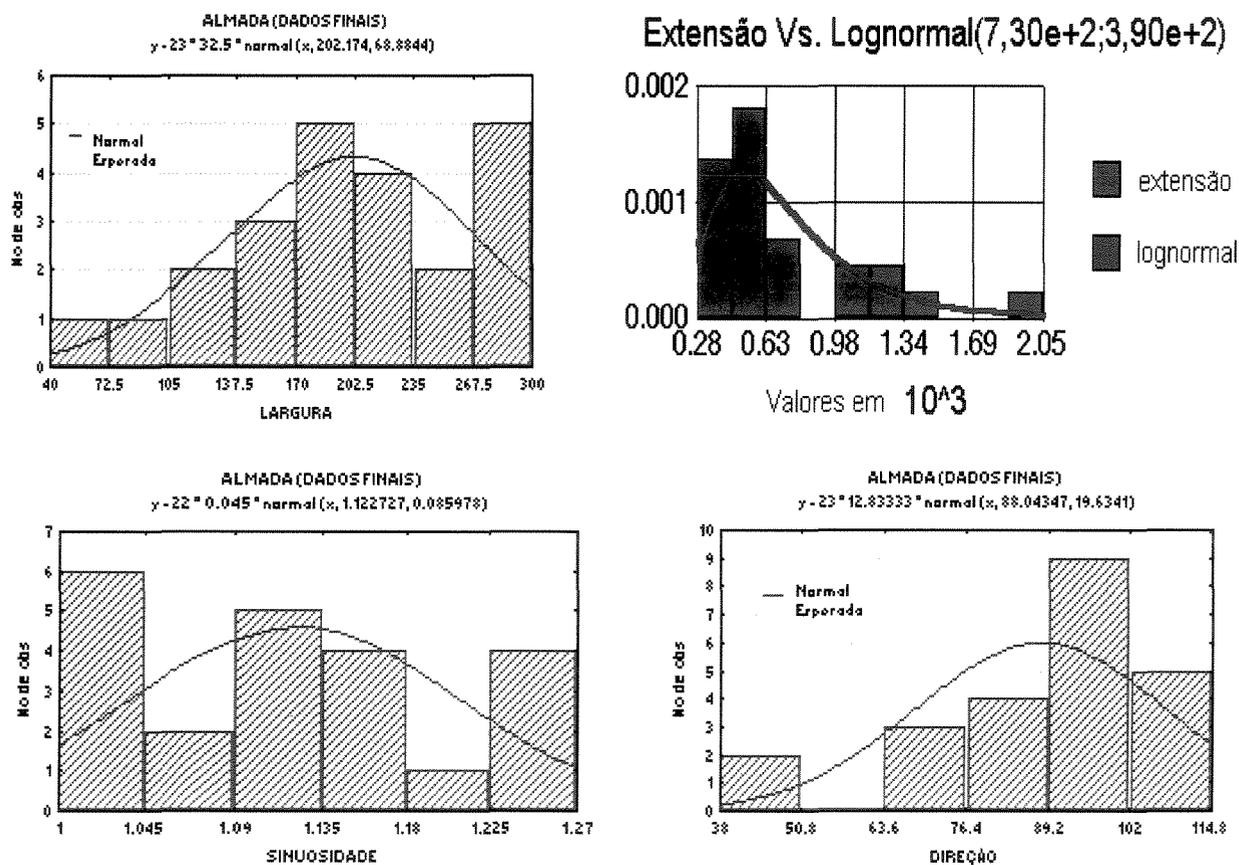


Figura 6.16 - Histogramas de largura, extensão, direção e sinuosidade dos dados reinterpretados dos afloramentos de Almada.

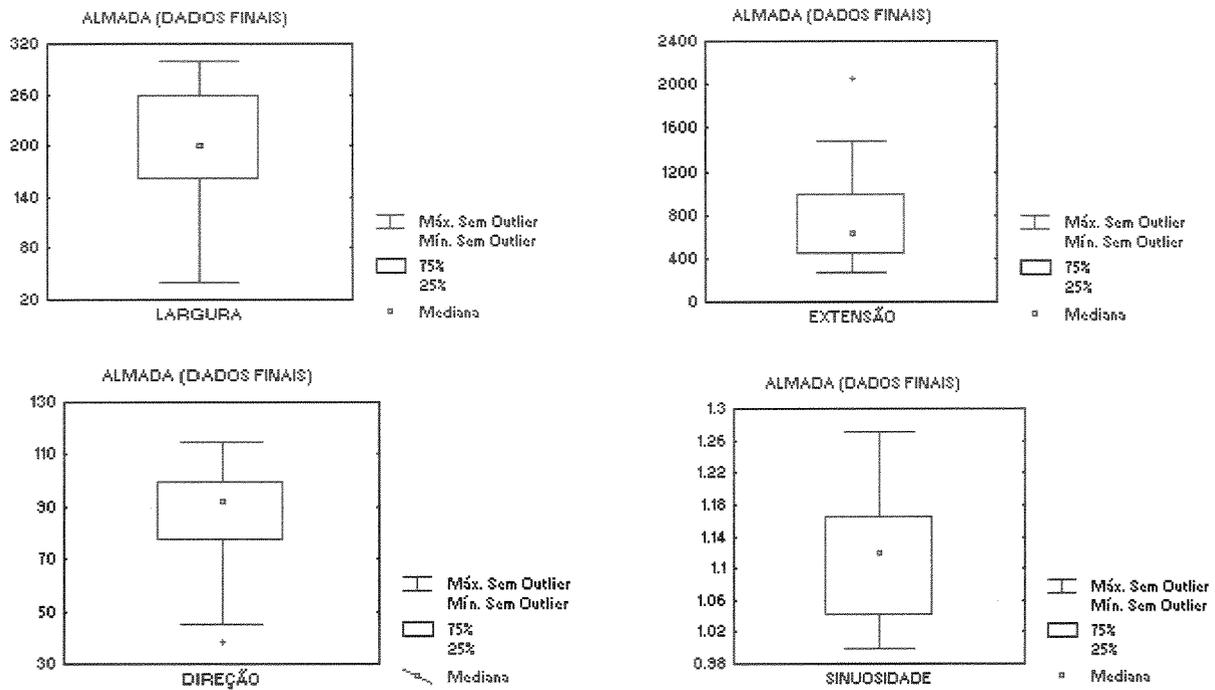


Figura 6.17 - Diagramas de caixa dos dados finais de largura, extensão, direção e sinuosidade dos afloramentos de Almada.

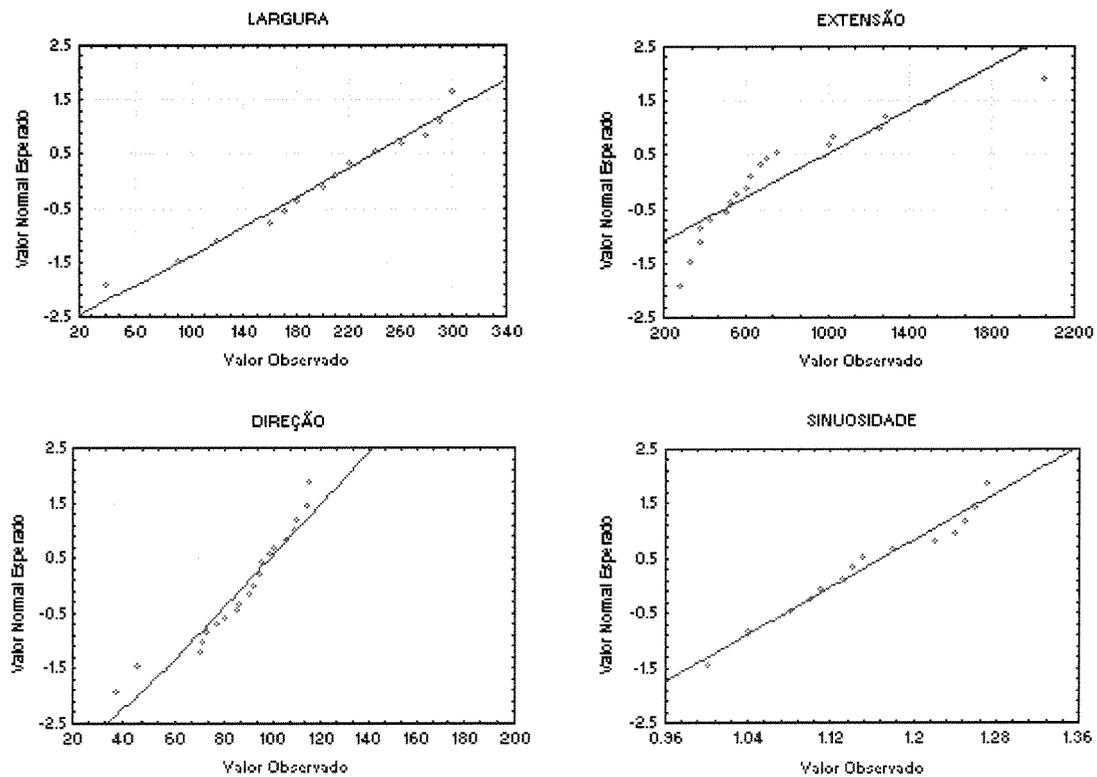


Figura 6.18 - Diagramas de probabilidade dos dados finais de largura, extensão, direção e sinuosidade dos afloramentos de Almada.

A análise dos dados remapeados revela uma pequena diferença em relação ao trabalho de Bruhn & Moraes (1989). Em planta, os canais reinterpretados correspondem a corpos ligeiramente mais alongados, o que também se verifica comparando-se os dados da estatística básica (tabelas 6.1 e 6.2). Ainda assim, é possível que os corpos identificados no Afloramento de Almada tivessem inicialmente uma dimensão maior, difícil de ser mapeada devido aos efeitos da erosão recente desses sedimentos.

Observa-se, como também ocorre com as medidas iniciais, que os dados de largura apresentam uma distribuição normal ($\chi^2 = 5,2$; $\chi^2_{7; 0,5} = 6,346$, $\alpha = 0,5$), enquanto que os dados de extensão aproximam-se de uma distribuição lognormal ($\chi^2 = 11,59$; $\chi^2_{9; 0,9} = 14,684$, $\alpha = 0,1$) e verifica-se a presença de *outliers*. Os dados de direção também mostram um maior afastamento da normal que os dados de sinuosidade (figs. 6.16 a 6.18).

A correlação entre os dados de largura e extensão, dada por:

$$c = -67,44 + 3,9744 * w \quad (\text{Eq. 6.2})$$

apresenta um coeficiente de cerca de 0,64, maior que o anteriormente observado; entretanto para larguras menores que 17 m, aproximadamente, têm-se valores negativos para a extensão, o que é incompatível com a geometria tridimensional esperada (Fig. 6.19a). Para contornar esse problema fez-se um novo diagrama de dispersão dos dados, agora eliminando-se os *outliers* identificados nas medidas de extensão e suas respectivas larguras, obtendo-se um coeficiente de correlação de 0,71 (Fig. 6.19b), maior que o anterior, cuja correlação é dada por:

$$c = 164,99 + 2,1455 * w \quad (\text{Eq. 6.3})$$

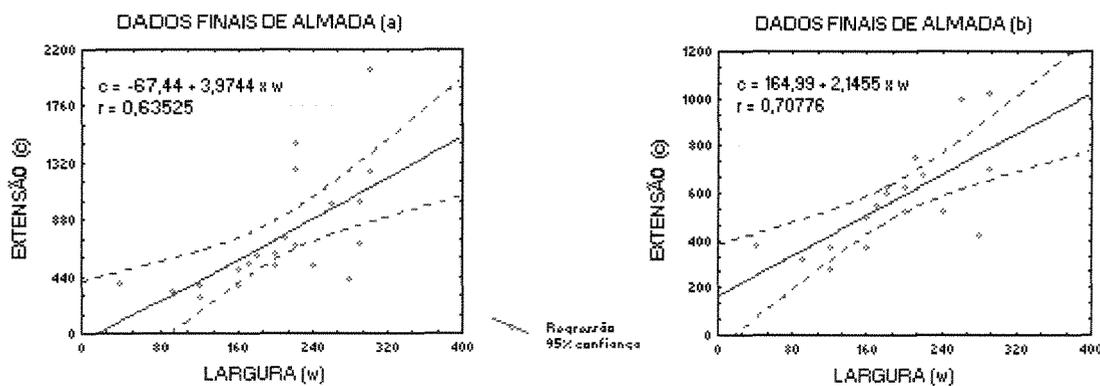


Figura 6.19 - Diagrama de dispersão dos dados finais de largura e extensão, afloramentos de Almada. (a) com *outliers*; (b) sem *outliers*.

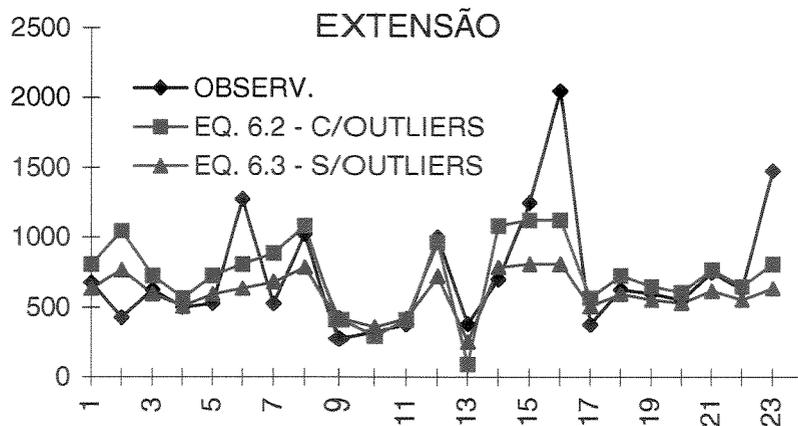
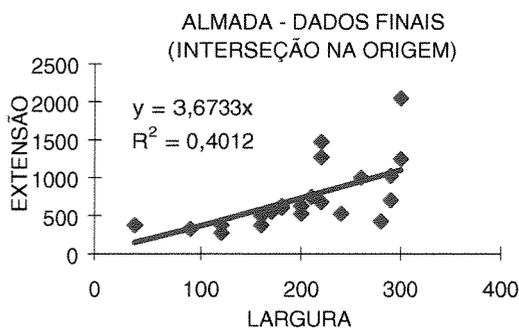


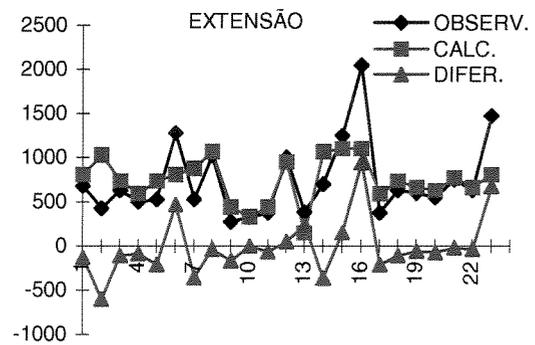
Figura 6.20 - Extensão: valores observados e valores calculados.

Os valores calculados a partir da Eq. 6.2 apresentam um erro médio de 12,5 % e uma tendência de superestimar os dados, exceto para os *outliers*, resultando numa extensão média de 736,1 m. A partir da Eq. 6.3 o erro médio é de -4,2 %, mas observa-se uma tendência de subestimar os dados, embora mostre uma aproximação melhor para os valores menores, resultando numa extensão média de 598,8 m.

Objetivando-se a obtenção de uma melhor correlação, efetuou-se uma regressão linear com interseção na origem (Eq. 6.4, dada por $c = 3,733 \cdot w$), utilizando-se o mesmo conjunto de dados anteriormente considerado (Fig. 6.21).



(a)



(b)

Figura 6.21 - Extensão: (a) correlação entre os dados finais com interseção na origem; (b) valores observados, calculados e diferença entre estes.

Como os valores calculados a partir das equações obtidas apresentavam um coeficiente de correlação baixo (Eqs. 6.2, 6.3 e 6.4), decidiu-se criar um conjunto de pontos selecionados, no qual os dados de largura foram colocados em ordem crescente e foram eliminados os pares de pontos cuja extensão medida era menor que a esperada, ou seja, os pontos em que a um aumento da largura correspondia diminuição relativa da extensão. A eliminação desses dados baseia-se na hipótese de que as extensões eliminadas apresentariam dimensões menores devido à erosão recente, o que os tornaria pouco representativos. A Figura 6.22 apresenta a correlação linear obtida, os valores observados, calculados e a diferença entre eles.

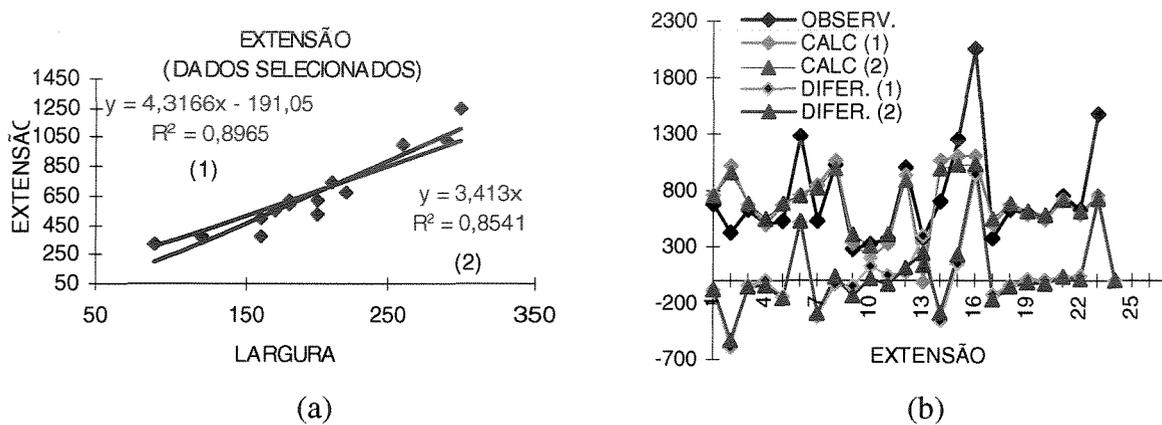


Figura 6.22 - Extensão: (a) correlação entre os dados selecionados, (1) sem interseção na origem; (2) com interseção na origem; (b) valores observados, calculados e diferença.

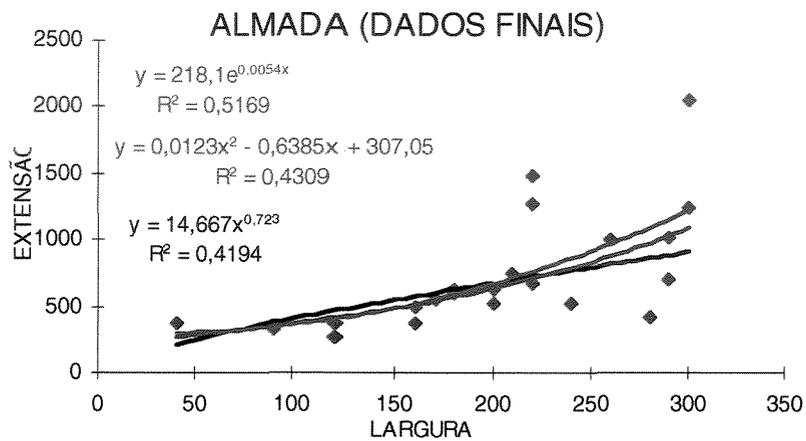
As correlações lineares obtidas, dadas por:

$$c = 4,3166 * w - 191,05 \quad (\text{Eq. 6.5})$$

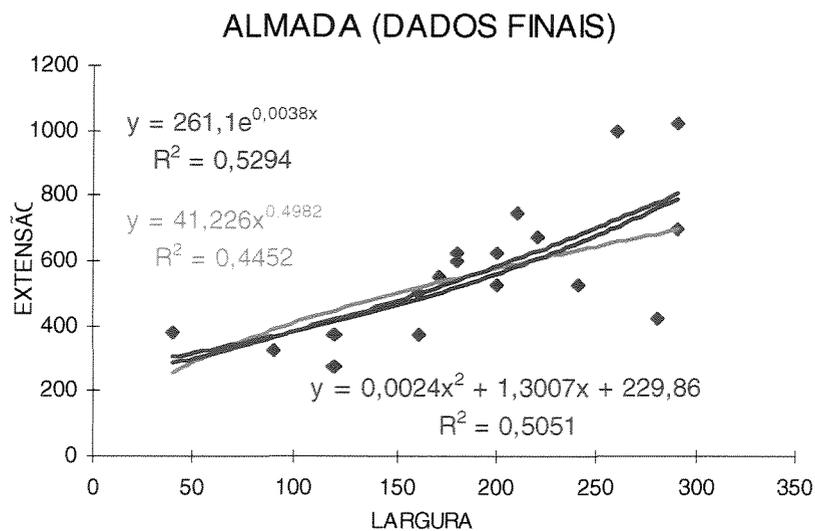
$$c = 3,413 * w \quad (\text{Eq. 6.6})$$

apresentam um coeficiente de correlação bem mais alto que os anteriores ($r^2 = 0,8965$ e $r^2 = 0,8541$) mas, no primeiro caso, com média de 681,7 m e erro médio de 1,6%, resulta em valores negativos para a extensão calculada a partir de larguras menores que 44,3 m e no segundo, há uma tendência de aumento relativo do erro (média de 6,7%).

Foram analisadas também correlações com linhas de tendência não-lineares entre as variáveis largura e extensão. Para tanto foram utilizados os mesmos três conjuntos de dados anteriormente analisados, ou seja, um conjunto compreende todas as medidas lidas após a reinterpretação do Afloramento de Almada (dados com *outliers*); outro, exclui os pontos correspondentes aos *outliers* identificados nas medidas de extensão e suas respectivas larguras, e o terceiro engloba pontos selecionados do primeiro conjunto, baseado nos critérios anteriormente citados. Além destes, foi analisado mais um conjunto que corresponde aos dados selecionados, acrescidos do par de pontos [0,0], representando as áreas de não ocorrência de canais. As figuras 6.23 e 6.24 mostram as correlações obtidas.



(a)



(b)

Figura 6.23 - Correlações com linhas de tendência não-lineares com todos os dados finais dos afloramentos de Almada; (a) com *outliers*; (b) sem *outliers*.

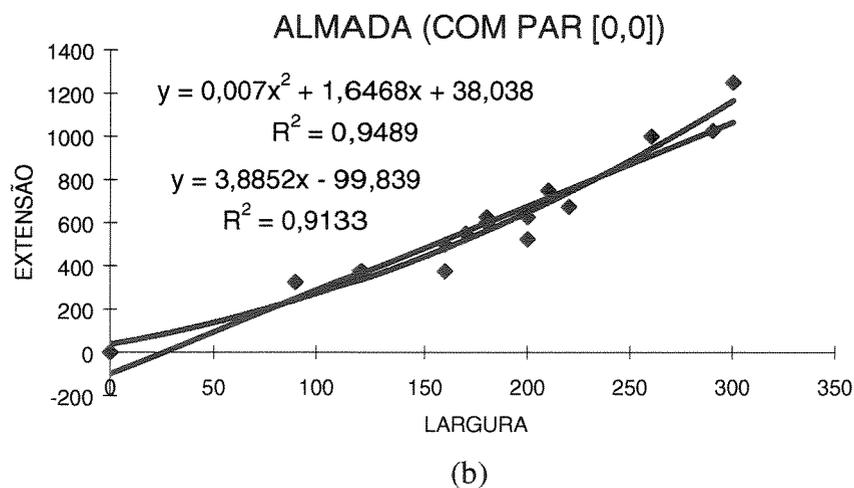
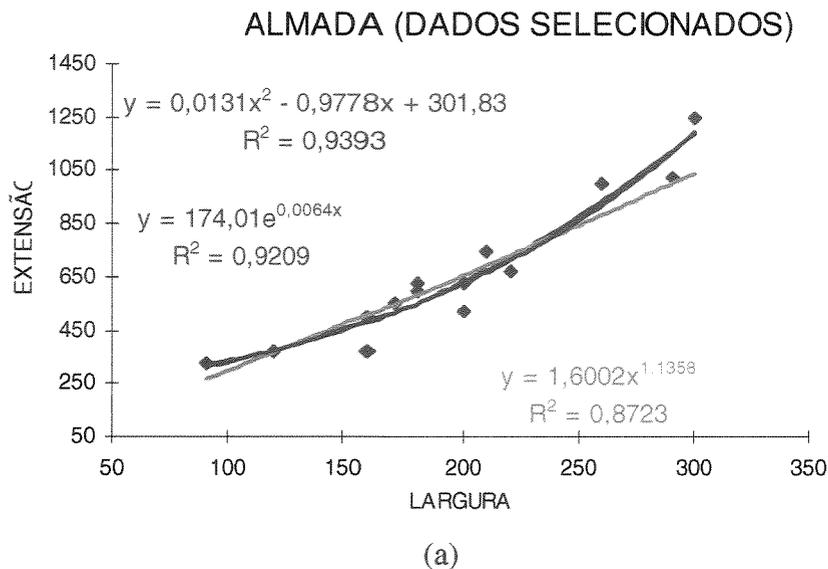


Figura 6.24 - Correlações com linhas de tendência não-lineares entre os dados selecionados: (a) sem o par [0,0] ; (b) com par [0,0], afloramentos de Almada.

Com as correlações que apresentaram os maiores coeficientes, de cada um dos conjuntos de dados analisados, calculou-se as respectivas extensões e foram construídos gráficos comparando os dados observados, os calculados e o erro encontrado (figs. 6.25 e 6.26).

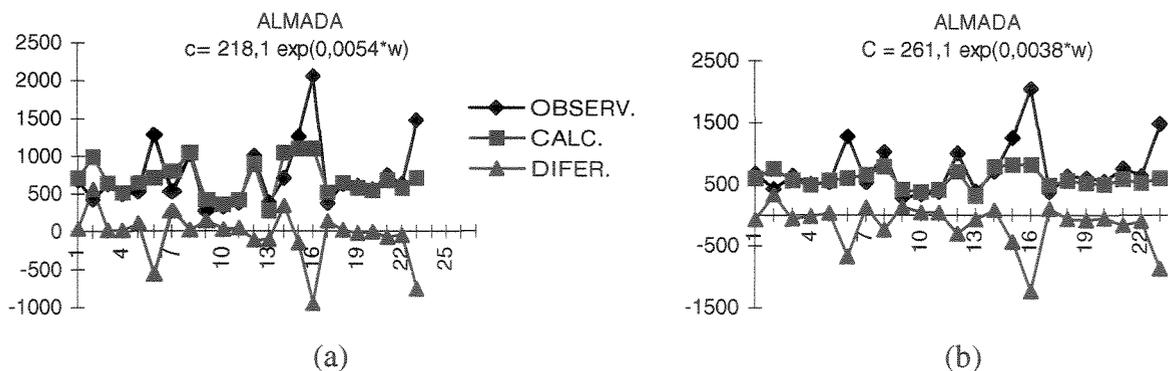


Figura 6.25 - Extensão: valores medidos, calculados e diferença;(a) com outliers; (b) sem outliers.

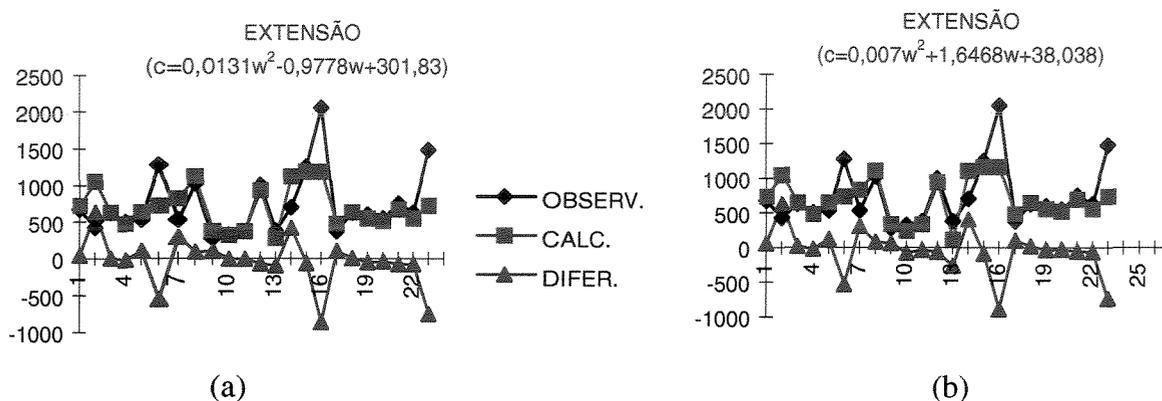


Figura 6.26 - Extensão: medida, calculada e diferença entre esses dados; (a) com par [0,0]; (b) sem par [0,0].

As diferentes extensões calculadas, independente da correlação utilizada (Tabela 6.3), mostram um comportamento semelhante, ou seja, localmente reproduzem os valores observados com aproximação boa (com diferença de 24 m ou 0,5% para a extensão calculada do canal 11, por exemplo, a partir da correlação mostrada na Figura 6.19b) mas tendem a subestimar os valores mais altos de extensão, apresentando um erro maior. Entretanto, as diferenças encontradas estão coerentes com os dados observados, pois para uma mesma largura a extensão pode variar bastante, conforme se verifica, por exemplo, para os canais 14, 15 e 16, com largura de 220 m e extensões de 675 m, 1275 m e 1475 m, respectivamente (Fig. 6.4).

Tabela 6.3 - Correlações obtidas entre os dados de largura e extensão, afloramentos de Almada.

CORRELAÇÃO	EQ.	R	R ²	DADOS
$c = 191,30 + 2,2492 * w$	6.1	0,49159		Iniciais.
$c = - 67,44 + 3,9744 * w$	6.2	0,63525	0,4035	Reinterpretados, com <i>outliers</i> .
$c = 164,99 + 2,1455 * w$	6.3	0,70776	0,5009	Reinterpretados, sem <i>outliers</i> .
$c = 3,6733 * w$	6.4	-	0,4012	Reinterpretados, intersec. na origem.
$c = - 191,05 + 4,3166 * w$	6.5	-	0,8965	Selecionados.
$c = 3,413 * w$	6.6	-	0,8541	Selec., intersecção na origem.
$c = 218,1 \exp(0,0054 * w)$	6.7	-	0,5169	Reinterpretados, com <i>outliers</i> .
$c = 261,1 \exp(0,0038 * w)$	6.8	-	0,5294	Reinterpretados, sem <i>outliers</i> .
$c = 0,131 * w^2 - 0,9778 * w + 301,83$	6.9	-	0,9393	Selecionados, sem par (0,0).
$c = 0,007 * w^2 - 1,6468 * w + 38,038$	6.10	-	0,9489	Selecionados, com par (0,0).

6.3.2. Campo de Lagoa Parda

Os dados do Campo de Lagoa Parda compreendem trinta e oito canais identificados por Bruhn (1993), agrupados em três complexos de canais, contendo medidas de largura, espessura e direção. Esses dados de direção não foram utilizados neste trabalho, porque considera-se que o campo estudado apresenta uma direção semelhante à direção do Afloramento de Almada.

Inicialmente foram considerados todas as medidas efetuadas e, quando os corpos não apresentavam medidas bem definidas, como no caso dos canais 3 e 21 (espessura e/ou largura dadas por >50 m e >300 m, respectivamente) considerou-se que os valores fornecidos correspondiam à medida da respectiva dimensão (ou seja, 50 m e 300 m, respectivamente). A estatística básica dos dados iniciais de Lagoa Parda está apresentada na Tabela 6.4 e figuras 6.27 e 6.28.

Tabela 6.4 - Estatística básica dos dados iniciais do Campo de Lagoa Parda.

	LARGURA	ESPESSURA
MÉDIA	472,1	24,8
MEDIANA	430,0	24,5
VARIÂNCIA	46685,0	130,2
DESVIO PADRÃO	216,1	11,4
MÁXIMO	1050,0	50,0
MÍNIMO	210,0	9,0
1o. QUARTIL	280,0	15,0
3o. QUARTIL	600,0	35,0
DIF. (3o.Q - 1o.Q)	320,0	20,0
NÚM. DADOS	38	38

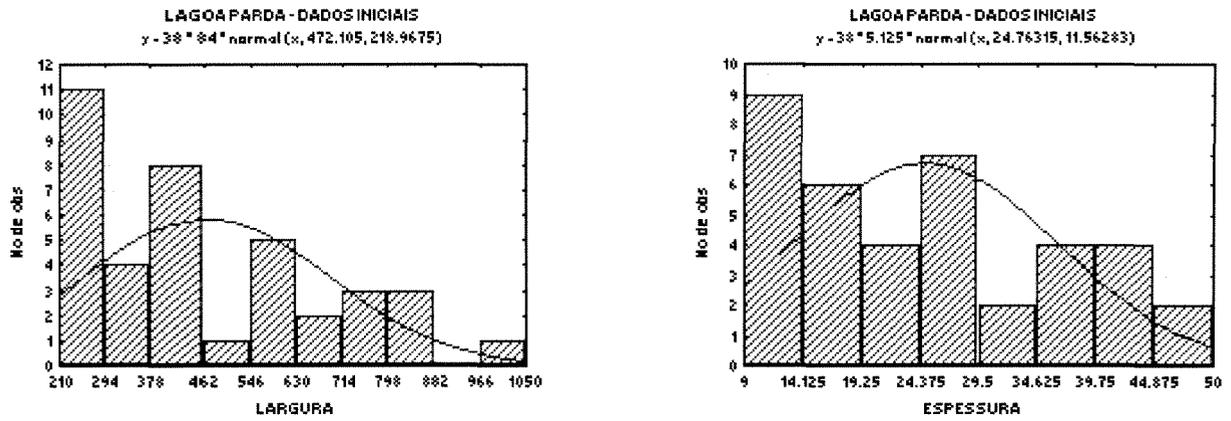
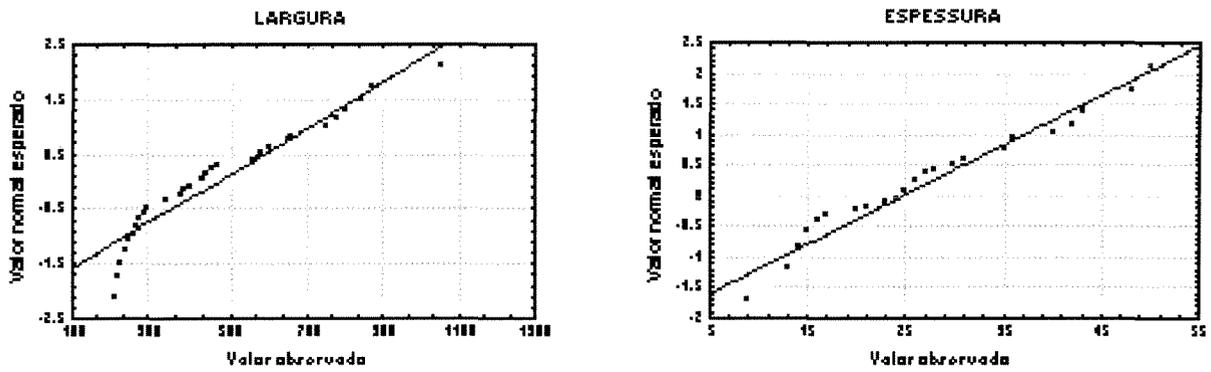
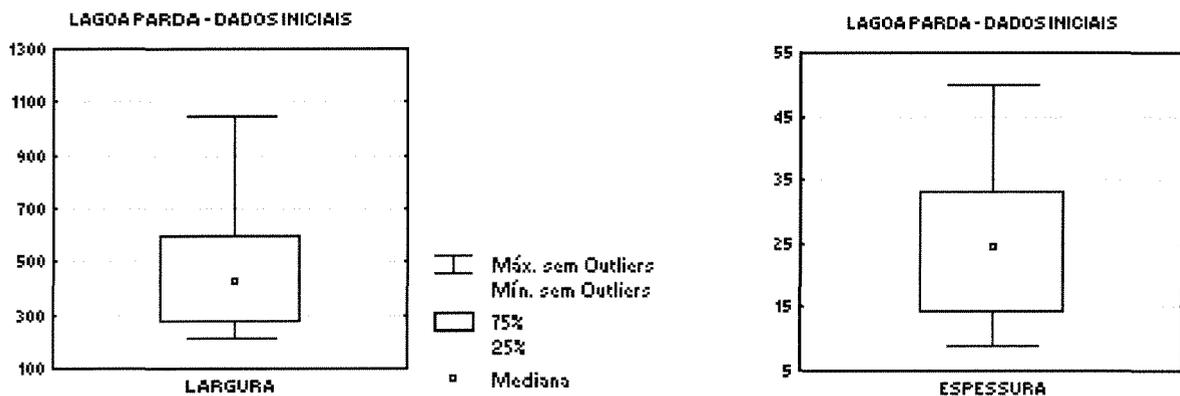


Figura 6.27 - Histogramas dos dados iniciais de Lagoa Parda.



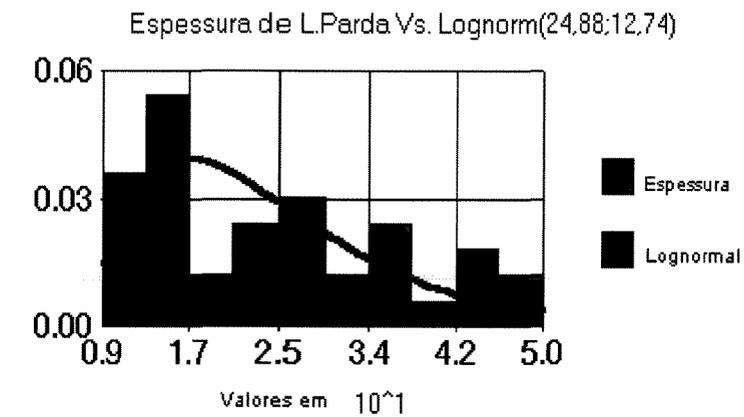
(a)



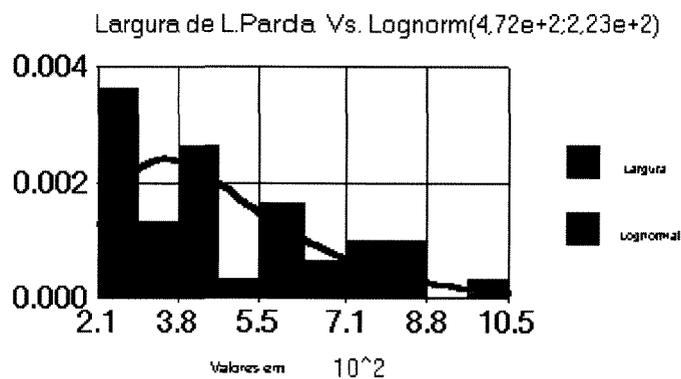
(b)

Figura 6.28 – Dados iniciais de largura e espessura de Lagoa Parda. (a) Diagramas de probabilidade normal; (b) Diagrama de caixa.

Observa-se que os dados de Lagoa Parda, tanto para a espessura quanto para a largura, afastam-se bastante da normal (figs. 6.27 e 6.28). Por isto, esses dados foram comparados também com uma distribuição lognormal (Fig. 6.29). Entretanto, o teste χ^2 mostra um nível muito baixo para aceitar essa hipótese, tanto para a espessura quanto para a largura ($\chi^2 = 13,2$; $\chi^2_{9;0,9} = 14,684$; $\alpha = 0,1$ e $\chi^2 = 16,62$; $\chi^2_{9;0,95} = 16,919$; $\alpha = 0,05$, respectivamente; figs. 6.32 e 6.33).



(a).



(b)

Figura 6.29 - Comparação entre a distribuição lognormal e os dados iniciais de Lagoa Parda . (a) espessura; (b) largura.

O diagrama de pontos de largura e espessura mostra uma grande dispersão dos dados (Fig. 6.30).

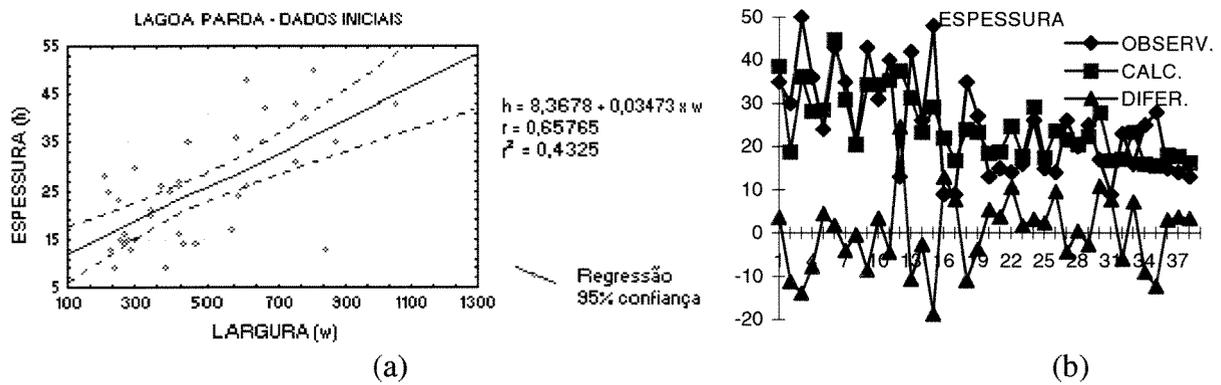


Figura 6.30 - (a) Diagrama de dispersão entre largura e espessura; (b) Espessura: valores observados, calculados e diferença entre esses valores, dados iniciais, Lagoa Parada.

A espessura calculada a partir da correlação inicial, dada por:

$$h = 8,3678 + 0,3473 * w \quad (\text{Eq. 6.11})$$

apresenta um erro médio de 15,7%, mas localmente mostra valores bastante discrepantes do observado (Fig. 6.30b). Objetivando uma melhor correlação, decidiu-se eliminar do conjunto de dados os valores cujas medidas não estavam bem definidas, entretanto os novos coeficientes de correlação obtidos foram menores que os anteriores (Fig. 6.31).

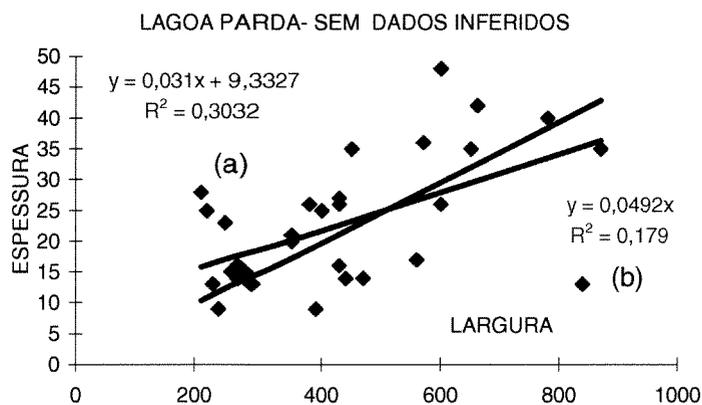


Figura 6.31 - Diagrama de dispersão de largura e espessura sem os dados inferidos de Lagoa Parada. (a) sem interseção na origem, Eq. 6.12; (b) com interseção na origem, Eq. 6.13.

Analisando-se os dados de Lagoa Parada verifica-se que os canais do complexo CC1 apresentam os maiores valores de largura e espessura, são preenchidos por clásticos grossos a

conglomeráticos, predominando clásticos muito grossos e parecem ter pouca semelhança tanto com os depósitos da área estudada, nos quais predomina uma granulometria grossa a média, quanto em relação aos dados de Almada, cuja largura é geralmente menor. Como a extensão dos canais está sendo calculada a partir dos dados de Almada e a espessura, a partir dos dados de Lagoa Parda, ambas em função da largura, decidiu-se eliminar dos dados de Lagoa Parda as medidas referentes ao complexo CC1, para que o conjunto resultante apresentasse dados de largura mais próximo dos valores obtidos em Almada. Entretanto, a correlação obtida ainda apresenta um coeficiente baixo (Fig. 6.32).

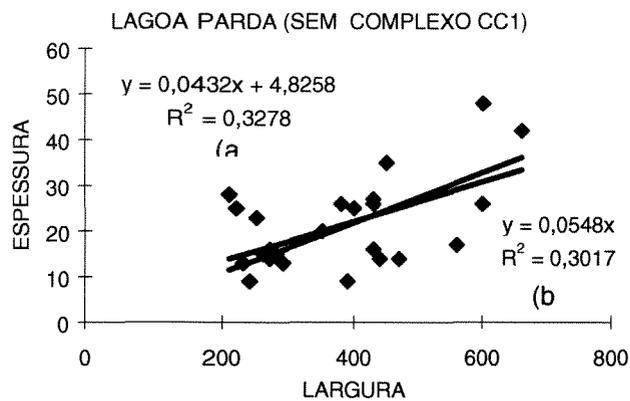


Figura 6.32 - Diagrama de dispersão entre largura e espessura de Lagoa Parda, sem os canais do Complexo CC1; (a) sem interseção na origem, Eq. 6.14; (b) com interseção na origem, Eq. 6.15.

Em função dos coeficientes mais baixos, esses dados foram desconsiderados.

Na tentativa de se obter uma melhor correlação foram eliminados do conjunto de dados de Lagoa Parda, além dos canais do Complexo CC1, os canais 34 e 35 do Complexo CC2, preenchidos por sedimentos finos e de difícil delimitação e o canal 16, também do Complexo CC2, o qual apresenta largura de 390 m e uma espessura de apenas 9 m, muito pequena quando comparada com os demais canais, embora não se constitua num *outlier*. A Tabela 6.5 e as figuras 6.33 a 6.37 apresentam a estatística básica desse conjunto de dados e a comparação entre os dados e as distribuições normais e lognormais. Os resultados do teste χ^2 mostram níveis baixos na comparação entre os dados de Lagoa Parda com a distribuição lognormal, tanto para a espessura quanto para a largura ($\chi^2 = 17,05$; $\chi^2_{9; 0,975} = 19,023$; $\alpha = 0,025$) e $\chi^2 = 13,90$; $\chi^2_{9; 0,9} = 14,684$; $\alpha = 0,1$, respectivamente).

Tabela 6.5 - Estatística básica dos dados selecionados de Lagoa Parda.

	LARGURA (m)	ESPESSURA (m)
MÉDIA	387,727	21,045
MEDIANA	390,000	16,500
VARIÂNCIA	16681,198	99,952
DESVIO PADRÃO	129,156	9,998
MÁXIMO	660,000	48,000
MÍNIMO	230,000	9,000
1o. QUARTIL	270,000	14,000
3o. QUARTIL	450,000	26,000
DIF. (3o.Q - 1o.Q)	180,000	12,000
NÚM. DADOS	22	22

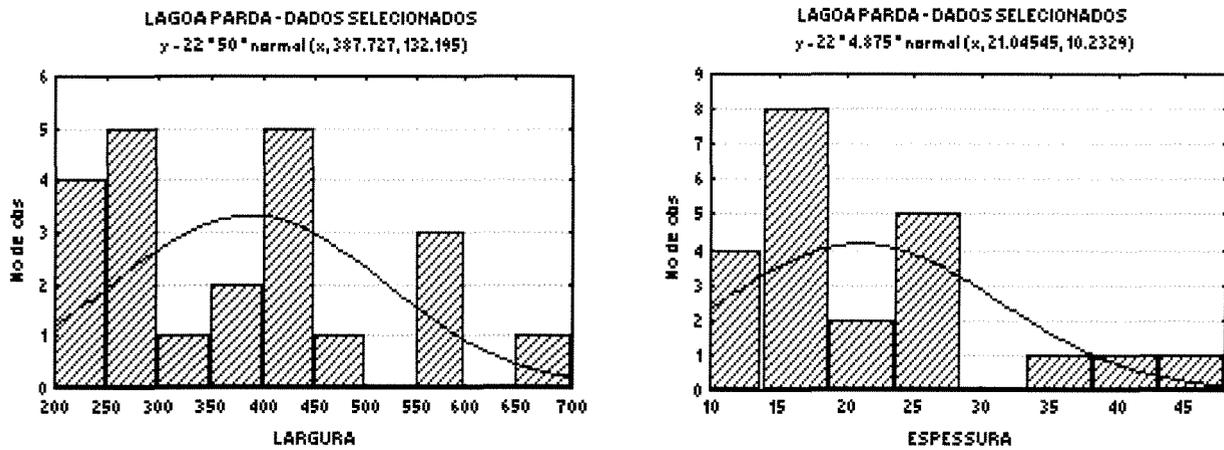


Figura 6.33 - Histogramas de largura e espessura, dados selecionados, Lagoa Parda.

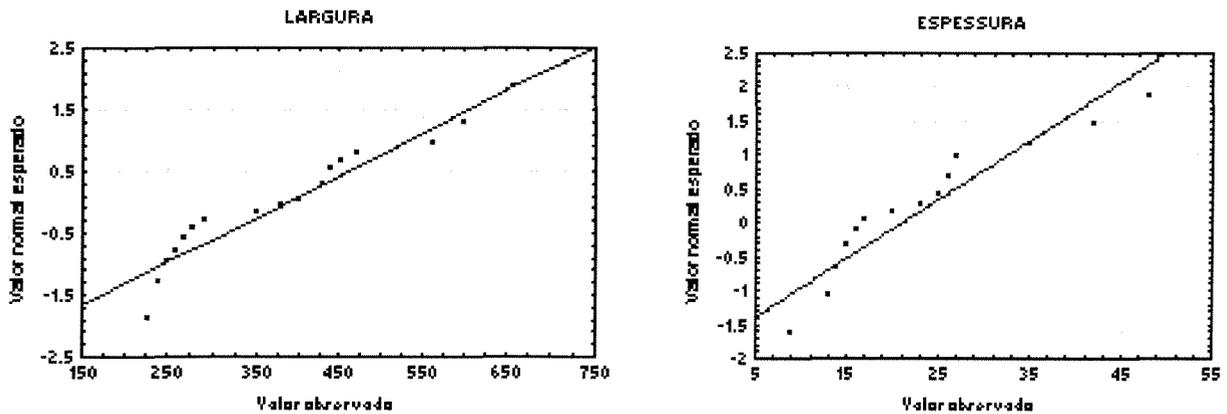


Figura 6.34 - Diagramas de probabilidade normal, dados selecionados de Lagoa Parda.

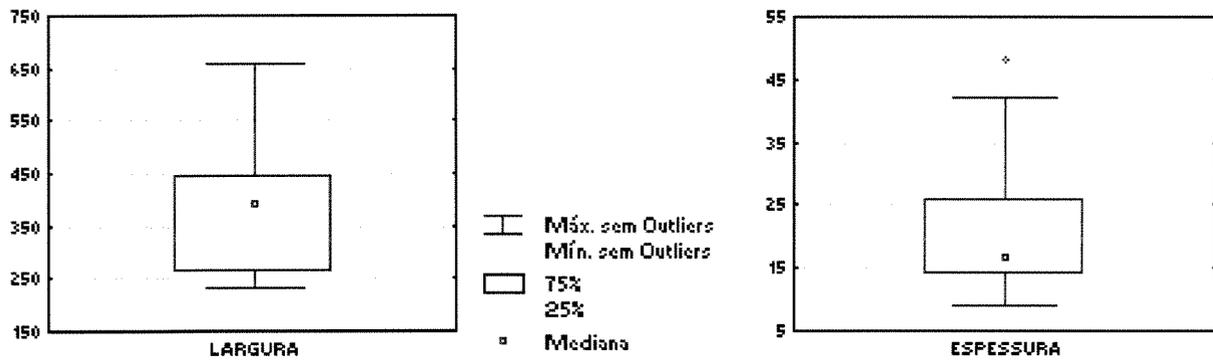


Figura 6.35 - Diagrama de caixa dos dados selecionados de Lagoa Parda.

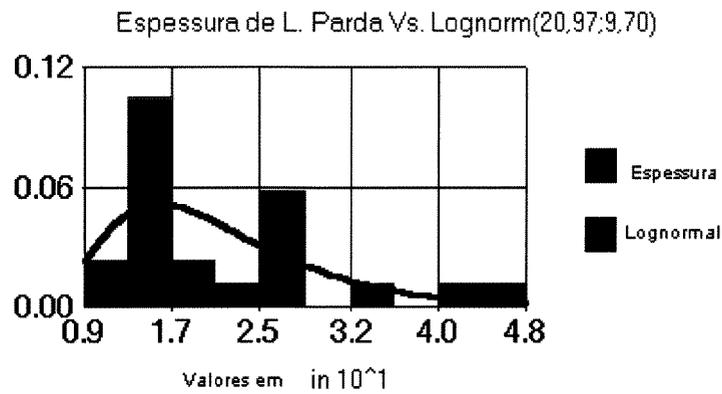


Figura 6.36 - Comparação entre a espessura (dados selecionados) de Lagoa Parda e a distribuição lognormal.

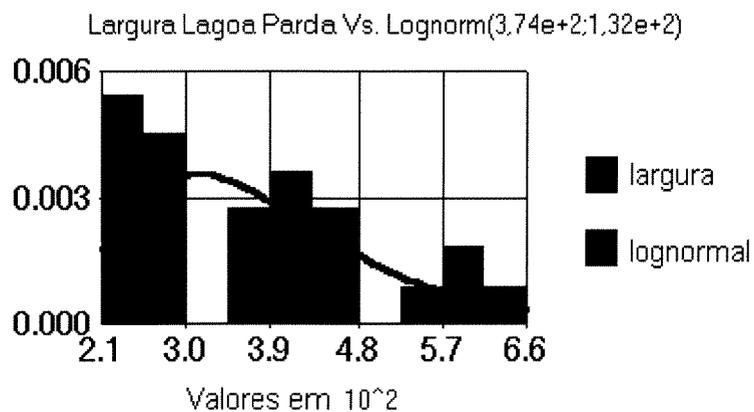


Figura 6.37 - Comparação entre a largura (dados selecionados) de Lagoa Parda e a distribuição lognormal.

A correlação obtida mostra um coeficiente (R^2) de 0,5055, um pouco maior que o obtido com os dados iniciais e um erro, em média, de 10,3% no cálculo da espessura (Fig. 6.38).

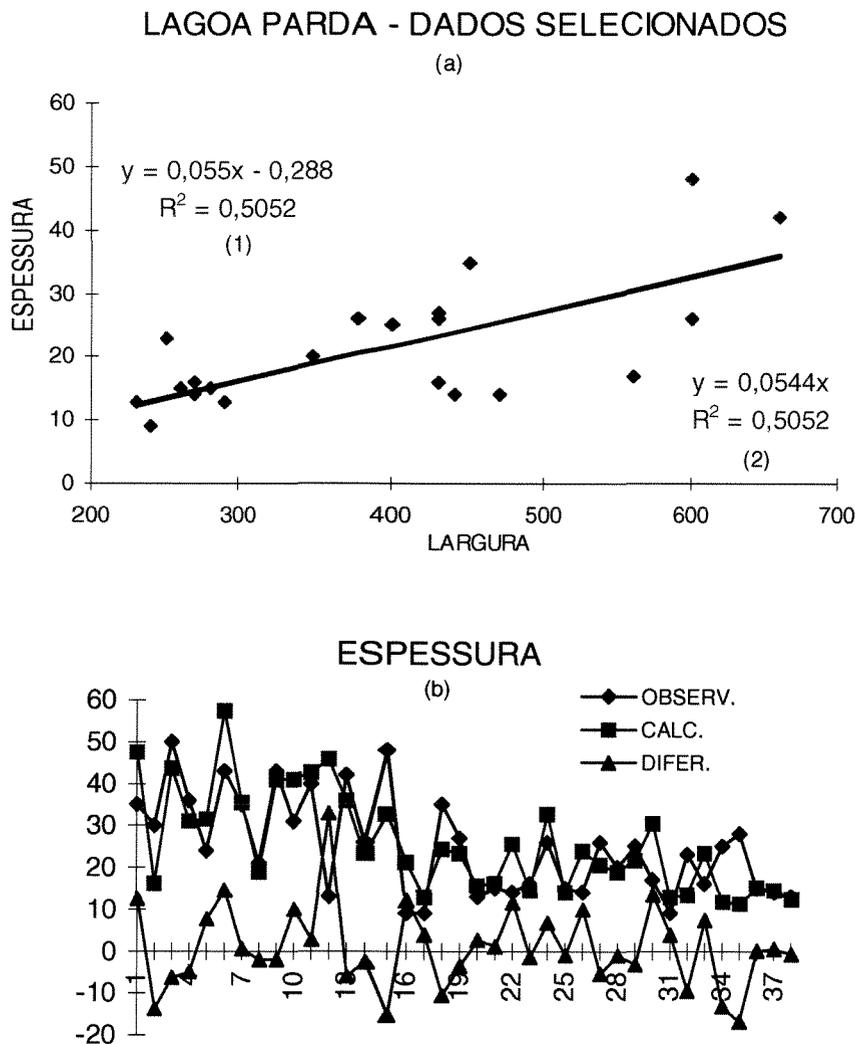


Figura 6.38 - Espessura de Lagoa Parada, dados selecionados. (a) diagrama de dispersão (1) sem interseção na origem, Eq. 6.16: $h = 0,055w - 0,0288$ e (2) com interseção na origem, Eq. 6.17: $h = 0,0544w$; (b) Espessura observada, calculada com Eq. 6.16 e diferença.

Com os quatro conjuntos de dados anteriormente utilizados, ou seja: (1) todos os dados com algumas medidas inferidas; (2) dados sem medidas inferidas; (3) dados sem os canais do Complexo CC1 e (4) dados sem os canais do Complexo CC1 e sem os canais 16, 34 e 35 do Complexo CC2 foram efetuadas regressões com linhas de tendência não-lineares (figuras 6.39 a 6.42).

LAGOA PARDA - DADOS INICIAIS

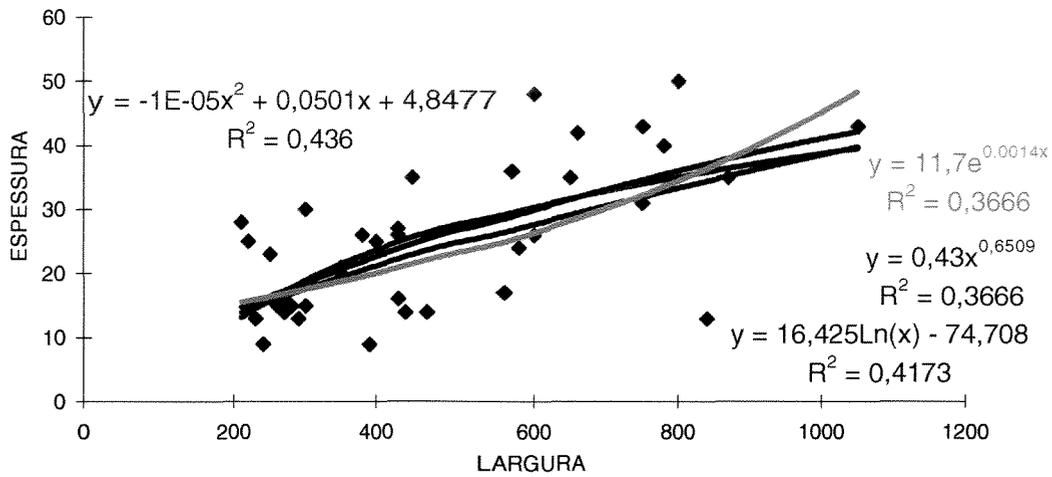


Figura 6.39 - Diagrama de dispersão dos dados iniciais de Lagoa Parada com linhas de tendência não lineares; Eq. 6.18: $h = -1E-05w^2 + 0,0501w + 4,8477$.

LAGOA PARDA - SEM DADOS INFERIDOS

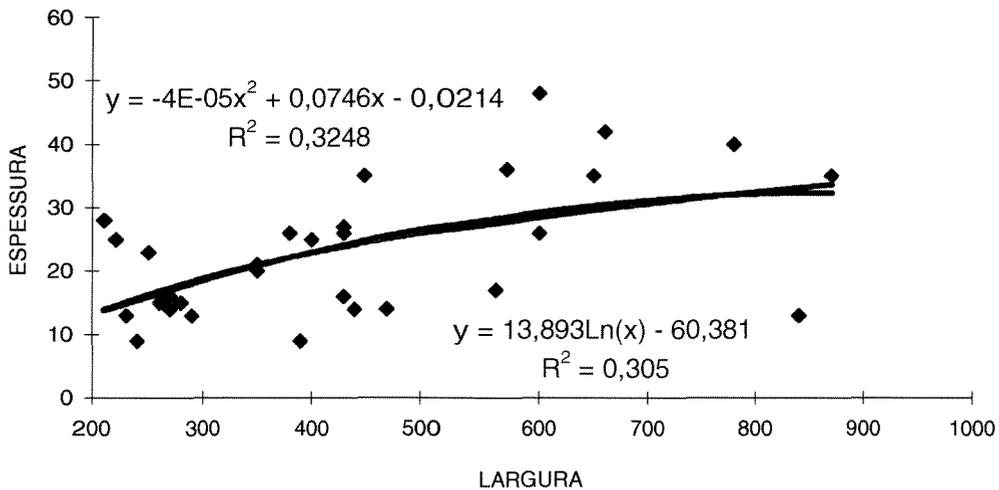


Figura 6.40 - Correlações com linhas de tendência não-lineares que apresentaram os maiores coeficientes, com as medidas de Lagoa Parada, sem dados inferidos.

(Eq. 6.19: $h = -4E-05w^2 + 0,0746w - 0,0214$)

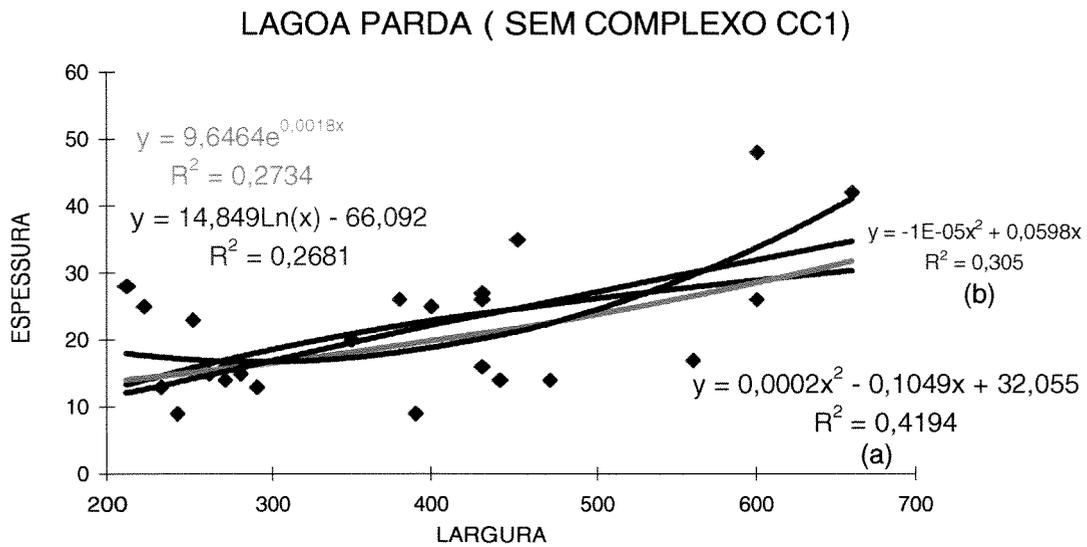


Figura 6.41 - Correlações com linhas de tendência não-lineares com os mais altos coeficientes, dados de Lagoa Parda, sem os canais do Complexo CC1: (a) sem interseção na origem, Eq. 6.20: $h = 0,0002w^2 - 0,1049w + 32,055$; (b) com interseção na origem.

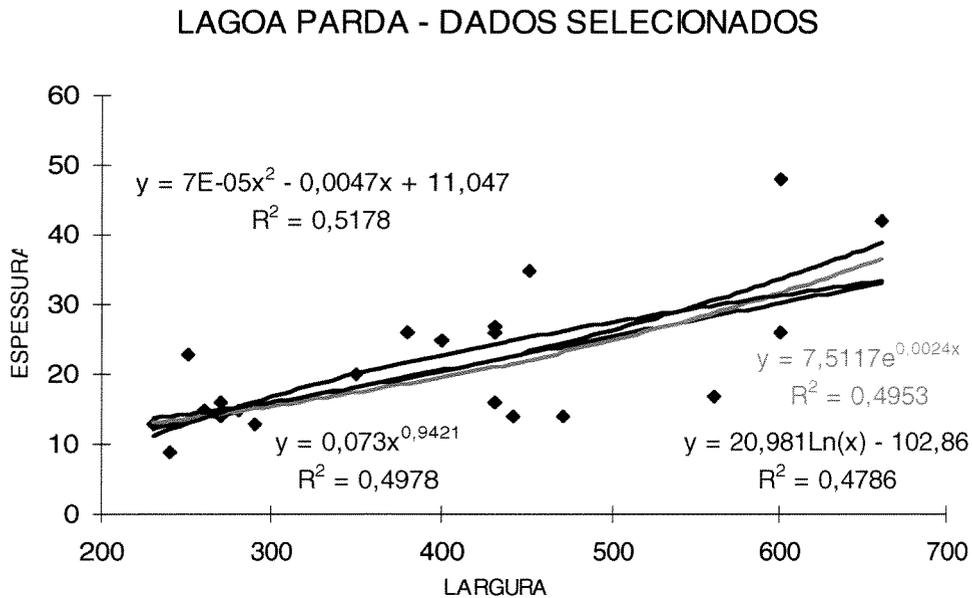


Figura 6.42 - Correlações com linhas de tendência não-lineares com os dados selecionados de Lagoa Parda; Eq. 6.21: $7E-05w^2 - 0,0047w + 11,047$.

As correlações lineares e com linhas de tendência não-lineares entre os dados de largura e espessura de Lagoa Parda, as quais apresentaram os maiores coeficientes, estão sumarizadas na Tabela 6.6.

Tabela 6.6 - Correlações obtidas com os dados de largura e espessura, Lagoa Parda.

CORRELAÇÃO	EQ.	R	R ²	DADOS
$h = 8,3678 + 0,3473w$	6.11	0,65765	0,4325	Iniciais.
$h = 9,3327 + 0,031w$	6.12	0,55060	0,3032	Iniciais sem dados inferidos.
$h = 4,8258 + 0,0432w$	6.14	0,57250	0,3278	Sem canais do Complexo CC1.
$h = -0,288 + 0,055w$	6.16	0,71081	0,5052	Sem canais 34,35, 16 e Comp. CC1.
$h = 0,0544w$	6.17	-	0,5052	Igual ao anterior, c/intersec. origem.
$h = -1E-05w^2 + 0,0501w + 4,8477$	6.18	-	0,4360	Iniciais.
$h = -4E-05w^2 + 0,0746w - 0,0214$	6.19	-	0,3248	Sem dados inferidos.
$h = -1E-05w^2 + 0,0598w$	6.20	-	0,4194	Sem Complexo CC1.
$h = 7E-05w^2 - 0,0047w + 11,047$	6.21	-	0,5178	Sem canais 34,35, 16 e Comp CC1.

O estudo de canais turbidíticos utiliza-se de muitos critérios originalmente definidos para canais fluviais, conforme se observa nas análises efetuadas por Clark & Pickering (1996a), por exemplo, para a definição dos elementos de arquitetura de canais turbidíticos. Decidiu-se, então, avaliar se as correlações obtidas entre as dimensões dos canais fluviais podem ser empregadas para canais turbidíticos. Para tanto, foram utilizados os dados de espessura de Lagoa Parda e a correlação definida por Poletto (1996) para estimar a largura dos canais fluviais da Formação Açú, dada por:

$$w = 16,372 h^{1,54}$$

Entretanto, a largura obtida com a equação acima foi muito maior que a observada (Figura 6.43), indicando que essa correlação não se aplica aos dados de Lagoa Parda.

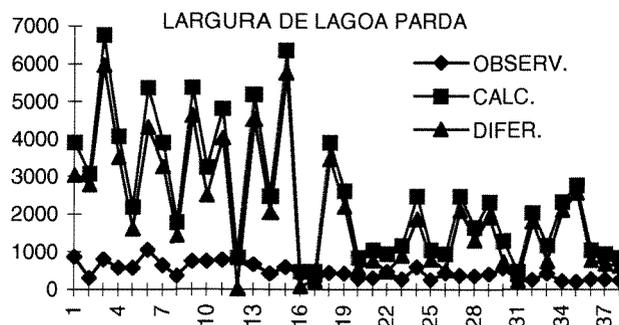


Figura 6.43 - Largura de Lagoa Parda: observada, calculada e diferença entre os dados.

6.3.3. Campo estudado

O principal reservatório do campo estudado ocupa uma área de aproximadamente 2km², com cerca de 90 poços perfurados. Neste estudo, embora tenha-se utilizado os dados de todos os poços na análise preliminar, a área simulada corresponde a 8 km², compreendendo 54 poços, nos quais foram identificados, a partir da correlação rocha-perfil e do padrão de comportamento das curvas de perfis elétricos e radioativos, os intervalos de ocorrência de reservatório e de rochas não-reservatório, em cada um dos poços estudados.

Não foram utilizadas equações matemáticas a partir de análise discriminante e da correlação rocha-perfil devido às grandes variações observadas nas respostas em perfis para uma mesma litologia. A individualização dos corpos arenosos contidos no intervalo estudado baseia-se na identificação litológica efetuada visualmente em cada um dos poços perfurados no campo, a partir do comportamento combinado das curvas dos perfis Raios Gama, Potencial Espontâneo (SP), Resistividade (rasa, média e profunda), Densidade e Neutrônico. Este método, interpretativo, é tradicionalmente usado nas atividades de geologia de desenvolvimento.

Para a delimitação de topo e base dos corpos arenosos, uma vez que esses dados condicionam os corpos gerados na simulação, procurou-se individualizar corpos correlacionáveis a um canal turbidítico. Entretanto, devido à pouca resolução mostrada pelas curvas dos perfis utilizados, os intervalos arenosos identificados podem estar associados a um canal turbidítico ou a um empilhamento de canais de pequena espessura.

Esses intervalos, nos diferentes poços analisados, apresentam uma espessura média de 6 m e 41 m, respectivamente (Tabela 6.7, figs. 6.44 a 6.48). Geralmente estão separados por camadas às vezes contínuas de folhelhos, siltitos e/ou arenitos muito finos, cujas espessuras variam entre 1 e 28 m. As camadas mais espessas de sedimentos finos são mais frequentes na porção sudoeste da área estudada.

A espessura dos intervalos arenosos apresenta uma distribuição lognormal ($\chi^2 = 8,267$; $\chi^2_{9; 0,5} = 8,343$; $\alpha = 0,5$) e vários *outliers*. Os dados do campo estudado afastam-se da distribuição normal, principalmente os relativo à espessura dos intervalos arenosos, onde ocorrem vários *outliers*.

Tabela 6.7 - Estatística básica das espessuras dos dados de poços utilizados.

	RESERVATÓRIO (m)	NÃO-RESERVATÓRIO (m)
MÉDIA	5,929	41,239
MEDIANA	5,000	28,000
VARIÂNCIA	17,869	1450,705
DESVIO PADRÃO	4,227	38,088
MÁXIMO	28,000	127,000
MÍNIMO	1,000	1,000
1o. QUARTIL	3,000	6,000
3o. QUARTIL	8,000	73,000
DIF. (3o.Q - 1o.Q)	5,000	67,000
NÚM. DADOS	200	262

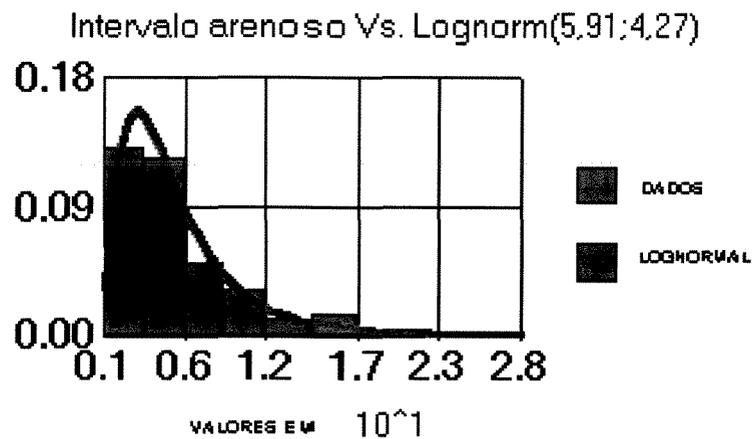


Figura 6.44 - Histograma das espessuras dos intervalos arenosos, campo estudado.

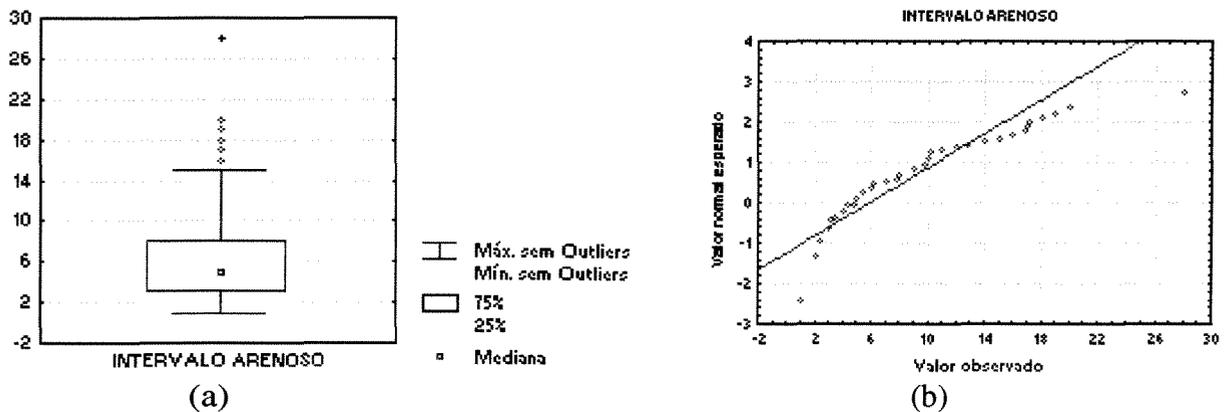


Figura 6.45 - (a) Diagrama de caixa e (b) gráfico de probabilidade normal das espessuras dos intervalos arenosos, campo estudado.

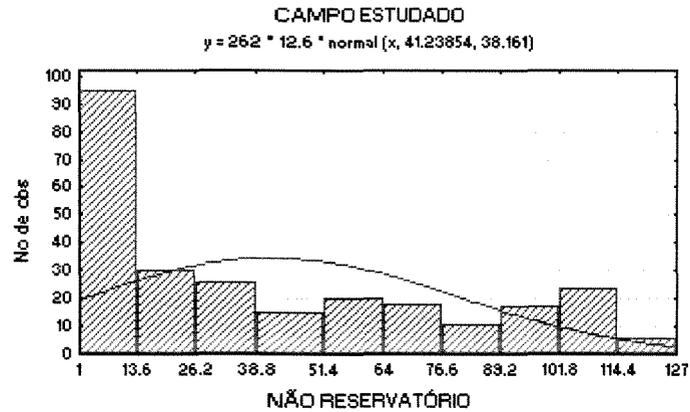


Figura 6.46 - Histograma das espessuras dos intervalos não-reservatórios, campo estudado.

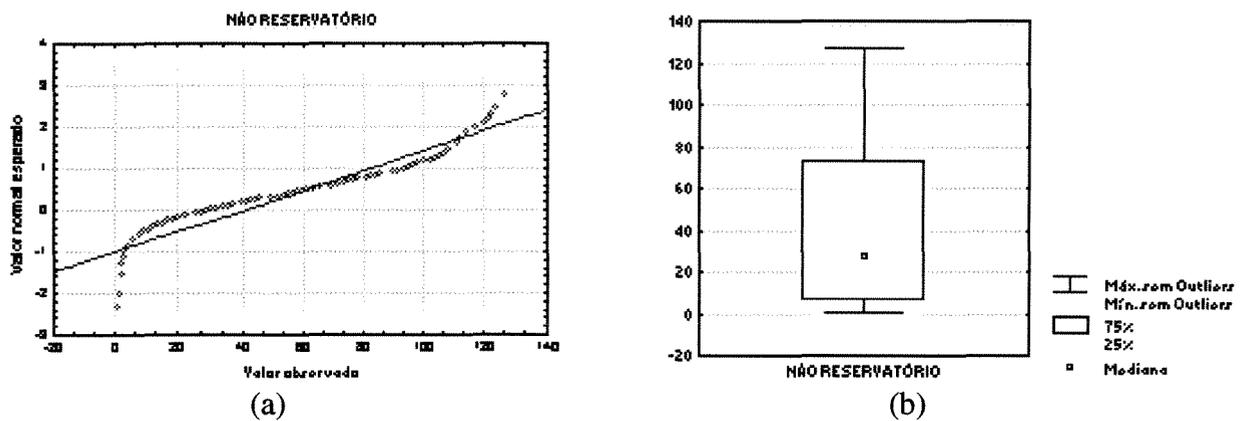


Figura 6.47 - (a) Gráfico de probabilidade normal e (b) diagrama de caixa, espessura dos intervalos não-reservatórios, campo estudado.

6.3.4. Comentários sobre as correlações obtidas

Analisou-se também a correlação entre largura e o logaritmo da extensão para os dados finais do Afloramento de Almada (Fig. 6.48), mas os valores de extensão obtidos a partir dessa correlação apresentam média bem menor que a obtida com os valores medidos (médias de 675,5 m e 736,1 m, respectivamente); desta forma, esta correlação não foi considerada.

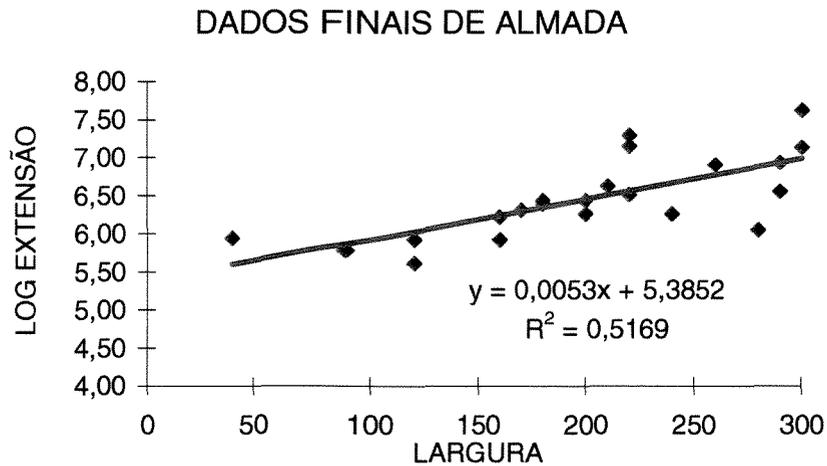


Figura 6.48 - Correlação entre a largura e logaritmo da extensão de Almada, dados finais.

Foram feitas várias simulações utilizando as correlações encontradas com os diferentes conjuntos de dados analisados, com o objetivo de avaliar visualmente a geometria dos corpos gerados, mesmo para baixos coeficientes de correlação. A Figura 6.49 mostra os corpos gerados empregando a forma de canal fluvial, o histograma da distribuição empírica da largura dos dados selecionados de Lagoa Parda como variável independente e as correlações dadas por: $h = 0,068*w - 15,64$ e $c = 9,346*w - 385,925$. Observa-se que os corpos gerados são maiores e aparentemente apresentam uma conectividade maior que o esperado para o campo estudado, comparando-se com a seção geológica (Fig. 6.6). Além disso, os corpos mostram extensão muito grande, comprovando que a forma canal fluvial não se aplica à simulação de canais turbidíticos.

A Figura 6.50 apresenta a imagem resultante da simulação com a forma geométrica de canal turbidítico, histograma da distribuição empírica da largura dos dados finais de Almada e as correlações dadas por: $h = 0,066*w - 0,892$ e $c = 1,057*w + 86,919$. Neste caso, os corpos gerados são pouco alongados, pois apresentam diferenças muito pequenas para as dimensões largura e extensão, indicando que a correlação usada não é adequada ao caso estudado.

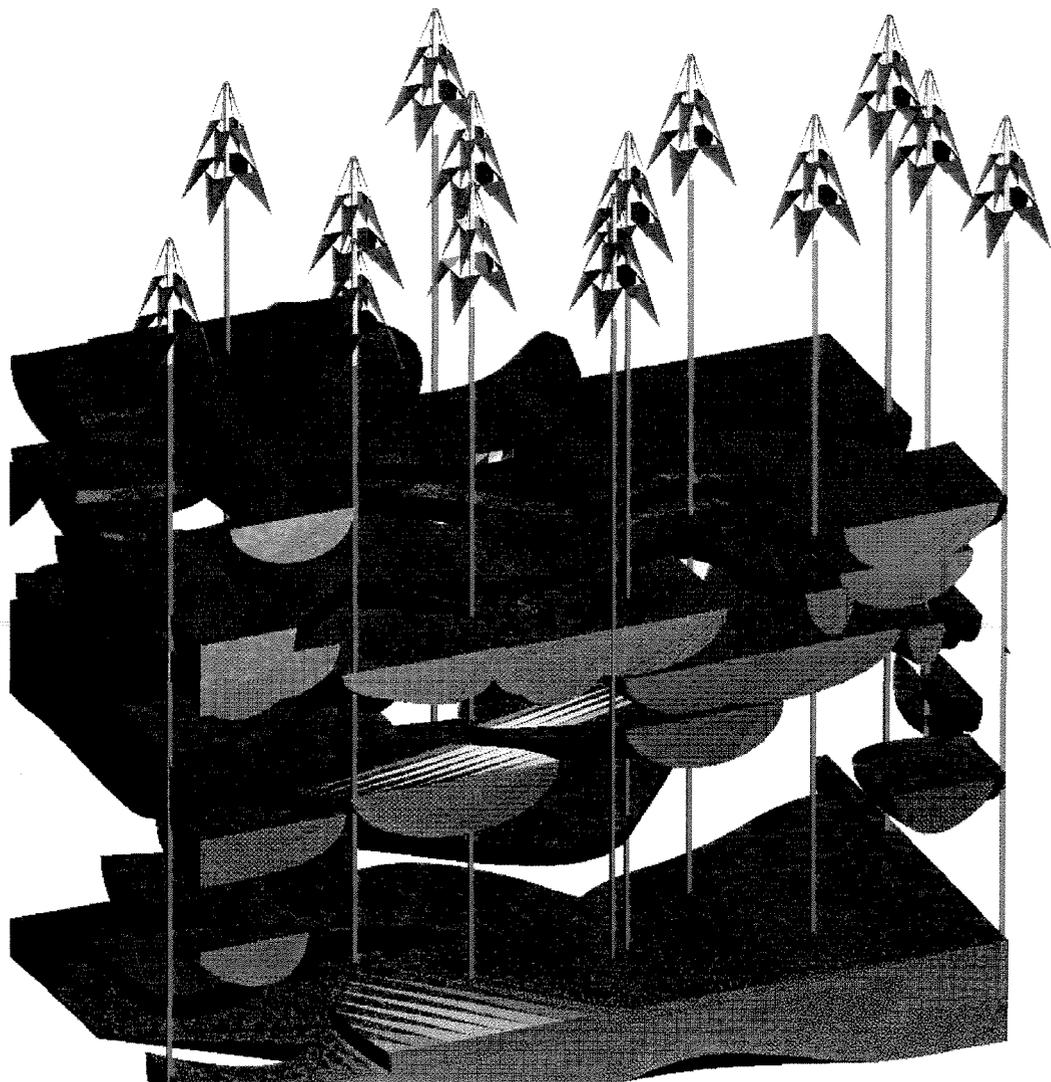


Figura 6.49 - Simulações condicionais iniciais efetuadas para testar as correlações obtidas e forma geométrica dos canais. A forma usada, canal fluvial, pressupõe extensão infinita e, por isso, as extremidades do canal têm terminações abruptas; a variável independente é dada pelo histograma de largura dos dados selecionados de Lagoa Parda e foram usadas as correlações: $h = 0,068*w - 15,64$ e $c = 9,346*w - 385,925$.

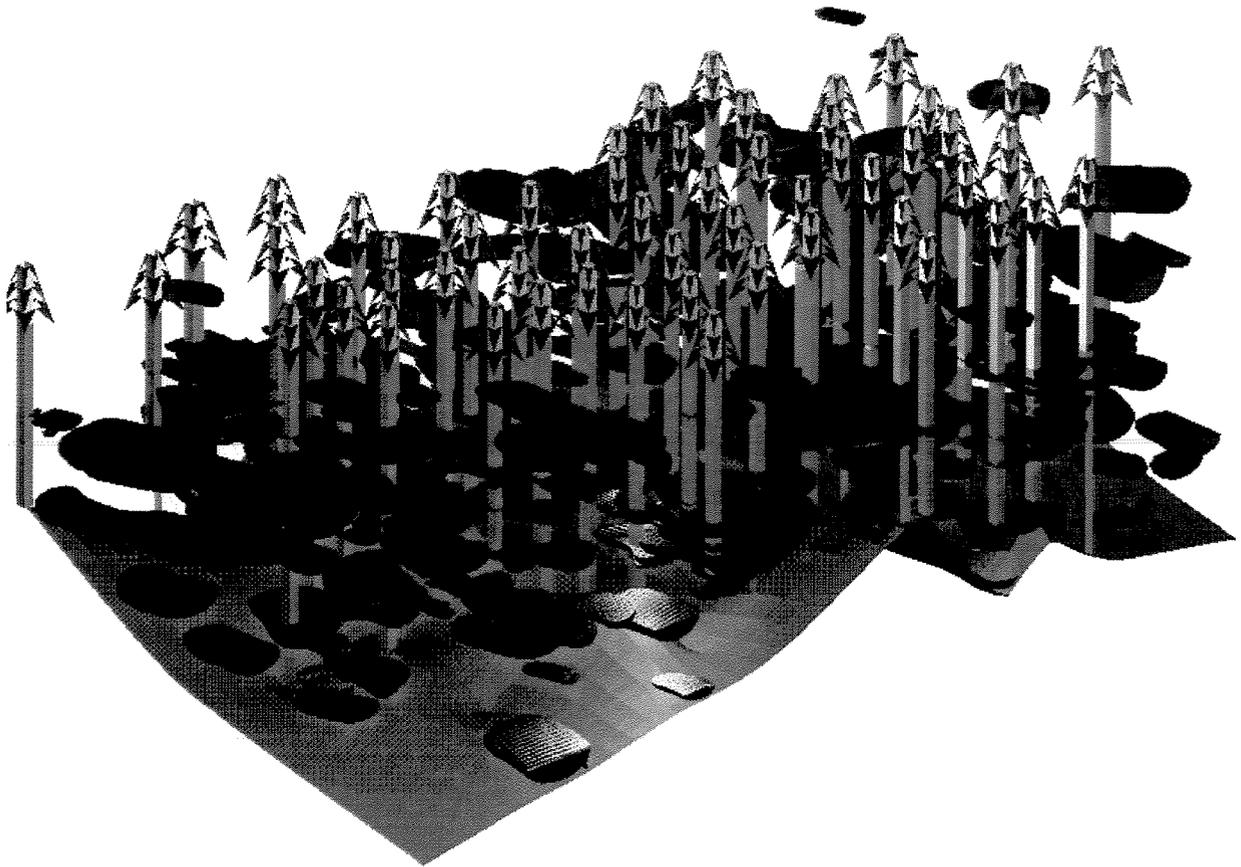


Figura 6.50 - Canais turbidíticos, gerados a partir da largura dos dados finais dos afloramentos de Almada e as correlações

$$h = 0,066*w - 0,892$$

$$c = 1,057*w + 86,919.$$

Com as diferentes correlações obtidas com os dados reinterpretados dos afloramentos de Almada (Tabela 6.2), calculou-se a extensão e efetuou-se a estatística básica das 23 medidas assim estimadas (Tabela 6.8). Tal procedimento foi também empregado com os dados de espessura de Lagoa Parda (Tabelas 6.6 e 6.9).

Tabela 6.8 - Estatística básica das extensões calculadas.

	MÉDIA	MEDIANA	VARIÂNCIA	D.PADRÃO	MÁXIMO	MÍNIMO	R ²
OBSERV.	736,1	625,0	177660,8	421,5	2050,0	275,0	
EQ. 6.2	736,1	727,4	71690,1	267,8	1124,9	91,5	0,4035
EQ. 6.3	598,8	594,1	20888,9	144,5	808,6	250,8	0,5009
EQ. 6.4	742,7	734,7	61246,4	247,5	1102,0	146,9	0,4012
EQ. 6.5	681,6	672,3	84576,8	290,8	1103,9	-18,4	0,8965
EQ. 6.6	690,0	682,6	52869,4	229,9	1023,9	136,5	0,8541
EQ. 6.7	691,8	642,2	55782,1	236,2	1102,1	270,7	0,5169
EQ. 6.8	581,0	558,3	20121,8	141,9	816,4	304,0	0,5294
EQ. 6.9	699,1	630,3	75954,6	275,6	1187,5	283,7	0,9393
EQ. 6.10	688,9	647,4	84488,6	290,7	1162,1	115,1	0,9489

Tabela 6.9 - Estatística básica das espessuras calculadas.

	MÉDIA	MEDIANA	VARIÂNCIA	D.PADRÃO	MÁXIMO	MÍNIMO	R ²
OBSERV.	21,05	16,50	99,95	10,00	48,0	9,0	
EQ. 6.11	21,83	21,95	20,11	4,49	31,3	16,4	0,4325
EQ. 6.12	21,36	21,40	15,98	4,00	29,8	16,5	0,3032
EQ. 6.14	21,57	21,65	30,95	5,56	33,3	14,8	0,3278
EQ. 6.16	21,05	21,15	50,36	7,10	36,0	12,4	0,5052
EQ. 6.17	21,10	21,25	49,30	7,02	35,9	12,5	0,4360
EQ. 6.18	22,60	22,85	29,13	5,40	33,6	15,8	0,3248
EQ. 6.19	22,22	23,00	28,23	5,31	31,8	15,0	0,4194
EQ. 6.20	21,53	21,80	44,11	6,66	35,1	13,2	0,3050
EQ. 6.21	20,93	19,90	50,31	7,09	38,4	13,7	0,5178

Analisando-se os dados das Tabelas 6.8 e 6.9 verifica-se que os valores estimados com as equações 6.2 e 6.16, dadas por:

$$c = -67,44 + 3,9744 * w \quad (\text{Eq. 6. 2})$$

$$h = -0,288 + 0,055*w \quad (\text{Eq. 6.16})$$

apresentam a mesma média que os dados medidos para a extensão e largura, respectivamente, embora tenham variância, desvio padrão e extremos menores, em ambos os casos. Essas equações foram utilizadas para calcular a espessura dos canais reinterpretados dos

afloramentos de Almada (Eq. 6.16; Tabela 6.10) e a extensão dos canais do Campo de Lagoa Parda (Eq. 6.2; Tabela 6.11).

Comparando-se a espessura estimada para os canais de Almada e as medidas efetuadas por Bruhn & Moraes (1989) para esses afloramentos, verifica-se que os valores calculados tendem a subestimar a espessura total da seção vertical, apesar desta incluir, além dos corpos arenosos, folhelhos e diamictitos (Fig. 6.3a; Tabela 6.10). Esses sedimentos mais argilosos apresentam uma erosão diferenciada em relação aos arenitos, sugerindo que originalmente os canais poderiam ser mais largos que os valores medidos, o que aumenta a diferença entre espessura estimada e observada. Essa diferença pode ser reflexo da técnica disponível para estimar a largura dos canais de Lagoa Parda, obtida através de meios indiretos, os quais dependem do espaçamento entre os poços.

Além disso, os canais de Lagoa Parda mostram uma grande predominância de clásticos grossos a médios (Bruhn, 1993) e a correlação obtida com esses dados refletem a relação entre a largura e a espessura desses depósitos de clásticos grossos. Talvez isto explique a baixa correlação entre largura e espessura, obtida com os dados de Lagoa Parda e as diferenças encontradas com a aplicação dessa correlação nos dados de Almada. É também possível que, uma vez que os canais de Almada apresentam sedimentos mais finos associados a depósitos de canais, a relação entre largura e espessura para Almada seja diferente da encontrada para Lagoa Parda. Outros fatores também podem ter interferido nas medidas obtidas, tais como história deposicional diferente para os sedimentos analisados e/ou eventos turbidíticos com maior potencial erosivo em Lagoa Parda.

Assim, as grandes variações encontradas nas medidas de largura desses corpos, para um mesmo comprimento em Almada e para uma mesma espessura em Lagoa Parda, podem ter influenciado a baixa correlação encontrada entre largura, espessura e extensão. Entretanto, os dados disponíveis são restritos, dificultando a análise dos resultados

Para haver maior confiabilidade nas correlações obtidas seria necessário a obtenção das espessuras de Almada, através de sondagens rasas ou de sísmica de alta resolução; desta forma, ter-se-ia em um mesmo conjunto de dados, as três dimensões necessárias para representar o objeto canal.

Os resultados mostram que a análise efetuada é bastante preliminar. Isto é decorrência da limitação dos dados utilizados e seus reflexos nas correlações encontradas, as quais, embora imprecisas, constituem-se nos melhores dados disponíveis para a simulação.

Tabela 6.10 - Espessura calculada para o Afloramento de Almada.

CANAL	EXTENSÃO (m)	LARGURA (m)	ESPESSURA (m)	SEÇÃO VERTICAL (*)
1	675	220	11.8	
2	425	280	15.1	
3	625	200	10.7	
4	500	160	8.5	
5	525	200	10.7	
6	1275	220	11.8	
7	525	240	12.9	
8	1025	290	15.7	
9	275	120	6.3	
10	325	90	4.7	
11	375	120	6.3	9.0 m (afloram. 3)
12	1000	260	14.0	
13	380	40	1.9	
14	700	290	15.7	
15	1250	300	16.2	
16	2050	300	16.2	16.0 m (afloram. 6)
17	375	160	8.5	29.0 m (afloram. 4)
18	625	200	10.7	
19	600	180	9.6	
20	550	170	9.1	
21	750	210	11.3	
22	625	180	9.6	
23	1475	220	11.8	

(*) Bruhn & Moraes (1989).

Tabela 6.11 - Extensões calculadas de Lagoa Parda.

CANAL	ESPESSURA (m)	LARGURA (m)	EXT. MAP. (m) (*)	EXT. CALC.(m)
13	42	660	> 1500	2555.7
14	26	430		1641.6
15	48	600	1300 (**)	2317.2
17	9	240		886.4
18	35	450	>1300	1721.0
19	27	430	>1500	1641.6
20	13	290		1085.1
22	14	470		1800.5
23	16	270		1005.6
24	26	600		2317.2
25	15	260		965.9
26	14	440		1681.3
27	26	380		1442.8
28	20	350	>700	1323.6
29	25	400	>1200	1522.3
30	17	560		2158.2
31	9	240		886.4
32	23	250	>900	926.2
33	16	430	>1000	1641.6
36	15	280		1045.4
37	14	270		1005.6

(*)segundo Bruhn (1993); (**) parcialmente erodido.

7. Simulações

7.1. Tratamento dos dados para a simulação

7.1.1. Dados de entrada

A primeira etapa para alimentar os dados no simulador corresponde à delimitação da área e do intervalo a ser simulado, através da identificação de marcos estratigráficos utilizados para delimitar topo e base do intervalo. Os critérios utilizados para definição dos marcos envolvem a análise de características litológicas, conteúdo fossilífero e assinatura em perfis elétricos e radioativos.

Esses marcos devem ter ocorrência regional, para que sejam correlacionáveis em todos os poços da área estudada e ter um significado estratigráfico conhecido, pois a simulação representa, simplificada, uma reconstituição paleoambiental do elemento simulado, embora o simulador usado ainda não considere todos os fatores envolvidos no processo deposicional, como taxa de aporte de sedimentos, taxa de subsidência da bacia e movimentação tectônica, entre outros. Esses marcos geralmente coincidem com superfícies de inundação (embora não necessariamente correspondam à superfície de inundação máxima), *hard-grounds* ou folhelhos com assinatura típica em perfis elétricos e radioativos, como o *datum* utilizado para o Campo de Lagoa Parda, o qual é constituído por folhelhos com alta resistividade enriquecidos em siderita, rodocrosita e/ou piritita (Bruhn, 1993).

O intervalo delimitado deve ser o mais homogêneo possível, ou seja, deve envolver corpos arenosos não só pertencentes ao mesmo ambiente deposicional, mas pertencentes à mesma unidade genética. Para que a simulação tenha significado geológico, como o simulador não prevê variações, por exemplo, de paleocorrentes regionais no intervalo a ser simulado, mesmo que os corpos arenosos aí contidos pertençam à mesma unidade genética, o intervalo deve ser subdividido e as simulações feitas em separado, como no caso dos complexos de canais CC1 e CC2 do Campo de Lagoa Parda, os quais apresentam variações na área fonte (Bruhn, 1993). Isto salienta a importância do conhecimento prévio da geologia da área a ser simulada e, quanto mais detalhado for esse conhecimento, tanto melhor serão os resultados obtidos com a simulação.

Uma vez identificados os marcos estratigráficos é necessário individualizar os corpos arenosos contidos no intervalo estudado, pois estes vão condicionar a simulação. Isto

geralmente é efetuado a partir da correlação rocha/perfil e dependendo dos dados de testemunhos e das características de perfis, esta etapa pode ser bastante trabalhosa. Para cada um dos poços da área a ser simulada, informa-se ao simulador as espessuras acumuladas dos corpos individualizados, a partir do topo do intervalo.

A etapa seguinte corresponde à determinação dos parâmetros iniciais de simulação, ou seja, largura, espessura, extensão, direção e sinuosidade dos objetos a serem simulados. Esses parâmetros de entrada podem ser fornecidos na forma de histogramas de frequência ou de correlação entre as medidas das dimensões que compõem a forma a ser simulada.

Poletto (1996) observou que para simular os canais fluviais da Formação Açú era necessário estabelecer uma relação entre a largura e a espessura dos canais, evitando-se assim distorções nos objetos gerados e impedindo, por exemplo, que canais de pequena espessura apresentassem uma largura muito grande, o que seria incompatível com o observado em afloramentos, dados do recente e da literatura (Leeder, 1973; Lorenz *et al.*, 1985; Schenk, 1992). Como esses canais tinham comprimento maior que o domínio da simulação, não foi necessário utilizar o parâmetro extensão.

Neste trabalho foi necessário estabelecer uma relação entre largura, espessura e extensão, já que os canais turbidíticos do campo estudado têm largura e extensão menores que a área a ser simulada e, portanto, têm dimensões finitas dentro do domínio da simulação.

7.1.2. Escolha dos parâmetros

A fase de escolha e obtenção de parâmetros é a etapa mais difícil e trabalhosa de todo o processo de simulação. Neste trabalho foram efetuados vários testes para definir qual o parâmetro (entre largura, extensão e espessura) que seria informado como variável independente (cujos dados de entrada são na forma de histograma), quais seriam informados como variável dependente (os dados de entrada são informados como correlações da variável independente) e qual a melhor correlação entre as variáveis.

As correlações usadas baseiam-se nas medidas de largura, extensão, direção e sinuosidade do Afloramento de Almada e nas medidas de largura e espessura do Campo de Lagoa Parda. A espessura dos intervalos arenosos provém dos dados de poços e pode corresponder a um único canal ou a um empilhamento de canais de pequena espessura.

Inicialmente, pretendia-se utilizar apenas os dados dos afloramentos da Bacia de Almada, mas as medidas de espessura restringem-se a três seções verticais. Tentou-se

também a utilização do mapa topográfico da área para estimar a espessura total das cristas de turbiditos, mas a carta topográfica disponível está na escala 1:100.000, correspondente à folha de Itabuna, Bahia (folha SD.24-Y-B-VI), dificultando em demasia as estimativas de espessura.

Como nenhum dos conjuntos de dados continha todos os parâmetros necessários para descrever no espaço tridimensional o objeto a ser simulado, optou-se pela largura como variável independente, já que essa medida está contida nos dois conjuntos de dados disponíveis. Considerou-se que as relações obtidas entre esses dados são representativas da ordem de grandeza esperada entre as dimensões dos corpos medidos e, portanto, aplicáveis ao campo estudado. A análise visual dos corpos gerados, comparados com as seções geológicas interpretadas, corrobora essa representatividade.

7.1.3. Curvas de proporção para a simulação de canais turbidíticos

Para a simulação dos canais turbidíticos do campo estudado, o *datum* selecionado corresponde ao topo do intervalo estratigráfico simulado. Conseqüentemente, está-se supondo que as camadas basais estão ausentes nos poços com menor espessura, embora isto não seja necessariamente verdadeiro, já que uma espessura menor pode ser reflexo de uma taxa de sedimentação diferenciada, em função das variações laterais de fácies. Assim, a curva de proporção vertical utilizada é não-normalizada e a proporção global da unidade genética, usando intervalo de classe igual à trinta, é de cerca de 7%, enquanto que a razão global reservatório/não reservatório do intervalo simulado, é de 12% (Fig. 5.6).

A curva de proporção utilizada foi obtida com todos os poços do campo estudado, pertencentes ao domínio simulado, cuja espessura total varia entre 139 m e 254 m, com média de 213,9 m, desvio padrão de 27,9 e variância de 779,04 (Fig5.5). A proporção vertical calculada corresponde à razão entre o número de ocorrências de uma unidade genética por intervalo de classe e o número de poços da área. Essa curva representa, proporcionalmente, a ocorrência da forma escolhida para a simulação, ou seja, uma proporção de 10%, por exemplo, para a simulação de uma forma qualquer, significa uma proporção igual para a ocorrência dessa forma. Caso a proporção utilizada seja maior ou igual à dada pelos poços, esta corresponde à proporção final dos objetos gerados. Quando é menor que os dados de poços, a proporção final varia conforme o tipo de simulação escolhida: se condicional, equivale aos dados de poços; se não-condicional, é obedecida a

proporção global informada no início da simulação.

As simulações efetuadas com a proporção global dada pela curva de proporção apresentam a mesma proporção final dos objetos gerados, tanto para as simulações não-condicionais quanto para as condicionais, seja aos dados de poços ou somente à curva de proporção vertical. Isto é o esperado, já que essas simulações respeitam a mesma proporção global, resultante dos intervalos informados em cada poço. Conseqüentemente, as simulações condicionadas simultaneamente aos dados de poços e à curva de proporção são realmente necessárias apenas quando o espaçamento entre os poços, no intervalo simulado, é muito maior que a largura da forma simulada e/ou quando o intervalo de ocorrência dessa forma for muito restrito e menor que o intervalo estratigráfico escolhido para a simulação. Simulações condicionadas à curva de proporção também são indicadas quando se quer simular uma área onde há pouco ou nenhum dado de poço; nestes casos, pode-se utilizar uma curva de proporção gerada a partir de dados de poços de áreas análogas, para suprir a falta de informações da área que se quer simular.

Na simulação de canais turbidíticos também verificou-se um aumento significativo do tempo de simulação, quando condicionada à curva de proporção vertical de unidades genéticas. Além disso, não se observou nenhuma variação significativa nas imagens obtidas simulando-se condicional à curva ou condicional apenas aos dados de poços. Como os corpos arenosos têm distribuição aleatória no intervalo selecionado, este resultado parece ser consistente, já que a curva é resultante desses dados e não-normalizada.

As alterações são imediatas quando se utiliza proporção global maior que a resultante da curva de proporção. Isto sugere que simulações condicionadas à curva de proporção melhoram os resultados quando o número de poços na área estudada é pequeno e/ou com malha de drenagem muito esparsa. Neste caso, pode-se usar uma curva obtida numa área análoga, em estágio avançado de desenvolvimento, na simulação de uma área em fase inicial de exploração ou exploração.

Souza Jr. (1997) introduziu a matriz de curvas de proporção no processo de simulação geoestatística. Acredita-se que a incorporação ao método booleano do condicionamento através de matriz de proporção forneça resultados mais realistas que o condicionamento por poços e/ou por curva de proporção vertical de fácies.

7.1.4. Arquivos de entrada para o simulador

Os dados de entrada para o simulador compreendem arquivos com a listagem de todos os poços utilizados na simulação, arquivos com as informações individuais de cada um dos poços e arquivos com a frequência absoluta da variável independente.

Os arquivos com a listagem de todos os poços têm extensão “.par”. Para cada um dos poços usados, deve-se construir um arquivo com extensão “.wel” contendo as informações da espessura acumulada dos intervalos identificados (reservatórios e não-reservatórios) apresentando, na primeira linha, as coordenadas UTM do poço, na segunda linha um código identificador do poço e o número de intervalos individualizados e nas demais linhas, as profundidades em cota dos diferentes intervalos, a partir do *datum* estratigráfico escolhido (Anexos 1 e 2).

Os arquivos contendo os dados de frequência têm extensão “.hst” e contém, na primeira linha o valor máximo do parâmetro analisado, na segunda, o valor mínimo, na terceira um número maior que a frequência máxima obtida, na quarta o número de classes do histograma e nas demais linhas, os valores das frequências absolutas de cada classe do histograma (Anexo 3). A partir desses dados, o programa constrói a curva de frequência acumulada no intervalo [0,1], a qual será utilizada para a obtenção da medida do parâmetro, que se baseia no sorteio de um número aleatório pertencente ao intervalo citado.

7.2. Parametrização e ajuste de correlações

A forma geométrica usada para a simulação de canais turbidífticos é semelhante à usada por Poletto (1996) para a simulação de canais fluviais, ou seja, a seção transversal dos canais é dada por uma semi-elipse cujo eixo maior corresponde à largura do canal e cujo eixo menor corresponde à profundidade do canal ou espessura do preenchimento deste (Fig. 7.1). A geometria e posição espacial do canal são dadas pelos parâmetros largura (w), espessura (h), direção (orientação preferencial do canal), sinuosidade (razão entre o comprimento e a distância mínima entre os extremos do canal) e comprimento (c). O comprimento teve de ser incluído como parâmetro de entrada dos dados porque os canais são menores, em extensão, que o domínio da área simulada. Assim, para manter a consistência do objeto simulado é necessário informar a correlação entre as três dimensões do objeto canal.

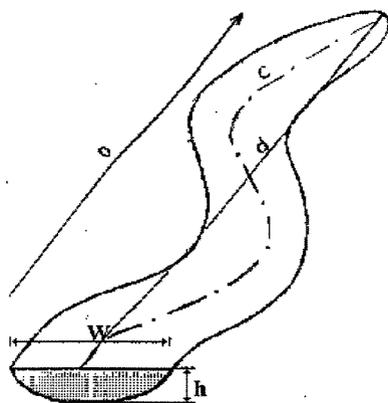


Figura 7.1 - Parâmetros que definem um canal turbidítico em três dimensões: largura (w), espessura (h), comprimento (c), direção preferencial (o), distância entre os extremos (d) e sinuosidade ($s = c/d$). (Modificado de Lanzarini *et al.*, 1995).

A inclusão do parâmetro c (comprimento) implicou na modificação da geometria do canal. Foram efetuadas algumas simulações usando-se a mesma forma empregada para a simulação de canais fluviais (de Lanzarini *et al.*, 1995; Fig. 7.2). Nestas condições, observa-se que os canais terminam abruptamente, mantendo a seção semi-elíptica com as mesmas dimensões em toda a extensão do canal. Para que a geometria representando o término dos canais fosse mais coerente com o observado em afloramentos foi efetuada uma adaptação na forma do canal de maneira que, próximo às extremidades, a seção semi-elíptica diminui gradativamente de largura e espessura (Fig. 7.3).

Nas simulações, a escolha das medidas das variáveis independentes para cada um dos canais simulados baseia-se no método da inversão, que consiste no sorteio de um número aleatório pertencente ao intervalo $[0,1)$. O número sorteado é considerado equivalente à frequência acumulada amostral do parâmetro que se quer obter a medida e, ao ser levado ao gráfico dessa função, fornecerá o valor da medida para aquele canal a ser simulado (Fig. 7.4). Como os números aleatórios sorteados em princípio apresentam uma distribuição uniforme, as medidas obtidas através do gráfico da função de distribuição acumulada são equiprováveis.

Neste trabalho, as variáveis independentes correspondem à largura, direção e sinuosidade e os gráficos das funções de distribuição acumulada são criados pelo programa utilizado a partir das informações fornecidas através dos histogramas de frequência (Fig. 7.5).

As simulações apresentadas nas figuras 7.6 e 7.7 foram geradas tendo como variáveis independentes os dados iniciais de direção e sinuosidade de Almada e os dados de espessura

do intervalo arenoso (h) do campo estudado; a largura (w) e o comprimento (c) são dados por:

$$w = 14,813 * h + 133,598$$

$$c = 9,346 * w - 385,925$$

Ambas as simulações partem da mesma proporção inicial global de 0,02%, mas no primeiro caso a simulação é não-condicional e, no segundo caso, condicional. A representação gráfica dos dados de poços é dada por linhas verticais, onde a fácies reservatório tem cor amarela e a fácies não-reservatório é dada pela cor verde. Na primeira simulação foram gerados corpos que não respeitam os dados dos poços, até atingir a proporção global informada (Fig. 7.6). Na segunda simulação verifica-se, através da análise visual, que prevalece o condicionamento aos dados de poços, em detrimento na proporção inicialmente informada, mostrando que nas simulações condicionais, qualquer que seja a proporção global inicial, a proporção final é resultante dos dados de poços. Conseqüentemente, foi gerado um número maior de corpos, geralmente com dimensões menores (Fig. 7.7).

Em ambos os casos, esses canais tendem a apresentar, devido ao empilhamento lateral e/ou vertical, uma continuidade maior da fácies reservatório do que sugerem a interpretação geológica, dados de testemunho e os dados de pressão e de produção do campo estudado. Isto indica que as correlações acima mencionadas não são adequadas para a geração dos corpos do campo em estudo e, por isso, foram desprezadas.

Após a realização de várias simulações constatou-se que nas simulações não-condicionais há uma concentração maior de corpos na seção basal do domínio da simulação, conforme mostra a Figura 7.6. Isto pode ser conseqüência de efeito de borda no sorteio aleatório do centro dos corpos ou resultante da metodologia usada para a geração de canais, ou seja, da base para o topo. Como a proporção global inicial é baixa, os corpos gerados na base do intervalo praticamente atendem à proporção utilizada, restando poucos corpos para totalizar a proporção de 0,02%, no caso do exemplo citado.

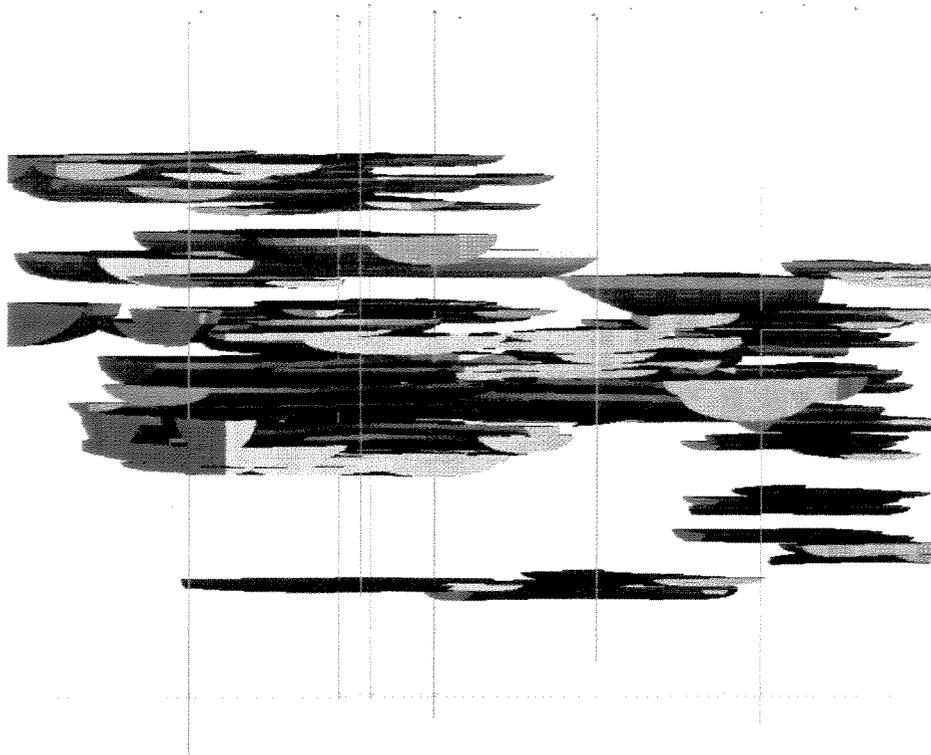


Figura 7.2 - Forma inicial do objeto canal, com terminações abruptas longitudinais.

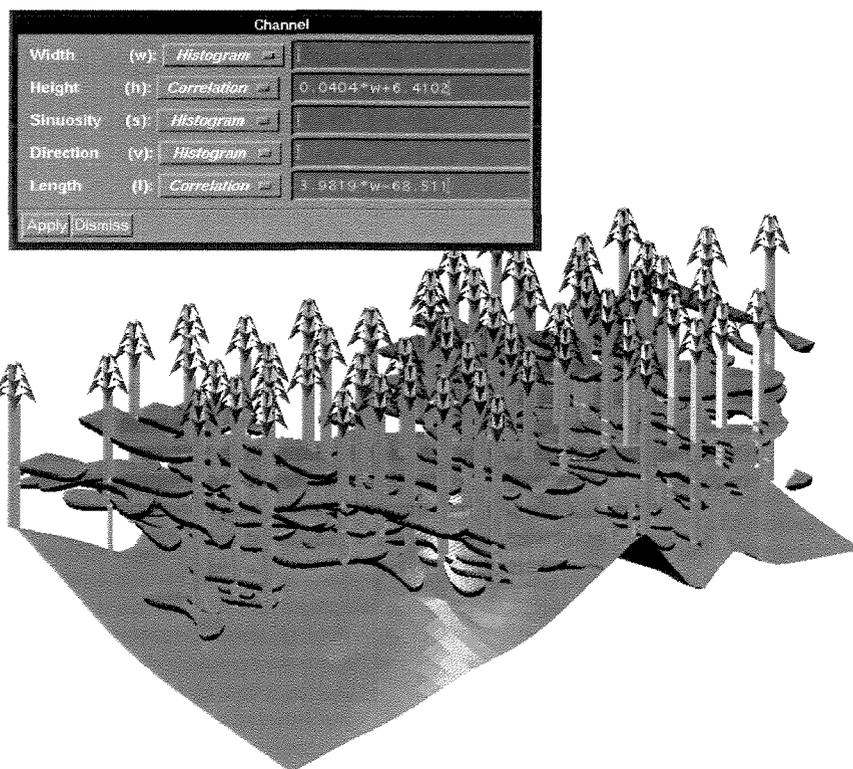


Figura 7.3 - Forma final do objeto canal, com terminações suaves nas extremidades.

Não se fez uma análise mais profunda, mas esta concentração de corpos na base do intervalo pode também significar que o algoritmo de geração (representando o processo de pontos) esteja com algum efeito de borda ou então que a concentração de corpos na base seja apenas reflexo da semente usada (neste caso, igual a 1).

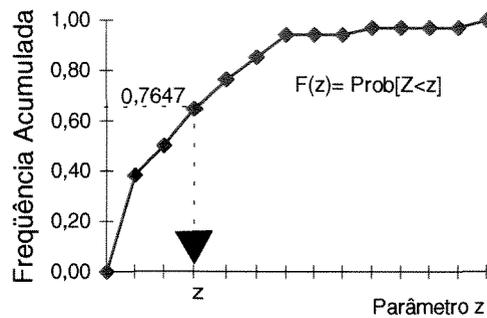
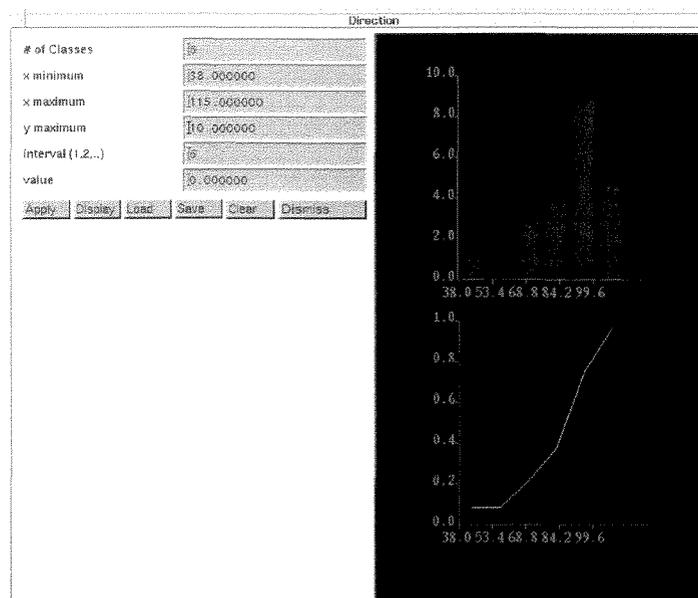


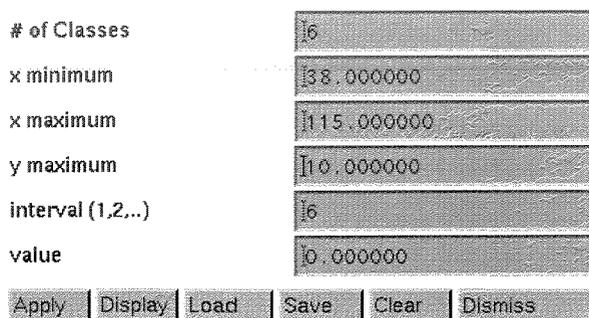
Figura 7.4 - Esquema gráfico do Método da Inversão: obtenção de medidas através de sorteios aleatórios.

Foram realizadas simulações não-condicionais (nem a poços, nem à curva de proporção), informando-se a proporção global inicial de 7%, igual a proporção global obtida com a curva de proporção baseada nos dados de poços (Figura 7.8a). Comparando-se esses resultados com a simulação condicional aos dados de poços e, portanto, com a mesma proporção global, verifica-se que o número de corpos gerados é diferente, 349 corpos no primeiro caso e 508 corpos no segundo caso, mas o volume final é o mesmo, como seria de se esperar. O número de corpos varia porque, para se atingir uma mesma proporção, esse número depende do tamanho do objeto gerado: quanto maior o tamanho, menor o número de corpos. A análise visual das figuras 7.8a e 7.8b mostra uma predominância de corpos com dimensões menores no segundo caso, devido ao condicionamento aos dados dos poços (Fig. 7.8b). Essas simulações baseiam-se nas mesmas correlações usadas na geração das figuras 7.6 e 7.7, as quais foram desconsideradas posteriormente.

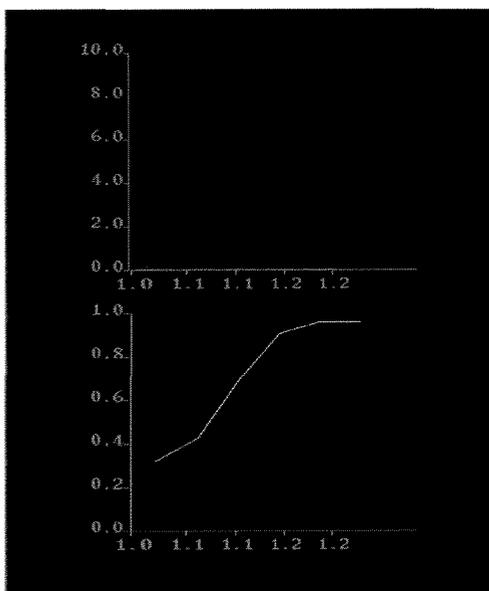
Para obter-se informações sobre a geração e distribuição espacial de corpos nas simulações condicionais, em função da proporção inicial indicada, foram feitas várias simulações usando-se os mesmos parâmetros de entrada, exceto a proporção global. Foram analisadas simulações com proporção igual à dada pelos poços (7%) e proporção global maior que a dada pelos poços (10% e 20%).



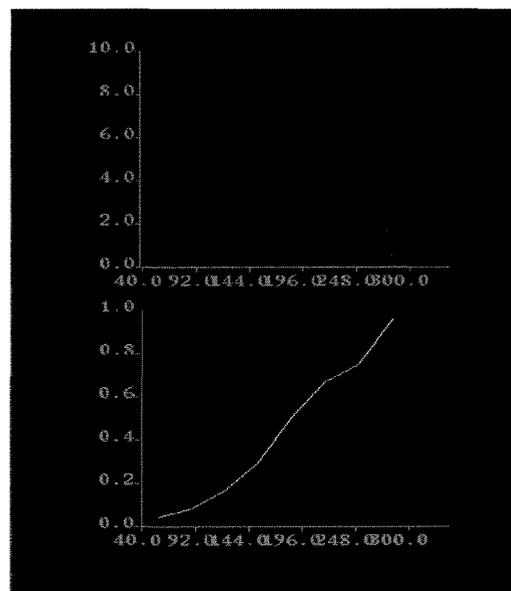
(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 7.5 – Exemplos de curvas de frequência acumulada geradas a partir dos dados amostrais de Almada; (a) janela completa do programa usado com a direção; (b) detalhe da janela com os dados de direção; (c) sinuosidade; (d) largura. Comparar com a Figura 6.16.

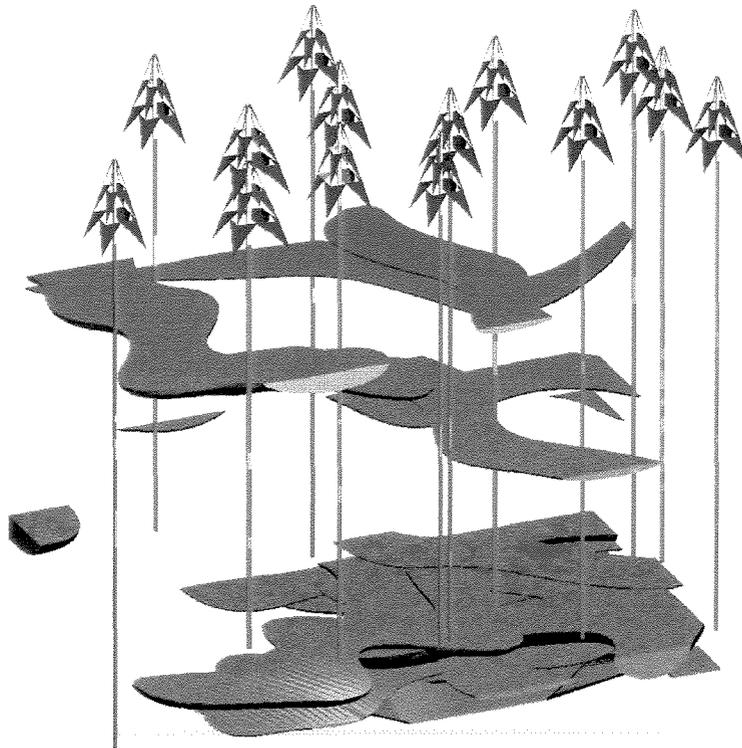


Figura 7.6 - Simulação não condicional de canais turbidíticos, com proporção global de 0,02%.

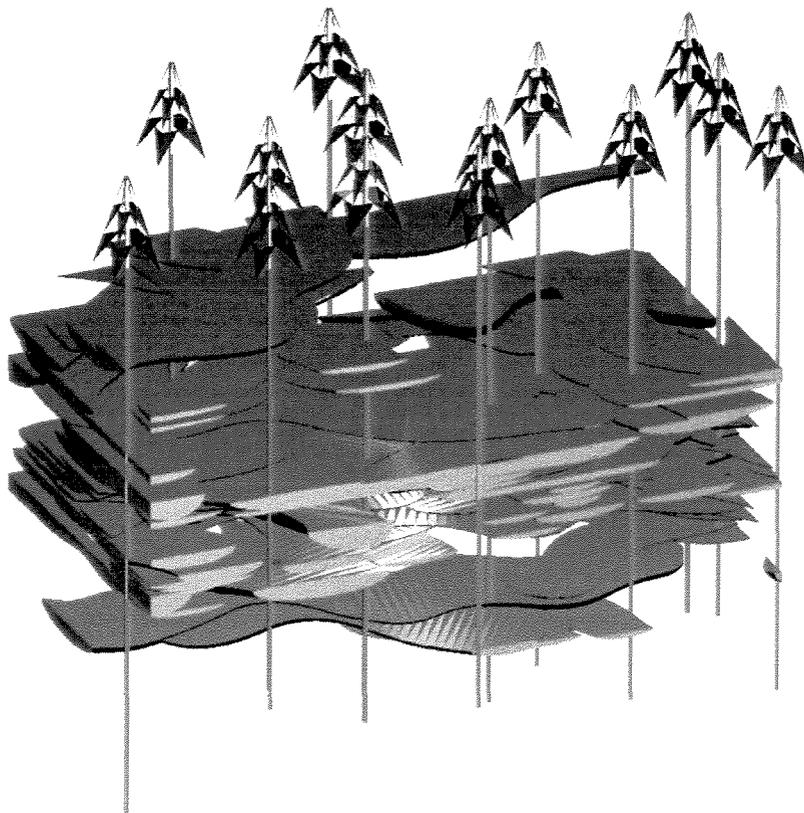


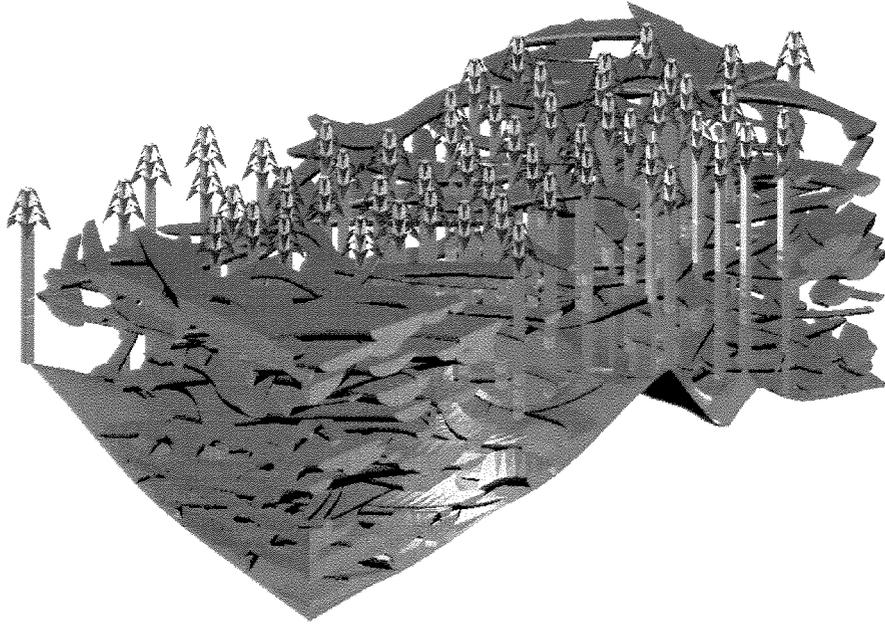
Figura 7.7 - Simulação condicional aos dados de poços, com proporção global inicial de 0,02% e proporção final simulada de 7,0%.

Nestas condições, são gerados primeiro os corpos que obedecem à proporção e ao condicionamento dado pelos poços (figs. 7.9a e 7.9b) e posteriormente são gerados os corpos entre os poços, até atingir a proporção global informada (figs. 7.9c e 7.9d). Analisando-se as imagens obtidas com a simulação condicional a dados de três poços e com proporção global dada pelos poços verifica-se, através da distribuição espacial dos corpos gerados no espaço tridimensional (Fig. 7.10) e num corte vertical (Fig. 7.11), que só foram gerados os corpos que atendem ao condicionamento aos dados de poços. Na Fig. 7.11, o poço à esquerda não se encontra no mesmo plano dos outros poços e, por isso, não está representado no corte vertical. Os três corpos gerados à esquerda do poço central correspondem aos corpos que atendem ao condicionamento dado pelo poço da esquerda, o que é facilmente verificável alterando-se a posição do plano vertical e incluindo esse poço no corte; como esses corpos são perpendiculares ao corte vertical feito, estão representados no plano contendo os outros poços.

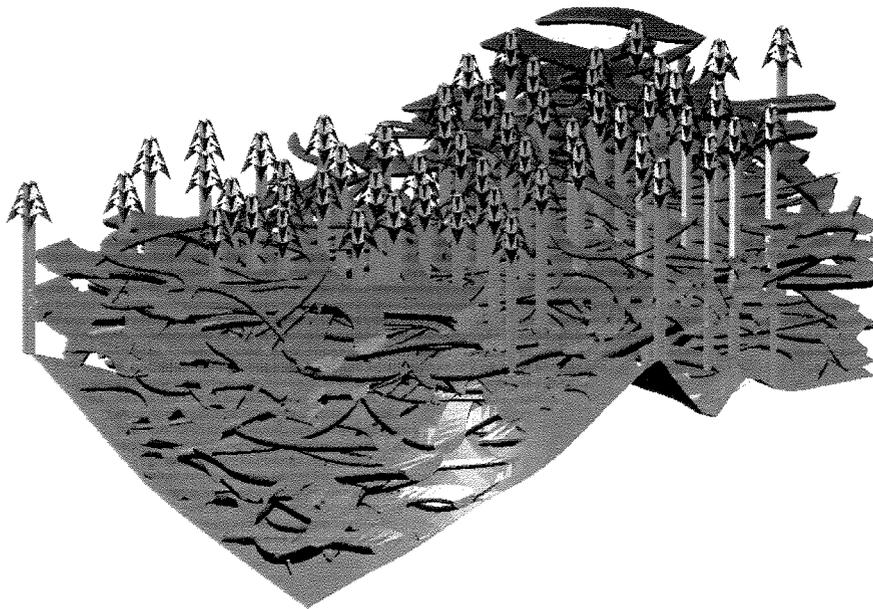
Foram efetuadas diversas simulações utilizando o mesmo conjunto de dados de poços e os mesmos parâmetros, exceto a proporção, nas quais foram realizados diversos cortes verticais, principalmente nos casos em que a proporção global usada é maior que a dada pelos poços. Em todos os casos analisados, os corpos gerados atendem ao condicionamento dado pelos poços. Para obedecer aos dados de poços, os corpos gerados têm dimensões menores e para atender à proporção informada, é gerado um maior número de corpos (figs. 7.12 e 7.13).

A possibilidade de variar-se a proporção global permite que se trabalhe com diferentes cenários, incluindo situações mais pessimistas, nas quais se acredita que os poços atravessaram todos os corpos arenosos do campo analisado; situações intermediárias, onde se considera que os poços atravessaram a maioria dos corpos, mas não todos e situações otimistas, onde se acredita que os poços atravessaram poucos corpos. A escolha de um ou outro cenário depende dos objetivos da simulação, do conhecimento prévio que se tem da geometria dos reservatórios analisados, sua continuidade e distribuição no espaço e do espaçamento entre os poços. Caso se tenha afloramentos ou campos em fase adiantada de exploração, análogos a um campo estudado, pode-se usar a proporção global dada por esses dados para adequar a simulação a uma situação mais representativa do campo estudado.

As simulações iniciais efetuadas não apresentam a superfície delimitadora da base do intervalo simulado. Essa superfície geralmente possui um relevo irregular, pois a espessura total do intervalo estratigráfico simulado varia conforme o poço. Com isto, mesmo usando-se



(a)



(b)

Figura 7.8 - (a) Simulação não-condicional, com proporção global de 7,0%; (b) Simulação condicional aos dados de poços, com proporção global de 7,0%.

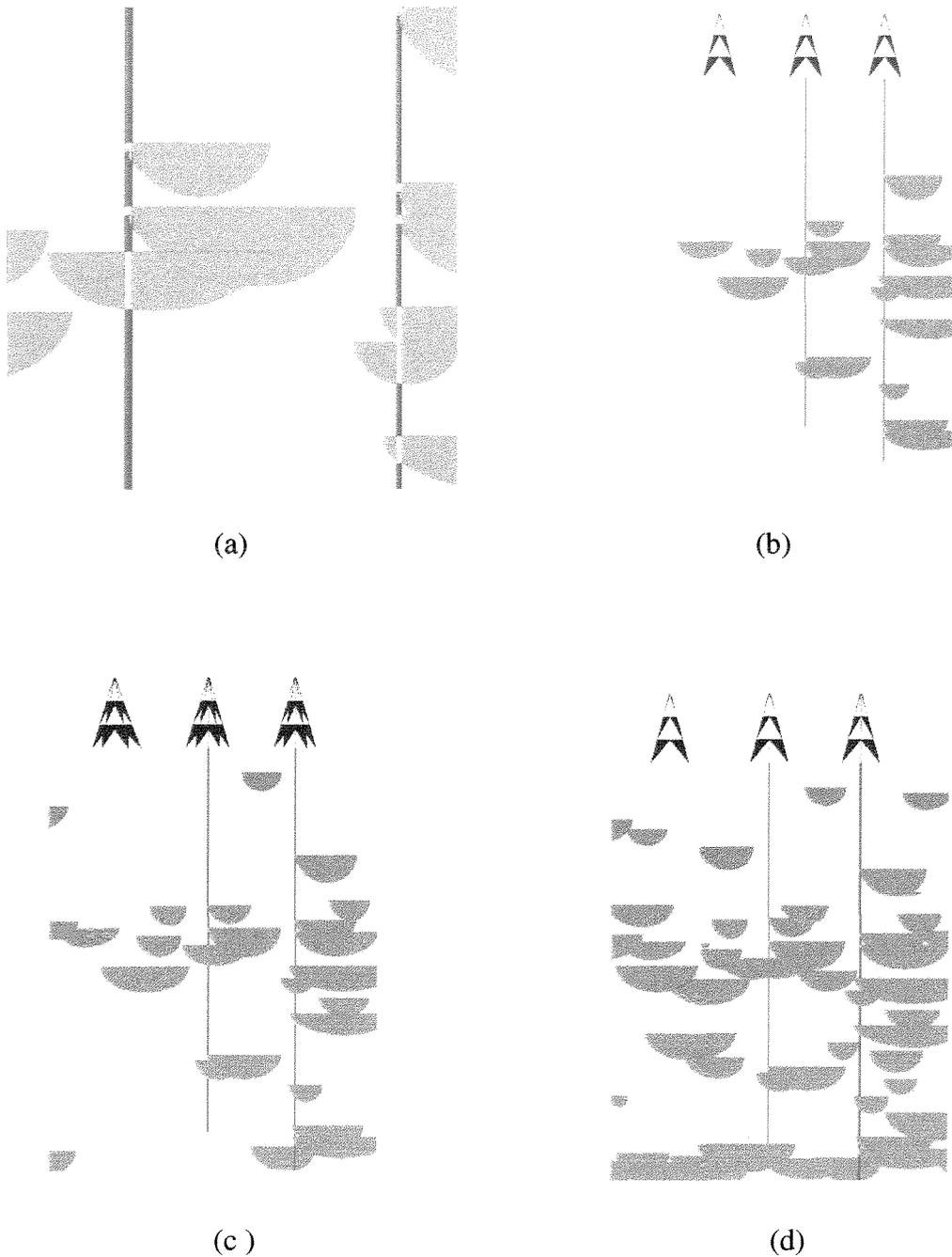


Figura 7.9 - Distribuição dos corpos gerados no espaço tridimensional numa simulação condicional aos dados de poços. (a) detalhe mostrando o intervalo arenoso nos poços e a distribuição dos canais; (b) proporção global final de 7,0%, equivalente à proporção dada pelos poços; (c) proporção global final de 10%; (d) proporção global final de 20%.

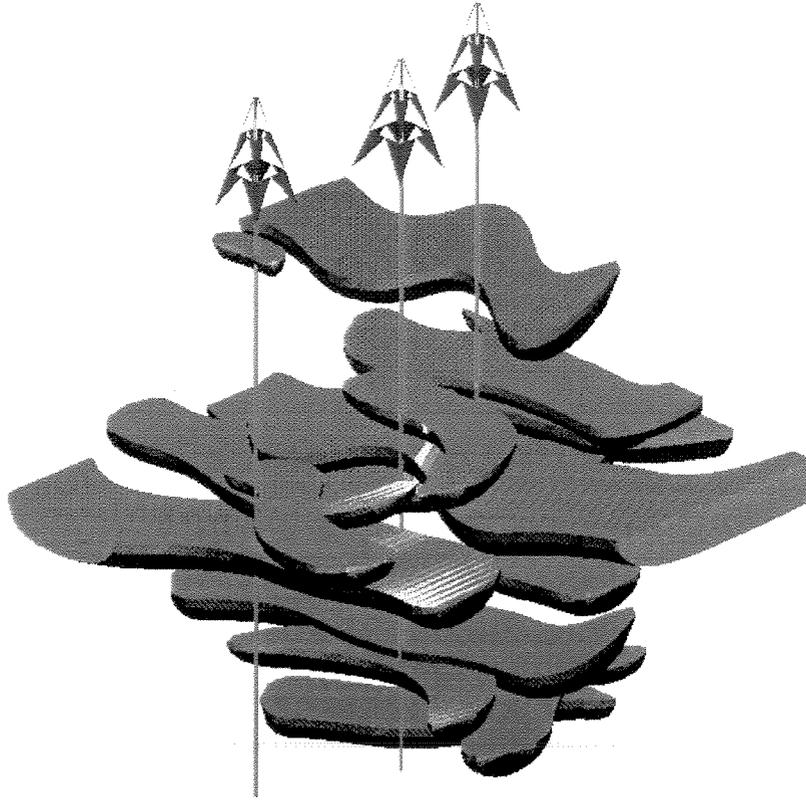


Figura 7.10 - Proporção global final de 7% (condicional aos dados de poços).

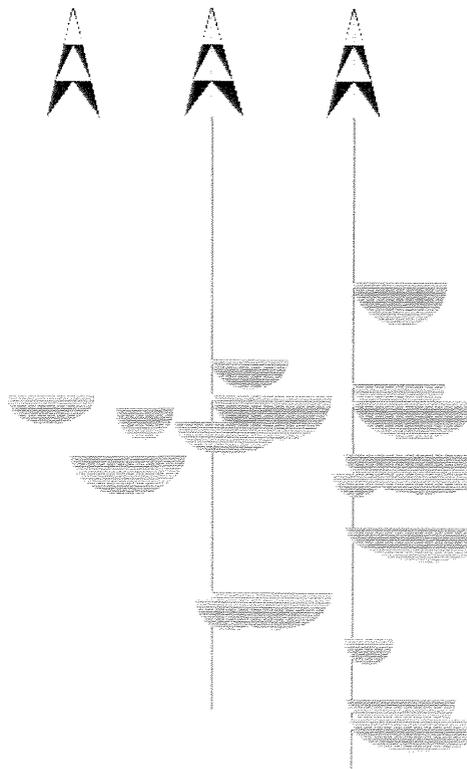


Figura 7. 11 - Plano contendo os poços central e à direita da figura anterior.

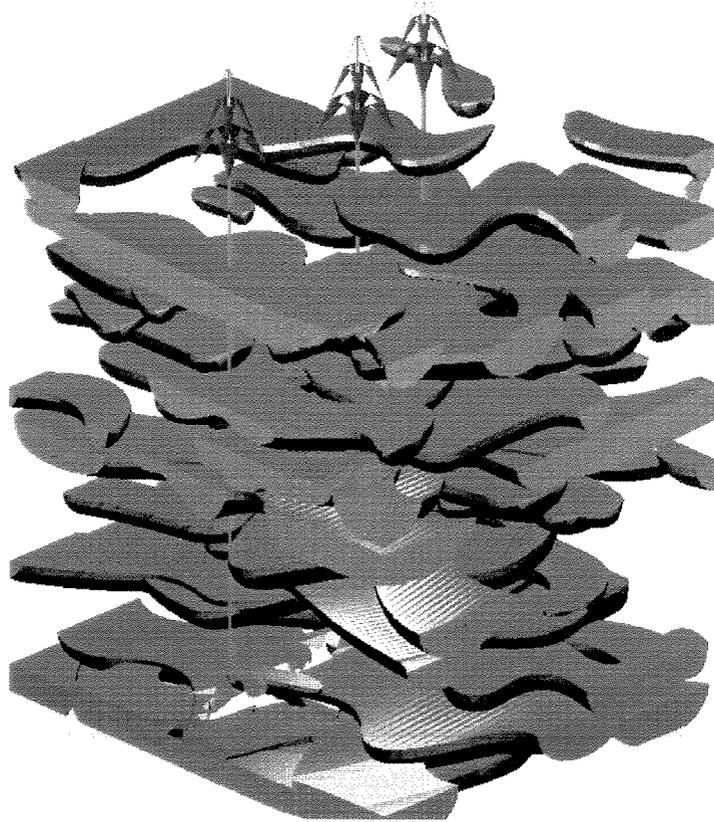


Figura 7.12- Simulação com proporção global de 20% e os mesmos parâmetros da Fig. 7.10.

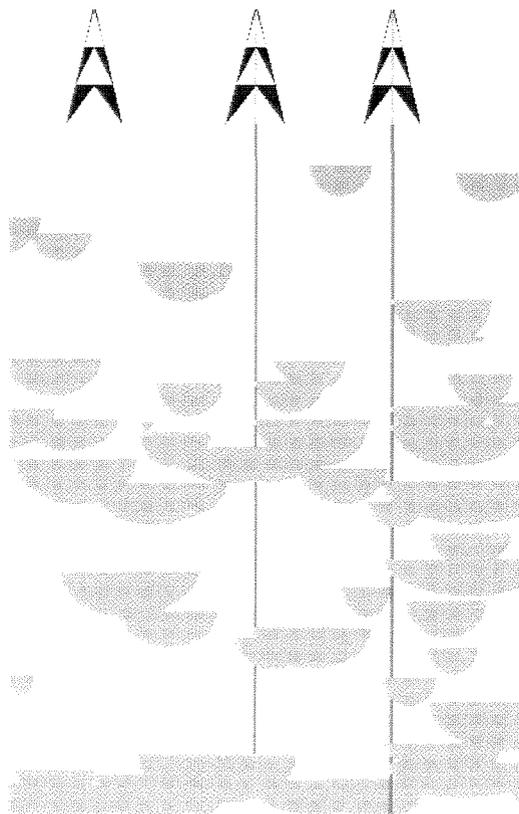


Figura 7.13 - Plano vertical contendo os poços central e à direita da figura acima.

uma proporção reservatório/não-reservatório baixa, gerando-se somente os corpos condicionados aos poços, o volume dos corpos gerados estava superestimado. Isto ocorria porque eram gerados corpos cujas dimensões ultrapassavam, lateralmente, o limite dado pela base do intervalo, em função das variações na espessura do intervalo simulado (Fig. 7.14). Nas simulações finais, com a inclusão da superfície basal, o cálculo do volume considera apenas os corpos gerados acima dessa superfície (Fig. 7.15). Os parâmetros de simulação usados para gerar essas figuras compreendem às correlações dadas pelas equações 6.1 e 6.11, onde w é obtida aleatoriamente a partir da curva de frequência acumulada da largura dos canais de Almada, a direção e sinuosidade são dadas pelas curvas de frequência acumulada dos dados iniciais de Almada e a simulação é condicional aos dados de poços.

Os trabalhos anteriores sobre o campo estudado (Palhares Jr., inf. verbais), as seções e mapa de distribuição dos canais turbidíticos sugerem a ocorrência de canais com largura máxima entre 250 e 600 m e extensão entre 800 a >2800 m (figs. 6.6 e 6.7). Essas interpretações foram utilizadas como critério para a análise visual das simulações efetuadas. Nas primeiras simulações realizadas analisou-se visualmente os reflexos das correlações obtidas na geometria dos corpos gerados, independente do valor dos coeficientes de correlação encontrados, geralmente baixos. Procurou-se também definir quais os parâmetros de entrada mais adequados, ou seja, entre as diferentes dimensões do canal, quais seriam consideradas como variáveis independentes (as quais são introduzidas na forma de histograma) e quais as variáveis dependentes (as quais são informadas como correlação das variáveis independentes).

As primeiras simulações utilizam basicamente as correlações iniciais obtidas com os dados dos afloramentos de Almada e do Campo de Lagoa Parda, representadas pelas equações 6.1 e 6.11, respectivamente.

Na primeira simulação efetuada, englobando 14 poços e condicionada a esses dados de poços, usou-se como variáveis independentes a direção e sinuosidade de Almada e a largura dos canais de Lagoa Parda. A extensão e a espessura constituem as variáveis dependentes correspondendo às correlações dadas por:

$$h = 8,3678 + 0,3473w \quad (\text{Eq. 6.1})$$

$$c = 191,30 + 2,2492w \quad (\text{Eq. 6.11})$$

Como a simulação é condicionada aos dados de poços e um mesmo canal em geral é atravessado transversalmente por, no máximo, dois poços (devido ao espaçamento entre os poços do campo estudado), a tendência é que, para cada intervalo arenoso dos poços usados, seja gerado um canal. Como consequência, é gerado um grande número de canais, os quais, por serem largos, resultam em corpos arenosos com uma continuidade e/ou empilhamento lateral maior que o esperado, indicando que as correlações usadas não são adequadas ao caso estudado (Fig. 7.16).

A simulação seguinte foi efetuada com as mesmas correlações anteriores, mas usando a direção, sinuosidade e largura dos dados iniciais dos afloramentos de Almada como variáveis independentes. Como no caso anterior, a tendência é que para cada intervalo arenoso dos poços usados seja gerado um canal. Como a largura dos canais de Almada são, na maioria dos casos, bem menores que os canais de Lagoa Parada, os corpos gerados apresentam dimensões mais compatíveis com os dados do campo estudado (Fig. 7.17). Entretanto, analisando a projeção horizontal desses corpos (Fig. 7.17, parte basal) verifica-se uma variação muito grande na direção dos diversos corpos gerados, diferente do observado nos afloramentos de Almada e nos mapas da área estudada, os quais, embora individualmente possam apresentar direções contrastantes, concentram-se em uma faixa com direção bem definida. Como o simulador usado ainda não permite o uso de tendências preestabelecidas, quando da reinterpretação dos dados de Almada procurou-se identificar a tendência geral para a direção dos canais.

Foram efetuadas simulações com comprimento constante para os canais, iguais a 1000m e 2000 m (Fig. 7.18). Entretanto, a relação das dimensões dos corpos gerados não foi considerada satisfatória, conforme a análise visual feita. Foram também efetuadas simulações com as correlações não-lineares, mencionadas no Capítulo 6. Constatou-se um aumento no tempo de simulação e os resultados obtidos apresentam, visualmente, pouca diferença em relação às correlações lineares (Fig. 7.19). Além disso, conforme já foi mencionado, acredita-se que as correlações lineares dadas pelas equações 6.2 e 6.16 representam melhor os dados observados para os afloramentos de Almada e o Campo de Lagoa Parada, respectivamente. Portanto, as simulações finais foram efetuadas com essas correlações (Fig. 7.20).

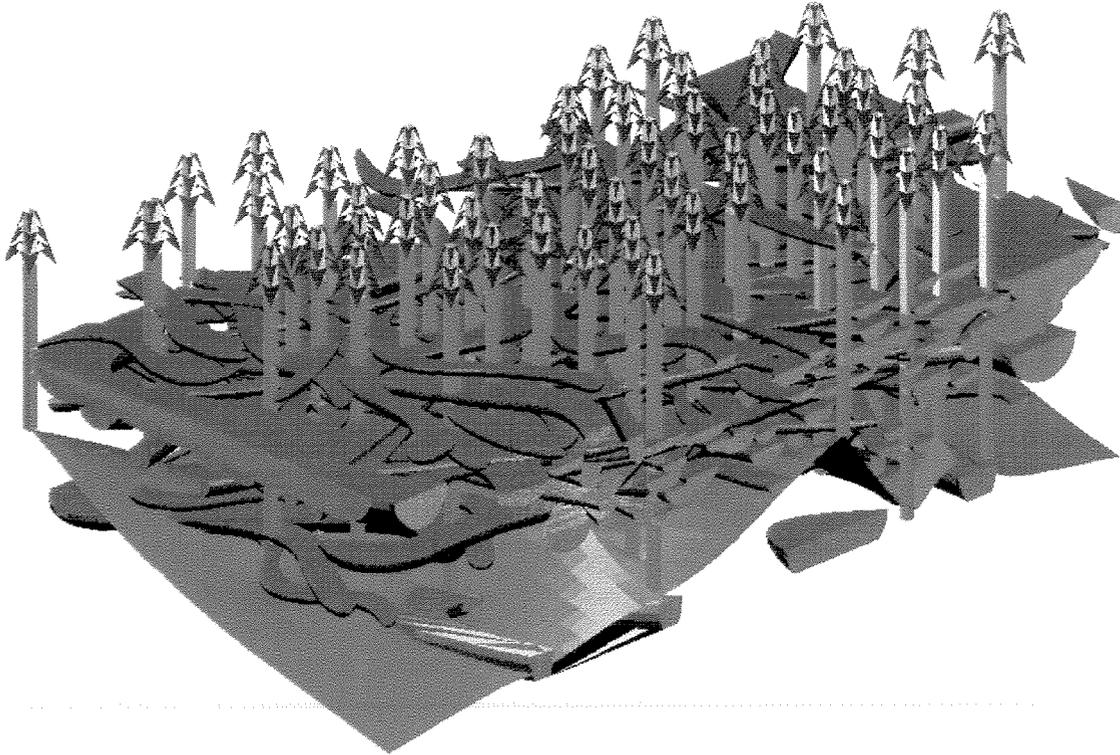


Figura 7.14 - Corpos gerados abaixo da superfície basal do intervalo simulado.

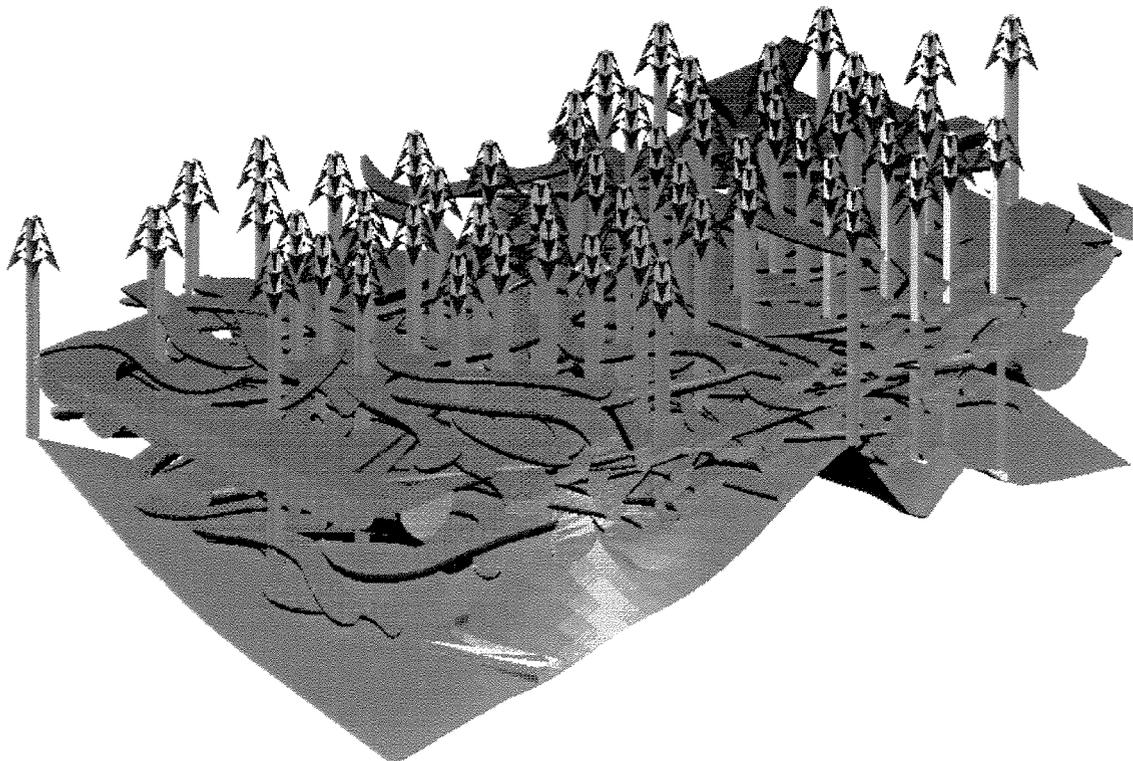


Figura 7.15 - Contribuem para o volume simulado apenas os corpos gerados acima da superfície basal do intervalo simulado.

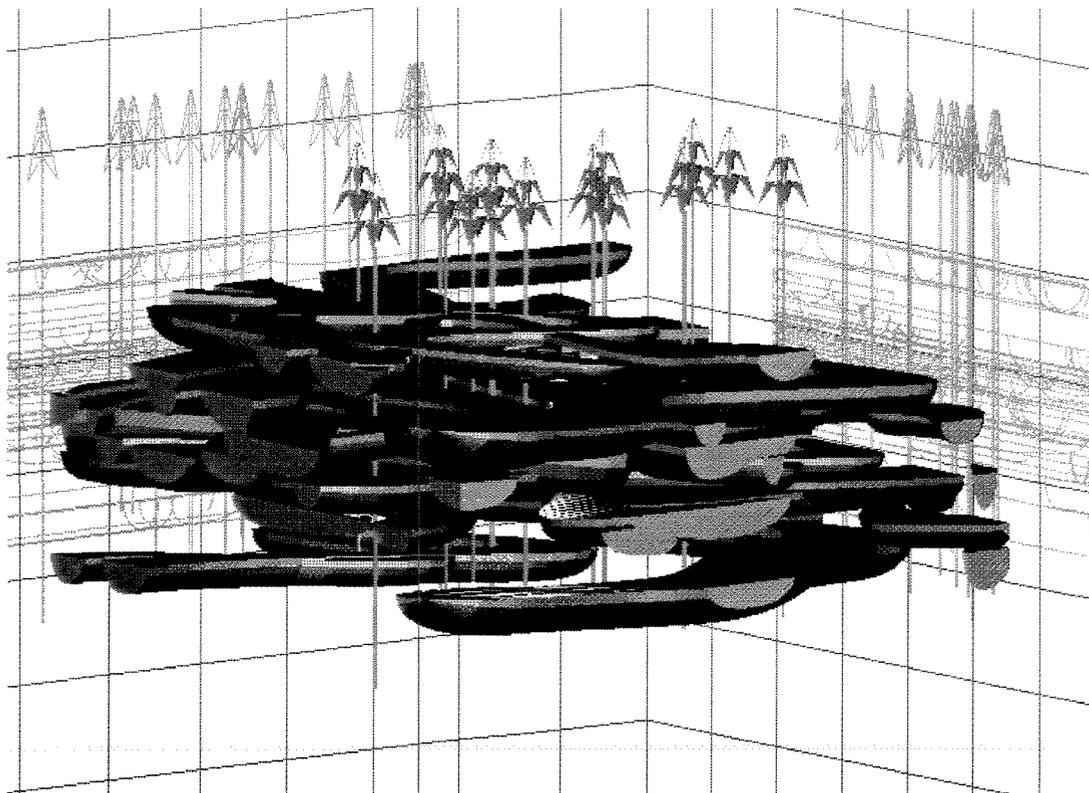


Figura 7.16 - Simulações usando os dados iniciais da largura de Lagoa Parda.

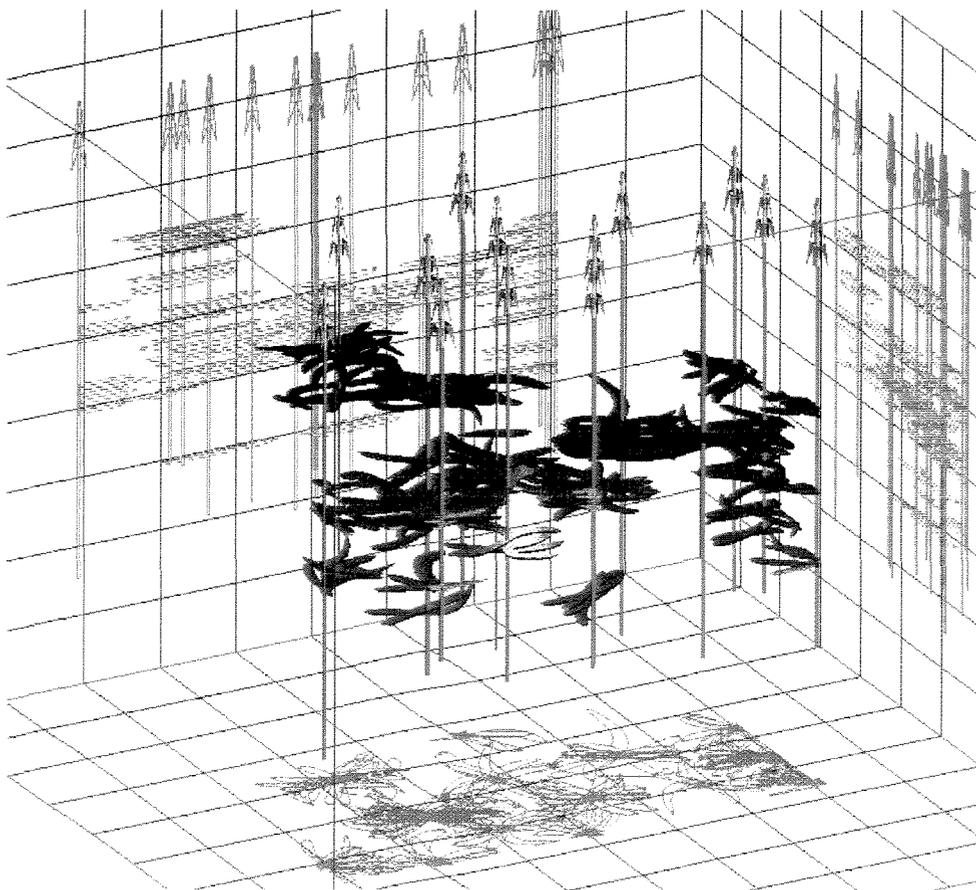
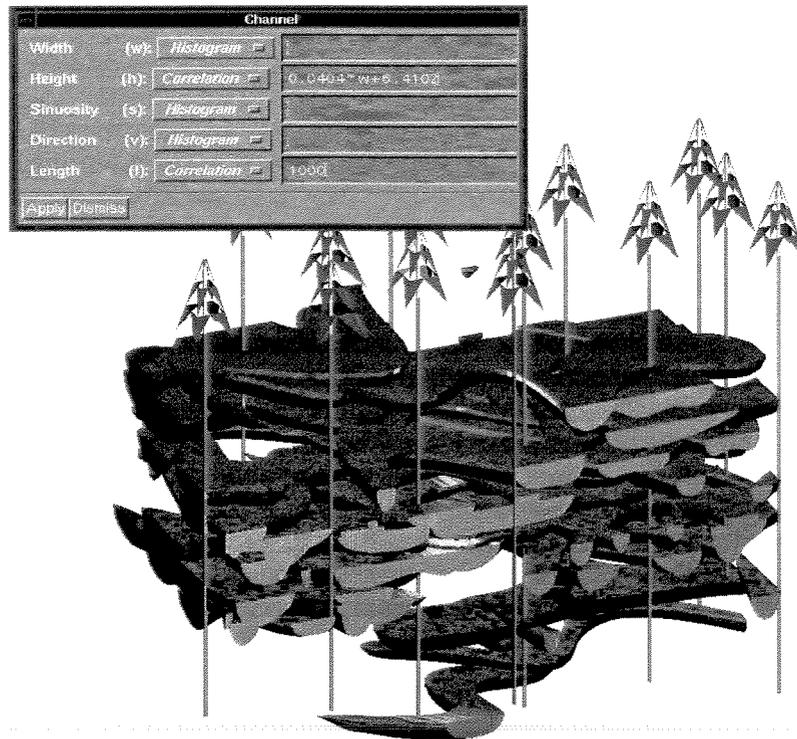
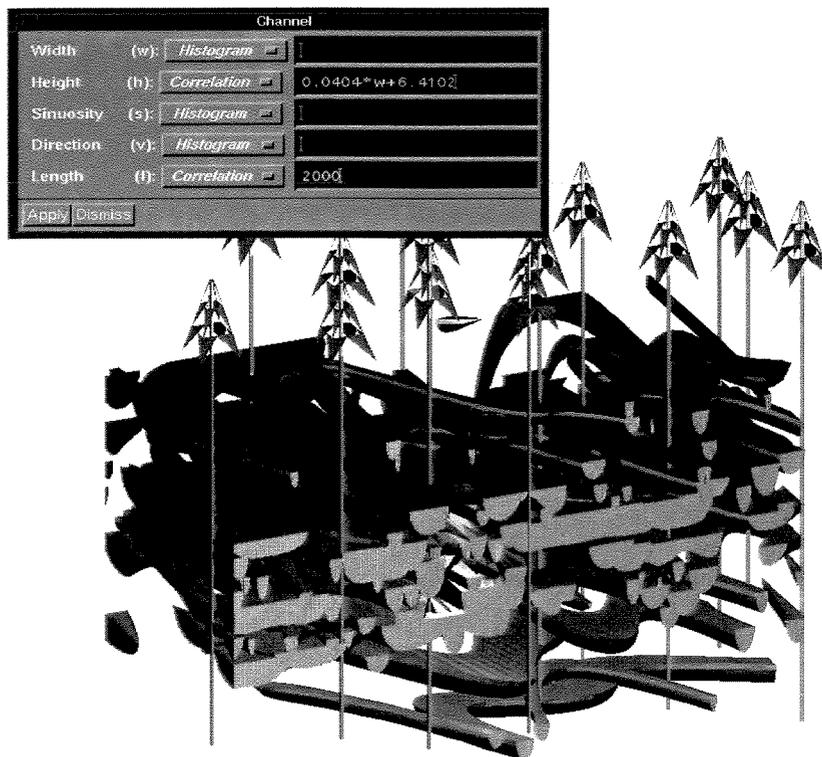


Figura 7.17 - Simulações usando os dados iniciais da largura de Almada.



(a)



(b)

Figura 7.18 - Simulações com comprimento constante para os canais gerados a partir do histograma de largura do Afloramento de Almada e $h = 0,040 \cdot w + 6,4102$. (a) $c = 1000$ m; (b) $c = 2000$ m.

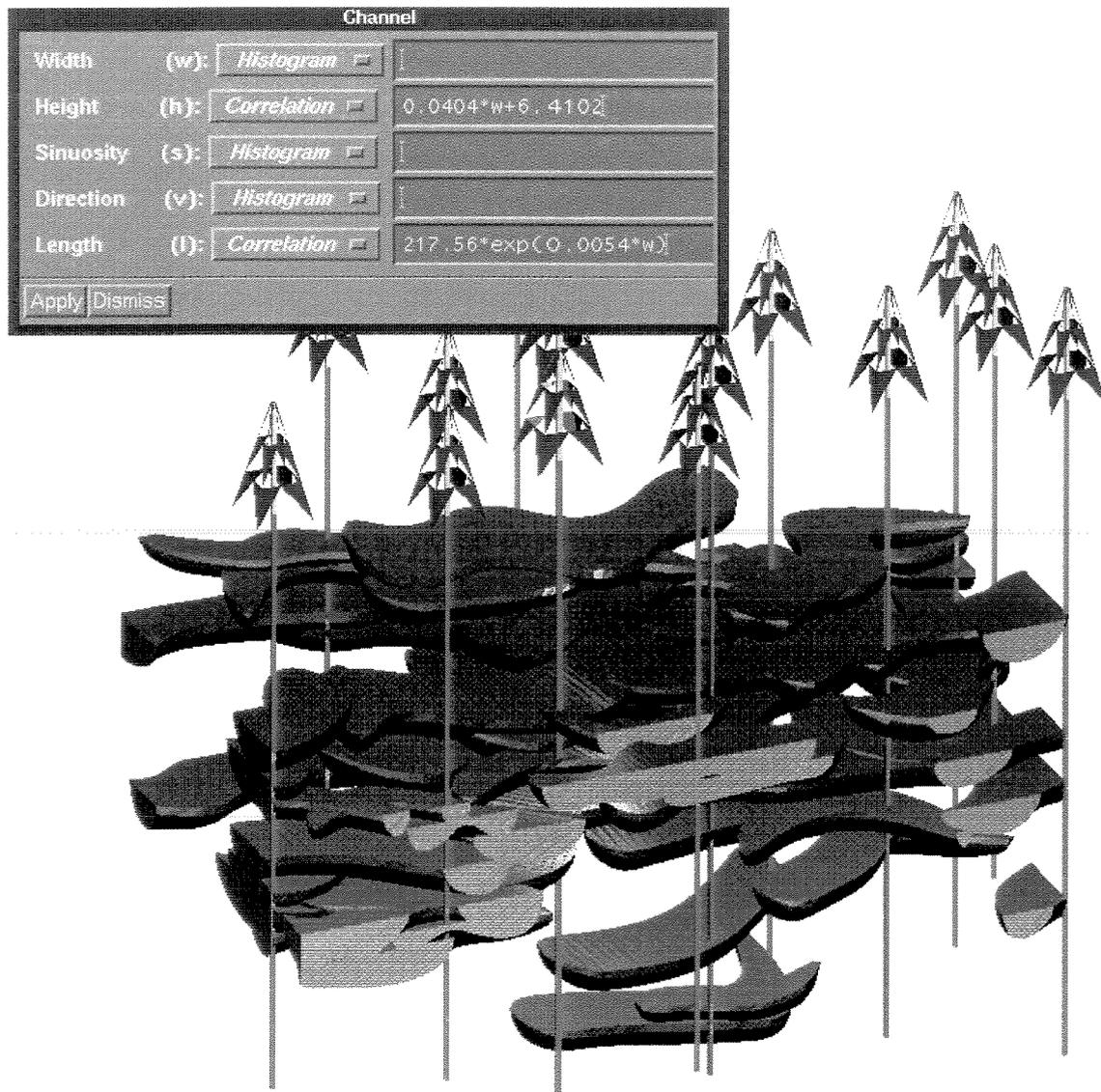


Figura 7.19 - Simulação condicional aos dados de poços usando correlação não-linear para a altura dos canais gerados.

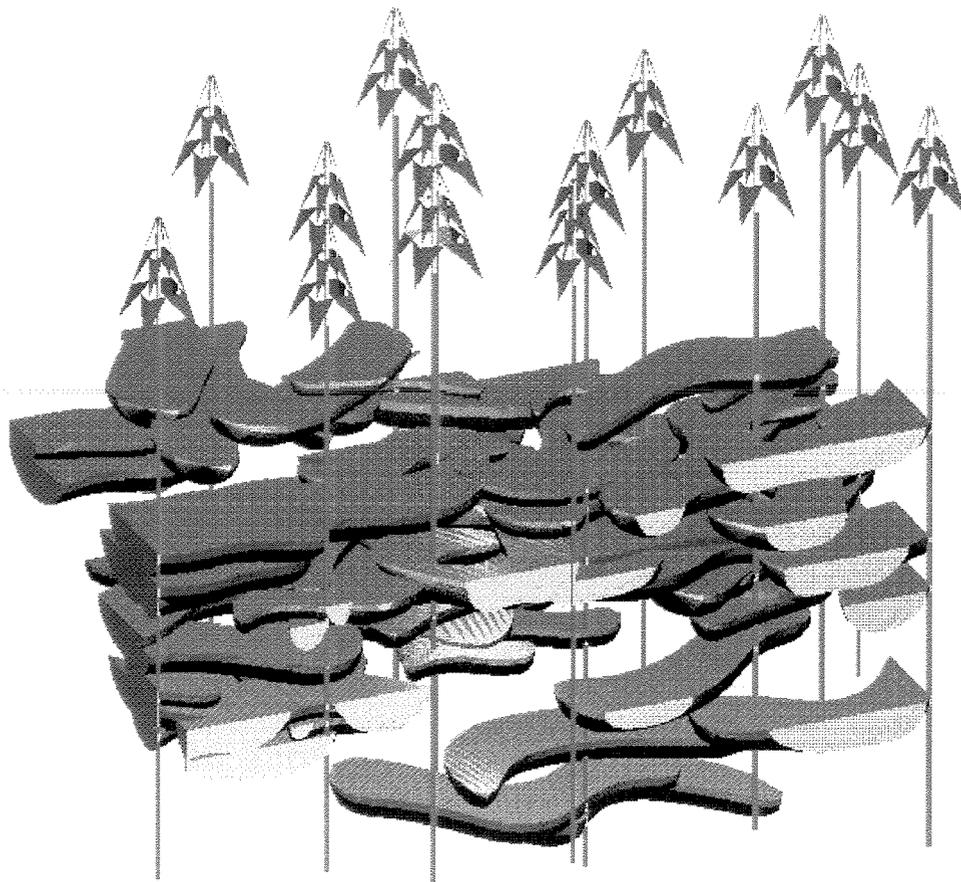


Figura 7.20 - Forma e correlações usada nas simulações finais dos canais turbidíticos do campo estudado. A direção e sinuosidade foram obtidas com os dados reinterpretados dos afloramentos da Bacia de Almada e as correlações são dadas pelas equações:

$$h = -0,288 + 0,055*w$$
$$c = -67,44 + 3,9744*w$$

7.4. Simulações finais

Os dados de poços utilizados nas simulações finais são provenientes de 54 poços, distribuídos numa malha de superfície aproximadamente regular, com espaçamento de 300m entre os poços. A área total simulada é de 8 km² e a espessura do intervalo estratigráfico analisado é de cerca de 300 m (Fig. 7.21).

As simulações finais têm por objetivo avaliar a utilidade de uma ferramenta como a simulação baseada em objetos, na fase exploratória de um campo petrolífero, uma vez que com o uso de simuladores pode-se obter, rapidamente, diferentes cenários para orientar a malha de desenvolvimento do campo. Desta forma, foram analisados cinco etapas do desenvolvimento do campo, baseadas na época em que os poços foram perfurados.

Tabela 7.1- Estágios simulados do desenvolvimento do campo.

ESTÁGIO	No.POCOS	No.CORPOS	VOLUME	OBSERVAÇÕES
1	13	241	21187	Poços perfurados entre 1976 e 1986.
2	21	300	29896	Acrescidos os poços perfurados em 1987.
3	27	322	27256	Acrescidos os poços perfurados em 1988.
4	33	309	37811	Acrescidos os poços perfurados em 1989.
5	54	425	47003	Acrescidos os poços perfurados entre 1990 e 1993.

As simulações associadas ao desenvolvimento do campo foram realizadas usando-se uma proporção global de 10%, maior que a dada pela curva de proporção de todos os poços, com o objetivo de diminuir a restrição no posicionamento dos corpos, imposta pela simulação condicional aos dados de poços (Fig. 7.22). Em todos os casos foram empregadas as correlações dadas pelas equações 6.2 e 6.16, a direção, sinuosidade e largura resultantes dos dados reinterpretados do Afloramento de Almada e a simulação é condicional aos dados de poços. O volume mencionado na Tabela 7.1 refere-se ao volume relativo dos corpos gerados para atender ao condicionamento dos poços.

A análise visual da Figura 7.22 mostra a existência de diferenças sutis entre as várias simulações, principalmente quanto a áreas onde se observa uma maior concentração de canais, geralmente associadas a locais onde há poucos poços, já que estes restringem a ocorrência dos canais turbidíticos. Aparentemente, a inclusão dos poços pouco alterou a distribuição espacial dos corpos gerados, sugerindo que, se essas imagens fossem utilizadas

para orientar a locação dos poços, ter-se-ia boas possibilidades de um canal ser atravessado por um poço. Observa-se uma tendência de diminuição das dimensões e aumento do número de corpos com o aumento do número de poços. Como em todos os casos foi usada a mesma proporção global, essa variação no número de corpos, maior na simulação condicionada a todos os poços, indicando que os corpos são menores, está coerente com as correlações de perfis efetuadas a partir dos poços da área estudada (Fig. 6.6).

Utilizando-se um conjunto de 14 poços foram feitas dez simulações condicionais a poços, usando-se os mesmos parâmetros de entrada, ou seja, as mesmas variáveis independentes, correlações, proporção global e mesmo domínio da simulação, variando-se apenas a semente para cada simulação. O objetivo desse exercício foi verificar visualmente nas figuras finais obtidas qual a variabilidade observada na distribuição espacial dos diferentes corpos gerados, em função da variação da semente, o que reflete a aleatoriedade dos corpos simulados. A Figura 7.23 mostra claramente as variações encontradas mudando-se a semente, mas embora a primeira dessas dez simulações tenha sido feita usando-se um número negativo para a semente, isto deve ser evitado, porque os programas geradores de distribuições aleatórias uniformes normalmente não apresentam boa repetibilidade com sementes negativas. Foram feitos alguns testes nesse sentido e comprovou-se que na maior parte dos casos o programa simplesmente desconsidera o sinal negativo indicado e o resultado da simulação é o mesmo que se obteria usando-se o mesmo número informado anteriormente, porém com sinal positivo. Os resultados obtidos com as diferentes simulações e a estatística básica destes estão apresentados na Tabela 7.2. O número de corpos corresponde ao total de corpos gerados e o volume compreende o volume de células ocupadas pelos corpos atravessados pelos poços.

Para se ter uma avaliação preliminar de qual seria o impacto da proporção global no volume de reservatório obtido ao final das simulações, foram feitas quatro simulações usando-se os mesmos parâmetros iniciais, variando-se apenas a proporção global de 7,3%, 10% , 15% e 20%. O cálculo de volume dos corpos gerados é uma função do *grid* de simulação utilizado, do número de componentes conexas (corpos gerados conectados) fornecido pelo programa e da proporção global. Desta forma, tem-se o volume de rocha compreendido no intervalo simulado, em função da proporção global informada. O volume poroso é dado pelo produto do volume dos corpos gerados e a porosidade das unidades genéticas. Os resultados obtidos estão apresentados na Tabela 7. 3.

Como a simulação é efetuada em coordenadas estratigráficas e a transformação para

coordenadas estruturais não é automática, não é possível obter-se o volume de óleo *in place* a partir dos volumes resultantes das simulações, já que o intervalo simulado inclui corpos portadores de água. Para o cálculo do volume poroso foi usada a porosidade média de 22% (conforme informações verbais de A. C. Del Rey) e foram efetuadas quatro simulações englobando os dados dos 54 poços, variando-se as sementes. A estatística básica do volume poroso encontrado está apresentada na Tabela 7.4.

Tabela 7.2 - Resultados obtidos com a variação da semente.

SEMENTE	No.CORPOS	VOLUME	ESTATÍSTICA BÁSICA		
				No.CORPOS	VOLUME
-1	111	66191			
1	102	68654			
1357	95	72912	MÉDIA	108,100	64422,900
11359	108	61487	MEDIANA	106,500	64208,000
51379	122	55306	VARIÂNCIA	143,690	37640117,490
51	89	74602	DESVIO PADRÃO	11,987	6135,154
37	133	63218	MÁXIMO	133,000	74602,000
13	104	60746	MÍNIMO	89,000	55306,000
15	105	65198	No.DADOS	10	10
3	112	55915			

Tabela 7.3 - Cálculo de volume dos corpos gerados.

Nº.CORPOS	C.CONEXAS	P.GLOBAL(%)	VOLUME (m ³)	V.POROSO (m ³)
289	264	7,3	0,8 x 10 ⁸	1,8 x 10 ⁷
425	377	10	1,4 x 10 ⁸	3,2 x 10 ⁷
651	557	15	2,0 x 10 ⁸	4,8 x 10 ⁷
914	480	20	2,7 x 10 ⁸	6,4 x 10 ⁷

Tabela 7.4 - Variações no volume poroso.

	VOLUME POROSO (M ³)
MÉDIA	1,73 x 10 ⁷
MEDIANA	1,71 x 10 ⁷
VARIÂNCIA	5,0 x 10 ¹⁵
DESVIO PADRÃO	7,3 x 10 ⁷
MÁXIMO	27,3 x 10 ⁷
MÍNIMO	7,6 x 10 ⁷
No.DADOS	4

O volume poroso estimado para o principal reservatório do campo estudado é de $1,7 \times 10^6 \text{ m}^3$ (A C. Del Rey, inf. verbais). Como esse valor não inclui todos os reservatórios do intervalo estratigráfico analisado, o resultado cerca de dez vezes maior obtido com a média das simulações é compatível com o esperado.

É provável que as simulações efetuadas (quatro) sejam insuficientes para uma análise mais efetiva dos valores obtidos. Ainda assim, esses resultados refletem as incertezas inerentes ao cálculo do volume poroso e, conseqüentemente, do volume de óleo *in place*. Desta forma, salientam a importância da utilização de métodos estocásticos na caracterização e quantificação dos reservatórios, pois permite a obtenção rápida de imagens diversas para embasar a análise de desempenho dos reservatórios. A avaliação adequada dos diferentes cenários pode servir de suporte para as tomadas de decisão relacionadas ao planejamento exploratório e/ou exploratório de uma acumulação de hidrocarbonetos, possibilitando, pelo menos, uma análise quantitativa dos riscos envolvidos no cálculo dos volumes envolvidos e suas conseqüências na economicidade do projeto.

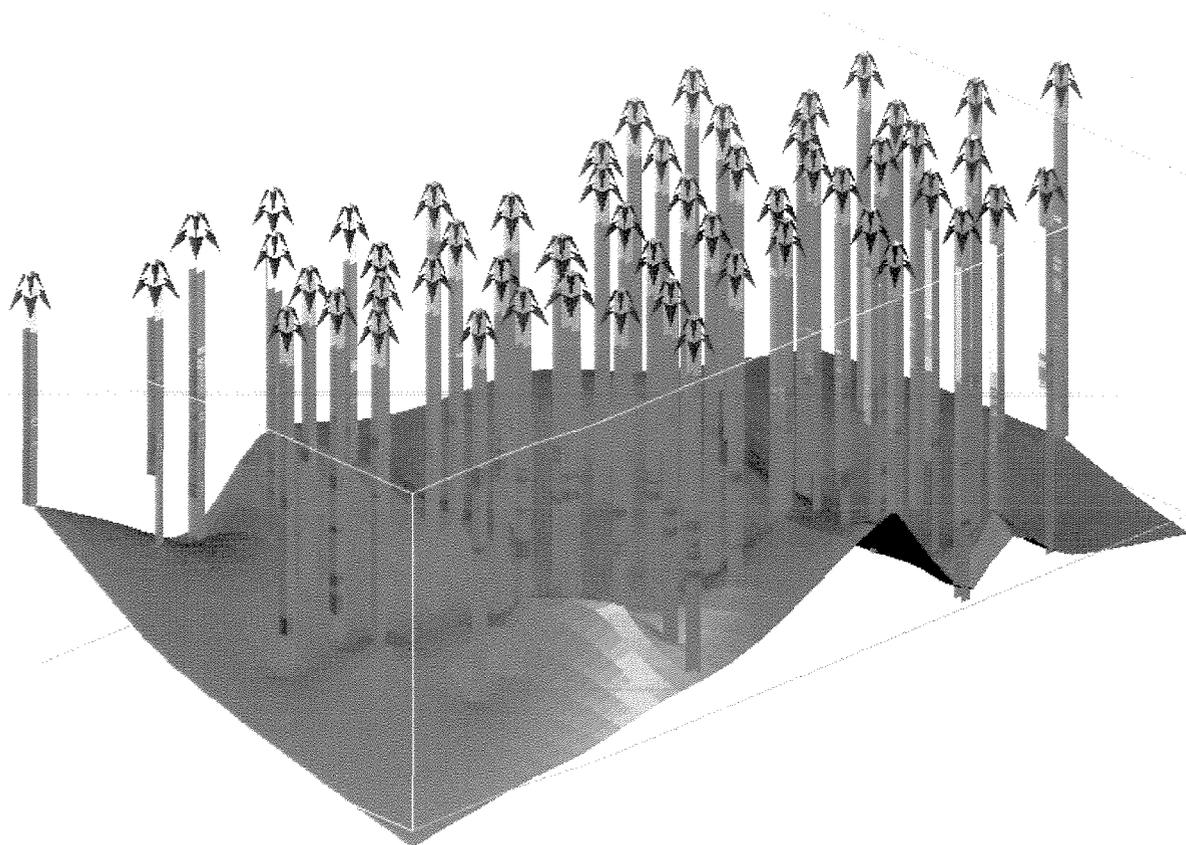


Figura 7.21 - Intervalo estratigráfico simulado e os 54 poços condicionantes das simulações finais, com espaçamento médio de 300 m. Nos poços, os intervalos arenosos estão representados em amarelo escuro e os intervalos não-reservatórios estão representados em verde.

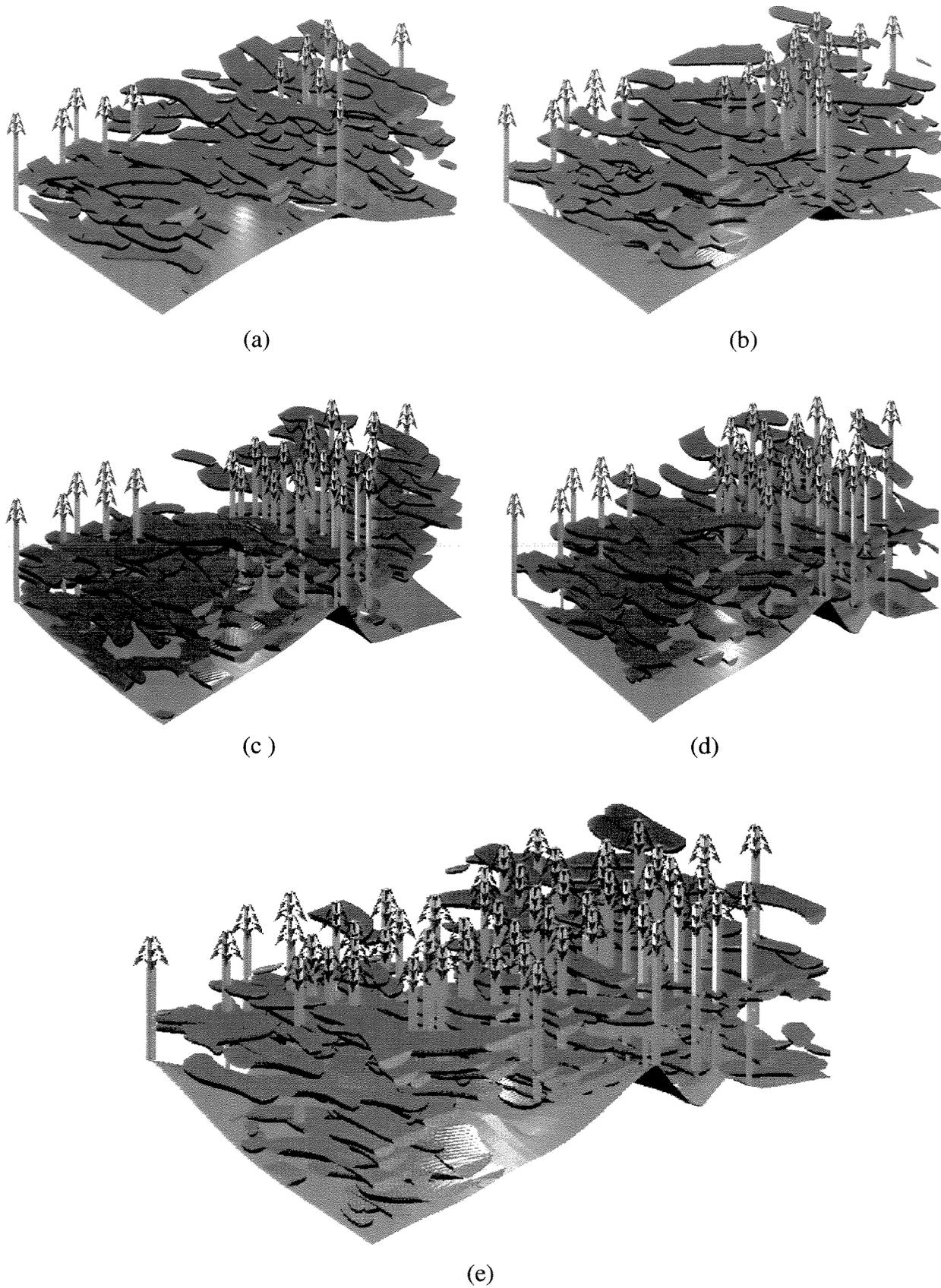
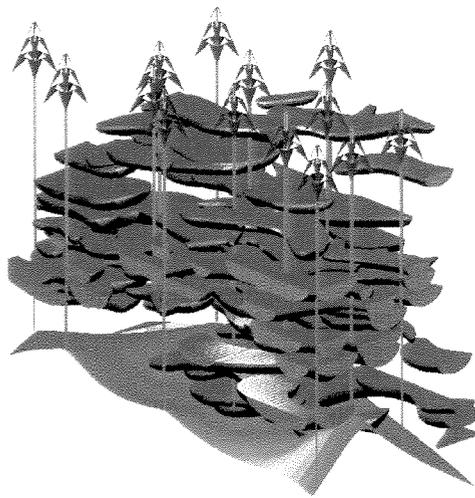
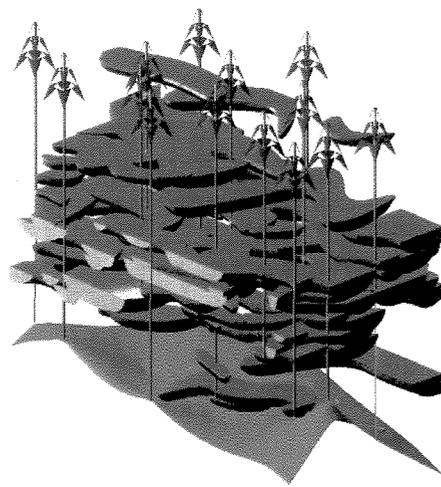


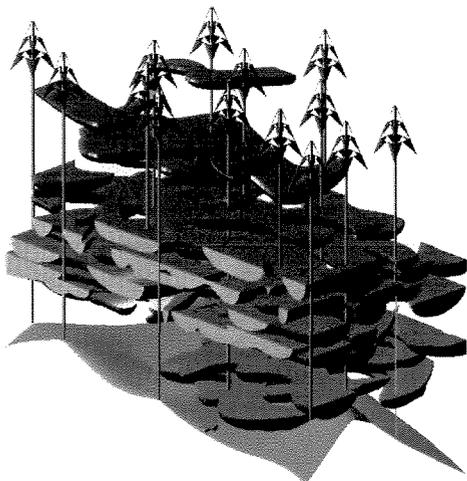
Figura 7.22 - Simulação dos estágios de desenvolvimento do campo estudado. (a) com 13 poços; (b) com 21 poços; (c) com 27 poços; (d) com 33 poços; (e) com 54 poços.



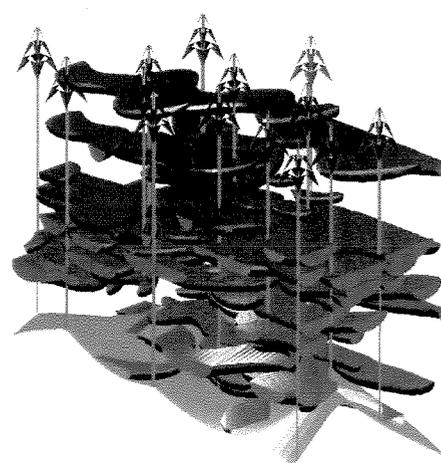
semente = -1



semente = 1

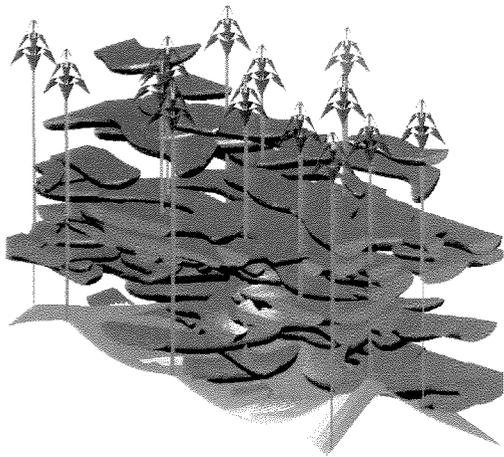


semente = 1357

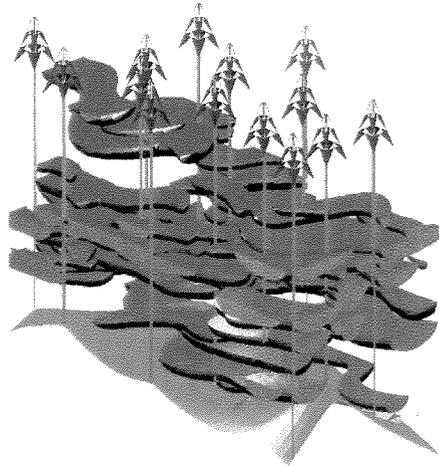


semente = 11359

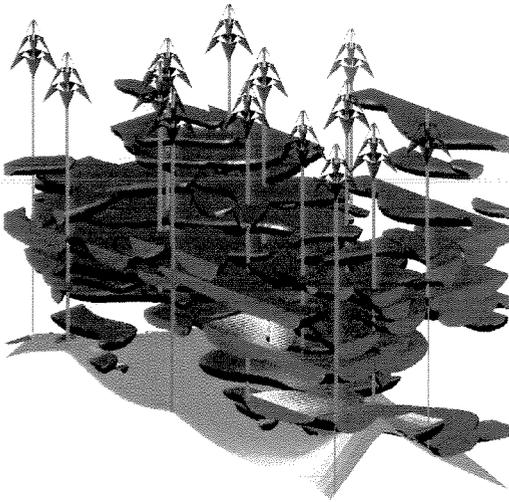
Figura 7.23 – Simulação condicional a dados de poços: mesmos parâmetros iniciais, diferentes sementes.



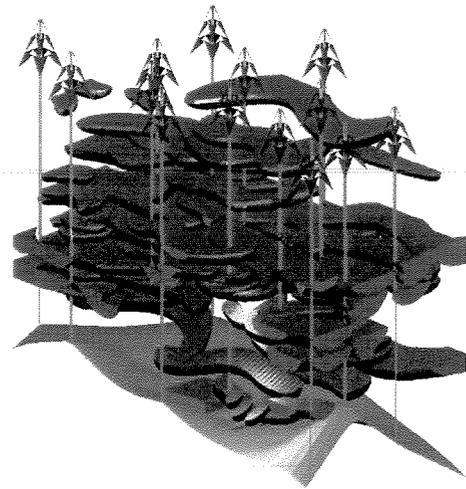
semente = 51379



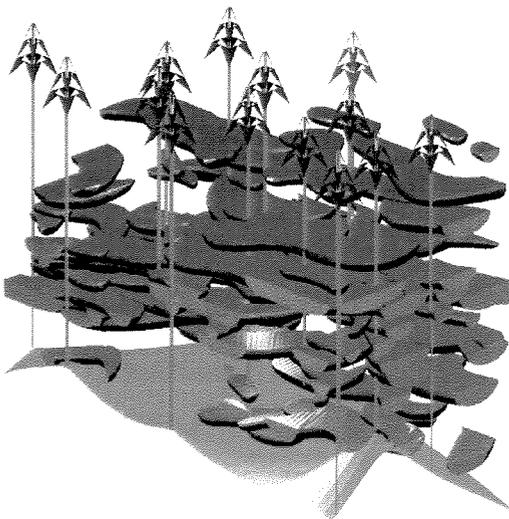
semente = 51



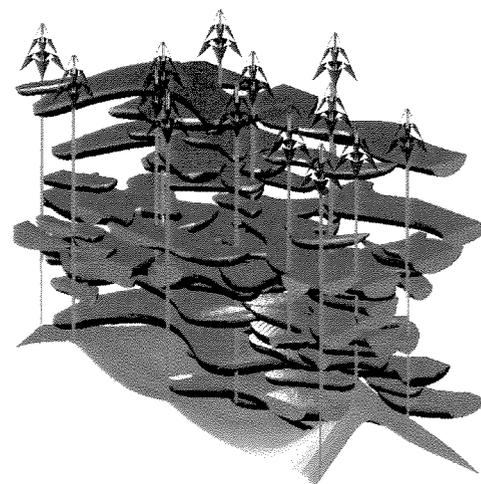
semente = 37



semente = 13



semente = 15



semente = 3

Figura 7.23 – (continuação).

8. Conclusões

1. Os reservatórios turbidíticos estudados representam um estilo de sedimentação, fácies e modelo deposicional semelhante ao proposto para os turbiditos do Campo de Lagoa Parda, ou seja, ocorrência de canais com ou sem *levee*, formando complexos de canais. Estão localizados numa situação proximal, mas mais afastadas da área-fonte que Lagoa Parda, em função da ausência, conforme os dados de testemunho disponíveis, de sedimentos muito grossos, tais como os encontrados na seção basal de Lagoa Parda. Apresentam uma semelhança maior com os afloramentos da Bacia de Almada, cujos *canyons* são mais largos, o que implica num menor confinamento e amalgamação de canais e cujos sedimentos são de mesma idade, Campaniano Superior/Maastrichtiano Inferior.
2. Foram identificados cinquenta e dois canais turbidíticos no intervalo estratigráfico estudado, os quais podem constituir corpos isolados, vertical e lateralmente separados por sedimentos finos englobando finas intercalações de arenito fino a muito fino, siltito e folhelho, de ocorrência geralmente localizada. Ocorrem também canais amalgamados, com um empilhamento lateral e vertical que resulta, predominantemente, numa baixa conectividade vertical e baixa continuidade lateral, conforme indicam as correlações entre os dados de poços.
3. Os depósitos de preenchimento de canais podem ser agrupados em três eletrofácies. Na eletrofácies 1 predomina um padrão de curvas em sino, associada à ocorrência de arenito grosso a muito grosso na base, gradando para arenito muito fino e/ou siltito no topo, conforme a correlação com os dados de testemunhos; constitui os melhores reservatórios do campo. A eletrofácies 2 geralmente mostra padrão em funil, associado a seqüências com granodecrescência descendente, não testemunhadas. A eletrofácies 3 mostra um padrão serrilhado, também sem correlação com dados de testemunhos; a assinatura em perfis é pouco característica para intervalos arenosos, mas os dados de produção permitem caracterizá-la como reservatório. Os depósitos de *levee* e sedimentos pelágicos apresentam, respectivamente, as eletrofácies 4 e 5.
4. Os canais identificados, em função das variações dos padrões das curvas dos perfis, podem ser agrupados em três complexos de canais. O Complexo CC1, basal compreende 17 canais, predomina a eletrofácies 3 nos depósitos de preenchimento de canais e os

reservatórios são, em geral, de baixa qualidade. O Complexo CC2 apresenta os melhores reservatórios, com predominância das eletrofácies 1 e 2 e localmente eletrofácies 3. As características de perfis são mais coerentes com os padrões geralmente associados a intervalos arenosos e é o único intervalo testemunhado, embora parcialmente. O Complexo CC3 é de ocorrência restrita.

5. Os melhores resultados, a partir da análise visual dos objetos gerados, foram obtidos utilizando-se a largura inicial dos dados reinterpretados dos afloramentos da Bacia de Almada como variável independente e as correlações dadas por $c = -67,44 + 3,9744*w$ e $h = -0,288 + 0,055*w$, apesar dos baixos valores dos coeficientes de correlação associados. Essas correlações foram usadas nas simulações finais, no cálculo da espessura dos corpos de Almada e da extensão dos canais de Lagoa Parda. Os valores resultantes apresentam uma escala compatível com o esperado, mas a análise dos resultados não é conclusiva, devido às poucas medidas disponíveis para comparação dos dados.
6. Apesar das semelhanças entre canais fluviais e turbidíticos, a correlação usada para simulações de canais fluviais ($w = 16,372*h^{1,54}$) não se aplica aos dados de Lagoa Parda, resultando em valores bem maiores de largura, comparando-se com as medidas disponíveis.
7. Para a utilização adequada da modelagem e simulação estocástica baseada em objetos, é necessário um bom conhecimento geológico prévio da área a ser simulada. Disso depende a identificação e delimitação do intervalo estratigráfico a ser estudado e a escolha da unidade genética mais representativa dos reservatórios presentes. Além disso, a definição dos parâmetros de entrada e correlações utilizadas dependem do conhecimento disponível sobre as formas e dimensões da unidade genética, ou seja, a geometria esperada para os corpos.
8. O uso de dados análogos é extremamente útil na obtenção de parâmetros, mas acredita-se que seriam obtidas correlações mais significativas entre medidas de largura, extensão e espessura provenientes de um mesmo depósito sedimentar. Apesar das correlações usadas serem questionáveis, a análise visual da geometria dos corpos gerados é compatível com os dados geológicos disponíveis do campo estudado.
9. Os resultados obtidos para o campo estudado sugerem que as simulações condicionadas a dados de muitos poços, distribuídos numa malha densa e aproximadamente regular no intervalo a ser simulado, não necessitam do uso de curvas de proporção. Isto acontece porque a seleção prévia do intervalo já considera o horizonte preferencial de ocorrência

dos corpos e sua geometria. A utilização de curvas de proporção nas simulações condicionais é necessária onde há concentração localizada de corpos e/ou as dimensões destes são significativamente menores que o espaçamento entre os poços. O não-condicionamento à curva de proporção permite uma diminuição considerável no tempo de processamento e, principalmente, no tempo gasto para reconstituir tridimensionalmente a imagem dos corpos gerados, tornando o processo mais ágil e eficiente.

10. A forma geométrica utilizada reproduz adequadamente a unidade genética predominante dos reservatórios estudados, que corresponde a canais turbidíticos, apesar das simplificações inerentes, conforme se verifica através da análise visual das imagens obtidas.
11. As diferentes seções verticais efetuadas mostram que o procedimento adotado pelo programa usado é bastante eficiente para condicionar os corpos gerados aos dados de poços. Além disso, como esse procedimento não se utiliza de cálculos de distribuição de probabilidades conjuntas e sim de equações paramétricas, implícitas e cálculo de interioridade, o condicionamento a vários poços não só é possível, mas efetuado rapidamente pelo programa.
12. O uso de uma proporção global maior que a definida pelos dados de poços permite a análise de diferentes cenários, representativos da área estudada. A existência de várias imagens possibilita uma avaliação mais robusta, principalmente para áreas pouco conhecidas, tanto em termos geológicos quanto econômicos, diminuindo as incertezas e, portanto, diminuindo os riscos associadas aos processos envolvidos.
13. Os objetos gerados podem ser considerados conjuntos aleatórios fechados contidos no espaço tridimensional. A forma desses objetos é descrita através de suas relações estruturais e a interação entre estes, que pode ser associada a operações entre conjuntos, é executada, no algoritmo usado, pela estrutura de dados *handle-edge* e pelos operadores topológicos de Morse.. Isto possibilita representar situações observáveis na natureza, como canais mais antigos sendo erodidos por canais mais jovens, canais maiores englobando canais menores e empilhamento lateral e vertical de canais.
14. Por analogia, as etapas envolvidas na geração dos objetos através do algoritmo usado são equivalentes àquelas descritas nos modelos germe-grão genéricos ou processo de pontos marcados. Isto sugere que o algoritmo usado descreve um processo estocástico caracterizado por um modelo germe-grão genérico ou mesmo por dois modelos germe-

grão independentes, um representando os corpos atravessados por um ou mais poços e o outro, os corpos gerados entre os poços. Entretanto, as operações realizadas por esse algoritmo obedecem a uma terminologia e fundamentos matemáticos distintos e, apesar das semelhanças encontradas, a associação entre o algoritmo usado e os processos estocásticos caracterizados por modelos germe-grão carece de demonstração formal. Apesar das limitações apontadas, o mecanismo de geração de objetos ficou melhor entendido a partir deste estudo e o algoritmo de simulação ficou melhor estabelecido.

15. A visualização de seções verticais e horizontais dos canais gerados auxilia na interpretação e validação das simulações, mas a definição das seções verticais através da seleção prévia de planos é pouco prática: como a malha dos poços não é exatamente regular, isto dificulta a construção de seções contendo vários poços. As seções horizontais mostram a mesma representação gráfica para todos os corpos cortados pelo plano horizontal selecionado, independente da posição do plano de corte em relação à profundidade do canal; desta forma, nem sempre é possível identificar a posição relativa dos objetos gerados.
16. A obtenção de diferentes imagens, a partir do uso de várias sementes, permite não só a análise visual de diferentes realizações representativas do campo estudado, mas também a escolha de uma ou mais imagens mais prováveis. Isto possibilita o cálculo dos diferentes volumes associados às imagens geradas, o que favorece a tomada de decisão quanto ao investimento exploratório do campo, em função dos diferentes cenários encontrados. Pode-se também obter cálculos de volume variando a proporção global das simulações, permitindo uma análise econômica mais adequada do campo a ser desenvolvido.
17. Recomenda-se que as imagens resultantes das simulações contenha uma representação gráfica das escalas horizontal e vertical empregadas para reproduzir os dados de poços e objetos gerados.
18. Dependendo de uma análise custo/benefício envolvendo a importância econômica, as características geológicas do campo estudado e o tempo de processamento requerido, é mais indicado efetuar simulações com *grid* de simulação e de geração das curvas de proporção discretizados por intervalo estratigráfico. Isto tende a reproduzir melhor a distribuição dos corpos arenosos, dando um maior significado à simulação, em termos geológicos, embora acarrete em operações mais complicadas para se obter o volume dos corpos gerados.

19. A utilização de matriz de curvas de proporção pode fornecer resultados geologicamente mais significativos, possivelmente tornando desnecessário o uso de *grids* e curvas estratigráficas.
20. O produto final das simulações deveria incluir, além das imagens, uma reprodução dos parâmetros iniciais fornecidos e uma relação dos resultados numéricos das simulações, tais como: volume total dos corpos gerados, volume conectado, dimensões (largura, espessura e extensão), orientação, sinuosidade e estatística básica dos corpos gerados. Esses dados facilitariam a análise dos resultados, além de possibilitar a confecção de mapas de isópacas, por exemplo.

ANEXO I

Exemplo de arquivo “.par” . Este tipo de arquivo contém no topo, à esquerda, o número total de poços utilizados e, em cada linha seguinte, o nome dos arquivos de poços usados na simulação efetuada pelo programa Petbool.

```
5
Poço01.txt
Poço02.txt
Poço03.txt
Poço04.txt
Poço05.txt
```

ANEXO II

Exemplo de arquivo “.wel”. Para cada poço utilizado na simulação é necessário criar um arquivo deste tipo, o qual contém os dados de poço.

```
XXXX  YYYY
"
POÇO      5
"
0      -118  1
"
-118  -131.8  2
-131.8 -184  1
-184  -198  2
-198  -230  1
```

Os arquivos do tipo “.wel” apresentam, na primeira linha, as coordenadas UTM X e Y, na segunda linha, um código identificador do poço e o número de intervalos seleccionados. Nas demais linhas informa-se a profundidade inicial, final e a identificação do intervalo, ou seja, não-reservatório ou reservatório (código 1 ou 2, respectivamente).

ANEXO III

Exemplo de arquivo “.hst” contendo os dados da variável independente.

```
38.0
174.0
10.0
13
2
2
3
3
2
1
6
3
3
1
2
2
4
```

Este arquivo contém os valores mínimo e máximo da variável considerada (primeira e segunda linha, respectivamente), o número de intervalos de classe utilizado (terceira linha), um número maior que a maior frequência obtida (quarta linha) e a frequência absoluta de cada um dos intervalos de classe (demais linhas).

9. Referências bibliográficas

- ADLER, R. J. *The geometry of random fields*. New York: Wiley, 1981.
- ALABERT, F.G. & CORRE, B. Heterogeneity in a complex turbiditic reservoir: impact on field development. In: **ANNUAL TECHNICAL CONFERENCE AND EXHIBITION OF THE SPE 66**, Dallas, USA. SPE # 22902, 1991.
- ALABERT, F.G. & MASSONNAT, G.J. Heterogeneity in a complex turbiditic reservoir: stochastic modeling of facies and petrophysical variability. **SPE #20604**, 1990.
- ALABERT, F.G. & MODOT, V. Stochastic models of reservoir heterogeneity: impact on connectivity and average permeabilities. In: **ANNUAL TECHNICAL CONFERENCE AND EXHIBITION OF THE SPE 67**, Washington, USA, (SPE # 24893), p.355-370, 1992.
- ALLEN, J.R.L. Sand waves: a model of origin and internal structure. **Marine Geology**, v.26, p. 281-328, 1980.
- ALLEN, J.R.L. Studies in fluvial sedimentation: bars, bar complexes and sandstone sheets (low-sinuosity braided streams) in the Brownstones (L. Devonian), Welsh Borders. **Sedimentary Geology**, v.33, p.237-293, 1983.
- ALPAY, O. A. A practical approach to defining reservoir heterogeneity. **Journal of Petroleum Technology**, v.24, p.841-847, 1972.
- ALSHARHAN, A.S. Geology and reservoir characteristics of carbonate buildup in Giant Bu Hasa Oil Field, Abu Dhabi, United Arab Emirates. **AAPG BULLETIN** v.71, n.10, p.1304-1318, 1987.
- AMBROSE, W. A., TYLER, N. & PARSLEY, M.J. Facies heterogeneity, pay continuity, and infill potential in barrier-island, fluvial, and submarine-fan reservoirs: examples from the Texas Gulf Coast and Midland Basin. In: MIAL, A. D. & TYLER, N. (Ed.) *The three-dimensional facies architecture of terrigenous clastic sediments and its implications for hydrocarbon discovery and recovery*. Tulsa: Society for Sedimentary Geology, 1991, 309p., p.13-21. (SEPM. Concepts in Sedimentology and Paleontology, 3).
- ANTUNES, R.L. Geohistória do paleocanyon de Fazenda Cedro, Bacia do Espírito Santo - Brasil, segundo dados bioestratigráficos. In: **CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA**, 33, 1984. Rio de Janeiro. **Anais...** Rio de Janeiro: Sociedade Brasileira de

- Geologia, 1984. p.670-684.
- ANTUNES, R.L. Eventos erosivos na seção terciária do paleocânion de Regência (Bacia do Espírito Santo, Brasil): um estudo com base na bioestratigrafia dos nanofósseis calcários. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 36, 1990. Natal. **Anais...** Natal: Sociedade Brasileira de Geologia, 1990. v.1, p. 455-469.
- BAILEY, E.B. New light on sedimentation and tectonics. **Geol. Mag.**, v.47, p.77-92, 1930.
- BAILEY, E.B. Sedimentation in relation to tectonics. **Bull. Geol. Soc. Amer.**, v.47, p. 1713-1726, 1936.
- BARTLETT, M.S. The spectral analysis of line process. In: 5TH BERKELEY SYMP. MATH. STATIST. PROB., 3, 1967. Berkley: **Proceedings ...**, p. 135-153.
- BERKHOUT, R. J., CHESSA, A.G. & MARTINIUS, A.W. A Statistical Adjustment of Haldorsen's Conditioned Boolean Simulation Algorithm. **Mathematical Geology**, v.28, n.6, p.791-810, 1996.
- BORER, J.M. & HARRIS, P.M. Lithofacies and Cyclicity of the Yates Formation, Permian Basin: Implications for Reservoir Heterogeneity. **AAPG BULLETIN** v.75, n.4, p.726-779, 1991.
- BOSENCE, D.W., POMAR, L., WALTHAM, D.A. & LANKESTER, T.H.G. Computer Modeling a Miocene Carbonate Platform, Mallorca, Spain. **AAPG BULLETIN** v.78, n.2, p.247-266, 1994.
- BOUMA, A. H., NORMARK, W.R. & BARNES, N.E. (Ed.) *Submarine fans and related turbidite systems*. New York: Springer-Verlag, 1985a, 351 p.
- BOUMA, A. H., STELTING, C. E. & COLEMAN, J. M. Mississippi fan, Gulf of Mexico. In: BOUMA, A H. , NORMARK, W.R. & BARNES, N.E. (Ed.). *Submarine fans and related turbidite systems*. New York: Springer-Verlag, 1985b, p. 143-150.
- BOWEN, D.G., KENNAIRD, T., HILL, J. & FROST, E.J. Reservoir description: A synergistic approach to more accurate determination of oil and gas reserves. **Geol. Soc. Malaysia, Bulletin 27**, Novembro, p.183-210, 1990.
- BRIDGE, J. S. & DIEMER, J. A. Quantitative interpretation of an ancient river system. **Sedimentology**, v.30, p.599-623, 1983.
- BRIDGE, J. S. & MACKEY, S.D. A theoretical study of fluvial sandstone body dimensions. In: FLINT, S. S. & BRYANT, I. D. (Ed.). *The geological modeling of hydrocarbon reservoirs and outcrop analogues*. Londres: Blackwell Scientific Publications, 1993,

- 269p., p. 213-236 (IAS. Special Publication, 15).
- BROOKFIELD, M. E. The origin of bounding surfaces in ancient aeolian sandstones. **Sedimentology**, v.24, p. 303-332, 1977.
- BROWN, L.F., Jr. & FISHER, W.L. Seismic stratigraphic interpretation of depositional systems: examples from Brazilian rift and pull-apart basins. In: PAYTON, C. E. (Ed.). *Seismic stratigraphy – applications to hydrocarbon exploration*. Tulsa: American Association of Petroleum Geologists, 1977, 526p., p. 213-248. (AAPG. Memoir, 26).
- BROWN, G.C., GORSLINE, D. S. & SCHWELLER, W.J. (Ed.) *Deep-marine sedimentation: Depositional models and case histories in hydrocarbon exploration & development*. Society of Economic Paleontologists and Mineralogists, Pacific Section, 1990, 326p. (Short Course, 66).
- BRUHN, C.H.L. *High-resolution stratigraphy, reservoir geometry, and facies characterization of Cretaceous and Tertiary Turbidites from Brazilian Passive Margin Basins*. Ontário, Canadá: McMaster University, 1993, 433p. Tese (Doutoramento).
- BRUHN, C.H.L. Rochas-Reservatório. Campinas: Universidade Estadual de Campinas, 1996. (Notas de curso).
- BRUHN, C.H.L. & MORAES, M.A.S. Turbiditos da Formação Urucutuca na Bacia de Almada, Bahia: um laboratório de campo para estudo de reservatórios canalizados. **Boletim de Geociências**. Rio de Janeiro: Petrobrás, vol.3, n. 3, p.235-267, 1989.
- BRUHN, C.H.L. & WALKER, R. G. Internal architecture and sedimentary evolution of coarse-grained, turbidite channel-levee complexes, Early Eocene Regência Canyon, Espírito Santo Basin, Brazil. **Sedimentology** v.44, p.17-46, 1997.
- BRYANT, I.D. & FLINT, S. S. Quantitative clastic reservoir geological modeling: problems and perspectives. In: FLINT, S. S. & BRYANT, I. D. (Ed.). *The geological modeling of hydrocarbon reservoirs and outcrop analogues*. Londres: Blackwell Scientific Publications, 1993, 269p., p. 3-20 (IAS. Special Publication, 15).
- BRYANT, I.D., GREENSTREET, C.W., VOGGENREITER, W.R. Integrated 3-D geological modeling of the C1 Sands reservoir, Maui Field, Offshore New Zealand. **AAPG BULLETIN** v.79, n.3, p. 351-374, 1995.
- CARVALHO, K.W.B. Geologia da bacia sedimentar do Rio Almada. **Boletim Técnico da PETROBRÁS**, Rio de Janeiro, v.8, n.1, p.5-56, 1965.

- CHANG, H. K., KOWSMANN, R. O., FIGUEIREDO, A. M. F. & BENDER, A. A. Tectonics and stratigraphy of the east Brazil rift system: an overview. **Tectonophysics**, v.213, p.97-138, 1992.
- CHAUTRU, J. M. The use of Boolean Random Functions in Geostatistics. In: ARMSTRONG, M. (ed.), *Geostatistics*, v.1, p.201-212, 1989.
- CHESSA, A.G. *Conditional simulation of spatial stochastic models for reservoir heterogeneity*. The Netherlands: Delft University, 1995, 173 p. Tese (Doutoramento).
- CHOWDHARY, L.R. & TAHA, SAID. Geology and habitat of oil in Ras Budran Field, Gulf of Suez, Egypt. **AAPG BULLETIN** v.71, n.10, p.1274-1293, 1987.
- CLARK, J. D. & PICKERING, K.T. *Submarine channels - Processes and architecture*. Londres: Vallis Press, 1996a. 231p.
- CLARK, J. D. & PICKERING, K.T. Architectural elements and growth patterns of submarine channels: application to hydrocarbon exploration. **AAPG BULLETIN** v.80, n. 2, p. 194-220, 1996b.
- CLEMETSEN, R., HURST, A. R., KNARUD, R. & OMRE, H. A Computer Program for Evaluation of Fluvial Reservoirs. In: BULLER, A.T. & KING, P.R (Ed.) *North Sea Oil and Gas Reservoirs II*. Londres: Graham & Trotman, 1990, p.373-385,.
- COX, D. R. & LEWIS, P.A.W. Multivariate point processes. In: LEWIS, P.A.W. (Ed.) *Stochastic Point Process: Statistical analysis, theory, and applications*. New York: Wiley & Sons, 1972.
- CRESSIE, N. *Statistics for spatial data*. New York, USA: Wiley. 900p. 1991.
- CROSS, T. A. Field-scale reservoir characterization. In: LAKE, L.W., CARROLL, H. B., JR. & WESSON, T. C. (Ed.). *Reservoir Characterization II*. San Diego: Academic Press, 1991, 726p., p. 493-496.
- DALEY, D. J. & VERE-JONES, D. A summary of the theory of Point Processes. In: LEWIS, P.A.W. (Ed.) *Stochastic point process: Statistical Analysis, theory, and applications*. New York: Wiley & Sons, 1972.
- DALY, R. A. Origin of submarine "canyons". **Am. J. Science.**, **31**, p.401-420, 1936.
- DAMSLETH, E., HALDORSEN, H., HENRIQUEZ, A. & TYLER, K. How well are we doing with reservoir description technology? Dialog. **Journal of Petroleum Technology**, p.957 e 971, Outubro, 1993.
- DAMSLETH, E. & OMRE, H. Geostatistical approaches in reservoir evaluation. **Journal of**

- Petroleum Technology**, p.498-501, Maio, 1997.
- DAMSLETH, E., TJØLSEN, C. B., OMRE, H. & HALDORSEN, H.H. A two-stage stochastic model applied to a North Sea reservoir. In: **ANNUAL TECHNICAL CONFERENCE AND EXHIBITION OF THE SPE 65**, New Orleans, USA. SPE # 20605, p. 791-802, 1990.
- DAMUTH, J. E., FLOOD, R. D., KOWSMANN, R. O., BERDERSON, R. H. & GORINI, M. A. Anatomy and growth pattern of Amazon deep-sea fan as revealed by long-range side-scan sonar (GLORIA) and high-resolution seismic studies. **AAPG BULLETIN** v.72, p. 885-911, 1988.
- DAMUTH, J. E., KOWSMANN, R. O., FLOOD, R. D., BELDERSON, R. H. & GORINI, M. A. Age relationships of distributary channels on Amazon deep-sea fan: implications for fan growth pattern. **Geology**, v.11, p.470-473, 1983.
- DAVIES, D.K., WILLIAMS, B.P.J. & VESSELL, R.K. Reservoir geometry and internal permeability distribution in fluvial, tight, gas sandstones, Travis Peak Formation, Texas. **SPE RESERVOIR ENGINEERING**. p.7-12, Fevereiro, 1993.
- DELHOMME, A.E.K. & GIANNESINI, J.F. New Reservoir Description Techniques Improve Simulation Results in Hassi-Messaoud Field – Algeria. In: **ANNUAL TECHNICAL CONFERENCE AND EXHIBITION OF THE SPE 54**, Las Vegas, USA. SPE # 8435, p. 1-12, 1979.
- DEUTSCH, C.V. & WANG, L. Hierarchical object-based stochastic modeling of fluvial reservoirs. **Mathematical Geology**, v.28, n.7, p.857-880, 1996.
- DICKEY, P.A., GEORGE, G.O. & BARKER, C. Relationships among oils and water compositions in Niger Delta. **AAPG BULLETIN** v.71, n.10, p. 1319-1328, 1987.
- DOTT, R. H., Jr. & BOURGOIS, J. Hummocky stratification: significance of its variable bedding sequences. **Geological Society of America Bulletin**, v.93, p.663-680, 1982.
- DOYLE, J. D. & SWEET, M. L. Three-dimensional distribution of lithofacies, bounding surfaces, porosity, and permeability in a fluvial sandstone - Gypsy Sandstone of Northern Oklahoma. **AAPG BULLETIN** v.79, n.9, p. 70-96, 1995.
- DREYER, T., SCHEIE, Å. & WALDERHAUG, O. Minipermeameter-based study of permeability trends in channel sand bodies. **AAPG BULLETIN**, v.74, n.4, p. 359-374, 1990.
- DREYER, T., FÄLT, L.-M., HØY, T. KNARUD, R. STEEL, R 7 CUEVAS, J.-L. Sedimentary architecture of field analogues for reservoir information (SAFARI): a case study of the

- fluvial Escanilla Formation, Spanish Pyrenees. In: FLINT, S. S. & BRYANT, I. D. (Ed.). *The geological modeling of hydrocarbon reservoirs and outcrop analogues*. Londres: Blackwell Scientific Publications, 1993, 269p., p. p.57-80 (IAS. Special Publication, 15).
- DROZ, L. & BELLAICHE, G. Rhone deep-sea fan: morphostructure and growth pattern. **AAPG BULLETIN**, v.71, n.11, p.1355-1365, 1985.
- DUBRULE, O. A review of stochastic models for petroleum reservoirs. In: Armstrong, M. (Ed.). *Geostatistics*. The Netherlands: Kluwer Academic Publisher, v.2, p. 493-506, 1989.
- DUBRULE, O. Introducing more geology in stochastic reservoir modeling. In: SOARES, A. (Ed.). *Geostatistics Troia'92*. The Netherlands: Kluwer Academic Publishers, 1993.
- DUBRULE, O., FLINT, S., PAARDEKAM, A. & BUDDING, M. C. Three-dimensional reservoir geological modeling. In: 13TH INTERNATIONAL SEDIMENTOLOGICAL CONGRESS. Nottingham, Inglaterra, 26-31 Ago., 1990. **Abstracts ...** Nottingham, 1990.
- DUPUY, M. & POTTIER, J. Application de méthodes statistiques a l'étude détaillée des réservoirs. **Rev. L'Institut Français du Pétrol**, 18 (Dec. Hors série), p.258-283, 1963.
- DZULINSKY, S. & WALTON, E. K. *Sedimentary features of flysh, and greywackes*. Amsterdam: Elsevier, 1965, 274p.
- EBANKS, W.J. Flow unit concept - integrated approach to reservoir description for engineering projects. **AAPG BULLETIN** v.71, n.5, p. 551-552, 1987.
- EISENBERG, R.A., HARRIS, P.M., GRANT, C.W., GOGGIN, D. J. & CONNER, F.J. Modeling reservoir heterogeneity within outer ramp carbonate facies using an outcrop analog, San Andres Formation of the Permian Basin. **AAPG BULLETIN** v.78, n.9, p.1337-1359, 1994.
- ELSAYED, S.A., BAKER, R., CHURCHER, P. L. & EDMUNDS, A. C. Multidisciplinary reservoir characterization and simulation study of the Weyburn Unit. **Journal of Petroleum Technology**, p.930-934 e 973. Outubro, 1993.
- EMERY, D. & MYERS, K. J. (Ed.). *Sequence stratigraphy*. Londres: Blackwell Science, 1996, 297p.
- EUBANKS, L.G. North Sabine Lake Field: complex deposition and reservoir morphology of Lower Hackberry (Oligocene), Southwest Louisiana. **AAPG BULLETIN** v.71, n.10,

- p.1162-1170, 1987.
- EYLES, N. (Ed.). *Glacial geology: an introduction for earth scientists and engineers*. Oxford: Pergamon Press, 1983, 409p.
- FÄLT, L.-M., HENRIQUEZ, A., HOLDEN, L., TJELMELAND, H. MOHERES, a Program System for Simulation of Reservoir Architecture and Properties. In: 6TH EUROPEAN EOR SYMPOSIUM, Stavanger, Noruega, Maio 21-23, 1991. **Proceedings...** Stavanger, 1991.
- FERRADAES, J. O. & SOUZA, R.G. *Estudo integrado geológico e geofísico das bacias de Camamu e Almada* s. I., Petrobrás: Relatório Interno.1972.
- FINLEY, R. J. & TYLER, N. Geological characterization of sandstone reservoir. In: LAKE, L. W. & CARROLL, JR., H. B. (Ed.). *Reservoir characterization*. San Diego: Academic Press, 1986, 659p., p. 1-38.
- FINLEY, R. J. & TYLER, N. *Geological characterization of heterogeneous reservoir: an overview of reserve growth and reservoir diversity with selected examples*. Ouro Preto, UFOP/ Petrobrás, 1991 (Notas de Curso).
- FISHER, W.L. & MCGOWEN, J. H. Depositional systems in the Wilcox Group of Texas and their relationship to occurrence of oil and gas: **Gulf Coast Association of Geological Societies Transactions**, v. 17, p.105-125, 1967.
- FOREL, F. A. Les ravins sous-lacustres des fleuves glaciaires: **Comptes Rendus de l'Academie des Sciences**, Paris, v.101, p.725-728, 1885.
- GALLOWAY, W.E. Reservoir facies architecture of microtidal barrier systems. **AAPG BULLETIN** v.70, n.7, p.787-808, 1986.
- GALLOWAY, W.E., DINGUS, W. F. & PAIGE, R. E. Seismic and depositional facies of Paleocene-Eocene Wilcox Group submarine canyon fills, northwest Gulf coast, U.S.A. In: WEIMER, P. & LINK, M. H. (Ed.). *Seismic facies and sedimentary processes of submarine fans and turbidite systems*. New York: Springer-Verlag, p.247-271, 1991.
- GIUDICELLI, C. B., ALABERT, F.G. & MASSONNAT, G.J. Anguille Marine, a deep-sea fan reservoir offshore Gabon: from stochastic modeling toward history matching. In: **ANNUAL TECHNICAL CONFERENCE AND EXHIBITION OF THE SPE 67**, Washington, USA. SPE # 24894, 1992.
- GOODWIN, R. H. & PRIOR, D. B. Geometry and depositional sequences of the Mississippi

- canyon, Gulf of Mexico. **Journal of Petroleum Technology**, v. 59, p.318-329, 1989.
- GROUT, J., REISS, L.H. & MONTADERT, L. Reservoir inhomogeneities deduced from outcrop observations and production logging. **SPE # 1279**, 1965.
- GUNDESØ, R., EGELAND, O. *SESIMIRA* - A new geological tool for 3-D modeling of heterogeneous reservoirs. In: BULLER, A.T. & KING, P. R. (Ed.). *North Sea Oil and Gas Reservoirs II*. Londres: Graham & Trotman, p.363-371, 1990.
- HALDORSEN, H.H. *Reservoir characterization procedures for numerical simulation*. Texas: University of Texas, 1983. Tese (Doutoramento).
- HALDORSEN, H.H. & DAMSLETH, E. Stochastic modeling. **Journal of Petroleum Technology**, abr. 1990.
- HALDORSEN, H.H. & LAKE, L.W. A new approach to shale management in field-scale models. **SPE Journal**, p.447-452, 1984.
- HALDORSEN, H.H. & MACDONALD, C. J. Stochastic modeling of underground reservoir facies (SMURF). In: **Annual Technical Conference and Exhibition of the SPE 62**, Dallas, USA. SPE # 16751, p.99-113, 1987.
- HARRIS, D.G. The role of geology in reservoir simulation studies. **Journal of Petroleum Technology**, mai. 1975.
- HATLØY, A.S. Numerical facies modeling combining deterministic and stochastic methods. In: YARUS, J.M. & CHAMBERS, R. (Ed.). *Stochastic modeling and geostatistics, principles, methods and case studies*. Tulsa: American Association of Petroleum Geologists, 1994, 379p., p.109-120. (AAPG. Computer Applications in Geology, 3).
- HELWIG, J. A. Field development is the future of Petroleum Geology. **AAPG BULLETIN** v.71, n.10, p. 1127-1136, 1987.
- HENRIQUEZ, A., TYLER, K.J. & HURST, A. Characterization of fluvial sedimentology for reservoir simulation modeling. **SPE Formation Evaluation**, Setembro, 1990.
- HERWEIJER, J. C. & DUBRULE, O. R. F. Screening of geostatistical reservoir models with pressure transients. **Journal of Petroleum Technology**, p. 973-979, nov.1995.
- HIRST, J.P.P., BLACKSTOCK, C.R. & TYSON, S. Stochastic modeling of fluvial sandstone bodies. In: FLINT, S. S. & BRYANT, I. D. (Ed.). *The geological modeling of hydrocarbon reservoirs and outcrop analogues*. Londres: Blackwell Scientific Publications, 1993, 269p., p. 237-252 (IAS. Special Publication, 15).

- HOIBERG, J., OMRE, H. & TJELMELAND, H. Large -scale barriers in extensively drilled reservoir. In: 2ND EUROPEAN CONFERENCE ON THE MATHEMATICS OF OIL RECOVERY, Paris, 1990. **Proceedings ...** Paris: Technip, p. 31-41, 1990.
- HOPKINS, J.C., WOOD, J.M. & KRAUSE, F.F. Waterflood response of reservoirs in a estuarine valley fill: Upper Mannville G, U, and W Pools, Little Bow Field, Alberta, Canada. **AAPG BULLETIN** v.75, n.6, p. 1064-1088, 1991.
- HÖCKER, C., EASTWOOD, K.M., HERWEIJER, J.C. & ADAMS, J. T. Use of Dipmeter data in clastic sedimentological studies. **AAPG BULLETIN** v.74, n.2, p. 105-118, 1990.
- HOWELL, D. G. & NORMARK, W. R. Submarine fans. In: SCHOLLE, P. A. & SPEARING, D. (Ed.). *Sandstone Depositional Environments*. Tulsa: American Association of Petroleum Geologists, 1982, 410p. p.365-404. (AAPG. Memoir, 31).
- HSÜ, K.J. The meaning of the word Flysh, a short historical search. In: LEJOIE, J. (Ed.). *Flysh sedimentology in North America*. Canada: Geol. Soc. Can., p.1-11, 1970. (Geol. Soc. Can. Special Paper 7).
- HUGHES CLARK, J. E., SHOR, A. N., PIPER, D. J. W. & MAYER, L. A. Large-scale current-induced erosion and deposition in the path of the 1929 grand banks turbidity current. **Sedimentology**, 37, p.613-629, 1990.
- JACKSON, R. G., II, Hierarchical attributes and a unifying model of bed forms composed of cohesionless material and produced by shearing flow. **Geological Society of America Bulletin**, v.86, p.1523-1533, 1975.
- JENNINGS, J.B. Capillary pressure techniques: application to exploration and development geology. **AAPG BULLETIN** v.71, n.10, p.1196-1209, 1987.
- JOHNSTON, D. D. & JOHNSON, R. J. Depositional and diagenetic controls on reservoir quality in First Wilcox Sandstone, Livingston Field, Louisiana. **AAPG BULLETIN** v.71, n.10, p. 1152-1161, 1987.
- JORDAN, D.W. & PRYOR, W. A. Hierarchical levels of heterogeneity in Mississippi River meander belt and applications to reservoir systems. **AAPG BULLETIN** v.76, n.10, p. 1601-1624, 1991.
- JOURNEL, A.G. & ALABERT, F.G. New method for reservoir mapping. **Journal of Petroleum Technology**, fev. 1990.
- KERANS, C., LUCIA, F.J. & SENGER, R.K. Integrated characterization of carbonate ramp

- reservoirs using Permian San Andres Formation outcrop analogs. **AAPG BULLETIN** v.78, n.2, p. 181-216, 1994.
- KERR, D. R. & JIRIK, L. A. Fluvial Architecture and Reservoir Compartmentalization in the Oligocene Middle Frio Formation, South Texas. In: **GULF COAST ASSOCIATION OF GEOLOGICAL SOCIETIES**, Transactions, v. XL, p.373-380, 1990.
- KRAUSE, F.F., COLLINS, H.N., NELSON, D.A., MACHEMER, S.D. & FRENCH, P. R. Multiscale anatomy of a reservoir: geological characterization of Pembina-Cardium Pool, West-Central Alberta, Canada. **AAPG BULLETIN** v.71, n.10, p.1233-1260, 1987.
- KRICKEBERG, K. Processus pontuels em statistique. In: HENNEQUIN, P. L. (Ed.). *Lecture Notes in Mathematics n.929*, Ecole d'Ete de Probabilites de Saint-Flour X-1980. Berlim: Springer, p.205-313, 1982.
- KUENEN, P. H. Comment. In: *Primary sedimentary structures and their hydrodynamic interpretation*. **Soc. Econ. Min. Pal.**, p.217-218, 1965. (Special Publication, 13).
- KUENEN, P. H. Experiments in connection with Daly's hypothesis on the formation of submarine canyons. **Leidsche Geol. Media**, v.8, p.327-335, 1937.
- KUENEN, P. H. Turbidity currents of high density. In: **INTERN. GEOL. CONGR.**, 18th, Londres, 1948. **Rept. 8 ...**, p.44-52, 1950.
- LAKE, L W., CARROLL, H.B., Jr. & WESSON, T. C. (Ed.). *Reservoir characterization II*. Academic Press. San Diego, 1991, 726p.
- LAMPERTI, J. *Stochastic process - A Survey of the Mathematical Theory*. New York: Springer-Verlag. 1977.
- LANTUÉJOUL, C. *Random sets and functions from models to conditional simulations*, 1995, 141p. (Notas de curso).
- LANZARINI, W.L., TAVARES, G., LOPES, H., FARIA, R. T. , BARRETO Jr., A. B., PESCO, S. & ROMEU, R. K. Petbool - Modelador estocástico/booleano da geometria e heterogeneidades de reservatórios petrolíferos. In: **WORKSHOP SOBRE CARACTERIZAÇÃO E ENGENHARIA DE RESERVATÓRIOS I**, Universidade Estadual de Campinas. Campinas, 1995. **Anais...** Campinas: Cepetro, p.26-27, 1995.
- LANZARINI, W.L., TAVARES, G., LOPES, H. FARIA, R., BARRETO Jr., A., PESCO, S. ROMEU, R.K., POLETTO, C.A. Modelagem estocástica/booleana da geometria tridimensional de reservatórios de petróleo. In: **CONGRESSO LATINO AMERICANO**

- DE HIDROCARBUROS, **5**. Rio de Janeiro, 1996. **Anais...1996a**. (CONEXPO ARPEL'96).
- LANZARINI, W.L., TAVARES, G., LOPES, H., FARIA, R., PESCO, S., BARRETO Jr., A. *Modelagem geológica orientada a objetos*. Rio de Janeiro: Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Dept^o. de Matemática. 1996b, 15p. (Pré-publicação n. 03/96).
- LANZARINI, W.L., POLETTO, C.A., TAVARES, G., PESCO, S., LOPES, H. Stochastic modeling of geometric objects and reservoir heterogeneities. In: **5TH LATIN AMERICAN AND CARIBBEAN PETROLEUM ENGINEERING CONFERENCE AND EXHIBITION**, Rio de Janeiro, Brasil. 1997.
- LARUE, D.K. & MARTINEZ, P.A. Use of Bed-Form Climb Models to Analyze Geometry and Preservation Potential of Clastic Facies and Erosional Surfaces. **AAPG BULLETIN** v.73, n.1, P. 40-53, 1989.
- LASSETER, T.J., WAGGONER, J. R. & LAKE, L.W. Reservoir heterogeneities and their influence on ultimate recovery. In: LAKE, L.W. & CARROLL JR., H. B. (Ed.). *Reservoir characterization*. San Diego: Academic Press, 1986, 659p., p.545-559.
- LAW, A. M. & KELTON, W. D. *Simulation modeling and analysis*. New York: McGraw-Hill, 1991.759p.
- LE BLANC SR., R. J. Distribution and Continuity of Sandstone Reservoirs. Part 1 and 2. **Journal of Petroleum Technology**, p.776-804. SPE # 6137, 1977.
- LEEDER, M.R. Fluvial fining-upwards cycles and the magnitude of palaeochannels. **Geol. Mag.**, 110, p.265-276, 1973.
- LEWIS, P.A.W. (Ed.) *Stochastic point process: Statistical analysis, theory, and applications*. Prefácio. New York: Wiley & Sons, 1972.
- LIA, O., TJELMELAND, H. & KJELLESVIK, L.E. Modeling of facies architecture by Marked Point Models. In: BAAFI, E.Y. & SCHOFIELD, N. A. (Ed.). **Geostatistics Wollongong'96**. v. 1, Londres: Kluwer Academic Publ., 1996, p. 387-397.
- LIMA, E.L. *Espaços métricos*. Instituto de Matemática Pura e Aplicada, CNPq. Rio de Janeiro: Editora Edgard Blücher Ltda. 1977.
- LONGMAN, M.W., MAXWELL, R. J., MASON, A.D.M & BEDDOES, Jr., L.R. Characteristics of a Miocene intrabank channel in Batu Raja Limestone, Ramba Field, South Sumatra, Indonesia. **AAPG BULLETIN** v.71, n.10, p. 1261-1273, 1987.
- LOPES, H., PESCO, S. & TAVARES, G. *The MatComp visualization environment: A*

- description. Rio de Janeiro: Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Dept^o. de Matemática, 1995, 21p. (Pré-publicação n. 22/95).
- LORENZ, J.C., HEINZE, D. M., CLARK, J. A. & SEARLS, G. A. Determination of widths of meander-belt sandstone reservoirs from vertical downhole data, Mesa Verde Group, Piceance Creek Basin, Colorado. **AAPG BULLETIN** v.69, n.5, p.710-721, 1985.
- LUTHI, S.M. & BANAVAR, J.R. Application of borehole images to three-dimensional geometric modeling of eolian sandstone reservoirs, Permian Rotliegende, North Sea. **AAPG BULLETIN** v.72, n.9, p.1074-1089, 1988.
- MACDONALD, A. C. & AASEN, J. O. A prototype procedure for stochastic modeling of facies tract distribution in shoreface reservoirs. In: YARUS, J. M. & CHAMBERS, R. L. (Ed.). *Stochastic modeling and Geostatistics: principles, methods and case studies*. Tulsa: American Association of Petroleum Geologists, 1994, 379p., p.91-108 (AAPG. Computer application in Geology, 3).
- MACDONALD, A. C. & HALLAND, E.K. Sedimentology and shale modeling of a sandstone-rich fluvial reservoir: Upper Statfjord Formation, Statfjord Field, Northern North Sea. **AAPG BULLETIN** v.77, n.6, p. 1016-1040, 1993.
- MALINVERNO, A., RYAN, W. B. F., AUFFRET, G. & PAUTOT, G. Sonar images of the path of recent failure events on the continental margin off Nice, France. In: CLIFTON, H. E. (Ed.). *Sedimentologic consequences of convulsive geologic events*. Geol. Soc. Am., Spec. Pap. 229, p.59-75, 1988.
- MANCINI, E.A., MINK, R.M., PAYTON, J.W. & BEARDEN, B.L. Environments of deposition and petroleum geology of Tuscaloosa Group (Upper Cretaceous), South Carlton and Pollard Fields, Southwestern Alabama. **AAPG BULLETIN** v.71, n.10, p.1128-1142, 1987.
- MASSONNAT, G.J., ALABERT, F.G. & GIUDICELLI, C. B. Anguille Marine, a deep-sea fan reservoir offshore Gabon: from geology to stochastic modeling. In: **ANNUAL TECHNICAL CONFERENCE AND EXHIBITION OF THE SPE 67**, Washington, USA. SPE # 24709, p. 477-492, 1992.
- MATHERON, G. *Eléments pour une théorie des milieux poreux*. Paris: Masson, 1967.
- MATHERON, G. *Les processus d'Ambarzoumian et leur application en Géologie*. Fontainebleau: Centre de Géostatistique ENSMP, 1969.
- MATHERON, G. *Random sets and integral geometry*. New York: John Wiley, 1975.

- MATHERON, G., BEUCHER, H., de FOUQUET, C. & GALLI, A. Conditional Simulation of the Geometry of Fluvio-Deltaic Reservoirs. In: **ANNUAL TECHNICAL CONFERENCE AND EXHIBITION OF THE SPE 62**, Dallas. SPE #16753, p.123-131, 1987.
- MCKENZIE, D. P. *Some remarks on the development of sedimentary basins*. Earth and Planetary Science Letters, v.40, p.25-32, 1978.
- MIALL, A. D. *Architectural-element analysis: a new method of facies analysis applied to fluvial deposits*. Amsterdam: Earth Science, v.22, p. 261-308.1985.
- MIALL, A. D. Reservoir heterogeneities in fluvial sandstones: Lessons from outcrop studies. **AAPG BULLETIN** v.72, n.6, p.682-697, 1988.
- MIALL, A. D. Architectural elements and bounding surfaces in channelized clastic deposits: notes on comparisons between fluvial and turbidite systems. In: TAIRA, A. & MASUDA, F. (Ed.). *Sedimentary facies in the active plate margin*. Tokyo, Japão: Terra Scientific Publishing Co., p.3-15, 1989.
- MIALL, A. D. Hierarchies of architectural units in terrigenous clastic rocks, and their relationship to sedimentation rate. In: MIALL, A. D. & TYLER, N. (Ed.). *The three-dimensional facies architecture of terrigenous clastic sediments and its implications for hydrocarbon discovery and recovery*. Tulsa: Society for Sedimentary Geology, 1991, 309p., p. 6-12. (SEPM. Concepts in Sedimentology and Paleontology, 3).
- MONTADERT, L. *La sédimentologie et l'étude détaillée des hétérogénéités d'un réservoir*. Paris: Ver. L'Institut Français du Pétrol., 18 (dec., Hors. Série), p.241-257, 1963.
- MOORE, D. G. Reflection profiling studies of the California continental borderland: Structure and quaternary turbidite basins. **Geol. Soc. Am. Special Paper 107**, p.1-142, 1969.
- MORRIS, W. R. & BUSBY-SPERA, C. J. Sedimentologic evolution of a submarine canyon in a forearc basin, Upper Cretaceous Rosario Formation, San Carlos, Mexico. **AAPG BULLETIN**, v.72, n.6, p.717-737, 1988.
- MORRIS, W. R. & BUSBY-SPERA, C. J. A submarine-fan valley-levee complex in the Upper Cretaceous Rosario Formation: implications for turbidite facies models. **Bull. Geol. Soc. Am.**, **102**, p.900-914, 1990.
- MUTTI, E. Turbidite systems and their relations to depositional sequences. In: ZUFFA, G.G. (Ed.). *Provenance of arenites*. Dordrecht: D. Reidel Publishing Co., p.65-93, 1985.

- MUTTI, E. *Turbidite Sandstones*. Milan: Agip, 1992, 275p.
- MUTTI, E. & NORMARK, W.R. Comparing examples of modern and ancient turbidite systems: problems and concepts. In: LEGGETT, J.R. & ZUFFA, G.G. (Ed.), *Marine clastic sedimentology: concepts and case studies*. Londres: Graham & Trotman, p.1-38, 1987.
- MUTTI, E. & RICCI-LUCCHI, F. Le torbiditi dell'Appennino settentrionale: introduzione all'analisi di facies. **Memorie della Società Geologica Italiana**, v.11, p.161-199, 1972.
- NELSON, C.H. & NILSEN, T.H. Modern and ancient deep-sea fan sedimentation. **Society of Economic Paleontologists and Mineralogists Short Course 14**, 404p. 1984.
- NORMARK, W.R. Growth patterns of deep-sea fans. **AAPG BULLETIN**, v.54, p.2170-2195, 1970.
- NORMARK, W. R. Fan valleys, channels, and depositional lobes on modern submarine fans: characters for recognition of sandy turbidite environments. **AAPG BULLETIN** v.62, p. 912-931, 1978.
- NORTH, C.P. & TAYLOR, K. S. Ephemeral-fluvial deposits: integrated outcrop and simulation studies reveal complexity. **AAPG BULLETIN** v.80, n.6, p. 811-820, 1996.
- OLIVEIRA, L. C. V. Arcabouço estratigráfico do Albo-Maastrichtiano da bacia de Campos: um estudo com base em nanofósseis calcários e suas relações com marcos elétricos estratigráficos e estratigrafia química. Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 1997, 181p.
- OMRE, H. Stochastic Models for Reservoir Characterization. In: SKJÆVELAND, S. M. & KLEPPE, J. (Ed.). *Recent advances in improved oil recovery methods for North Sea sandstone reservoirs*. Stavanger: Norwegian Petroleum Directorate, p.141-149, 1992.
- OOMKENS, E. Depositional sequences and sand distribution in a deltaic complex. **Geologie en Mijnbouw**, 46, p.265-278, 1967.
- ØVREBERG, O., DAMSLETH, E. & HALDORSEN, H.H. Putting error bars on reservoir engineering forecasts. **Journal of Petroleum Technology**, p.732-738, junho, 1992.
- PEREIRA, M. R. S. *Processos de Poisson duplamente estocásticos na caracterização de reservatórios fraturados*. Campinas: Universidade Estadual de Campinas,]1997, 82p. Dissertação (Mestrado).

- PERIN FILHO, C. *Introdução à simulação de sistemas*. Campinas: Editora da Universidade Estadual de Campinas. 1995, 163p.
- PESCO, S. & TAVARES, G. Splines in a topological setting. In: LAURENT, P.-J., LE MÉHAUTÉ, A. & SHUMAKER, L. L. (Ed.). *Curves and surfaces in geometric design*. Wellesley: A. K. Peters, p. 361-368, 1994.
- PETTIJOHN, E.J. *Sedimentary Rocks*. New York: Harper & Row, Publishers. 1975, 628p.
- PETTIJOHN, F. J., POTTER, P. E. & SIERVER, R. *Sand and sandstone*. New York: Springer-Verlag, 1973.
- PICKERING, K. T., HISCOTT, R. N. & HEIN, F. J. *Deep marine environments: clastic sedimentation and tectonics*. Londres: Chapman & Hall, 1989.
- PICKUP, G. E., RINGROSE, P.S., FORRESTER, M.M., JENSEN, J.L. & SORBIE, K. S. The Geopseudo Atlas: Geologically Based Upscaling of Multiphase Flow. In: **EUROPEAN PETROLEUM COMPUTER CONFERENCE**, Aberdeen, U.K., p.277-289, SPE # 27565, 1994.
- POLETO, C.A. *Modelagem geológica orientada a objetos e simulação estocástica da geometria de reservatórios fluviais*. Campinas: Universidade Estadual de Campinas. 1996, 141p. Dissertação (Mestrado).
- PONTE, F.C. & ASMUS, H.E. *Geological framework of the Brazilian continental margin: Geologische Rundschau*, v.67, p.201-235, 1978.
- POSAMENTIER, H. W., ERSKINE, R. D. & MITCHUM JR., R. M. Models for submarine-fan deposition within a sequence-stratigraphic framework. In: WEIMER, P. & LINK, M. H. (Ed.). *Seismic facies and sedimentary processes of submarine fans and turbidite systems*. New York, Springer-Verlag, p.127-136, 1991.
- POTTER, P. E. & SCHEIDEGGER, A. E. Bed thickness and grain size: graded beds. *Sedimentology*, v.7, p.233-240, 1996.
- PRYOR, W. A. Permeability-porosity patterns and variations in some Holocene sand bodies. *AAPG BULLETIN* v.57, p. 162-189, 1973.
- READING, H. G. & RICHARDS, M. Turbidite systems in deep-water basin margins classified by grain size and feeder system. *AAPG BULLETIN* v.80, n.5, p. 792-821, 1994.
- REINECK, H.E. & SINGH, I.B. *Depositional sedimentary environments*. Berlin: Springer-Verlag, 1975, 439 p.

- REINSON, G. E., CLARK, J.E. & FOSCOLOS A. E. Reservoir geology of Cristal Viking Field, Lower Cretaceous estuarine tidal channel-bay Complex, South-Central Alberta. **AAPG BULLETIN** v.72, n.10, p. 1270-1294, 1988.
- RINGROSE, P.S., JENSEN, J.L. & SORBIE, K. S. The use of Geology in the interpretation of core-scale relative permeability data. In: **ANNUAL TECHNICAL CONFERENCE AND EXHIBITION OF THE SPE 69**, New Orleans, USA. p.881-890, 1994.
- RIPLEY, B. D. *Spatial statistics*. New York: John Wiley, 1981, 252p.
- RIPLEY, B. D. *Stochastic simulation*. New York: John Wiley, 1987, 237p.
- ROJAS, I. Geological evaluation of San Diego Norte Pilot Project, Zuata Area, Orinico Oil Belt, Venezuela. **AAPG BULLETIN** v.71, n.10, p.1294-1303, 1987.
- SCHENK, C. J. Geometry of fluvial point-bar sandstones and application to horizontal drilling. In: SCHMOCKER, J.W., COALSON, E.B., BROWN, C.A. (Ed.). *Geological studies relevant to horizontal drilling in Western North America*. Rocky Mountain Association of Geologists. p.61-66, 1992.
- SCHUPPERS, J. D. Quantification of turbidite facies in a reservoir-analogous submarine-fan channel sandbody, south-central Pyrenees, Spain. In: FLINT, S. S. & BRYANT, I. D. (Ed.). *The geological modeling of hydrocarbon reservoirs and outcrop analogues*. Londres: Blackwell Scientific Publications, 1993, 269p., p. 99-112 (IAS. Special Publication, 15).
- SELLEY, R.C. *Ancient sedimentary environment*. London: Chapman & Hall. 1970, 287p.
- SERRA, J. *Image analysis and mathematical morphology*. Londres: Academic Press, 1982.
- SERRA, O. *Sedimentary environments from wireline logs*. França: Schlumberger. Imprimerie Louis-Jean, 2^a ed., 1989.
- SHANMUGAN, G. & MOIOLA, R. J. Reinterpretation of depositional processes in a classic flysch sequence (Pennsylvanian Jackfork Group), Ouachita Mountains, Arkansas and Oklahoma. **AAPG BULLETIN** v.79, n.5, p.672-695, 1995.
- SHANMUGAM, G., BLOCH, R. B., MITCHELL, S. M., BEAMISCH, G. W. J., HODGKINSON, R. J., DAMUTH, J. E., STRAUME, T., SYVERTSEN, S. E. & SHIELDS, K. E. Basin-floor fans in the North Sea: sequence stratigraphic models vs. sedimentary facies. **AAPG BULLETIN** v.79, n.4, p.477-512, 1995.
- SHANMUGAN, G., BLOCK, R. B., DAMUTH, J. E. & HODGKINSON, R. J. Basin-floor fans in the North Sea: sequence stratigraphic models vs. sedimentary facies: Replay. **AAPG**

- BULLETIN** v.81, n.4, p.666-672, 1997.
- SHANMUGAN, G., LEHTONEN, L. R., STRAUME, T., SYVERSTEN, S. E., HODGKINSON, R. J. & SKIBELI, M. Slump and debris-flow dominated upper slope facies in the Cretaceous of the Norwegian and Northern North Seas (61-67°): implications for sand distribution. **AAPG BULLETIN**, v.78, n.6, p.910-937, 1994.
- SLATT, R.M. & HOPKINS, G. L. Scaling geologic reservoir description to engineering needs. **Journal of Petroleum Technology**, p.202-210, Fevereiro, 1990.
- SMITH, E. H. The influence of small-scale heterogeneities on average relative permeability. In: LAKE, L W., CARROLL, H.B., Jr. & WESSON, T. C. (Ed.). *Reservoir characterization II*. San Diego: Academic Press. San Diego, 1991, 726p.
- SNEIDER, R. M. Predicting reservoir rock geometry and continuity in Pennsylvanian Reservoirs, Elk City Field, Oklahoma. **Journal of Petroleum Technology**, p.851-866, SPE # 6138, 1977.
- SOUZA Jr., O. G. *Stratigraphie séquentielle et modélisation probabiliste des réservoirs d'un cône sous-marin profond (Champ de Namorado, Brésil)*. Intégration des données géologiques et géophysiques. Paris: Universidade de Paris 6, 1997. 215p. Tese (Doutoramento).
- SRIVASTAVA, M.R. An overview of stochastic methods for reservoir characterization. In: YARUS, J.M. & CHAMBERS, R. (Ed.). *Stochastic modeling and geostatistics, principles, methods and case studies*. Tulsa: American Association of Petroleum Geologists, 1994, 379p., p.1-11. (AAPG. Computer Applications in Geology, 3).
- STOYAN, D., KENDALL, W.S. & MECKE, J. *Stochastic geometry and its applications*. New York: John Wiley & Sons. 345p. 1987.
- SWEET, M. L., BLEWDEN, C. J., CARTER, A.M. & MILLS, C.A. Modeling heterogeneity in a low-permeability gas reservoir using geostatistical techniques, Hyde Field, Southern North Sea. **AAPG BULLETIN** v.80, n.11, p.1719-1735, 1996.
- TANKARD, A.J. & WELSINK, H.J. Extensional Tectonics and Stratigraphy of Hibernia Oil Field, Grand Banks, Newfoundland. **AAPG BULLETIN** v.71, n.10, p.1210-1232, 1987.
- TAVARES, G. & LANZARINI, W.L. *Projeto Petbool - Relatório de Especificação da Abrangência do Projeto*. Rio de Janeiro: Petrobrás/Cenpes/Diger- Laboratório

- MatComp. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. 11p. 1996.
- TAVARES, G., CASTELO, A., LOPES, H. Topological methods in geometric modeling. In: CONGRESSO NACIONAL DE MATEMÁTICA APLICADA E COMPUTACIONAL – CNMAC, 15, São Carlos, 1992 . **Anais...** São Carlos, 1992.
- TAVARES, G., LANZARINI, W.L., PESCO, S., LOPES, H., FARIA, R., BARRETO Jr., A. *Simulação orientada a objetos de reservatórios petrolíferos: condicionamento a poços*. Rio de Janeiro: Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Dept^o. de Matemática, 1996a, 30p. (Pré-publicação n. 04/96).
- TAVARES, G., LOPES, H., PESCO, S., LANZARINI, W.L., ROMEU, R., BARRETO, A., FARIA, R., POLETTO, C.A. *Petbool 1.0 Manual do usuário e de referência*. Rio de Janeiro: Laboratório MatComp- Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. 1996b, 77p.
- TOUFFAIT, Y., BEUCHER, H. & GUERILLOT, D. A three-dimensional integrated structure for computer-aided reservoir characterization. **SPE #20348**, junho, 1990.
- TYLER, N. & AMBROSE, W. A. Facies architecture and production characteristics of strand-plain reservoirs in North Markham-North Bay City Field, Frio Formation, Texas. **AAPG BULLETIN** v.70, n.7, p.809-829, 1986.
- TYLER, N. & FINLEY, R. J. Architectural controls on the recovery of hydrocarbons from sandstone reservoirs. In: MIAL, A. D. & TYLER, N. (Ed.). *The three-dimensional facies architecture of terrigenous clastic sediments and its implications for hydrocarbon discovery and recovery*. Tulsa: Society for Sedimentary Geology, 1991, 309p., p. 77-89. (SEPM. Concepts in Sedimentology and Paleontology, 3).
- TYLER, K., HENRIQUEZ, A., SVANES, T. Modeling heterogeneities in fluvial domains: a review of the influence on production profiles. In: YARUS, J.M. & CHAMBERS, R. (Ed.). *Stochastic modeling and geostatistics, principles, methods and case studies*. Tulsa: American Association of Petroleum Geologists, 1994, 379p., p.77-89. (AAPG. Computer Applications in Geology, 3).
- TYLER, N., GHOLSTON, J.C. & AMBROSE, W. A. Oil recovery in a low-permeability, wave-dominated, Cretaceous, Deltaic Reservoir, Big Wells (San Miguel) Field, South Texas. **AAPG BULLETIN** v.70, n.7, p.1171-1195, 1986.
- VAIL, P. R., AUDEMARD, F., BOWMAN, S. A., WISNER, P. N. & PEREZ-CRUZ, C. The stratigraphic signatures of tectonics, eustasy and sedimentology – an overview. In:

- EINSELE, G., RICKEN, W. & SEILACHER., A. *Cycles and events in stratigraphy*. Berlin: Springer-Verlag, p.617-659, 1991.
- van de GRAAFF, W.J.E. & EALEY, P.J. Geological modeling for simulation studies. **AAPG BULLETIN** v.73, n.11, p.1436-1444, 1989.
- van WAGONER, J. C., MITCHUM, R. M., CAMPION, K. M. & TAHMANIAN, V. D. *Siliciclastic sequence stratigraphy in well logs, cores, and outcrops: concepts for high-resolution correlation of time and facies*. Tulsa: American Association of Petroleum Geologists, 1990, 55p. (AAPG. Methods in Exploration Series, 7).
- VERRIEN, J. P., COURAND, G. & MONTADERT, L. Applications of production geology methods to reservoir characteristic analysis from outcrop observations. In: 7TH WORLD PETROL. CONGR., México, II. **Proceedings...**, p. 425-446, 1967.
- VIEIRA, R.A.B., MENDES, M.P., VIEIRA, P. E., COSTA, L.A.R., TAGLIARI, C.V., BACELAR, L.A.P. & FEIJÓ, F.J. Bacias do Espírito Santo e Mucuri. **Boletim de Geociências da Petrobrás**, n° 1, vol.8, janeiro/ março, 1994.
- WALKER, R.G. Deep-water sandstone facies and ancient submarine fans: models for exploration for stratigraphic traps. **AAPG BULLETIN**, v.62, p.932-966, 1978.
- WALKER, R.G. *Facies models*. Toronto: Geoscience, 1984, 317p. (Reprint series 1).
- WALKER, R.G. Mudstones and thin-bedded turbidites associated with the Upper Cretaceous Wheeler Gorge conglomerates, California: a possible channel-levee complex. **Journal of Sedimentary Petrology**, **55**, p.279-290, 1985.
- WALKER, C. & EYLES, C.H. Geometry and facies of stacked shallow-marine sandier upward sequences dissected by erosion surface, Cardium Formation, Willesden Green, Alberta. **AAPG BULLETIN** v.72, n.12, p.1469-1494, 1988.
- WALKER, R. G. & JAMES, N. P. *Facies models: response to sea level change*. Toronto: Geoscience. 1992.
- WEBER, K.J. How heterogeneity affects oil recovery. In: LAKE, L. W. & CARROLL, JR., H. B. (Ed.). *Reservoir characterization*. San Diego: Academic Press, 1986, 659p., p.487-544p.
- WEBER , K. J., EIJPE, R., LEIJNSE, D. & MOENS, C. Permeability distribution in a Holocene distributary channel-fill near Leerdam (The Netherlands). **Geologie en Mijnbouw**, n. **51**, p.53-62, 1972.
- WEBER, K.J. & van GEUNS, L.C. Framework for constructing clastic reservoir simulation

- models. **Journal of Petroleum Technology**, p.1248-1253 ,Outubro, 1990.
- WEIMER, P. Sequence stratigraphy of the Mississippi fan (Plio-Pleistocene), Gulf Of Mexico. **Geo-Mar. Lett.**, **9**, p.185-272, 1989.
- WEIMER, P. & LINK, M. H. (Ed.) *Seismic facies and sedimentary processes of submarine fans and turbidite systems*. New York, Springer-Verlag, 1991, 447p.
- WILGUS, C.K., HASTINGS, B. S., KENDALL, C. G. St. C., POSAMENTIER, H.W., ROSS, C. A., van WAGONER, J.C. (Ed.) *Sea-level changes: an integrated approach*. Tulsa: Society for Sedimentology Geology, 1988, 407p. (SEPM. 42).
- WOOCK, R .D. & KIN, A .R. Predictive isopach mapping of gas sands from seismic impedance: modeled and empirical cases from Ship Shoal Block 134 Field. **AAPG BULLETIN** v.71, n.10, p.1143-1151, 1987.
- WORTHINGTON, P. F. Reservoir characterization at the mesoscopic scale. In: In: LAKE, L W., CARROLL, H.B., Jr. & WESSON, T. C. (Ed.). *Reservoir characterization II*. San Diego: Academic Press. San Diego, 1991, 726p.
- ZENG, H., BACKUS, M.M., BARROW, K.T., ANDSBJERG, J. Facies mapping from three-dimensional seismic data: potential and guidelines from a Tertiary Sandstone-Shale Sequence Model, Powderhorn Field, Calhoun County, Texas. **AAPG BULLETIN** v.80, n.1, p.16-46, 1996.