



UNICAMP

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS

INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOENGENHARIA
DE RESERVATÓRIOS

CARLOS ALBERTO POLETTO

**MODELAGEM GEOLÓGICA ORIENTADA A OBJETOS
E SIMULAÇÃO ESTOCÁSTICA DA GEOMETRIA DE
RESERVATÓRIOS FLUVIAIS**

Dissertação apresentada ao Instituto de Geociências como
parte dos requisitos para obtenção do grau de Mestre em
Geoengenharia de Reservatórios

Orientador: Dr Wilson Luiz Lanzarini

Este exemplar corresponde à
redação final da tese defendida
por Carlos Alberto Poletto
e aprovada pelo Conselho Julgador
em 16/12/96.

CAMPINAS - SÃO PAULO

DEZEMBRO - 1996

P758m

30287/BC

Lanzarini
ORIENTADOR

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS



UNICAMP

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE
CAMPINAS**

INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

**PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOENGENHARIA
DE RESERVATÓRIOS**

CARLOS ALBERTO POLETTO

**MODELAGEM GEOLÓGICA ORIENTADA A OBJETOS
E SIMULAÇÃO ESTOCÁSTICA DA GEOMETRIA DE
RESERVATÓRIOS FLUVIAIS**

Dissertação apresentada ao Instituto de Geociências como
parte dos requisitos para obtenção do grau de Mestre em
Geoengenharia de Reservatórios

Orientador: Dr. Wilson Luiz Lanzarini - PETROBRAS/CENPES

Co-Orientador: Dr. Geovan Tavares dos Santos - PUC-RIO

CAMPINAS - SÃO PAULO

Dezembro - 1996

UNIDADE	100
N.º CHAMADA	TI/UNICAMP
	P758m
V.	
TOMBO BC/	30287
PRCC.	281/97
C	<input type="checkbox"/>
	<input checked="" type="checkbox"/>
PREÇO	R\$ 11,00
CARA	21/09/97
N.º CTD	

CM.00098080-1

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA
BIBLIOTECA I.G. - UNICAMP

P758m	Poletto, Carlos Alberto
	Modelagem geológica orientada a objetos e simulação estocástica da geometria de reservatórios fluviais / Carlos Alberto Poletto.- Campinas. SP.: [s.n.], 1996
	Orientadores: Wilson Luiz Lanzarini, Geovan Tavares dos Santos Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual de Campinas, Instituto de Geociências.
	1. Reservatórios (fluviais). 2. Análise estocástica. 3. Geometria. 4. Petróleo Geologia - Métodos de Simulação. I. Lanzarini, Wilson Luiz. II. Santos, Geovan Tavares dos. III. Universidade Estadual de Campinas, Instituto de Geociências. IV. Título.



UNICAMP

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS

INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

**PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOENGENHARIA
DE RESERVATÓRIOS**

AUTOR: CARLOS ALBERTO POLETTO

**TÍTULO DA DISSERTAÇÃO: MODELAGEM GEOLÓGICA ORIENTADA A
OBJETOS E SIMULAÇÃO ESTOCÁSTICA DA GEOMETRIA DE
RESERVATÓRIOS FLUVIAIS**

ORIENTADOR: Dr. Wilson Luiz Lanzarini

CO-ORIENTADOR: Dr. Geovan Tavares Dos Santos

Aprovada em: ____/____/____

PRESIDENTE: Dr. Wilson Luiz Lanzarini

EXAMINADORES:

Dr. Wilson Luiz Lanzarini - Orientador

W. Lanzarini

Dr. Armando Zaupa Remacre

A. Z. Remacre

Dr. Joel Carneiro de Castro

J. C. Castro

Campinas, de Dezembro de

Dedico este trabalho:

a Deus, companheiro,

à Vera, companheira

e

à Luciana, Mariana e Ivana, nossas filhas

AGRADECIMENTOS

Agradeço aos meus orientadores, Dr. Wilson Luiz Lanzarini e Prof. Dr. Geovan Tavares dos Santos, pela gentileza em conduzirem este trabalho, pela paciência e atenção que nos dedicaram, ensinando e incentivando em todos os momentos, ao longo deste ano.

Agradeço ao Departamento de Matemática da PUC-Rio, ao Laboratório MatComp, na pessoa do Coordenador Prof. Dr. Geovan, pelo uso de 600 horas de máquina concedidas a este trabalho e pelo alojamento na universidade. Um agradecimento especial ao Prof. Dr. Hélio Lopes e ao Prof. Doutorando Sinésio, pela troca de conhecimentos com diálogo fácil, convívio agradável e principalmente por aceitarem nossas sugestões ao projeto; ao Prof. Dr. Marcos, pelo interesse em conhecer o tema da dissertação e a todas as pessoas do Departamento que sempre nos receberam tão cordialmente.

Agradeço à Petrobras S/A pelo suporte financeiro e ao Cenpes/Diger, especialmente ao Dr. Alberto Sampaio de Almeida, pela iniciativa do desenvolvimento do Projeto PetBool e por ter aceito nossa integração ao grupo de trabalho.

Aos colegas: Marisa Bueno dos Santos, que desenvolveu o modelo geológico utilizado nesta dissertação; Kurt, por compilar os dados de testes de formação; Nivaldo (*bobó*), Militão, Jurandir, Miguel e Pinto, por ajudarem na edição de dados e algumas figuras; ao Dr Bruhn pela bibliografia; ao Dr. Renato D. Mattos, ao geólogo Zapparolli e ao Prof. Dr. Chang (UNESP), pelo auxílio recebido na descompactação dos sedimentos.

Aos colegas do Cenpes: Socorro (*help*), que informou a existência do Projeto PetBool na Diger; à Rosane, por ajudar nas curvas de proporção no *Heresim*; ao mestre Abelardo (Abel), pelo apoio na informática; ao Dr. Ballin, pelo incentivo e perguntas pertinentes; ao Benjamin, Dr. Régis e Dr. Marco Moraes, por contribuírem com sugestões ao trabalho.

À UNICAMP, nas pessoas do Prof. Dr. Armando Zaupa Remacre e Prof. Dr. Ivan De Araújo Simões Filho, da Geoengenharia, pelos novos conhecimentos e contribuições neste trabalho; à Profª Emília, por sorrir sempre e desvendar alguns segredos da geoestatística; ao Moacir, pela programação de tratamento de dados e suporte geral de informática; à Creuza e Wellington, pelo apoio na secretaria; ao Departamento de Engenharia de Petróleo, nas pessoas do Prof. Dr. Denis Schiozer, por ler e sugerir melhorias no texto; ao Prof. Bordalo por sua boa ação na SCPG.

Aos colegas do mestrado: Borba, Garcia, Glauber, Jonas, Paulo, Soares e Vidal pelo convívio saudável, pelo espírito de equipe e por me ajudarem sempre que foi necessário.



UNICAMP

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE
CAMPINAS**

INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

**PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOENGENHARIA
DE RESERVATÓRIOS**

**MODELAGEM GEOLÓGICA ORIENTADA A OBJETOS E SIMULAÇÃO
ESTOCÁSTICA DA GEOMETRIA DE RESERVATÓRIOS FLUVIAIS**

RESUMO

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

Carlos Alberto Poletto

Neste trabalho, é proposto um método de modelagem geológica orientado a objetos denominado Modelagem Estocástica de Objetos Geométricos, para simular a geometria e a arquitetura de reservatórios fluviais num estudo de caso. Os reservatórios fluviais são formados por depósitos de preenchimento de canal, que constituem a unidade básica do reservatório. O objeto canal é representado em seção transversal pela geometria da superfície semi-elipse. A utilização das representações paramétrica e implícita da semi-elipse torna o algoritmo eficiente para gerar e visualizar objetos. A estimativa de volumes associados às superfícies geradas com esta estratégia é igualmente facilitada.

Através da parametrização do modelo geológico de subsuperfície da Formação Açú - Bacia Potiguar, obtido de um campo de petróleo bastante desenvolvido, foram construídas as funções de distribuição experimentais dos parâmetros que definem um canal no domínio tridimensional. Os parâmetros utilizados são: a espessura e a largura relacionada dos reservatórios individualizados em sucessões de granodecrescência ascendente a partir de testemunhos e seções geológicas, a sinuosidade e a direção preferencial dos canais medidas em mapas geológicos do mesmo campo onde o método foi testado. A curva de proporção global das litofácies controla a distribuição dos reservatórios no domínio simulado.

O processo de simulação de cada objeto inicia-se a partir de um ponto aleatório no espaço e com a amostragem aleatória dos seus parâmetros nas respectivas funções, e encerra-se quando todos os poços condicionantes são honrados e a proporção de reservatórios foi atingida. Os objetos aceitos são construídos por modelagem geométrica discreta de superfícies. A arquitetura equiprovável do reservatório em três dimensões é o resultado da erosão, sobreposição e união dos objetos gerados. Podem ser obtidas seções do domínio em qualquer direção ou plano, com várias opções de visualização científica.

As simulações são consistentes com todos os 30 poços condicionantes utilizados. O elevado potencial do método se traduz em representações tridimensionais realistas de reservatórios fluviais, exibindo o típico empilhamento diagonal dos canais. As realizações são úteis para acessar as incertezas quanto à arquitetura e estimativas dos volumes de reservatórios, e para validar as interpretações sedimentológicas em duas ou três dimensões. O método tem potencial para subsidiar a perfuração de novos poços e os estudos de comportamento do fluxo de fluidos em reservatórios.



UNICAMP

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE
CAMPINAS**

INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

**CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
GEOENGENHARIA DE RESERVATÓRIOS**

**OBJECT BASED GEOLOGICAL MODELING AND STOCHASTIC
SIMULATION OF FLUVIAL RESERVOIRS GEOMETRY**

ABSTRACT

MASTER DISSERTATION

Carlos Alberto Poletto

In this work, an object based method for geological modeling named Stochastic Modeling of Geometric Objects is proposed, to simulate the geometry and the architecture of fluvial reservoirs in a case study. Fluvial reservoirs are formed by channel fill deposits, which are the basic unit of the reservoir. The object channel is represented in cross-section by the geometry of the semi-ellipse surface. The use of the parametric and implicit representations of the semi-ellipse makes the algorithm efficient to generate and to visualize objects. The volumes estimation associated to surfaces generated with this strategy is equally facilitated.

Using the parametrization of the subsurface geologic model of the Açu Formation - Potiguar Basin, from a very well developed oil field, the experimental distributions functions of the parameters which define a channel into a three-dimensional domain were constructed. These used parameters are: the thickness and the width related of the reservoirs individualized as fining-upward successions from cores and geologic cross-sections, the sinuosity and channels preferential direction measured on geologic maps of the same field where the method was tested. The global proportion curve of lithofacies controls the distribution of the reservoirs within the simulated domain.

The simulation process of each object starts from a random point into the space and with random samples of their parameters on the respective functions and ends when all conditioning wells are honoured and the reservoir proportion is reached. The accepted objects are built by discrete geometric modeling of the surfaces. The equiprobable architecture of the reservoir in three dimensions is a result of erosion, superposition and union of the generated objects. One may have sections of the domain on any direction or plane, with several options of scientific visualization.

The simulations are consistent with all the 30 conditioning wells used. The high potential of this method results in realistic three-dimensional representations of fluvial reservoirs, with the exhibition of the typical diagonal channels stacking. The realizations are useful to access the uncertainties related to the architecture and reservoirs volume estimations, and to validate sedimentological interpretations in two or three-dimensions. The method has potential to subsidize new well perforations and the studies of reservoir flow analysis.

Índice

AGRADECIMENTOS	v
ÍNDICE	viii
LISTA DE FIGURAS	x
LISTA DE TABELAS	xiv
LISTA DE ANEXOS	xv
1. INTRODUÇÃO	1
1.1. OBJETIVOS	2
1.2. PERFIL DA DISSERTAÇÃO	3
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	5
2.1. SISTEMA FLUVIAL	5
2.2. HETEROGENEIDADES E GEOMETRIAS DE RESERVATÓRIOS FLUVIAIS	12
2.3. MODELO BOOLEANO DE SIMULAÇÃO ESTOCÁSTICA	23
2.4. MODELOS ORIENTADOS A OBJETOS PARA A REPRESENTAÇÃO DA ARQUITETURA DE RESERVATÓRIOS	25
2.4.1. <i>Modelagem geométrica</i>	26
2.4.2. <i>Aplicações dos modelos orientados a objetos na caracterização de reservatórios</i>	28
2.4.3. <i>Modeladores estocásticos orientados a objetos</i>	30
3. METODOLOGIA	40
3.1. MODELAGEM ESTOCÁSTICA DE OBJETOS GEOMÉTRICOS	40
3.2. CURVAS DE PROPORÇÕES	41
3.3. AQUISIÇÃO DE DADOS PARA A PARAMETRIZAÇÃO DOS CANAIS	45
3.3.1. <i>Forma geométrica</i>	46
3.3.2. <i>Espessura das sucessões de granodecrescência ascendente</i>	46
3.3.3. <i>Descompactação das sucessões de granodecrescência ascendente</i>	49
3.3.4. <i>Estimativa das larguras dos canais</i>	51
3.3.5. <i>Simosidades dos canais</i>	52
3.3.6. <i>Direções preferenciais dos canais</i>	54
3.4. MODELAGEM GEOMÉTRICA E SIMULAÇÃO CONDICIONAL DE CANAIS	55
3.4.1. <i>Ambiente gráfico da modelagem</i>	55
3.4.2. <i>Geração do objeto</i>	58
3.4.3. <i>Cálculo da interioridade e volume de reservatório</i>	65

3.4.4. <i>Ajuste do canal ao poço condicionante</i>	66
3.4.4.1. Algoritmo de simulação	69
4. ANÁLISE DE SENSIBILIDADE E TESTES DO PROGRAMA	70
5. ESTUDO DE CASO	82
5.1. FORMAÇÃO AÇU, BACIA POTIGUAR EMERSA.....	82
5.2. CURVA EXPERIMENTAL DA PROPORÇÃO VERTICAL DE FÁCIES.....	84
5.3. HISTOGRAMAS EXPERIMENTAIS	85
5.4. SIMULAÇÕES	90
5.4.1. <i>Estatísticas dos parâmetros simulados</i>	95
5.4.1.1. Espessuras simuladas de reservatórios e não reservatórios.....	95
5.4.1.2. Larguras simuladas(dimensões dos reservatórios)	97
5.4.1.3. Sinuosidades simuladas	97
5.4.1.4. Direções preferenciais simuladas	97
5.4.2. <i>Estimativa do volume relativo de reservatórios</i>	98
6. CONCLUSÕES	101
GLOSSÁRIO	104
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	105
ANEXOS	113

Lista de Figuras

- Figura 2-1: Padrões de canais fluviais e os parâmetros para classificação de estilos w : largura, h : profundidade, s : sinuosidade (adaptado de Swanson, 1993 e Chessa, 1995). _____ 6
- Figura 2-2: Rio meandrante com sinuosidade 2,6 calculada pela razão entre as extensões da curva tracejada e da reta que unem os pontos A e B. _____ 7
- Figura 2-3: Modelo de estilo fluvial para os sedimentos da Unidade Açú 3 da Formação Açú (adaptado de Miall, 1985). _____ 10
- Figura 2-4: (a) 6ª superfície de 6ª ordem separando membros estratigráficos (Mb) em escala de bacia. (b) 5ª superfície de 5ª ordem em forma de U achatado separando os canais maiores (adaptado de Miall, 1988). 12
- Figura 2-5: As quatro escalas de magnitude das heterogeneidades em depósitos fluviais na classificação de Weber (1986). _____ 14
- Figura 2-6: Classificação de reservatórios segundo a geometria. (a) reservatórios tipo layer-cake (estratificado), (b) reservatório tipo jigsaw-puzzle (enigma) e (c) reservatório tipo labirinto (Weber e Van Geuns, 1990). _____ 15
- Figura 2-7: Reservatórios fluviais em afloramentos. A linha pontilhada representa uma superfície de 5ª ordem delimitando dois corpos arenosos formados por depósitos de preenchimento de canal. Membro Siderópolis da Formação Rio Bonito na Bacia do Paraná (estrada Ituporanga, Vidal Ramos-SC, martelo para escala). _____ 16
- Figura 2-8 Critérios para interpretação faciológica de ambiente fluvial através de testemunhos e perfis elétricos (adaptado de Lorenz et al. 1985). _____ 19
- Figura 2-9: Largura do canal (w) e espessura dos depósitos de preenchimento de canal (h) (Lorenz et al. (1985). _____ 19
- Figura 2-10: Correlação entre larguras do canal fluvial e do cinturão meandrante (Lorenz et al., 1985). _____ 20
- Figura 2-11: Vista em planta da planície de inundação de rio meandrante. No detalhe: raio de curvatura do meandro (R_m) e comprimento da barra em pontal (W_{pb}) (adaptado de Schenk, 1992). _____ 21
- Figura 2-12: Modelo booleano planar $\Xi \equiv \cup_n (\Xi_n + x_n)$. Cada disco $B(F)$ limita um aglomerado de n pontos formando um grão. O centro dos discos são os germes dos grãos e o espaço vazio entre eles é um void. O sinal $+$ indica uma translação (Stoyan, 1987). _____ 24
- Figura 2-13: Corpos fluviais construídos como séries de hexaedros (adaptado de Hirst et al., 1993). _____ 34
- Figura 2-14: Três possibilidades para honrar o mesmo intervalo $[z_i, z_{i-n}]$ num poço. A seta mostra situação com probabilidade entre 0,6 a 0,8 de acontecer segundo Hirst et al. (1993) (adaptado de Hatløy, 1994). 36
- Figura 2-15: Representação dos depósitos de extravasamento no SIRCH. Uma cunha é colocada adjacente ao canal, visto aqui esquematicamente em seção transversal (adaptado de Hirst et al., 1993). _____ 36
- Figura 3-1: Curvas de proporções horizontais entre as litofácies reservatório e não reservatório, nas direções N45°E e N45°W, na área de reconhecimento, com 9 Km². _____ 44
- Figura 3-2: Curva de proporções verticais entre as litofácies reservatórios e não reservatórios, na área de 9

<i>Km². Nota-se os dois marcos de folhelho delimitando o intervalo a ser modelado e também os dois níveis argilosos internos separando-o em três subzonas. O nível 0 significa o topo do capeador e o nível 5 a base do folhelho inferior.</i>	44
<i>Figura 3-3: Método da inversão. Através do sorteio de um número aleatório no intervalo [0, 1] o parâmetro p_i é amostrado na curva que representa a sua função de distribuição acumulada.</i>	45
<i>Figura 3-4: Parâmetros que definem um canal fluvial em três dimensões, w: largura, h: espessura, a: amplitude (função da sinuosidade) e d: direção preferencial. Para simplificar o modelo geométrico, a declividade é considerada constante e igual a zero (adaptado de Lanzarini et al., 1995).</i>	47
<i>Figura 3-5: Variação da largura w em função da espessura h. Nota-se que a faixa de variação de 0,6h até 0,8h corresponde respectivamente de 92 a 98% da largura w.</i>	48
<i>Figura 3-6: As setas representam o padrão interpretado para depósitos de preenchimento de canal. GR: raios gama. PHIN: porosidade neutrônica. RHOB: densidade de rocha total.</i>	50
<i>Figura 3-7: Variação na largura (w) do canal, causada pela translação da semi-elipse ao longo da curva geratriz, segundo planos paralelos ao plano yz.</i>	54
<i>Figura 3-8: Modelagem geométrica condicional de canal. O condicionamento é feito por funções de distribuição experimental de parâmetros, por intervalos de reservatório e não reservatório nos poços e por curva vertical de proporção de fácies.</i>	56
<i>Figura 3-9: Uma face é constituída por um ciclo fechado de semi-arestas formando um complexo celular. A semi-aresta ($V_2 V_3$) comum a duas faces é identificada pela seta com ponta dupla) e substitui a semi-aresta ($V_8 V_5$). As letras V representam os vértices das faces.</i>	57
<i>Figura 3-10: Sorteio aleatório da posição C_i, no plano yz que representa o germe do objeto a ser criado. C_i carrega consigo os parâmetros sorteados h e w que definem a semi-elipse (grão). O domínio tridimensional (D) é igual ao domínio dos dados e sua diagonal no plano xy é l.</i>	60
<i>Figura 3-11: Construção da curva geratriz (linha tracejada) sobre a reta diretriz de comprimento 2l. Entre B_1 e B_{15} estão os pontos de controle da spline (B_i) afastados entre si por um valor constante e igual a d.</i>	61
<i>Figura 3-12: Superfície envoltória das semi-elipses construída por modelagem geométrica discreta de superfícies (MGD) dando forma ao objeto canal.</i>	62
<i>Figura 3-13: Rotação do objeto de θ graus em relação ao eixo x, correspondendo a direção preferencial d amostrada.</i>	63
<i>Figura 3-14: Translação do objeto de volta ao ponto de origem C_i.</i>	64
<i>Figura 3-15: Eliminação das superfícies que ultrapassam o domínio dos dados.</i>	65
<i>Figura 3-16: Nesta dissertação são evitadas as situações de tangência do poço em relação ao objeto e/ou de estar localizado exatamente na sua espessura máxima, apesar de serem consistentes com os dados de campo, estas situações são possíveis, mas pouco prováveis. No poço, a cor amarela indica reservatório e a verde não reservatório.</i>	67
<i>Figura 3-17: Ajuste de um canal ao intervalo condicionante $[z_i, z_{i+1}]$. O posicionamento é definido por números aleatórios, (ii) para posicionar o objeto à esquerda ou à direita do poço, (i) para manter-se na faixa de 85% de w.</i>	68
<i>Figura 4-1: Representação tridimensional de reservatórios simulados em domínio maior que o domínio dos</i>	

dados. (a) Não há restrição próximo as faces. (b) Há restrições, exceto na	71
Figura 4-2: Corte vertical numa realização mostrando os corpos compostos sobrepondo-se e o condicionamento sendo respeitado. No destaque, em amarelo, o empilhamento diagonal de canais, que é observado em afloramentos.	72
Figura 4-3: Ilusão de não condicionamento, (a) causado por problema de precisão numérica nos limites do domínio (marcado pela linha vermelha), a seta branca indica poço fora e a seta preta indica poço dentro do domínio, (b) número de iterações não suficiente para condicionar todos os intervalos de reservatório, marcados pelos retângulos.	73
Figura 4-4: Truncamento e união de objetos. A e B são dois objetos distintos. A operação $A \cup B$	73
Figura 4-5: Dimensões aparentes causadas por cortes não ortogonais (XX' , YY' , QQ') aos eixos dos canais. (a) O canal superior é mais estreito que o canal inferior, mas o corte XX' mostra o contrário. (b) O corte ZZ' é o que mais se aproxima da relação verdadeira entre as dimensões dos dois canais.	75
Figura 4-6: Exercício de simulação (s44.sim) utilizando um histograma para amostrar larguras w . Nota-se a predominância de larguras similares.	76
Figura 4-7: Simuosidades médias por ponto de controle, ao longo da reta diretriz, em duas realizações. (a) Realização com 315 amostras. (b) Realização com 11610 amostras. A simulação condicional a poços e a CPVF exige um número grande de objetos para honrar todos os poços e a curva. Neste caso, o valor médio das simuosidades simuladas converge para média amostral (1,26).	78
Figura 4-8: Comportamento do parâmetro simuosidade nos pontos de controle s_1 , s_5 , s_{10} e s_{15} , em duas realizações: (a) s36.sim e (b) s23.sim. Em ambas, o comportamento aleatório da amostragem é evidenciado.	79
Figura 4-9: Distribuições de espessuras h , dados simulados.	81
Figura 4-10: Distribuições de simuosidades s , dados simulados.	81
Figura 4-11: Distribuições de direções d , dados simulados.	81
Figura 5-1: Seções estratigráficas na Unidade Açú 3, da Formação Açú (adaptado de Santos e Poletto, 1993).	83
Figura 5-2: Curva de Proporção vertical de fácies (CPVF) calculada com 30 poços. Observa-se dois níveis argilosos separando o intervalo em três subzonas.	84
Figura 5-3: Função de distribuição experimental das espessuras (h), dos depósitos de preenchimento de canal, nos poços testemunhados. Estatística: média aritmética 5,72 m; mínimo 2,0 m; máximo 11,2 m; mediana 5,6 m; n° de amostras 15; variância 6,8.	86
Figura 5-4: Função de distribuição experimental das simuosidades (s) dos canais, obtidas nos mapas de Santos e Poletto (1993). Estatística: média aritmética 1,26 m; mínimo 1,0m; máximo 3,0 m; mediana 1,14 m; n° de amostras 49; variância 0,15.	88
Figura 5-5: Função de distribuição experimental das direções preferenciais (d). Estatística: média aritmética 85° , mínimo 0° , máximo 180° , mediana 90° , n° de amostras 110, variância 2059,96.	89
Figura 5-6: Realizações equiprováveis de simulação condicional a 30 poços e CPVF, (a) com 79,7%, (b) com 79,0% em volume relativo de reservatórios. Notam-se que os dois níveis argilosos da CPVF coincidem com dois níveis em predominam os vazios (voids). O domínio D mede $1631,9 \times 1629,8 \times 34$ m. Exagero vertical: 30 vezes.	92, 93

- Figura 5-7: Comparação entre a seção geológica interpretada e a simulada. (a) Seção geológica de Santos e Poletto (1993), adaptada para o mesmo datum da simulação. RG: Perfil de Raios Gama. (b) Mesma seção simulada. A cor verde no poço coincide com os vazios (voids) e representam não reservatórios, em amarelo os reservatórios. Nota-se o condicionamento exato aos intervalos fornecidos . _____ 94*
- Figura 5-8: Curvas de proporção vertical de fácies simuladas em duas realizações (a) e (b). _____ 99*
- Figura 5-9: Estimativa do volume relativo de reservatórios entre 80 e 85% considerando a hipótese de atingir 1.000.000 de iterações no programa PetBool. _____ 100*

Lista de Tabelas

<i>Tabela 3-1: Critérios de escolha das indicatrizes usadas na construção das curvas de proporção para reconhecimento da área. PHIN: porosidade neutrônica. PHID: porosidade do perfil densidade. GR: Indicador de argilosidade. RHOB: densidade total. Caliper: diâmetro do poço. Rugosidade: diâmetro relativo do poço entre duas profundidades a intervalos fixos de medição. UAPI: unidades API (modificado de Poletto et al., 1993).</i>	43
<i>Tabela 3-2: Estatística das espessuras dos depósitos de preenchimento de canal nos testemunhos e seções geológicas.</i>	47
<i>Tabela 4-1: Comparação das estatísticas de larguras w obtidas por simulação utilizando um histograma de larguras ao invés de equação de correlação com a espessura h.</i>	76
<i>Tabela 4-2: Comparação das estatísticas de simuosidades s, obtidas por simulação, utilizando simuosidades constantes como dado de entrada.</i>	77
<i>Tabela 5-1: Estatísticas das espessuras dos corpos gerados em 4 realizações condicionais.</i>	95
<i>Tabela 5-2: Estatística da espessura dos corpos compostos de reservatórios (TH) e dos corpos de não reservatórios (VDH), em 4 realizações condicionais, medidas em 100 posições da matriz que representa o domínio simulado.</i>	96
<i>Tabela 5-3: Volumes relativos de reservatórios após honrar os 30 poços do domínio.</i>	99

Lista de Anexos

ANEXO 1.....	114
-ESPESSURA DAS SUCESSÕES DE GRANODECRESCÊNCIA ASCENDENTE MEDIDAS NOS TESTEMUNHOS,	
-ESPESSURAS DAS SUCESSÕES DE GRANODECRESCÊNCIA ASCENDENTE E DOS DEPÓSITOS DE TRANSBORDAMENTO DE CANAL MEDIDAS NAS SEÇÕES GEOLÓGICAS,	
-RAZÃO w/h NAS SEÇÕES GEOLÓGICAS.	
ANEXO 2.....	122
-LEVANTAMENTO DAS SINUSIDADES SOBRE O MODELO DE SANTOS E POLETTO (1993),	
-HISTOGRAMAS DE RAIO DE CURVATURA DE MEANDROS <i>Rm</i> .	
ANEXO 3.....	126
-SINUSIDADES DE CURVAS REPRESENTANDO CANAIS FLUVIAIS.	
ANEXO 4.....	130
-FLUXOGRAMA SIMPLIFICADO DAS SIMULAÇÕES CONDICIONAIS.	
ANEXO 5.....	132
-TABELA RESUMO DE 29 SIMULAÇÕES DIVERSAS,	
-TABELA DE TIPOS DE SIMPLAÇÕES <i>VERSUS</i> NÚMERO DE OBJETOS,	
-HISTOGRAMAS DE RAIO DE CURVATURA DE MEANDROS <i>Rm</i> .	
-PLANILHAS COM AS FREQUÊNCIAS DE ESPESSURA DOS CORPOS GERADOS, DOS CORPOS COMPOSTOS DE RESERVATÓRIOS E ESPESSURAS DE NÃO RESERVATÓRIOS	
ANEXO 6.....	139
-PESQUISA SOBRE ESTIMATIVAS DAS DIMENSÕES DE RESERVATÓRIOS FLUVIAIS UTILIZANDO DADOS DE TESTES DE FORMAÇÃO E EQUAÇÕES DE RELAÇÃO DA ESPESSURA (h) COM A LARGURA (w).	

1. Introdução

Vários fatores influenciam o comportamento do fluxo de fluidos num reservatório de petróleo, entre eles, está a geometria externa, que é resultado da sua arquitetura. A elaboração de modelos de geometria externa e heterogeneidades destes reservatórios é uma atividade contínua durante o processo de exploração. À medida que são acrescentadas novas informações ao conjunto de dados disponíveis, vai se aperfeiçoando o modelo do reservatório, até que na fase do desenvolvimento adiantado do campo, com espaçamentos relativamente pequenos entre os poços, consegue-se uma noção aproximada da sua geometria. Vale ressaltar que, neste tipo de modelagem, o objetivo é representar as litofácies como se apresentam hoje, as suas dimensões e relações paramétricas, e não como foram depositadas no passado geológico.

As considerações sobre a geometria externa de um reservatório petrolífero dependem da escala de observação. A própria existência de um meio poroso portador de hidrocarbonetos, cercado por rochas selantes, representa por si só uma heterogeneidade de larga escala. Por outro lado, as diminutas variações no tamanho de grão, no seu empacotamento, seleção ou diagênese, representam heterogeneidades de escala microscópica controladoras da porosidade e da permeabilidade, que por sua vez controlam o fluxo de fluidos através do reservatório.

Neste trabalho, a escala de aquisição de dados abrange a observação das superfícies limitantes de 3ª, 4ª e principalmente 5ª ordens de Miall (1988b). A escala da simulação estocástica da geometria externa da fácies reservatório enquadra-se na escala das macroformas de Jackson (1975). Estes depósitos preenchem o canal fluvial através da acresção lateral ou frontal originando os complexos de barras fluviais, cuja união

entre si, forma o cinturão fluvial sinuoso.

E qual seria a geometria externa de um determinado reservatório petrolífero em subsuperfície, que não se pode acessar diretamente? Na prática, faz-se conjecturas sobre sua geometria externa através da análise faciológica e a comparação com os modelos de sistemas deposicionais construídos a partir dos depósitos antigos aflorantes, ou estudando os análogos do Recente.

É possível então a partir dos modelos geológicos estabelecidos, adotar um modelo matemático e probabilístico para a representação da geometria tridimensional de um reservatório petrolífero em subsuperfície. Os modelos de simulação que se aplicam à esta finalidade são os modelos booleanos, mais particularmente os modelos orientados a objetos discretos, cujos exemplos publicados com raras exceções, são modelos não condicionais a poços e em duas dimensões.

1.1. Objetivos

O objetivo desta dissertação é propor a técnica de Modelagem Estocástica de Objetos Geométricos (MEOG) para obter representações equiprováveis da geometria externa e da arquitetura tridimensional de reservatórios fluviais, tendo como base os depósitos de preenchimento de canal, com a restrição imposta do condicionamento aos dados de poços. Portanto, a unidade genética canal, como serão tratados tais depósitos nesta dissertação, significa um ou mais corpos arenosos compostos, cuja forma em seção transversal é em formato de \cup com espessura h da ordem de metros, e a largura w da ordem de centenas de metros.

A modelagem é baseada na parametrização de um modelo geológico detalhado de subsuperfície para a Formação Açu, definido em Santos e Poletto (1993), que foi construído com informações de 30 poços de desenvolvimento, entre os quais quatro poços testemunhados, e também é controlada pela curva de proporção vertical entre as

fácies reservatório e não reservatório.

O modelo geológico de subsuperfície é similar ao modelo definido por Becker *et al.* (1992) e Barton *et al.* (1995), Lanzarini (1994) e Lanzarini (1995) em afloramentos análogos da Formação Açu, situados no Km 98 e Km 99 da BR 101, à uma distância de aproximadamente 60 Km do campo onde foi aplicado este estudo de caso. Para o ajuste do parâmetro de dimensão dos reservatórios são usadas as informações dos raios de investigação dos testes efetuados a poço revestido, no intervalo modelado e correções de descompactação e de dados da literatura.

Os reservatórios da Formação Açu a serem modelados contêm os maiores volumes de óleo da bacia. Foram depositados no Cretáceo Superior através de sistemas fluviais sinuosos e entrelaçados, que originaram depósitos predominantemente arenosos, intercalados por camadas de argilitos e folhelhos delgados de difícil correlação lateral.

Estes reservatórios são classificados segundo a geometria como do tipo labirinto na definição de Weber e Van Geuns (1990), que admitem várias interpretações na área entre os poços, o que justifica o uso do modelo probabilístico na geração de representações da distribuição espacial dos corpos arenosos.

A partir das curvas de acréscimo da proporção simulada de canais são feitas estimativas do volume relativo das litofácies reservatório e não reservatório.

1.2. Perfil da dissertação

O Capítulo 2 é uma revisão bibliográfica sobre: a relação entre os elementos arquiteturais e de heterogeneidades dos reservatórios fluviais e a necessidade da abordagem probabilística para a sua modelagem. É colocada uma revisão de alguns conceitos matemáticos básicos do modelo booleano, e a sua adaptação para os modelos orientados a objetos, com aplicação na geoestatística de reservatórios de petróleo. Também foram pesquisados os principais programas de modelagem publicados na

literatura.

O Capítulo 3 é sobre a metodologia de modelagem geométrica orientada a objetos. É apresentada a seqüência de aquisição dos dados, os problemas relacionados a quantificação de cada parâmetro do modelo geológico e os motivos que levaram a adotar determinadas soluções para o estudo de caso. Ainda, neste capítulo são colocados os fundamentos de geometria da semi-elipse utilizados para o condicionamento aos dados de poços, bem como, das representações paramétrica e implícita da elipse empregados na geração, visualização e estimativa de volumes relativos de litofácies.

No capítulo 4 é realizada a análise de sensibilidades do algoritmo de simulação em relação a variação dos parâmetros do modelo e os principais testes de validação feitos durante a sua implementação.

O Capítulo 5 é um estudo de caso com dados reais de um campo produtor de petróleo em estágio adiantado de desenvolvimento. São apresentadas realizações tridimensionais equiprováveis, a comparação entre os resultados obtidos na simulação da geometria dos reservatórios com a interpretação sedimentológica existente e a estimativa de volumes de litofácies.

O Capítulo 6 é o sumário dos principais resultados obtidos neste trabalho para futuras pesquisas e aplicações na caracterização de reservatórios de petróleo.

Ao final estão incorporados os anexos necessários ao entendimento do texto.

Os principais recursos computacionais utilizados foram: SPFPC™, LOGCALC™, ISATIS™, HERESIM™, ANAVAR (domínio público), xv (domínio público), EXCEL 5.0™, Word 6.0™, ModVis e PetBool™.

2. Revisão Bibliográfica

Um projeto de modelagem geológica de reservatórios petrolíferos, orientado a objetos, é tarefa multidisciplinar por envolver conceitos de geologia, geoestatística, matemática, estrutura de dados, modelagem geométrica e visualização científica. Este capítulo foi subdividido de maneira a pesquisar os tópicos relacionados à atividade de modelagem de reservatórios fluviais.

2.1. Sistema fluvial

Os sistemas fluviais são classificados principalmente segundo a morfologia em planta do canal, distribuição e geometria das fácies sedimentares associadas e secundariamente pela razão entre a largura w do canal e a sua profundidade h .

A morfologia em planta define o fator morfológico sinuosidade s . A sinuosidade e a complexidade dos canais caracterizam os padrões extremos de estilos fluviais denominados de: entrelaçado (*braided*), meandrante e de baixa sinuosidade. Os canais anastomosados são os múltiplos canais bifurcantes que compõe o padrão entrelaçado e tem sido confundidos como um estilo à parte (Figura 2-1).

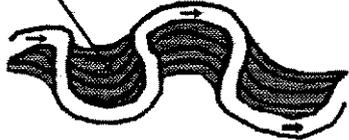
A. Entrelaçado (<i>braided</i>)	B. Meandrante	C. Baixa sinuosidade
<p>canais anastomosados</p>  <p>barras</p> <p>razão w/h: 12-60</p>	<p>barra em pontal</p>  <p>razão w/h: 8-12</p> <p>s > 1.5</p>	<p>raso</p> <p>barra (corredeiras) fundo</p>  <p>razão w/h: 0.5-12</p> <p>s: 1.0-1.2</p>

Figura 2-1: Padrões de canais fluviais e os parâmetros para classificação de estilos w: largura, h: profundidade, s: sinuosidade (adaptado de Swanson, 1993 e Chessa, 1995).

Estes padrões podem gradar entre si ao longo de um mesmo rio, por exemplo, alguns rios entrelaçados variam desde muito sinuosos até retilíneos. O Rio Solimões (Bacia Amazônica) é ao mesmo tempo entrelaçado e meandrante em alguns trechos (Baker, 1978). Os depósitos de acreção lateral considerados típicos de rios meandantes de alta sinuosidade, também ocorrem nos rios entrelaçados e nas correntes efêmeras de enchentes. Os sedimentos que formam as barras longitudinais comumente creditados a rios entrelaçados, podem ser encontrados também nos rios meandantes de alta sinuosidade (Miall, 1988a). Assim, estes modelos fluviais devem ser vistos como extremos dentre as diversas possibilidades de sistemas reais.

A proporção relativa dos sedimentos de acreção vertical, em relação aos sedimentos de acreção lateral e frontal, não é um indicador do estilo fluvial. Tradicionalmente as sucessões fluviais contendo mais de 20% de sedimentos de acreção vertical eram interpretadas como originadas por rios meandantes e as sucessões predominantemente arenosas eram tidas como resultado de rios entrelaçados (*braided*). Miall (1988a) credita estas proporções a fatores como área fonte de sedimentos e taxa de subsidência da bacia.

Pode-se acrescentar que, a sedimentação fluvial não é governada somente pelo mergulho regional, distância da área fonte e descarga do rio. Outros elementos independentes como: variações climáticas, tectonismo e vegetação têm influência na

morfologia fluvial, no que diz respeito a multiplicidade dos canais e a sua sinuosidade.

Considerando um rio meandrante, a sinuosidade do canal é calculada como a razão entre as extensões da curva e da reta que unem dois pontos A e B ao longo do seu curso, como mostrado na Figura 2-2.

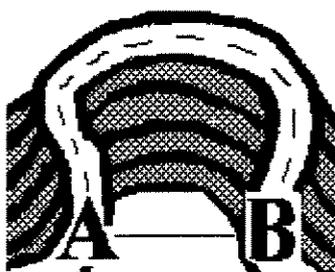


Figura 2-2: Rio meandrante com sinuosidade 2,6 calculada pela razão entre as extensões da curva tracejada e da reta que unem os pontos A e B.

Os valores de sinuosidade estabelecidos na literatura para que um rio seja considerado meandrante são 1,5 segundo Leeder (1973) e 1,7 segundo Lorenz *et al.* (1985). Como já foi citado acima, o termo meandrante pode induzir à associação com rios geradores de reservatórios ricos em sedimentos argilosos, o que não é necessariamente verdadeiro.

Nesta dissertação é adotado o termo fluvial sinuoso para se referenciar ao estilo fluvial dos depósitos modelados. Assim evita-se a conotação sedimentológica tradicional que o termo meandrante acarreta.

Jackson (1975) propõe uma classificação dos depósitos fluviais baseada numa ordenação hierárquica nas escalas de tempo e física, que denominou de: microformas, mesoformas e macroformas. Estas três hierarquias podem ocorrer simultaneamente.

As microformas são geradas por turbulências na corrente. São as marcas de onda de pequena escala (cm) e as lineações formadas por fluxos unidirecionais. Ocorrem em todos os ambientes sedimentares clásticos dominados por correntes de tração, sendo por si só não diagnósticas de ambiente fluvial. Na escala de tempo, as microformas são

geradas desde segundos até horas.

As mesoformas são heterogeneidades de média escala, da ordem de poucos metros, tais como: dunas e ondas de areia (*sandwaves*), pequenos canais e barras unitárias (tipo: linguóides, transversais, longitudinais e diagonais formadas por depósitos de acreção lateral e frontal).

As mesoformas são geradas por eventos dinâmicos sazonais e efêmeros, têm geometria similar em todos os ambientes sedimentares sob as condições de fluxo aquoso unidirecional. A geometria destas barras, as paleocorrentes e os padrões de fluxo, não podem ser identificadas satisfatoriamente a partir de afloramentos ou testemunhos. Estes elementos necessitam de grandes exposições em três dimensões para serem adequadamente estudados.

Na escala física, as mesoformas são unidades que têm entre 100 e 1000 m de comprimento e, por causa do seu tamanho e complexidade interna, requerem malhas de poços com espaçamento de 400 a 566 m para serem identificadas. Na escala de tempo, as mesoformas representam eventos dinâmicos como furacões, tempestades e enchentes sazonais, quando grandes quantidades de sedimentos são movidos num curto espaço de tempo.

As macroformas refletem os efeitos cumulativos de uma dinâmica de eventos durante dezenas a milhares de anos em resposta a controles tectônicos, geomorfológicos e climáticos de caráter amplo. Incluem os depósitos compostos de canais maiores, os cinturões meandrantés, as barras em pontal compostas, as barras laterais compostas, as planícies de areia e as ilhas. Estas são as formas que podem ser observadas nas fotografias aéreas dos rios atuais. É nesta escala, que a modelagem geológica é proposta neste trabalho.

Miall (1985 e 1988a) apresenta a metodologia de análise dos elementos arquiteturais dos depósitos fluviais baseada em litofácies e estruturas sedimentares a partir de afloramentos. Estas litofácies são constituídas de oito elementos arquiteturais

em três dimensões descritos a seguir:

(1) canais (CH): têm forma de \cup com topo plano ou levemente côncavo para cima. Os canais podem conter depósitos de outros elementos arquiteturais;

(2) formas de leito tipo barras conglomeráticas (GB): conglomerados tabulares ou com estratificações cruzadas, originados como barras longitudinais ou transversais;

(3) depósitos de fluxos gravitacionais (SG): são depósitos conglomeráticos formados por escorregamentos;

(4) formas de leito arenosas (SB): são as formas de leito geradas por regime de fluxo. Têm granulometria de areia. Quando combinadas dão uma grande variedade de geometrias. Formam lençóis tabulares, ocupando base de canais, topos de barras ou formam os depósitos de extravasamento (*crevasse splays*);

(5) macroformas de acreção frontal ou acreção longitudinal (DA): são similares aos depósitos (SB), sempre limitadas por uma superfície convexa para cima. Indicam a direção do paleofluxo que é paralelo ou subparalelo ao mergulho da superfície limitante. Crescem por acreção na direção da corrente. Indicativas da profundidade mínima da água que é aproximadamente a altura do relevo da superfície de 4ª ordem;

(6) depósitos de acreção lateral (LA): são similares aos depósitos (DA), porém a orientação da camada faz alto ângulo com o mergulho das superfícies internas de acreção de 3ª ordem. São as clássicas barras em pontal;

(7) lençóis de areias laminadas (LS): são similares aos depósitos (SB), porém são geradas em regime de fluxo superior, comumente em rios efêmeros;

(8) depósitos finos da planície de inundação (OF): são originados por acreção vertical. Formam camadas de lamitos, siltitos (e arenitos de pequena extensão areal) na planície de inundação e nos canais abandonados. Costuma ter também paleossolos,

camadas de carvão, e evaporitos (mais raramente) associados.

A partir da combinação destes oito elementos arquiteturais, Miall (1985, 1988a) estabeleceu doze modelos de estilos fluviais, enfatizando que a mistura entre eles é comum. O modelo 5 denominado de fluvial meandrante de granulometria grossa, contém barras arenosas e conglomeráticas, dunas e ondas de areia, canais escavados, meandros abandonados e freqüentes sucessões de granodecrescência ascendente. A Unidade Açú 3 da Formação Açú é similar ao modelo 5, porém com canais menos sinuosos (Figura 2-3).

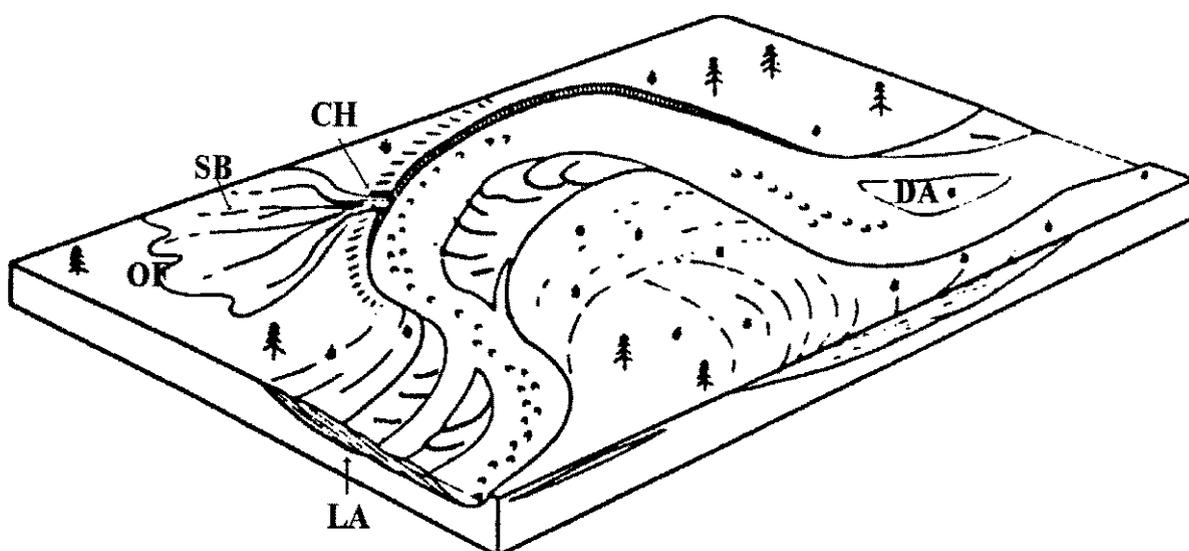


Figura 2-3: Modelo de estilo fluvial para os sedimentos da Unidade Açú 3 da Formação Açú (adaptado de Miall, 1985).

Estes elementos arquiteturais são limitados por superfícies definidas em Miall (1988a), com hierarquias variando de 1^a até 6^a ordens.

A superfície de 1^a ordem limita litofácies individualmente como as laminações das estratificações cruzadas e planares. Há pouca ou nenhuma erosão entre elas e a sua presença é reconhecida pelos truncamentos sem mudança litológica. A superfície de 2^a ordem limita unidades multihistóricas, é representada por exemplo, pela superfície entre areias com ondas cavalgantes (*climbing ripples*) e areias laminadas. As superfícies de 1^a e 2^a ordens indicam mudanças no regime ou direção de fluxo. As litofácies acima e abaixo

delas são diferentes mas não há hiato de tempo significativo ou outra evidência de erosão. Assim, as superfícies de 1ª e 2ª ordens estão relacionadas às laminações e estratificações em escala de testemunho, variando desde centímetro a dezenas de metros e são consideradas de pequena extensão areal. Uma superfície de 2ª ordem também pode ser observada em lâmina petrográfica.

Uma superfície de 3ª ordem é a superfície entre o siltito homogêneo e o arenito homogêneo originados por depósitos de acreção lateral (LA). As superfícies de 3ª ordem delimitam fases acrescenciais e indicam também as mudanças na direção da acreção. São as superfícies de baixo ângulo que ocorrem no interior das macroformas de Jackson (1975).

Uma superfície de 4ª ordem é o limite superior da macroforma de Jackson (1975), geralmente de forma plana ou convexa para cima. Por exemplo, o topo convexo de uma barra longitudinal, formada por acreção frontal, é uma superfície de 4ª ordem. As barras compostas por diversas barras em pontal tem cada unidade separada por superfícies de 4ª ordem.

Uma superfície de 5ª ordem é a que define os canais maiores com dimensões desde 10 a 1000m de largura. Sobre estas superfícies, encontram-se os depósitos de preenchimento de canais, cuja forma geométrica resultante é um grande U achatado, geralmente com topo plano ou levemente côncavo para cima. São marcadas no relevo basal por feições de corte e preenchimento e por conglomerados basais. Os depósitos de acreção lateral e longitudinal estão sobre estas superfícies e são capeados por superfícies de 4ª ordem. As superfícies de 5ª ordem são difíceis de distinguir das superfícies de 3ª e 6ª ordens nos pequenos afloramentos e testemunhos. São difíceis de correlacionar em poços, exceto nos campos mais desenvolvidos, sendo mapeáveis também através da sísmica tridimensional. (Figuras 2-4a e 2-4b).

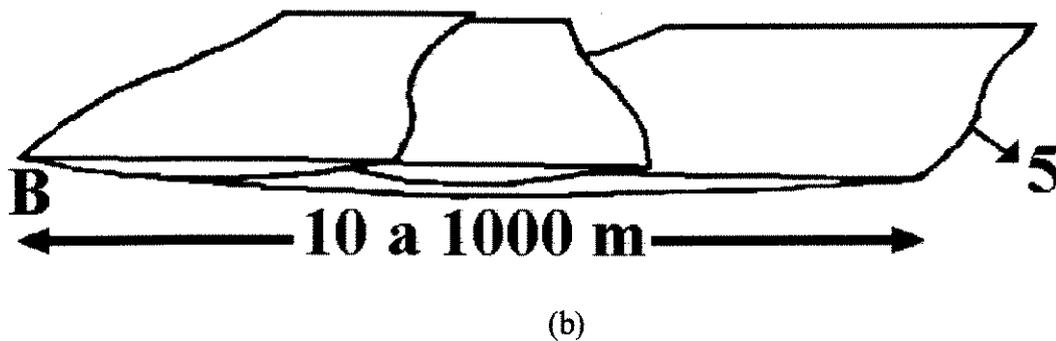
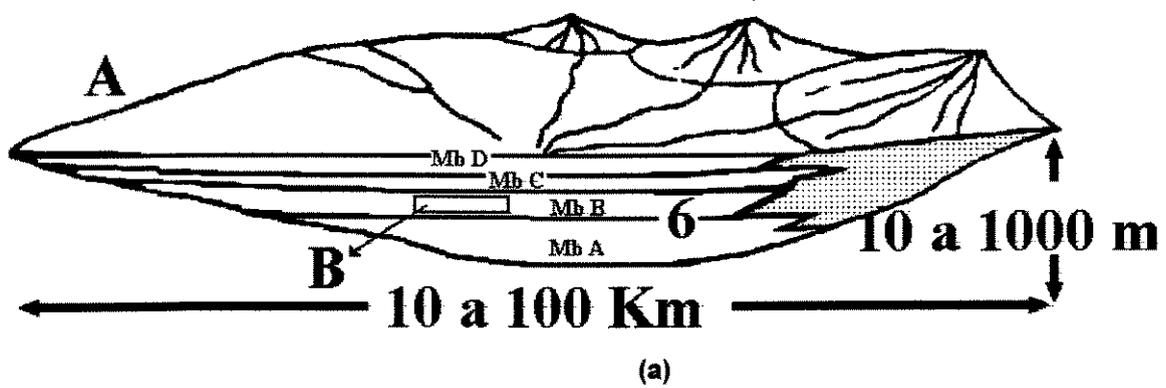


Figura 2-4: (a) 6: superfície de 6ª ordem separando membros estratigráficos (Mb) em escala de bacia. (b) 5: superfície de 5ª ordem em forma de U achatado separando os canais maiores (adaptado de Miall, 1988).

Uma superfície de 6ª ordem separa membros estratigráficos numa seqüência fluvial. Podem ser rastreadas através de dezenas de quilômetros. Elas definem os cinturões de canais fluviais (Figura 2-4a).

2.2. *Heterogeneidades e geometrias de reservatórios fluviais*

As heterogeneidades de reservatórios são controladas em grande parte pelo processo sedimentológico, e posteriormente, pelos processos diagenéticos e tectônicos que se sucedem, estando relacionadas também com a escala de observação. Haldorsen e Lake (1984) analisam as propriedades internas de reservatórios que envolvem a continuidade de folhelhos, a porosidade e permeabilidade, definindo quatro escalas de

heterogeneidades:

- (1) escala microscópica: a escala individual de poros e gargantas (μm);
- (2) escala macroscópica: a escala de amostras da petrofísica (cm);
- (3) escala megascópica: a escala de blocos numa malha para a simulação de fluxo (200 a 400 m);
- (4) escala gigascópica: a escala de todo o reservatório ou formação ($>10^3$ m).

O que torna um reservatório heterogêneo na escala megascópica é a distribuição espacial dos corpos reservatórios, das camadas selantes e a presença de falhas. Na escala macroscópica, as heterogeneidades do reservatório são atribuídas às propriedades da rocha como porosidade e permeabilidade, ambas variam segundo os eixos x , y e z . Isto torna um reservatório heterogêneo em várias escalas. As heterogeneidades estão relacionadas ao sistema deposicional do reservatório e são decorrentes da sua arquitetura. Portanto, a modelagem da arquitetura dos reservatórios está relacionada aos processos sedimentares que os originaram.

Weber (1986) também classifica as heterogeneidades dos reservatórios segundo quatro escalas de magnitude (Figura 2-5).

(1) Heterogeneidades do Tipo a: determinam a conectividade e a continuidade dos reservatórios, que são os fatores responsáveis pela quantidade de hidrocarbonetos drenados. É a escala de campo que define os projetos de exploração. Sua ordem de grandeza é de 1 a 10 km.

(2) Heterogeneidades do Tipo b: são os limites entre as unidades genéticas, que tem efeito significativo no fator de recuperação de hidrocarbonetos. São os corpos estocásticos de folhelhos entre canais fluviais. É a escala de reservatório, sua ordem de grandeza vai de 10 a 100 m.

(3) Heterogeneidades do Tipo c: são devidas às variações na granulometria dos sedimentos, como as marcas de onda no topo de uma sucessão de estratos que irá causar variações na permeabilidade vertical (K_v). Esta é a escala de testemunhos, da ordem de 1 a 10m.

(4) Heterogeneidades do Tipo d: são mais importantes na fase de exploração avançada. Nesta etapa, são pesquisados os efeitos da pressão capilar no fator de recuperação de hidrocarbonetos, ou a sua quantidade de óleo residual atrás na zona varrida pela injeção de água. É a escala da lâmina petrográfica, com dimensões de 1 a 10mm.

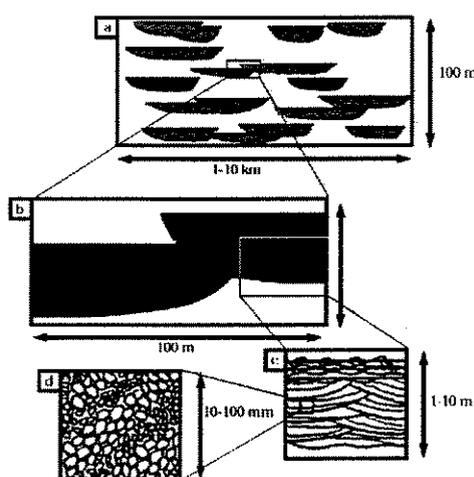


Figura 2-5: As quatro escalas de magnitude das heterogeneidades em depósitos fluviais na classificação de Weber (1986).

Na exploração e na produção de petróleo, os dados disponíveis são mais numerosos na direção vertical do que na direção horizontal. Então, as informações referentes à variabilidade horizontal das heterogeneidades dos tipos *a*, *b* e *c*, podem ser obtidas em afloramentos análogos, enquanto que as do tipo *d* provêm dos poços perfurados.

Weber e Van Geuns (1990), com o objetivo de fornecer modelos para a simulação de fluxo, classificam os reservatórios fluviais segundo a complexidade e

geometria de larga escala, nos três tipos básicos descritos a seguir (Figura 2-6):

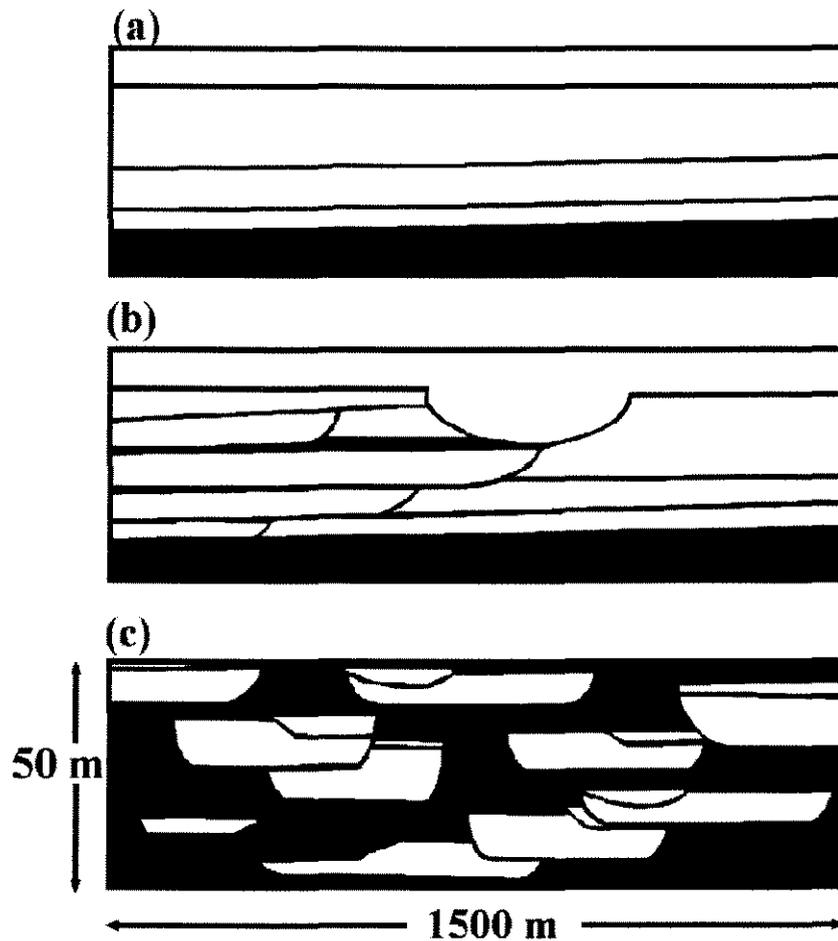


Figura 2-6: Classificação de reservatórios segundo a geometria. (a) reservatórios tipo *layer-cake* (estratificado), (b) reservatório tipo *jigsaw-puzzle* (enigma) e (c) reservatório tipo labirinto (Weber e Van Geuns, 1990).

(1) reservatórios tipo *layercake* (estratificados): consistem em pacotes de extensos arenitos tabulares, cujas propriedades petrofísicas não mostram discontinuidades. As variações na espessura são graduais e os limites dos corpos coincidem com as mudanças nestas propriedades,

(2) reservatórios tipo *jigsaw puzzle* (enigma): são compostos por vários corpos arenosos que se ajustam entre si sem maiores discontinuidades entre as unidades. Um ocasional corpo de baixa permeabilidade pode estar imerso no reservatório, ou entre certos reservatórios superpostos. Internamente em cada unidade podem ocorrer variações abruptas nas propriedades das rochas, ou entre as unidades arenosas. São

necessários diagramas de cerca para a obtenção de uma boa definição tridimensional,

(3) reservatórios tipo labirinto: são complexos arranjos de corpos arenosos. O reservatório não é estritamente descontínuo como pode parecer através da observação de seções geológicas. Existe a comunicação em três dimensões, e a correlação detalhada só é possível quando o espaçamento entre os poços é pequeno. A continuidade dos reservatórios geralmente é dependente da direção. Os modelos precisos do reservatório em três dimensões raramente são possíveis. É recomendada a abordagem probabilística para a modelagem de arquitetura desta natureza e das suas propriedades petrofísicas.

Nesta dissertação, a proposta de modelagem da arquitetura de reservatórios enquadra-se: na escala megascópica de Haldorsen e Lake (1984), nas heterogeneidades do tipo *b* de Weber (1986), e em reservatórios do tipo Labirinto de Weber e Van Geuns (1990). A fotografia da Figura 2-7 ilustra a aparência destes reservatórios em afloramentos, onde se observa um canal que erodiu depósitos arenosos anteriores. Há um filme de argila depositado sobre a superfície de 5ª ordem.

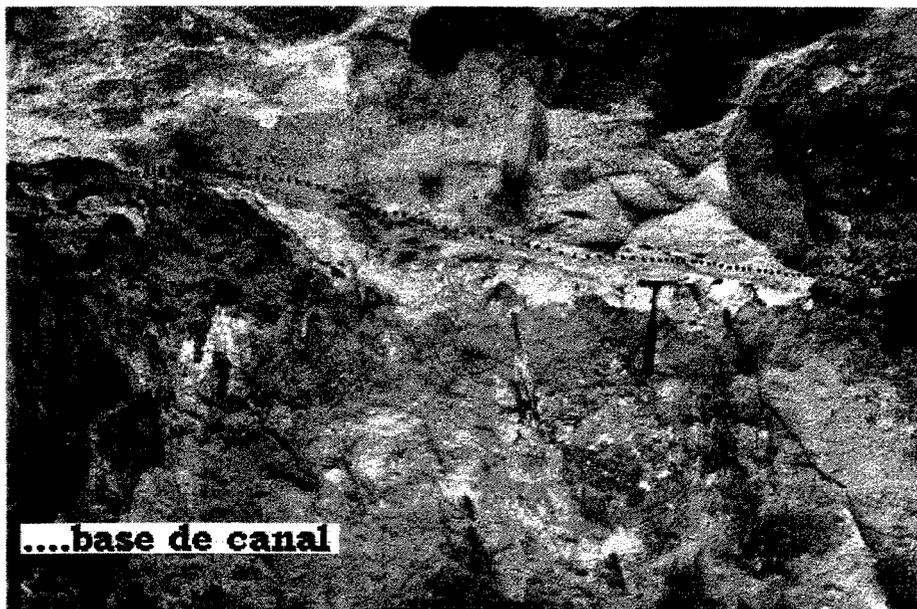


Figura 2-7: Reservatórios fluviais em afloramentos. A linha pontilhada representa uma superfície de 5ª ordem delimitando dois corpos arenosos formados por depósitos de preenchimento de canal. Membro Siderópolis da Formação Rio Bonito na Bacia do Paraná (estrada Ituporanga, Vidal Ramos-SC, martelo para escala).

A determinação acurada da geometria e dimensões do reservatório são essenciais para o desenvolvimento de um campo de petróleo. Estes fatores são importantes na estimativa do volume de hidrocarbonetos, na avaliação do significado econômico de um determinado prospecto e no planejamento de um programa de estimulação da produção. Estas informações são importantes desde o estágio exploratório até os estágios mais avançados da exploração. Em reservatórios fluviais, qualquer subdivisão que possa ser rastreada por poucos quilômetros, certamente é produto de agentes alocíclicos como mudanças no nível do mar, na tectônica, etc. Estes fatores causam heterogeneidades na escala gigascópica e são limitadas por superfícies de 6ª ordem.

Nos reservatórios fluviais, as heterogeneidades na escala megascópica são as mais difíceis de serem caracterizadas, porque os elementos arquiteturais e as superfícies limitantes estendem-se lateralmente por dezenas ou centenas de metros, ou seja, são menores do que o espaçamento de poços usual. Adicionalmente, estas feições não têm formas simples, tipo tabular ou prismática; tornando a correlação, predição e sua modelagem muito difícil.

Os depósitos de preenchimento de canal, normalmente constituem os melhores reservatórios num sistema fluvial. São classificados por Friend (1983) segundo a razão entre a largura w e a espessura h , em três geometrias:

(1) canais fixos ou estáveis: $w/h < 15$, originam os cordões arenosos;

(2) canais móveis: $15 < w/h < 100$, predomina o processo de migração lateral. Os depósitos típicos são dos elementos arquiteturais DA, LA e SB num único canal;

(3) Lençóis arenosos: $w/h > 100$, os depósitos são desenvolvidos por migração lateral do canal e alternância para rios de múltiplos canais, por fluxo efêmero não canalizado nas planícies, e por longa e continuada acresção lateral em canais sinuosos. São os depósitos fluviais mais comuns e com muitos quilômetros de largura. Sua geometria é complexa, porque inclui também os canais menores (*chute channels*), macroformas de LA e DA e lentes de lamitos localizadas formadas durante estágios de baixa atividade deposicional.

Portanto não se pode assumir que tenham propriedades de reservatório homogêneo.

Cada mecanismo destes acima é provavelmente produtor de lençóis arenosos de maior ou menor amplitude, embora muitos sedimentologistas assumam que a deposição em rios de múltiplos canais seja o modo principal de origem devido às grandes razões w/h comumente observadas.

Lorenz *et al.* (1985) propõem a determinação das dimensões de reservatórios fluviais, a partir da componente vertical que representa a profundidade do paleocanal nos poços. Os critérios de interpretação faciológica destas espessuras e o seu significado geológico está ilustrado na Figura 2-8.

Os sedimentos estudados por Lorenz *et al.* (1985), foram depositados em sistema fluvial meandrante. A profundidade dos paleocanais é reconhecida nos poços, a partir da espessura h , das sucessões de granodecrescência ascendente em 1250 m de testemunhos. Segundo os autores as sucessões representam aproximadamente as profundidades dos canais e tiveram sua espessura original restaurada pelo fator de descompactação de 10%. As espessuras foram convertidas para larguras de canais w conforme a seguinte relação estabelecida por Leeder (1973):

$$w = 6,8h^{1,54} \quad (2 - 1)$$

onde, w é largura do canal em metros e h é a espessura da sucessão de granodecrescência ascendente medida no testemunho e descompactada (Figura 2-9).

Há uma ressalva em Bridge e Mackey (1993), sobre sucessões fluviais representarem profundidades de canais. Num estudo sobre dimensões de corpos arenosos fluviais, citam que nem sempre isso é verdadeiro, porque no ponto de máxima curvatura do canal, a profundidade é cerca de três vezes maior que a profundidade média, e que a espessura h dos sedimentos neste ponto é 10% menor do que a profundidade.

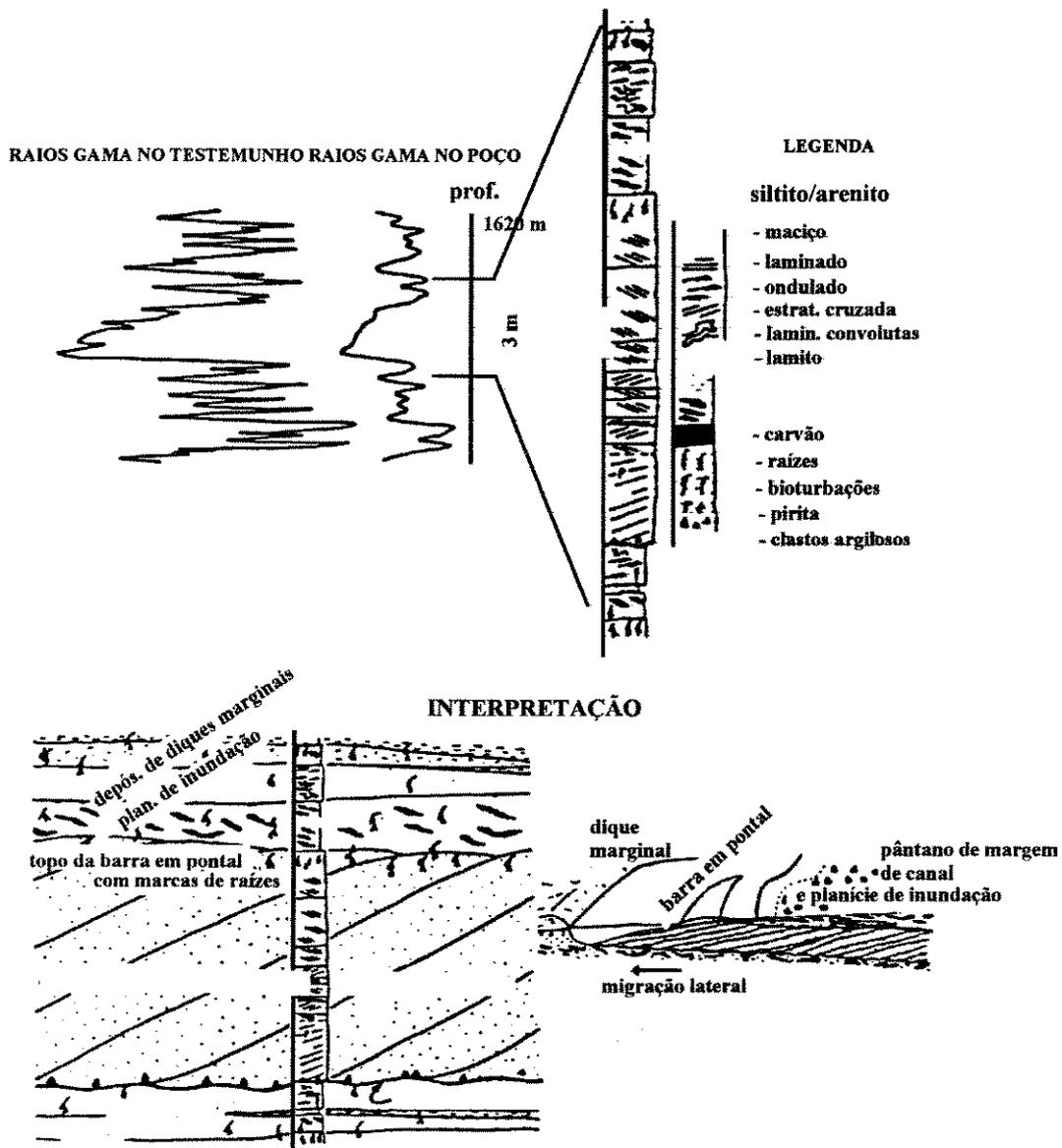


Figura 2-8 Critérios para interpretação faciológica de ambiente fluvial através de testemunhos e perfis elétricos (adaptado de Lorenz *et al.* 1985).

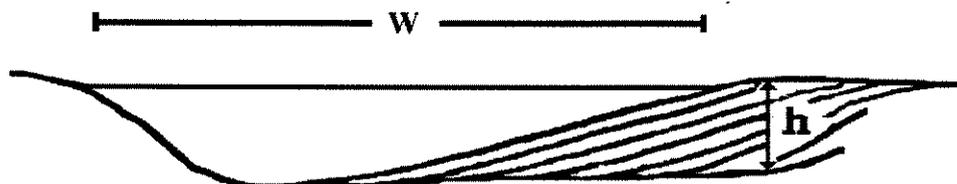


Figura 2-9: Largura do canal (w) e espessura dos depósitos de preenchimento de canal (h) (Lorenz *et al.* (1985).

A partir da largura do canal w , Lorenz *et al.* (1985) estimam a largura do cinturão meandrante Wm , através da relação média entre as equações de Leopold e Wolman (1960) e de Carlston (1965) (Figura 2-10).

$$Wm = 7,44w^{1,01} \quad (2-2)$$

onde, Wm é a largura do cinturão meandrante e w é a largura do canal, ambos em pés.

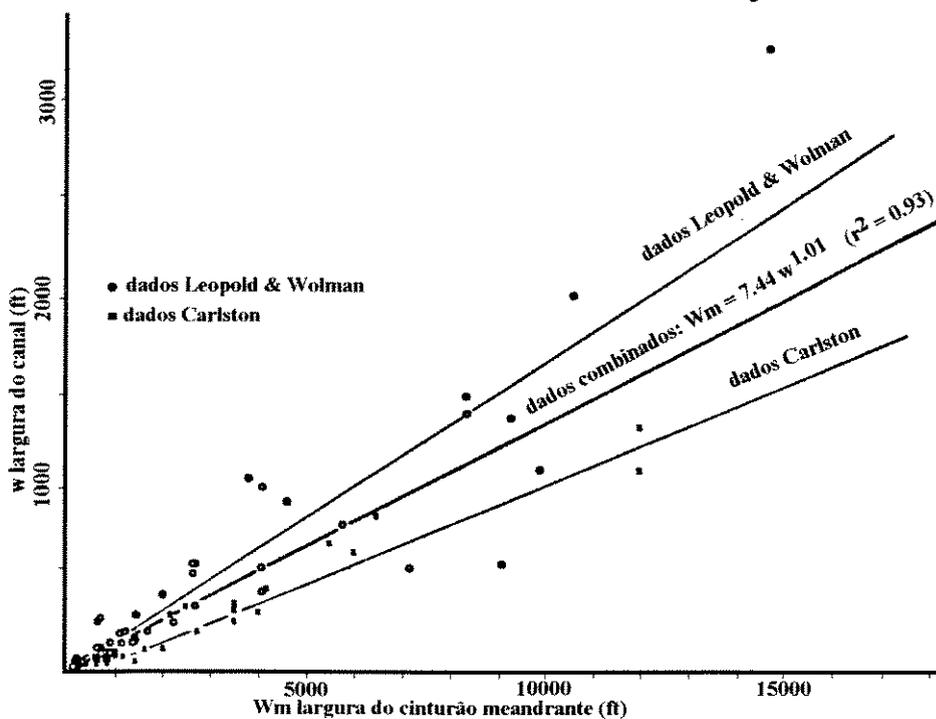


Figura 2-10: Correlação entre larguras do canal fluvial e do cinturão meandrante (Lorenz *et al.*, 1985).

Um cinturão meandrante é formado por todos os depósitos de acreção (DA ou LA) de um canal, através da sua migração lateral na planície de inundação. É aceito como aproximação da largura do reservatório (Figura 2-11).

Como resultado, Lorenz *et al.* (1985) obtiveram larguras de canais variando de

45 a 67 m e larguras de reservatórios W_m entre 350 e 520 m. Visando a validação da técnica e comparação de resultados, os autores usaram outros métodos de estimativas das dimensões de reservatórios fluviais. Fizeram observações em afloramentos análogos a partir de fotografias aéreas e obtiveram W_m médio de 316 m. Através de medições diretas nos afloramentos análogos numa área próxima dos poços obtiveram w entre 55 e 82 m e valores de W_m entre 430 e 650 m. A partir das relações de probabilidade de dois poços atravessarem o mesmo corpo arenoso, sendo conhecidas as distâncias entre os três poços do projeto puderam estimar W_m prováveis de 126 m, 205 m e 427 m.

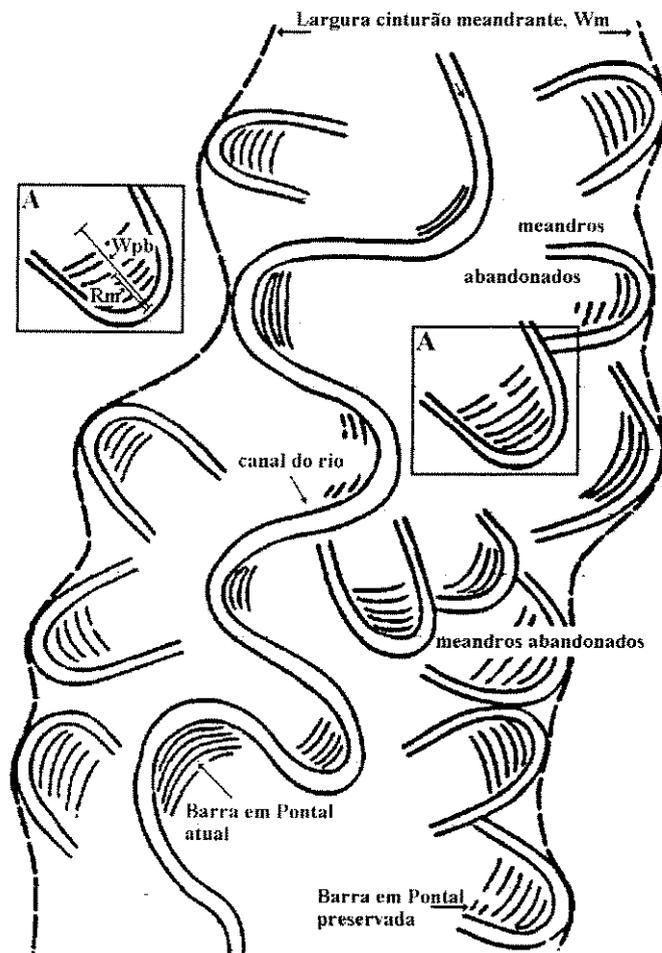


Figura 2-11: Vista em planta da planície de inundação de rio meandrante. No detalhe: raio de curvatura do meandro (R_m) e comprimento da barra em pontal (W_{pb}) (adaptado de Schenk, 1992).

Com estes resultados, Lorenz *et al.* (1985) concluem por W_m médios da ordem de 450 m na área do seu projeto. Ao comentarem os resultados do trabalho, enfatizam que, quando se referem às larguras, estão se referindo à dimensão aproximadamente

ortogonal à direção do canal, uma vez que ao longo dele o comprimento do reservatório é considerado infinito, e que as larguras médias calculadas por estes métodos são aproximações devido a natureza inexata das medições das profundidades originais dos canais, e pela erosão que sofrem os depósitos precedentes pelos depósitos que os sucedem, o que pode levar a erros consideráveis.

Allen (1984) relacionou a largura de um canal com o raio de curvatura do seu meandro Rm em unidades métricas da seguinte maneira:

$$Rm = 3,25w \quad (2 - 3)$$

Schenk (1992) estudou 76 depósitos de barras em pontal em cinturões meandrantos modernos dos rios Mississipi, Red e Tallahatchie (EUA), onde obteve a seguinte relação entre o comprimento da barra em pontal W_{pb} e o raio de curvatura do meandro em unidades métricas,

$$W_{pb} = 1,8Rm \quad (2 - 4)$$

onde, W_{pb} é o comprimento da barra em pontal e Rm é o raio de curvatura do meandro.

Schenk (1992) aplicou a Equação 2-4 em 6 reservatórios antigos, contendo sucessões de granodecrescência ascendente, visando estimar o W_{pb} . Suas predições concordaram com dois casos medidos, foram muito grandes em dois casos, e muito pequenas nos outros dois. Segundo o autor, a razão discrepância se devem a dificuldade de separar as sucessões de barras em pontal em subsuperfície. E afirma que, a maior fonte de erros nas relações entre profundidades e larguras de canais está nas medidas da espessura dos depósitos de preenchedimento de canais e na descompactação.

A seguir são citadas algumas dimensões de w , W_{pb} e Rm obtidas na literatura. O Wm do Rio Brahmaputra atinge até 14 km de largura, o seu canal ativo w tem até 3 km de largura e o processo dominante de sedimentação é por acresção lateral (Coleman, 1969; Bristow 1987). Os depósitos permianos de alta sinuosidade na África do Sul tem W_{pb} preservado de pelo menos 6 km de comprimento (Smith, 1987). Os rios Amazonas

e Juruá (bacia amazônica) tem Wm que atingem 50 km e 20 km de largura respectivamente (Baker, 1978).

2.3. Modelo booleano de simulação estocástica

Segundo Lantuéjoul (1995), o modelo booleano:

expressa a idéia intuitiva de união de objetos independentes localizados aleatoriamente [...] tem sido redescoberto por vários autores. Mas a maioria de suas propriedades foi estabelecida por Matheron (1967, 1975). [...] não há interação entre os objetos mas pode haver sobreposição deles. (p.51)

O modelo booleano tem sido principalmente uma ferramenta da morfologia matemática utilizada no tratamento das matrizes que representam as imagens da natureza ou da tecnologia.

O modelo booleano orientado a objetos, na terminologia matemática da área de geometria estocástica, pertence à classe dos *Point Process* definido mais precisamente como *Random Closed Set (RACS)*.

Um *RACS* é definido como: $X = (\mathcal{F}, \sigma_{\mathcal{F}}, P)$. Cada conjunto X representa uma região mensurável $(\mathcal{F}, \sigma_{\mathcal{F}})$ do espaço com a probabilidade P de ocorrência. Um espaço de eventos $\sigma_{\mathcal{F}}$ chamado de σ -álgebra) é um sub-espaço do espaço amostral Ω , que permite operações de união, intersecção e complementação de eventos. Uma σ -álgebra em Ω é um $\mathcal{B}(\Omega)$ ou *Borel Set* (Stoyan, *et al.*, 1987; Chessa, 1995).

Em \mathcal{R}^2 o método booleano pertence à classe dos *Poisson Grain Models*, para descrever, por exemplo, a distribuição de uma família \mathbb{F} de n pontos aleatórios e independentes no plano, em que sobre cada ponto n é sobreposto um disco $B(\mathbb{F})$ de raio fixo r para formar um grão. A união dos $B(\mathbb{F})$ definida por $\Xi \equiv \cup_n (\Xi_n + x_n)$ é um modelo booleano dos $B(\mathbb{F})$ transladados por $+x_n$. Para Stoyan *et al.* (1987) cada ponto n é um

germe e cada disco é um grão (Figura 2-12).

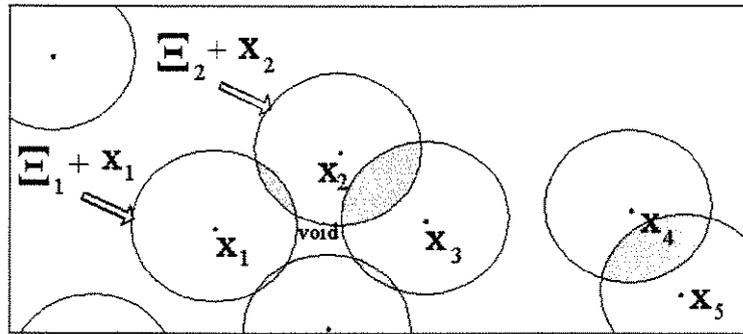


Figura 2-12: Modelo booleano planar $\Xi \equiv \cup_n (\Xi_n + x_n)$. Cada disco $B(F)$ limita um aglomerado de n pontos formando um grão. O centro dos discos são os germes dos grãos e o espaço vazio entre eles é um *void*. O sinal + indica uma translação (Stoyan, 1987).

Em se tratando da modelagem de geometrias estocásticas, há outra distinção à ser feita, um elemento $x = (x_1, x_2, \dots, x_d) \in \mathcal{R}^d$ (Espaço Euclidiano) é conhecido em geometria como um *ponto*, no entanto a geometria estocástica refere-se à coleções aleatórias de pontos, sendo por isso, que tais processos são denominados de *point processes* (Stoyan *et al.*, 1987).

Os modelos booleanos de geometria estocástica são processos probabilísticos para a distribuição de RACS no espaço, segundo a lei de probabilidade da distribuição de Poisson. Uma distribuição é dita Poissoniana, quando o número de unidades de interesse em um dado volume é distribuído de maneira aleatória e independente. São distribuições com média e variância iguais ao parâmetro λ . Este parâmetro representa o número médio de objetos no volume considerado, e por isso é chamado também de *intensidade* do processo. A *intensidade*, no modelo booleano, é a probabilidade de ocorrência de um objeto num determinado volume.

Existem várias maneiras de caracterizar um Processo de Poisson (Ξ). A mais conhecida é através do Teorema de Renyi para um processo homogêneo em que: considerando uma família finita de pontos formada por conjuntos disjuntos (*Borel sets*) de um *point process* Ξ , a probabilidade do número de pontos n em cada *Borel set*

obedecer a distribuição de Poisson é dada por:

$$P(\Xi) = n = \frac{e^{-\lambda} \lambda^n}{n!} \quad (2 - 5)$$

onde $0 \leq \lambda < \infty$ é a média e variância do número de pontos n de Ξ .

Os modelos booleanos de aplicação mais promissora às geociências, são os modelos de objetos discretos e os modelos de intensidade regionalizada. Nos modelos discretos é adotada uma forma geométrica específica, passível de ser parametrizada, e cada locação no espaço só pode ser ocupada por um tipo de objeto, fácies, etc. Nos modelos de intensidade regionalizada, a distribuição dos objetos não é mais aleatória e independente e a média e variância não são mais estacionárias (ex: Processo de *Cox*).

Tradicionalmente, a principal dificuldade dos modelos booleanos de simulação estocástica tem sido o condicionamento aos dados de poços, e portanto, estes modelos seriam mais indicados para aplicações no estágio exploratório de um campo de petróleo, porque nesta fase não existem muitos poços a serem honrados, conferindo-lhes bastante liberdade.

2.4. Modelos orientados a objetos para a representação da arquitetura de reservatórios

Os modelos matemáticos em \mathcal{R}^d , que combinam objetos de forma definida (grãos), referenciados à uma locação no espaço (germe), com características geométricas de dimensões e orientação, que obedecem a distribuições amostrais de parâmetros são denominados de modelos orientados a objetos, com aplicação cada vez maior na simulação estocástica da distribuição espacial de reservatórios petrolíferos.

O objetivo destes modelos é obter representações realistas da arquitetura de reservatórios, ainda que probabilísticas. Tais modelos permitem incorporar o

conhecimento geológico, através de regras empíricas que definem os objetos. Segundo Freulon e Dunderdale (1994), um modelo orientado a objetos, definido para um determinado local, não pode ser usado em outro. Nestes casos, só a filosofia do método pode ser transportada.

Nos casos em que a *intensidade* λ do processo é regionalizada, torna-se necessário incorporar interferências espaciais, através de funções de atração ou repulsão entre os objetos, segundo a sua natureza ou manter distâncias mínimas entre os seus centróides. Uma curva de proporção de fácies representativa pode desempenhar esta função.

Um modelo geoestatístico de caracterização de reservatórios, deve ter suas propriedades estatísticas definidas espacialmente, porém, as informações relevantes nem sempre são disponíveis em quantidade suficiente, tornando-o intrinsecamente probabilístico. Se um modelo de reservatório tem componentes de caráter probabilístico, então a simulação estocástica deve ser utilizada para quantificar incertezas. Assim, pode-se dizer que, cada simulação desta natureza é uma realização da função randômica que descreve o reservatório, com distribuição espacial pré-especificada.

A seguir são apresentadas as técnicas de simulação estocástica de geometrias de reservatórios, que enquadram-se na classe dos modelos orientados a objetos.

2.4.1. Modelagem geométrica

Na modelagem geométrica orientada a objetos geológicos é enfatizado o ponto de vista moderno, de dar destaque às relações estruturais entre os elementos topológicos que compõem os objetos, a partir da definição de parâmetros geológicos. Este aspecto conceitual é muito importante, porque esses parâmetros são definidos de modo a permitir que componentes tipicamente geoestatísticos possam ser incorporados ao modelo geométrico. A integração desta técnica de modelagem geométrica com a visualização científica habilita a criação de algoritmos eficientes, para que sejam criados cenários, a partir de parâmetros deduzidos por amostragem (Lanzarini *et al.* 1996).

Em geometria, algumas superfícies podem ser definidas através de fórmulas *paramétricas* e *implícitas*. A formulação paramétrica resolve o problema da geração e visualização da superfície, enquanto que a representação implícita permite o cálculo da interioridade (que será visto mais adiante). As superfícies que possuem simultaneamente essas duas formulações podem ser utilizadas na criação de algoritmos eficientes de modelagem geológica orientada a objetos (Lanzarini *et al.* 1996b).

As superfícies paramétricas 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 e $x(u,v)$, $y(u,v)$ e $z(u,v)$ são funções matemáticas que definem as coordenadas u e v no plano.

As superfícies implícitas são definidas por uma função matemática do tipo $F(x,y,z) = 0$, onde $(x, y, z) \in D$, sendo D um domínio qualquer não necessariamente planar.

Uma superfície desta natureza pode ser representada graficamente, ter suas propriedades como área e volume calculadas ou identificar se um dado ponto no espaço é interior a ela ou não.

Considerando a superfície geométrica elipse, a sua representação paramétrica é dada por:

$$x - x_0 = a \cos \theta$$

$$y - y_0 = b \sin \theta \quad (2 - 6)$$

sendo, $0 \leq \theta \leq 2\pi$. Isto significa que, ao variar o parâmetro θ , o ponto $A(x, y)$ desloca-se ao longo da curva fechada que define a elipse. A sua representação implícita é dada por:

$$\frac{(x - x_0)^2}{a^2} + \frac{(y - y_0)^2}{b^2} = 1 \quad (2 - 7)$$

Um ponto $A(x, y)$, que tenha suas coordenadas substituídas na Equação (2-7), ao

resultar um valor ≤ 1 estará dentro da elipse. Se o resultado for > 1 , o ponto estará fora da mesma. Esta operação é denominada de cálculo de interioridade (Lanzarini *et al.*, 1996).

2.4.2. Aplicações dos modelos orientados a objetos na caracterização de reservatórios

A adaptação dos métodos booleanos de geometria estocástica para modelos orientados a objetos na caracterização de reservatórios, procurou retirar de cada método as características peculiares mais adequadas ao estudo de caso. Assim, surgiram modelos mistos, porém particularmente válidos, em função da quantidade de informações disponíveis e do estágio de desenvolvimento do campo de petróleo aos quais são aplicados.

Neste sentido o trabalho mais conhecido é de Haldorsen (1983), que utilizou a simulação booleana condicional em duas dimensões para modelar folhelhos, honrando os dados de poços. Nesta modelagem, os folhelhos estão imersos num volume de reservatórios comunicados e com propriedades homogêneas. Considerado um trabalho precursor, é citado por todos os autores que o sucederam nesta linha de pesquisa. Seu propósito era investigar o comportamento de fluxo de fluidos no meio poroso. Definiu claramente que a simulação numérica de fluxo é função da caracterização do reservatório. Abordou a caracterização de reservatórios visando obter uma descrição realista na fase em que poucas informações são disponíveis. Também pesquisou o problema da transferência de escala das propriedades das rochas para entrada de dados no simulador numérico de fluxo.

Haldorsen e MacDonald (1987) aplicaram esta técnica na geração de representações idealizadas da arquitetura de reservatórios fluviais em dados sintéticos. Estudaram em duas e três dimensões, sob determinados espaçamentos de poços e proporções de clásticos, a acessibilidade aos corpos arenosos, a conectividade do reservatório entre poços, fração de arenitos sob varredura da injeção de água e modelagens de falhas, fraturas e aquíferos.

Para Haldorsen (1983) e Chessa (1995) a representação de um reservatório através de modelo orientado a objetos é feita em dois estágios. No primeiro estágio, é feita a simulação dos objetos geológicos amostrados. No segundo estágio, simula-se os objetos geológicos na área entre os poços.

Os trabalhos mais importantes já publicados sobre o uso prático desta abordagem em escala de campo para simulações de fluxo e planejamento do desenvolvimento são em campos petrolíferos do Mar do Norte, principalmente o campo Snorre Field por Nybraten *et al.* (1990). Num estudo do campo de Brent Field por Keijzer e Kortekaas (1990) há a citação de que o modelo estocástico orientado a objetos foi o que forneceu o melhor ajuste do histórico de produção, por ter uma distribuição de folhelhos mais realista.

Hatløy (1994) apresenta um completo estudo de caso de simulação estocástica orientada a objetos, usada com sucesso para modelar fácies de ambiente fluvial. A seqüência fluvial foi modelada usando uma combinação de relações paramétricas empíricas, distribuições de probabilidades e regras geo(lógicas) da seguinte maneira:

- (1) construção do arcabouço estrutural do reservatório,
- (2) modelagem da arquitetura e distribuição das fácies,
- (3) descrição das propriedades petrofísicas das fácies,
- (4) homogeneização e transferência de escala das propriedades internas para uma malha adequada aos simuladores numéricos de fluxo.

Hatløy (1994) modelou um volume compartimentado por falhas com 4 km x 5 km x 240 m, formado por depósitos de preenchimento de canais fluviais de moderada sinuosidade e por depósitos de transbordamento de canais (*crevasse splay*) em matriz de siltitos, lamitos, folhelhos e carvão. Os canais foram modelados com a seção transversal em forma de trapézio. O comprimento é considerado infinito, isto é, nenhum dos canais termina dentro do volume modelado. A largura do cinturão meandrante foi estimada por correlação com a profundidade e largura do canal. Para calibração dos parâmetros foram

usadas relações da literatura e testes de produção do próprio campo. As orientações dos canais são obtidas de uma distribuição uniforme entre noroeste e nordeste.

A parametrização do seu modelo fluvial foi utilizada para desenvolver o “SESIMIRA *concept*”, que é um programa aplicável em diferentes tipos de reservatórios, com o objetivo de quantificar as incertezas na arquitetura das fácies, servindo como base para modelos detalhados de parâmetros petrofísicos, além de checar qualitativamente as interpretações sedimentológicas.

2.4.3. Modeladores estocásticos orientados a objetos

A escola norueguesa e as companhias petrolíferas que operam no Mar do Norte se destacam na criação de modelos geológicos de simulação estocástica orientados a objetos. O motivo disto é que, na plataforma continental da Noruega e do Reino Unido existem as maiores acumulações de óleo e gás do mundo, em reservatórios fluviais da Formação Statfjord.

A Formação Statfjord é o berço dos modelos de simulação estocástica orientados a objetos. Tem arquitetura complexa e contém os reservatórios dos campos mais importantes. No campo Brent foi originada por canais meandantes, em outros campos, por canais de baixa sinuosidade e também canais entrelaçados. Alguns corpos arenosos podem ser tratados de forma discreta mas em geral correspondem ao reservatório tipo labirinto. A Formação Garn corresponde ao reservatório tipo *jigsaw-puzzle*. Daí nasceu a necessidade da caracterização não convencional destes reservatórios petrolíferos com os trabalhos pioneiros de Haldorsen (1983) e Haldorsen e Lake (1984). Estes autores sugeriram os modelos estocásticos orientados a objetos como ferramenta de modelagem para tais reservatórios. Seguiram-se trabalhos para refinar as técnicas de estimativa da permeabilidade efetiva vertical (K_v), nos reservatórios contendo folhelhos estocásticos, de Martin e Cooper (1984), Begg e King (1985), Haldorsen e Chang (1986) e Haldorsen *et al.* (1987).

Causou grande interesse na indústria petrolífera norueguesa e do Reino Unido a possibilidade da modelagem de canais de baixa sinuosidade, sobre uma matriz de não

reservatórios, como subsídio na definição de prospectos *offshore* ou no posicionamento de plataformas com espaçamento de poços da ordem de quilômetros, ao custo de alguns milhões de dólares por poço.

A formação de consórcios entre a indústria petrolífera com entidades governamentais de gerenciamento da exploração e de pesquisa, levou ao surgimento de diversos pacotes de modelagem estocástica integrada de canais fluviais, tais como: SISABOSA, FLUREMO, SESIMIRA, MONARCH3D, SIRCH, STORM, GOCAD, SEDSIM3, MOHERES e FLUVSIM descritos em linhas gerais a seguir:

O programa SESIMIRA (SEdimentological SIMulation in IRAP). IRAP é um sistema de mapeamento desenvolvido pelo *Geomatic* (Gundesø e Egeland, 1990; Damsleth *et al.*, 1992; Hatløy, 1994), para fazer modelagens em dois estágios. No primeiro estágio, gera-se a distribuição espacial do modelo faciológico. No segundo estágio, é feita a simulação condicional das propriedades petrofísicas.

A parte estocástica do SESIMIRA pertence a classe dos modelos estocásticos discretos, cujo postulado básico é, somente um tipo de fácies (objeto) está presente numa determinada locação do reservatório. Isto implica na existência de relações lógicas entre os objetos de natureza diferente.

Ao permitir abordagens estocásticas e determinísticas, o SESIMIRA habilita o usuário gerar realizações estocásticas durante a fase exploratória do campo, e posteriormente, ir refinando o modelo ao acrescentar elementos determinísticos a medida que o desenvolvimento do campo avança. É válido salientar os conceitos de determinístico e estocástico no SESIMIRA, assim, determinísticos são os canais nos poços, e estocásticos são os canais na área interpoços, que se acreditam existir baseando-se na proporção de canais observada.

No SESIMIRA, o termo fácies significa uma unidade geométrica de reservatório como se encontra hoje, e o pesquisador também pode inserir corpos de diferentes formas, tamanhos e propriedades dentro do volume simulado.

Os resultados das simulações são conjuntos de matrizes tridimensionais representando o volume simulado. Cada cela da matriz tem um número correspondente ao código do tipo de fácies que a ocupa. Podem ser examinadas seções, planos ou representações tridimensionais, calcular o volume de reservatório conectado em função do número de poços, do raio de drenagem ou da geometria da malha de produção. Também pode ser investigada a variação do volume conectado ao poço em diferentes realizações.

O volume conectado é o somatório do volume de todas as células com reservatório em contato dentro de um determinado raio a partir do poço. O critério para comunicação horizontal é que ao menos um lado de cubos adjacentes deve ser comum. O critério para comunicação vertical é definido pelo usuário.

A transferência de escala do modelo numérico detalhado é feita calculando-se valores médios para conjuntos de células, visando gerar os contrastes de porosidade e permeabilidade perdidos ou mascarados na simulação.

O programa SISABOSA (Augedal *et al.*, 1986; Stanley *et al.*, 1990) cria o reservatório colocando paralelepípedos de arenito permeável dentro de um volume de lamitos impermeáveis, até que uma determinada proporção pré-especificada seja atingida. Ele também considera o comprimento do corpo arenoso como infinito. A espessura, largura e orientação do corpo são determinadas a partir das respectivas distribuições de probabilidades. A largura do corpo é calculada por correlação com a espessura.

Neste programa é apresentado o conceito de razão de continuidade Rc :

$$Rc = \frac{V_c}{V_s} \quad (2 - 8)$$

onde, V_c é o volume de reservatório conectado entre dois poços e V_s é o volume total de arenitos.

O programa FLUREMO (Clements *et al*, 1990) é uma evolução a partir do SISABOSA, que permite agrupar corpos individuais de canais em cinturões de canais e fazer cálculos de continuidade, indicadores do potencial do reservatório. Também faz a transferência de escala dos resultados.

O programa MONARCH 3D (Keijzer e Kortekaas, 1990) habilita ao usuário criar interativamente uma arquitetura determinística do reservatório, e preencher o restante do volume através da simulação estocástica.

O programa SIRCH (*System for Integrated Reservoir Characterization*, Hirst *et al*, 1993) foi desenhado especialmente para canais fluviais. É o modelador mais sofisticado dentre os pesquisados nesta dissertação, além da modelagem ele permite associar propriedades petrofísicas ao objeto geológico.

Cada forma geométrica tem um conjunto de atributos que define suas dimensões, posição e relações com as outras formas. Estes atributos são baseados em variáveis geológicas. Os valores são derivados das funções de distribuição apropriadas ao sistema sedimentar que está sendo modelado. As múltiplas realizações são úteis para avaliar o volume arenoso conectado por um ou mais poços.

Os aspectos que podem ser pesquisados com o SIRCH são as estimativas de: volume de reservatório total, volume de reservatório conectado a um ou mais poços e o volume de hidrocarbonetos recuperável a partir de um poço ou de todo o campo.

O objetivo do SIRCH é gerar estocasticamente uma distribuição de heterogeneidades realística e fornecer ferramentas para a caracterização geológica. É um gerador de formas, que utiliza o método orientado a objetos, onde as formas são pré-definidas, possuindo propriedades petrofísicas assinaladas. Os objetos geométricos usados para a geração do reservatório são: caixas e cunhas. As cunhas são também formadas por caixas colocadas lado a lado, que vão diminuindo de tamanho à medida que se afastam lateralmente do canal, e representam os depósitos de extravasamento.

O usuário pode adicionar objetos como desejar, de acordo com o sistema deposicional que for modelado. A dimensão de cada caixa e sua orientação necessitam ser baseadas em dados reais. Os atributos de cada forma são:

- (1) posição e orientação no espaço,
- (2) tamanhos das faces,
- (3) tipos de conexão e geometria das formas associadas,
- (4) propriedades petrofísicas (porosidade e permeabilidade) assinaladas para cada forma.

As formas dos objetos no SIRCH são hexaedros regulares, que são colados uns aos outros para criar outras formas mais complexas (Figura 2-13).

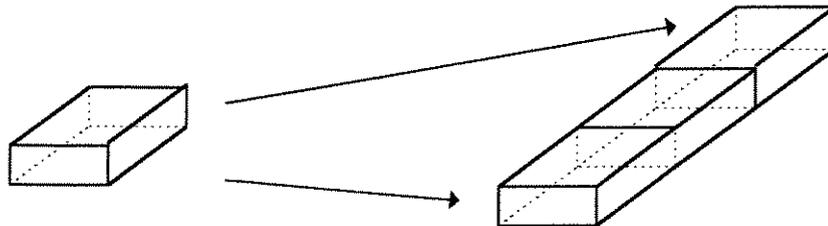


Figura 2-13: Corpos fluviais construídos como séries de hexaedros (adaptado de Hirst et al., 1993).

A parametrização dos corpos é bem detalhada. Os atributos geométricos são definidos em seção transversal e em planta, também são estabelecidas as relações em três dimensões.

Na geometria em seção transversal é especificada a espessura da unidade básica do corpo arenoso, a sua largura e a seção transversal em duas dimensões. Na geometria em planta são informadas as variações da largura e da espessura do corpo arenoso ao longo do comprimento, o comprimento do corpo unitário (o comprimento do cinturão de canais é considerado infinito), o ângulo entre os canais conectados, a frequência de bifurcações/unificações de canais por unidade de comprimento e a orientação dos corpos.

Nas relações tridimensionais são estabelecidas a razão clástica e o padrão de empilhamento dos objetos, se estocástico ou determinístico. Adicionalmente, podem ser usadas formas mais complexas para representar os depósitos de transbordamento e os diques marginais, desde que sejam especificados os seus parâmetros.

Em relação ao condicionamento aos poços há um erro aceitável de até 10% no posicionamento dos objetos. O programa também faz deslocamentos laterais até conseguir o ajuste dentro desta margem de aceitabilidade.

Quanto as espessuras dos depósitos fluviais é comentado que, a sua distribuição é obtida em poços, mas tem muitos problemas de reconhecimento, principalmente no caso de canais multihistóricos. Este problema diminui no caso de ter muitos poços disponíveis. Quando se dispõe de poucos poços, e/ou quando poucos corpos arenosos foram atravessados, pode-se usar afloramentos análogos para completar uma distribuição experimental.

Hirst *et al.* (1993) ao estudarem afloramentos fluviais encontraram a probabilidade de 0,6 a 0,8 para que um poço atravesse um canal na sua espessura máxima, então observaram que a espessura medida em poços é uma fração da espessura máxima (Figura 2-14).

Para estimar larguras de canais no SIRCH são usadas as relações empíricas entre espessura e largura da literatura. Para evitar degraus causados por amostragem nos extremos da distribuição de espessuras, é colocado um grau de correlação de 25% entre as caixas adjacentes, portanto a variação na espessura de um canal ao longo de uma seqüência de caixas não pode variar mais que $\frac{1}{4}$ da variação total da distribuição. A largura dos canais é obtida a partir da equação de correlação com a espessura, e não tem o limite de variação que tem a espessura. Qualquer amostra de largura dentro dos limites da distribuição é aceita.

A freqüência dos corpos arenosos nas sucessões é controlada por uma curva de proporção. O programa preenche o volume até a proporção especificada. O resultado da simulação é muito próximo ao valor informado. Há uma tolerância sobre este valor, que

não é citada no artigo de referência. Quanto mais poços disponíveis, maior será o controle desta proporção.

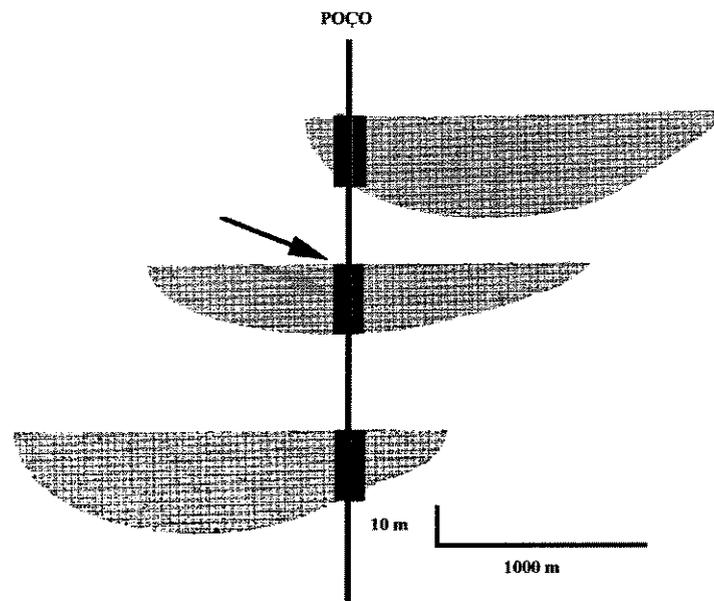


Figura 2-14: Três possibilidades para honrar o mesmo intervalo $[z_i, z_{i+h}]$ num poço. A seta mostra situação com probabilidade entre 0,6 a 0,8 de acontecer segundo Hirst *et al.* (1993) (adaptado de Hatløy, 1994).

Os depósitos de transbordamento de canais são incluídos no modelo, colocando-se cunhas dispostas lateralmente às caixas. São tipicamente depósitos delgados em espessura, que se derramam para longe do canal. (Figura 2-15).



Figura 2-15: Representação dos depósitos de extravasamento no SIRCH. Uma cunha é colocada adjacente ao canal, visto aqui esquematicamente em seção transversal (adaptado de Hirst *et al.*, 1993).

Os elementos estruturais, como falhamentos e o mergulho regional, são incorporados após a simulação, através de distorções no modelo, até ficar conforme o mapa estrutural.

O resultado das simulações no SIRCH são representações do volume de rocha formado por corpos estocásticos de arenitos construídos com base a modelos de poços e/ou afloramentos análogos. Os corpos conectados e seus agrupamentos são separados por cores e gravados em arquivos. São necessárias pelo menos 10 realizações para produzir uma distribuição de resultados.

O programa STORM™ (ODIN Reservoir Software & Services AS), é um pacote desenvolvido pelo *Norwegian Computer Center* e a *Stanford University*. Tem o objetivo de gerar representações tridimensionais equiprováveis de modelos de reservatórios adequados ao simulador numérico de fluxo de fluidos.

É um modelador de fácies com múltiplos estágios, em que cada estágio é opcional, podendo ser modelado deterministicamente ou estocasticamente. O programa inicia com a simulação do arcabouço estrutural que inclui as espessuras do zoneamento. A seguir usam-se técnicas de modelagem discreta para simular as heterogeneidades de grande escala. Isto é, são construídas as formas geométricas como: deltas, canais, barras, camadas tabulares, barreiras de folhelhos, etc. Num estágio posterior, são distribuídas as propriedades petrofísicas no interior de cada forma através das técnicas gaussianas de simulação. Após esta fase, é feita a transferência de escala dos resultados para o simulador de fluxo, onde as realizações são classificadas em função dos volumes de hidrocarbonetos e dos perfis de produção.

O STORM inclui facilidades como: saídas na forma de mapas geológicos, mapas de proporções, estatísticas básicas, variogramas, gráficos, cálculos de volumes, análise de conectividades, etc. Pode incorporar variáveis sísmicas e trabalhar com poços direcionais. Inclui também alguns módulos do GSLIB (pacote geoestatístico da *Stanford University*).

O programa GOCAD™ é um projeto de pesquisa iniciado em 1989 *pelo Computer Science Department, Nancy School of Geology*. O objetivo deste projeto é desenvolver uma nova abordagem computacional para a modelagem de objetos geológicos, voltada para as aplicações em geofísica, geologia e engenharia de reservatórios. O projeto é patrocinado por um consórcio internacional de companhias e

institutos de pesquisas.

A abordagem do GOCAD é direcionada a um novo formalismo para gerar e interpolar formas de reservatório complexas em três dimensões, combinando a integração do conhecimento através da parametrização dos objetos geológicos com a geração em grande número de possibilidades geométricas correspondentes a este conhecimento. Este método de modelagem é baseado na técnica gráfica denominada Interpolação Suave Discreta (Mallet, 1989, 1992).

Os dados de entrada para a modelagem no GOCAD incluem: perfis dos poços, estatísticas da parametrização dos corpos geológicos e *templates* geométricos representando as formas básicas a serem combinadas estocasticamente.

O programa SEDSIM3 (Tetzlaff e Harbaugh, 1989) é um software que modela através do tempo geológico o transporte e a deposição de clásticos para obter uma representação tridimensional de bacias sedimentares. Ambos, processos de longa duração tais como alterações eustáticas do nível do mar e os processos catastróficos como depósitos de tempestades, são considerados com apropriadas escalas de tempo. Isto permite criar um modelo em três dimensões que pode incorporar conceitos de estratigrafia de seqüências e elementos estocásticos, como zonas cimentadas, geralmente a flutuações do nível do mar.

No programa MOHERES (Tyler *et al.*, 1994) cada objeto canal é simulado aleatoriamente, sendo preenchido também de maneira aleatória por elementos internos como barras conglomeráticas, camadas arenosas, e lamitos, dependendo das suas probabilidades de distribuição de tamanho e posição dentro dos canais. Neste programa a forma do canal é um paralelepípedo.

Deutsch e Wang (1996) modelaram reservatórios fluviais segundo o que denominaram de uma nova abordagem. Do seu trabalho resultou o programa FLUVSIM que adota o conceito geométrico para os objetos geológicos, e o condicionamento por curva de proporção de fácies. Segundo os autores, isto eliminou as tradicionais dificuldades de condicionamento dos modelos orientados a objetos, especialmente em

áreas densamente perfuradas. O FLUVSIM incorpora também a simulação de propriedades petrofísicas através da técnica de *annealing*. No artigo é apresentado um estudo de caso com dados sintéticos de poço vertical e inclinado.

Basicamente, nesta pesquisa bibliográfica, pode-se constatar que estes programas compartilham os mesmos princípios gerais apenas variando o grau de detalhe na descrição do objeto utilizado, da sua forma geométrica e da sua discretização. Estes princípios são:

- adotar uma forma geométrica básica para representar e parametrizar o reservatório,
- através de um método de inversão amostrar aleatoriamente os parâmetros e construir realizações equiprováveis da arquitetura do reservatório e de suas propriedades internas,
- fazer a transferência de escala das propriedades de rocha simuladas,
- considerar representativa a realização equiprovável que melhor ajustar o histórico de produção do reservatório.

3. Metodologia

Através da pesquisa efetuada no capítulo anterior, é proposto o método de simulação estocástica orientado a objetos, aqui denominado de Modelagem Estocástica de Objetos Geométricos (MEOG), que incorpora a maioria dos conceitos de modelagem pesquisados.

A modelagem geométrica dos reservatórios fluviais é feita a partir da unidade genética canal (*grão*), que corresponde à litofácies CH de Miall (1988a e 1988b). Esta unidade contém outros elementos arquiteturais principalmente as litofácies DA, LA, e secundariamente SB. O substrato sobre o qual estas litofácies depositam-se tem a forma de \cup aberto em seção transversal, representando superfícies de 5ª ordem.

3.1. Modelagem estocástica de objetos geométricos

O modelo MEOG é definido como o processo:

$$\Xi \in W, \text{ e } W \subset \mathcal{K}^3,$$

para a distribuição de N objetos geométricos $\Xi_1, \Xi_2, \dots, \Xi_N \subset W$, sendo que a distribuição dos germes que definem o centro de cada objeto $\Xi_i (x_i, y_i, z_i)$ é aleatória e W é o reservatório simulado.

Neste processo os objetos são independentes entre si podendo sobrepor e erodir

parcialmente ou totalmente outros objetos. A restrição imposta é que devem ser consistentes na direção do eixo z com os dados condicionantes nos poços do domínio W . Este processo é homogêneo, com densidade p de objetos extraída da curva de proporção vertical de fácies (CPVF). As realizações são equiprováveis, cada objeto tem seus parâmetros amostrados aleatoriamente nas funções de distribuição experimental. Cada realização consiste de dois estágios: no primeiro estágio, são simulados os reservatórios atravessados pelos poços e no segundo estágio, são simulados os reservatórios localizados na área interpoços, até que a CPVF seja obedecida com um certo grau de aceitabilidade em relação à curva original. Nos dois estágios são descartados os corpos não consistentes com os poços.

3.2. Curvas de Proporções

A simulação de geometrias de reservatórios, através das litofácies, visa recompor o processo sedimentológico unindo às informações estocásticas e determinísticas do conhecimento geológico.

A utilização de mapas de razão litológica na interpretação paleoambiental é antiga e serve para representar a probabilidade de ocorrência de litologias. Uma curva de proporção também representa a razão entre os casos observados de uma determinada litologia dividido pelas ocorrências totais (Simon e Uzumaki, 1995).

Recentemente as curvas de proporções ganharam importância como fatores condicionantes na simulação estocástica de heterogeneidades e da geometria de reservatórios, através dos métodos booleanos de simulação estocástica (Matheron *et al.*, 1987).

A curva de proporção vertical de fácies representa a distribuição global das percentagens de cada litologia. É calculada linha por linha, em arquivo discretizado, a intervalos constantes de profundidade. São referenciadas a um *datum* e a um domínio definido por marcos de topo e base.

As curvas de proporções horizontais (CPH) representam a distribuição espacial de

litologias. São calculadas poço a poço e projetadas em seções de acordo com determinada direção escolhida. São úteis para identificar tendências regionais e definir compartimentações do domínio, no caso de não estacionariedade das proporções.

A pesquisa da necessidade de compartimentação ou não compartimentação da área em estudo, utilizando as curvas de proporções, foi feita adotando-se o método do *zoom*. Primeiro, foi pesquisada uma área mais ampla que envolve a área a ser simulada. Depois, foi estudada uma região menor interna à primeira. Nos dois casos os arquivos foram horizontalizados no *datum* equivalente ao topo do reservatório produtor.

Nesta etapa dos estudo as curvas de proporção tem a função de auxiliar na caracterização espacial da distribuição das litofácies. Foram feitas curvas de proporções horizontal (CPH) e vertical (CPVFH) no programa *Heresim*¹, utilizando 113 poços distribuídos numa área de 9 Km², com o objetivo de reconhecimento da área.

A transformação das informações originais de coordenadas estruturais em coordenadas estratigráficas foi feita da seguinte maneira:

$$Z_e = Z_i - Z_{topo} \quad (3 - 1)$$

onde, Z_e é a profundidade do nível estratigráfico referenciado ao *datum*, Z_i é o nível a ser referenciado e Z_{topo} é o *datum*, no caso o topo da zona modelada.

Na investigação da área maior com 113 poços foram utilizados os dados de Poletto *et al.* (1993), que realizaram um levantamento litológico através de computador baseando-se em perfis elétricos. O tratamento destes dados consistiu em agrupar as litologias em duas

¹ TM HERESIM Group

indicatrizes conforme indicado na Tabela 3-1, e com eles construir as curvas de reconhecimento através de *grid* estratigráfico (Figuras 3-1 e 3-2).

Tabela 3-1: Critérios de escolha das indicatrizes usadas na construção das curvas de proporção para reconhecimento da área. PHIN: porosidade neutrônica. PHID: porosidade do perfil densidade. GR: Indicador de argilosidade. RHOB: densidade total. Caliper: diâmetro do poço. Rugosidade: diâmetro relativo do poço entre duas profundidades a intervalos fixos de medição. UAPI: unidades API (modificado de Poletto *et al.*, 1993).

Indicatriz 1: RESERVATÓRIOS	Indicatriz 0: NÃO RESERVATÓRIOS
PHIN - PHID < 8; e 50 ≥ GR ≤ 110 UAPI = (Arenito)	PHIN - PHID ≥ 8 e GR > 50 UAPI e 2.45 < RHOB ≤ 2.5 ; ou Caliper > 12.5 Pol; ou Rugosidade > 4 Pol = (Argilito/ Siltito/Arenito argiloso)
2.45 < RHOB ≤ 2.5; e GR > 50 UAPI = Conglomerado	RHOB > 2.45 e GR ≤ 50 UAPI = Arenito cimentado

A análise das CPH's mostra pequenas variações nas proporções das fácies nas duas direções estudadas, porém não suficientemente importantes para compartimentar a área em domínios menores.

A análise da CPVFH indica que existem dois intervalos argilosos importantes separando o reservatório em três sucessões de granodecrescência ascendente, que fazem parte de um ciclo maior com a mesma tendência, conhecidos na Formação Açú. Também são visíveis os marcos de topo e base da zona. O cálculo global das proporções indica 75% de reservatórios. Caso fosse realizado o agrupamento das indicatrizes, considerando apenas a litofácies, a proporção total de arenitos seria maior, diferentemente do agrupamento mostrado na Tabela 3-1, que é baseado na qualidade da rocha como reservatório.

Bridge e Mackey (1993) mostram que os cinturões de canais com proporção de reservatórios iguais ou maiores que 75%, tem todos os canais conectados.

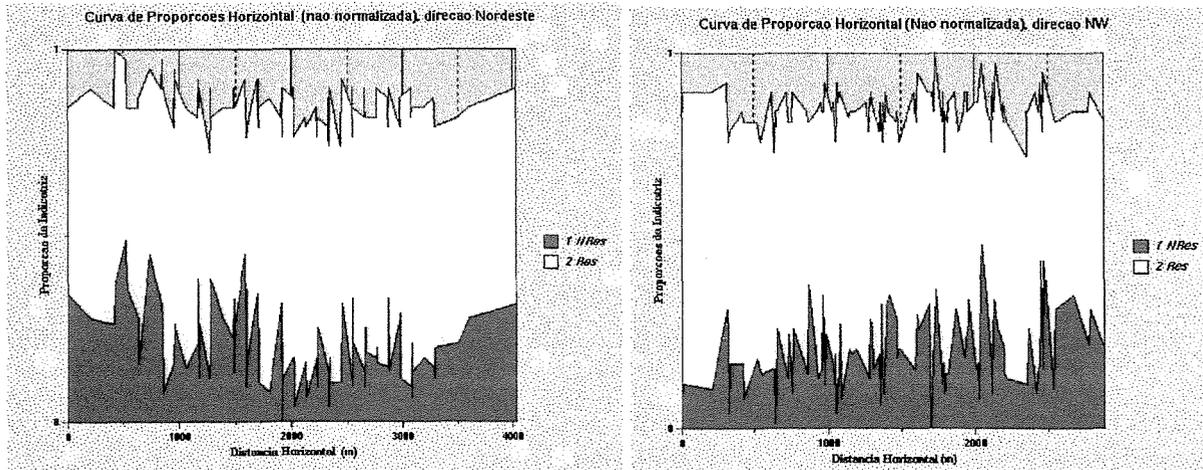


Figura 3-1: Curvas de proporções horizontais entre as litofácies reservatório e não reservatório, nas direções N45°E e N45°W, na área de reconhecimento, com 9 Km².

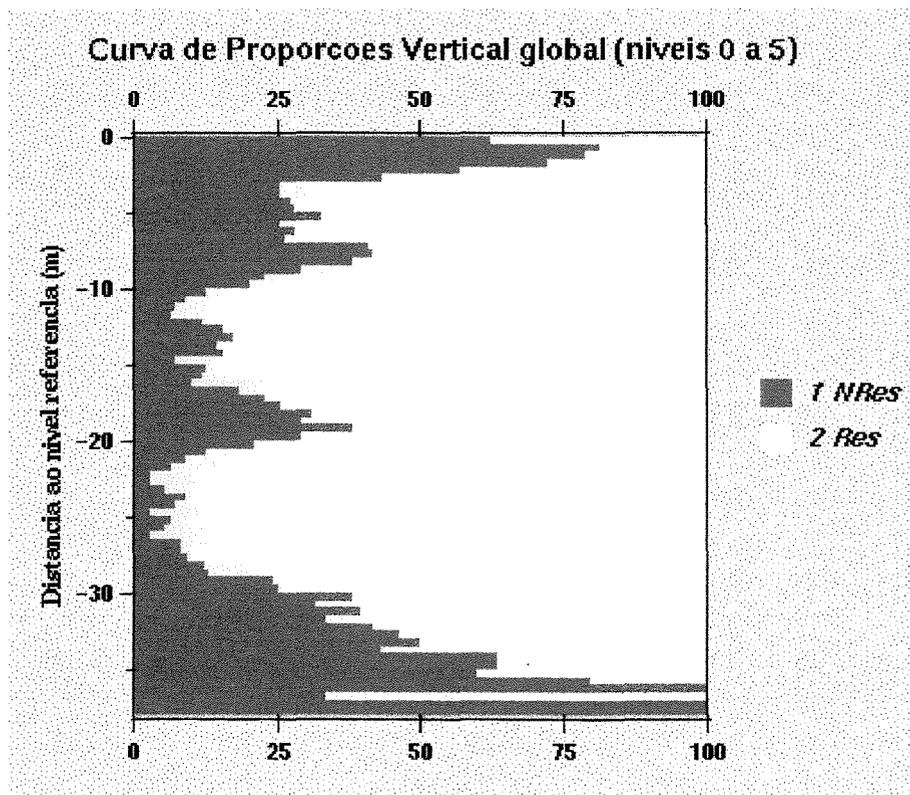


Figura 3-2: Curva de proporções verticais entre as litofácies reservatórios e não reservatórios, na área de 9 Km². Nota-se os dois marcos de folhelho delimitando o intervalo a ser modelado e também os dois níveis argilosos internos separando-o em três subzonas. O nível 0 significa o topo do capeador e o nível 5 a base do folhelho inferior.

3.3. Aquisição de dados para a parametrização dos canais

O levantamento dos parâmetros h , s e d foi realizado nos poços testemunhados da área e no modelo geológico detalhado de subsuperfície em Santos e Poletto (1993), sendo compatíveis com os dados de afloramentos análogos estudados por Barton *et al.* (1995).

O modelo geológico adotado nesta dissertação é interpretativo, contudo é baseado em grande número de informações, porque foram pesquisados 130 poços em 9 Km² de um campo de petróleo em desenvolvimento adiantado. Esta dissertação focaliza o estudo de caso de uma região interna à área acima citada.

Para a amostragem dos parâmetros h , s e d , foi usado o método da inversão, que consiste no sorteio de um número aleatório no intervalo $[0, 1)$, para com ele amostrar o parâmetro na respectiva função de distribuição acumulada. Como os números aleatórios tem distribuição uniforme, a consequência é que, todas as amostras do parâmetro tornam-se equiprováveis (Figura 3-3).

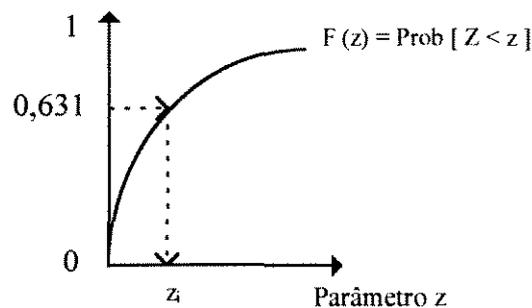


Figura 3-3: Método da inversão. Através do sorteio de um número aleatório no intervalo $[0, 1)$ o parâmetro z_i é amostrado na curva que representa a sua função de distribuição experimental.

A estimativa da larguras dos canais foi feita através de equação de correlação com a espessura dos depósitos. Desta maneira é garantida a relação entre h e w , evitando-se uma fonte adicional de erro, ao amostrar estes parâmetros em distribuições diferentes. Apesar disso,

foram feitas algumas simulações utilizando o histograma das 45 amostras de w , que serão comentadas no Capítulo 4.

Na prática os parâmetros h , w , s e d podem ser estimados em subsuperfície a partir da sísmica de alta resolução, métodos teóricos, expressões de regressão ou relacionando as dimensões dos canais com a sua geometria em planta. Conforme citado no Capítulo 2, (modelador SIRCH), no caso de existirem poucas amostras, ou poucos poços para a coleta de dados, pode-se completar uma distribuição de parâmetros com dados de afloramentos.

3.3.1. Forma geométrica

Assume-se a forma geométrica da semi-elipse para a definição da seção transversal de um canal. Os parâmetros que representam a geometria e disposição espacial do canal são: a espessura h que corresponde ao comprimento do eixo menor da semi-elipse; a largura w que é o eixo maior da semi-elipse; a sinuosidade s que está relacionada à parâmetros de comprimento de onda e amplitude do canal; a direção preferencial d cujo sentido indica a paleocorrente e a declividade v que é o gradiente do rio (Lanzarini *et al.*, 1995), (Figura 3-4).

Para efeito de simplificação do modelo, a declividade é desconsiderada porque a escala de modelagem deste trabalho enquadra-se na magnitude de heterogeneidades do tipo b de Weber (1986), que é muito menor do que a bacia sedimentar. Então considera-se o canal como sendo horizontal.

3.3.2. Espessura das sucessões de granodecrescência ascendente

As amostras das espessuras h dos canais foram obtidas nos poços a partir da análise das descrições de 85,8m de testemunhos (descritas pelo DEBAR/SELAG), constituindo o arquivo principal de dados. Após individualizadas as seqüências de granodecrescência ascendente nos testemunhos, o seu padrão de resposta em perfil elétrico foi estendido aos poços não testemunhados, para constituir outro arquivo de dados. Com o objetivo comparativo, é apresentado na Tabela 3-2 o resumo estatístico dos dois arquivos (Vide Anexo 1).

Tabela 3-2: Estatística das espessuras dos depósitos de preenchimento de canal nos testemunhos e seções geológicas.

	Média Aritm.	Mediana	Valor máx.	Valor min.	Dados
Testemunhos	5,72	5,6	11,2	2,0	15
Seções Geol.	5,51	4,6	16,5	1,4	37*

* Dos 134 depósitos de preenchimento de canais individualizados, escolheu-se 37. Foram descartados os canais não ortogonais às seções ou aqueles localizados nas suas extremidades.

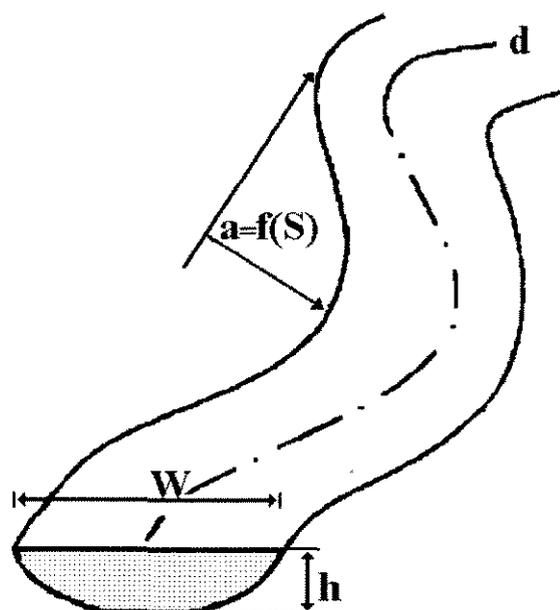


Figura 3-4: Parâmetros que definem um canal fluvial em três dimensões, w : largura, h : espessura, a : amplitude (função da sinuosidade) e d : direção preferencial. Para simplificar o modelo geométrico, a declividade é considerada constante e igual a zero (adaptado de Lanzarini *et al.*, 1995).

Visando acrescentar um fator de aleatoriedade na correção e amostragem dos dados de espessura h , foi usado o trabalho de Hirst *et al.* (1993), onde os autores citam que, estudando afloramentos fluviais, encontraram as probabilidades entre 0,6 e 0,8 de um poço atravessar o

canal na sua espessura máxima. Então concluíram que a espessura de canais atravessadas por poços são frações da espessura máxima. Desta maneira, as 15 amostras de h foram corrigidas para os fatores de Hirst de +40%, +30% e +20%, formando outro arquivo com 45 amostras, as quais também foram corrigidas para o fator de descompactação (Anexo 1).

Através da representação implícita da elipse, (Equação 2-7), foi calculada a variação do parâmetro w em função da variação do parâmetro h , e observou-se que a correção da espessura, pelos fatores de Hirst, abrange praticamente toda a extensão do eixo w , que corresponde a largura do canal. Desta maneira, tornou-se desnecessário corrigir as espessuras, para todos os fatores de probabilidades (entre 0 e 1,0), (Figura 3-5).

Após as correções da espessura, foi construída sua função de distribuição experimental para condicionar o modelo orientado a objetos.

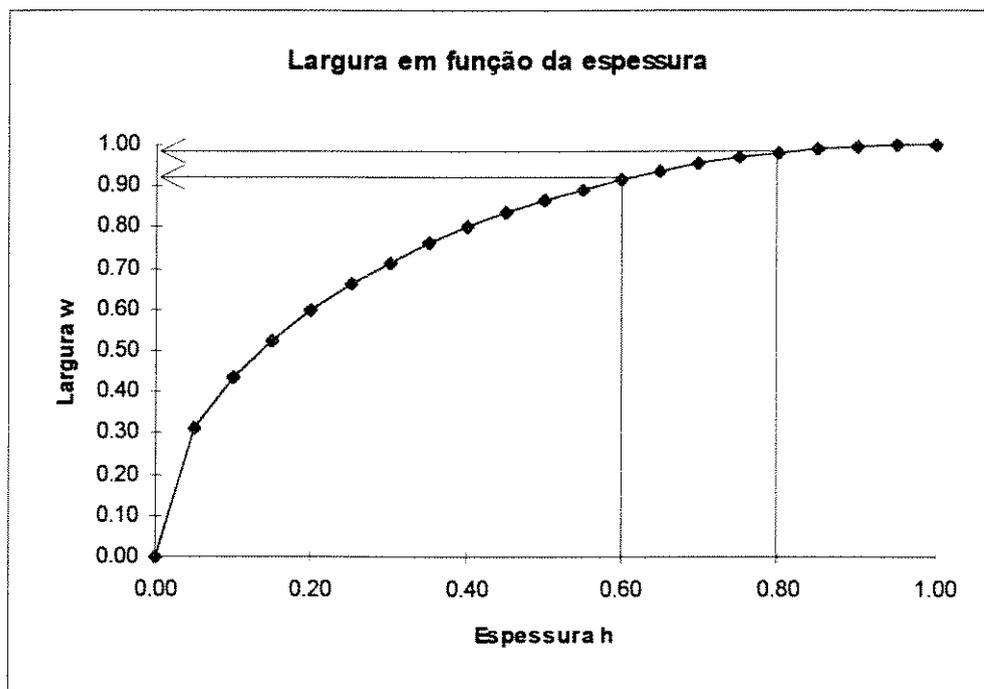


Figura 3-5: Variação da largura w em função da espessura h . Nota-se que a faixa de variação de $0,6h$ até $0,8h$ corresponde respectivamente de 92 a 98% da largura w .

Segundo Puigdefabregas e Van Vliet (1978), o padrão que identifica uma sucessão de granodecrescência ascendente, é a seguinte associação de fácies (Figura 3-6):

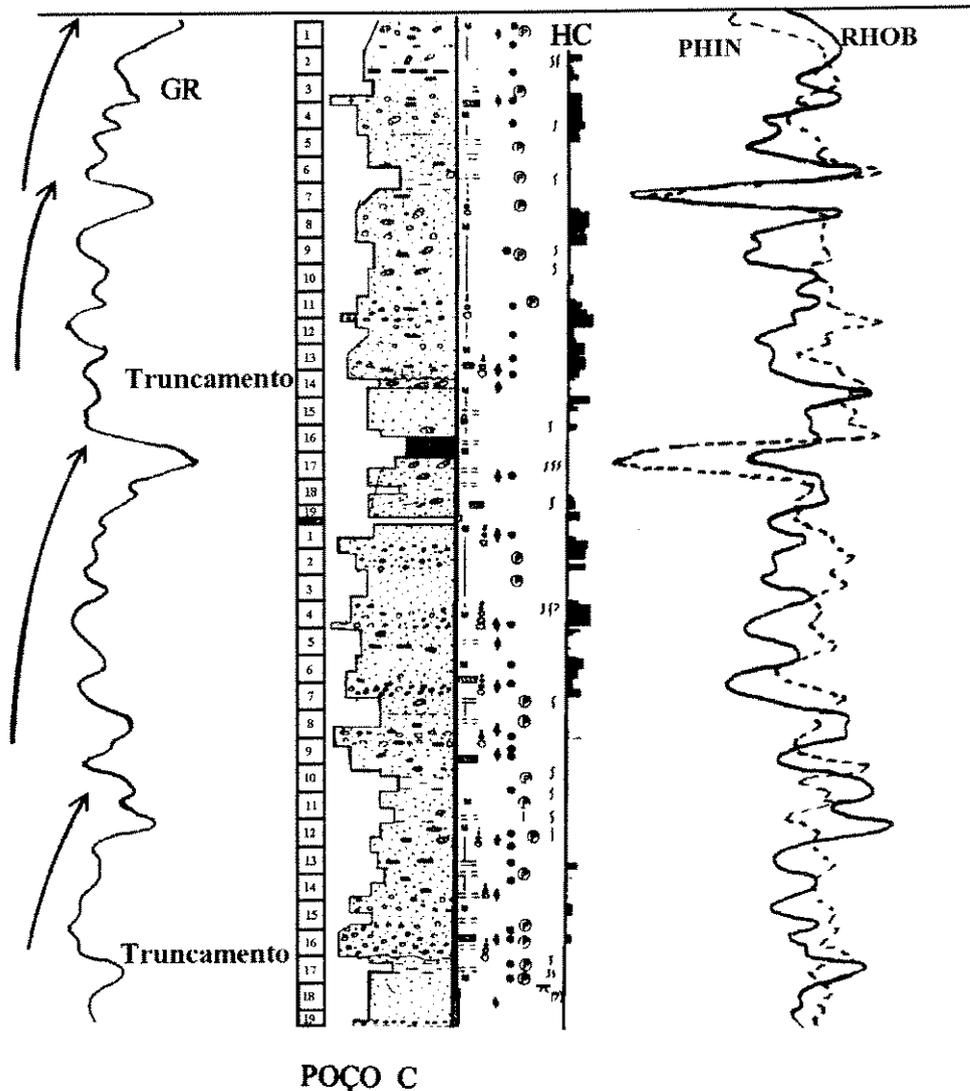
- a) o contato basal abrupto (truncamento),
- b) a mudança de baixo para cima de depósitos de alta energia para depósitos de baixa energia, quando analisados os tipos de estratificação,
- c) a diminuição no tamanho de grão dominante de baixo para cima,
- d) a presença de estruturas sedimentares inclinadas de larga escala em toda a sucessão refletindo a acreção lateral.

3.3.3. *Descompactação das sucessões de granodecrescência ascendente*

Embora a simulação da arquitetura dos reservatórios seja feita em ambiente compactado, na profundidade média de -660m em relação ao nível do mar, é necessário fazer a descompactação dos sedimentos para encontrar a relação original entre os parâmetros espessura h e largura w , a exemplo de Lorenz *et al.* (1985), e assim estimar dimensões de depósitos arenosos fluviais como w , Rm e Wpb .

A compactação é o resultado de fenômenos físicos químicos e mineralógicos em subsuperfície governados pela pressão de soterramento. O processo de compactação é devido principalmente à perda de água nos sedimentos (exceto para o sal), pois o volume de sólidos permanece relativamente o mesmo durante o processo. A quantidade de água é usualmente expressa como porosidade, que é uma medida do estado compactacional dos sedimentos.

A ordem de grandeza da compactação pode ser estimada através das alterações na porosidade, densidade total e densidade absoluta dos sedimentos. Se a porosidade for usada como base para cálculos de compactação, então assume-se que toda a redução no espaçamento poroso é causada apenas pela compactação. Esta atitude acarreta em algum erro, porque a redução no espaço poroso pode ter sido em parte causada por diagênese. Segundo Athy (1930), nos folhelhos, 95% da redução da porosidade ou aumento na densidade é causada por compactação.



- M MACICO
- = estratíf.ou lamin. plano paralela
- ≡ estratíf.ou lamin. plano paralela pouco definida
- ▨ estratificação cruzada tabular
- Δ granodécrescência ascendente
- ∩ pouca bioturbação
- ∩∩ bioturbação moderada
- ∩∩∩ bioturbação intensa
- π raízes

- ◆ fragmentos de folhelho
- bolas de argila
- ⊙ concreções piritosas
- ~ truncamento
- ▭ testemunho desagregado
- ▭ marrom-avermelhado

↑ depósito de preenchimento de canal

(por: ALMÉRIO/CARLÚCIO-SELAG)

Figura 3-6: As setas representam o padrão interpretado para depósitos de preenchimento de canal. GR: raios gama. PHIN: porosidade neutrônica. RHOB: densidade de rocha total.

Athy (*op. cit.*) construiu um gráfico de porosidade contra a profundidade de folhelhos pensilvanianos e permianos do norte de Oklahoma e obteve uma curva, denominada curva de Athy, onde a porosidade decresce exponencialmente com a profundidade. Este comportamento também é reconhecido para os arenitos.

Rubey e Hubbert (1959) *Apud* Magara (1978), obtiveram a partir da curva de Athy uma função exponencial expressando a relação entre a porosidade de folhelhos e a profundidade numa tendência normal de compactação, como segue:

$$\phi = \phi_0 e^{-cz} \quad (3 - 2)$$

onde, ϕ é o valor da porosidade na profundidade z , ϕ_0 a porosidade (em %) na superfície ($z=0$), c é a constante de dimensão (inverso do comprimento). O valor de c é a inclinação da reta de ajuste ou a constante de decaimento da porosidade com a profundidade.

Os dados de porosidade e profundidade da Formação Açú, indicam através da Equação 3-2, os valores de 38% para ϕ_{zero} e -0.69/Km para c . (Renato D. Mattos, comunicação pessoal, maio/1996). Os parâmetros ϕ_{zero} e c juntamente com os dados de profundidades foram processados através do programa Bass², resultando num fator de descompactação de 23%, necessário para obter-se a condição original dos sedimentos em superfície.

3.3.4. Estimativa das larguras dos canais

Leeder (1973), Leopold e Wolman (1960) *Apud* Lorenz *et al.* (1985) observaram que há uma relação positiva entre a profundidade e a largura de canais fluviais. Seguindo a

² Petrobrás/Cenpes

abordagem destes autores, foi aplicada a Equação 2-1 ao conjunto de espessuras descompactadas visando estimar o parâmetro w .

No caso de serem utilizadas seções geológicas para a obtenção do parâmetro w , deve-se ter o cuidado de utilizar as seções ortogonais ao eixo do canal, para evitar medições de larguras aparentes. Os dados levantados nas seções geológicas (Anexo 1), indicam razões w/h variando entre 46 e 53,7 e enquadram os rios formadores destes sedimentos na classificação de canais móveis de Friend (1983).

3.3.5. Sinuosidades dos canais

Um canal fluvial sinuoso pode ser descrito através de uma curva senoidal com amplitude $a = f(s)$ e comprimento de onda qualquer, obtidos através do parâmetro sinuosidade s .

O levantamento do parâmetro sinuosidade foi feito sobre os mapas geológicos de Santos e Poletto (1993), porque são dados diretos, alicerçados em grande quantidade de poços e por ser a única fonte de informação disponível em número suficiente para construir uma função de distribuição experimental. A sísmica poderia ser utilizada caso houvessem levantamentos com essa finalidade na área.

Ao medir as sinuosidades dos canais nos mapas, constatou-se valores baixos, desde a base até o topo do intervalo analisado. São 49 medidas variando de 1,0 a 3,0 com média de 1,26 e mediana 1,14 (apenas 2 canais têm sinuosidade 3,0), (Anexo 2). São valores similares às três medidas que puderam ser feitas no estudo dos afloramentos análogos, através de furos de sondagem e sísmica rasa, por Barton *et al.* (1995).

Um canal fluvial sinuoso pode ser idealizado por uma curva com amplitude variável. Para isso os valores de sinuosidade são convertidos para valores de amplitude. Em Tavares *et al.* (1996) a amplitude é estimada através da *spline Bi* da Equação 3-3,

$$B_i = d \frac{2s - 2}{\pi - 2} \quad (3 - 3)$$

onde, B_i é a amplitude do canal, s é a sinuosidade, e d é a constante de segmentação da reta diretriz. A Equação 3-3 é uma aproximação linear que fornece valores exatos de amplitude quando $s = 1$ ($B_i = 0$) e $s = \pi/2$ ($B_i = d$).

A amplitude pode ser positiva ou negativa dependendo do sinal \pm , obtido por sorteio de um número aleatório no intervalo (-1, +1). Cada incremento igual a d sobre a reta diretriz, é um *ponto de controle*, onde é amostrado um valor de sinuosidade s , para ser convertido em amplitude.

O comprimento d da segmentação da reta diretriz é a constante assim calculada,

$$d = \frac{2l}{n} \quad (3 - 4)$$

onde l é a diagonal do domínio dos dados no plano xy e n é o número de pontos de controle da *spline*. O número de pontos de controle n é função do raio de curvatura dos meandros Rm predominante, (detalhe da Figura 2-11).

A Equação 2-3 aplicada aos dados de testemunhos e seções geológicas resultou em valores modais de Rm de 209 e 207 m respectivamente (Anexo 2). Aplicando a Equação 3-4 num domínio com l de 1500 m, significa particionar a reta diretriz em 14 ou 15 segmentos. Nesta dissertação foi adotado n igual a 15 ou d igual a 200 m em função dos valores de Rm .

Na modelagem, a sinuosidade produz o efeito da variação da largura w do canal. Isto é causado através da translação da semi-elipse no plano xy paralelamente ao plano vertical yz (Figura 3-7).

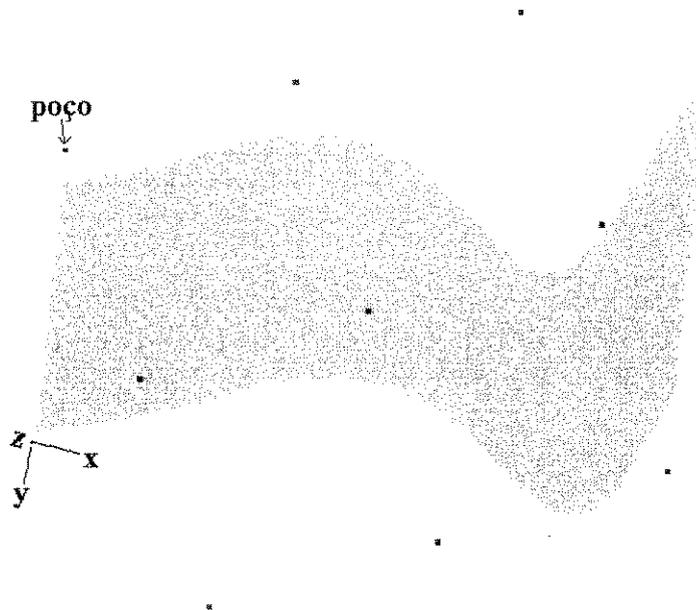


Figura 3-7: Variação na largura (w) do canal, causada pela translação da semi-elipse ao longo da curva geratriz, segundo planos paralelos ao plano yz .

3.3.6. Direções preferenciais dos canais

Um dos princípios básicos da sedimentologia, principalmente fluvial, é que, os sedimentos não são gerados desorganizadamente pela natureza, mas sim arranjados de uma maneira sistemática como consequência da interação dos processos auto e alocíclicos, que afetam os sistemas deposicionais (Bryant e Flint, 1993).

Para arranjar os canais no domínio simulado foram levantadas suas direções preferenciais d nos mapas de Santos e Poletto (1993). Como os mapas e os poços estão referenciados em coordenadas UTM³, as medidas de direção são tomadas em relação ao Leste, no sentido trigonométrico.

³ Universal Transverse Mercator

Devido o caráter restrito da área de aquisição dos dados para esta dissertação e tendo sido levantados num modelo de subsuperfície, não se tem um controle muito efetivo sobre o parâmetro d . A decisão em usá-los baseia-se na similaridade com os dados de afloramentos análogos e outras fontes externas a serem comentadas no Capítulo 5.

3.4. Modelagem geométrica e simulação condicional de canais

Os depósitos de preenchimento de canais desenvolvem-se sobre superfícies de 5ª ordem que tem a forma côncava para cima (Figura 2-4b), por isso adotou-se a geometria do canal para os seus depósitos de preenchimento. Em seção transversal, a figura geométrica mais adequada para representar estas superfícies e os depósitos que as preenchem é a semi-elipse. (Figura 3-8). Nos trabalhos mais antigos, em duas dimensões, estes depósitos eram representados por retângulos e quando em três dimensões, usavam-se paralelepípedos.

3.4.1. Ambiente gráfico da modelagem

O ambiente gráfico de modelagem é o programa ModVis (Lopes *et al.*, 1995) cujo sistema baseia-se na técnica da modelagem geométrica discreta (MGD) para a construção de superfícies *paramétricas* e *implícitas*. A técnica MGD representa superfícies utilizando-se de uma *estrutura de dados* e dos *operadores topológicos*. A estrutura de dados é a *Handle-Edge* (orientação pela mão direita com o polegar apontando para cima) e os operadores de dados são os operadores de Morse. Desta maneira podem ser representadas superfícies abertas e superfícies fechadas (Tavares *et al.* 1996b, Lanzarini *et al.* 1996b).

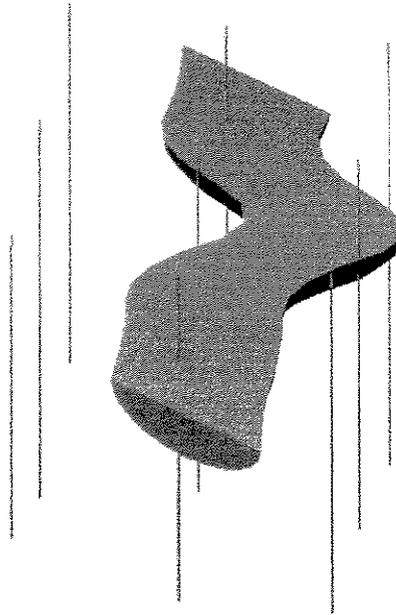


Figura 3-8: Modelagem geométrica condicional de canal. O condicionamento é feito por funções de distribuição experimental de parâmetros, por intervalos de reservatório e não reservatório nos poços e por curva vertical de proporção de fácies.

Na MGD, as superfícies envoltórias que definem o objeto no espaço tridimensional são constituídas pelos *complexos celulares* que são conjuntos de *vértices*, *semi-arestas* e *faces*. Por exemplo, na estrutura de dados *Handle-Edge* uma face é definida por um ciclo fechado de semi-arestas, onde o final da última coincide com o início da primeira (Figura 3-9). Na MGD as arestas comuns tornam-se uma só, diminuindo sensivelmente o número de informações. Para construir o canal, os vértices semelhantes são unidos por semi-arestas que dão forma ao objeto geométrico.

Os operadores de Morse podem construir e destruir superfícies eficientemente. Constituem a linguagem que une a geração com a visualização no sistema MGD. Eles mantêm separados os aspectos geométricos da estrutura de dados associada à representação, daí a sua eficiência.

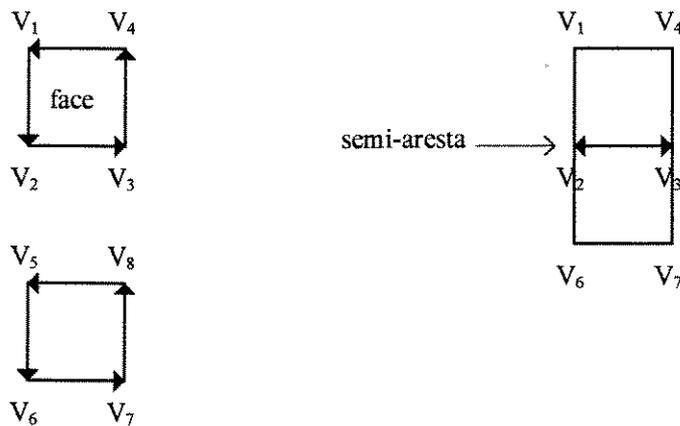


Figura 3-9: Uma face é constituída por um ciclo fechado de arestas. As letras V representam os vértices das faces. A aresta ($V_2 V_3$) comum a duas faces é identificada pela seta com ponta dupla e substitui a aresta ($V_8 V_5$). Um prisma de base quadrada pode ser criado unindo-se os vértices semelhantes : V_1 com V_5 , V_4 com V_8 , V_2 com V_6 e V_3 com V_7 .

Os métodos baseados em superfícies não usam a todo o instante as informações tridimensionais. Tais informações são chamadas na visualização dos objetos. A estrutura manipula os dados como contornos planares extraídos de seções transversais dos objetos, ao contrário dos métodos baseados em volumes (*voxels*) que necessitam de muita memória para armazenar e manipular dados, tornando-se computacionalmente mais lentos (Nonato e Tavares, 1995).

O modelador numérico de fâcies utilizado nesta dissertação é o PetBool⁴ que incorpora como núcleo gráfico o programa ModVis. O método de construção de imagens tridimensionais do PetBool é baseado nas superfícies *paramétricas* e *implícitas* e no cálculo de interioridade (esquema *in-out*). O objetivo do projeto PetBool é a modelagem estocástica e booleana de objetos geológicos parametrizados como: camada plana, cunha, canal, lobo, sigmóide, duna, e feições diagenéticas (Lanzarini *et al.* 1995; Lanzarini *et al.* 1996a, 1996b; Tavares *et al.* 1996a e 1996b).

⁴ Petrobras Booleano, projeto Cenpes/Diger e Laboratório MatComp/PUC-Rio.

3.4.2. Geração do objeto

A geração de cada objeto é feita através da operação de translação da semi-elipse que se desloca ao longo de uma curva geratriz. Utiliza-se a formulação *paramétrica* da semi-elipse para gerar a superfície, e a formulação *implícita* para calcular a *interioridade* (Equações 2-6 e 2-7). Este processo foi proposto em Lanzarini *et al.* (1996b) e em Tavares *et al.* (1996b).

O processo de geração de cada objeto inicia num ponto aleatório C_i , no plano yz , condicionado ao domínio dos dados. O ponto $C_i (x_c, y_c, z_c)$, nesta dissertação, representa o germe do objeto que será criado. É o ponto médio da largura w .

Além da posição no plano yz também são amostrados aleatoriamente os outros parâmetros de C_i que são: uma amostra de espessura h (com largura w relacionada através de equação), quinze amostras de sinuosidades s e uma amostra de direção preferencial d .

A superfície E' é construída no plano yz através de dois parâmetros μ e t sob a forma: $E': (x', y', z') = (c_x(t), c_y(t), \text{através da formulação paramétrica } (w/2 \cos \mu, h \sin \mu)^5$. Os centros, $c_x(t)$ e $c_y(t)$, formam a curva geratriz no plano xy , em função do parâmetro $t \in [-l, l]$, e $\mu \in [-\pi, 0]$ (metade inferior da elipse) sendo l a diagonal do domínio no plano xy (Figura 3-10).

A razão de usar o comprimento $2l$ para a reta diretriz é para evitar que o canal termine dentro do domínio simulado, após as operações de transformação (rotação e translação).

A superfície E' é transladada para a origem do sistema de coordenadas $(c_x(t), c_y(t), 0)$ juntamente com os parâmetros h e w para a operação de rotação. O centro em $x(c_x(t))$ é definido por $c_x(t) = t$, e o centro em $y, c_y(t)$ pela *spline* B_i (Equação 3-3).

⁵ Trocou-se θ da Equação 2-6 por μ para diferenciar de θ que é o ângulo de rotação em radianos aplicado ao objeto, a seguir.

Em cada ponto de controle de B_i são efetuados dois sorteios de números aleatórios. O primeiro, no intervalo (0, 1), para amostrar um valor de sinuosidade. O segundo, no intervalo (-1,+1), para definir o sinal positivo ou negativo da amplitude em cada ponto de controle B_i (Figura 3-11).

Após a construção da curva geratriz, faz-se a superfície E' migrar ao longo da curva, segundo planos paralelos ao plano yz , com o controle de que o centro de E' ($c_x(t), c_y(t), 0$) fique sobre a curva.

A geometria do objeto canal é obtida pela superfície envoltória de todas as semi-elipses, e é construída por modelagem geométrica discreta de superfícies (MGD). O resultado é o semi-elipsóide que representa o objeto canal (Figura 3-12). Quanto maior a discretização das semi-arestas, mais suave será o contorno da envoltória.

A seguir, aplica-se uma rotação de θ graus em relação ao eixo x , que corresponde a direção preferencial do canal, obtendo-se a superfície E'' . Esta operação é realizada através da matriz de rotação abaixo, e o resultado é ilustrado na Figura 3-13.

$$E'' : (x'', y'', z'') = \begin{bmatrix} \cos\theta & -\text{sen}\theta & 0 \\ \text{sen}\theta & \cos\theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} (x', y', z'),$$

onde, x'' , y'' e z'' são as coordenadas x' , y' , z' rotacionadas.

A Figura 3-14 mostra o objeto E'' de volta à origem no ponto $C_i (x_c, y_c, z_c)$, através da operação de translação abaixo:

$$E : (x, y, z) = (x'' + x_c, y'' + y_c, z'' + z_c)$$

Nesta etapa é checada a consistência do objeto gerado com os poços condicionantes através de confronto com: as coordenadas dos poços, as indicatrizes de fácies informadas via arquivo, o cálculo de interioridade e a curva de proporção. Se o objeto for recusado o

processo recomeça com um novo sorteio de um novo objeto. Caso o objeto seja aceito, as suas extremidades para fora do domínio dos dados são eliminadas, é realizado o cálculo da interioridade (detalhes no Item 3.4.3), e o seu volume é contabilizado na proporção p de reservatórios simulada (Figura 3-15).

As operações e transformações descritas neste item são repetidas tantas vezes quanto necessário, até que todos os poços condicionantes sejam honrados e o volume seja preenchido por canais na proporção desejada, ou até atingir o número máximo de iterações estabelecido.

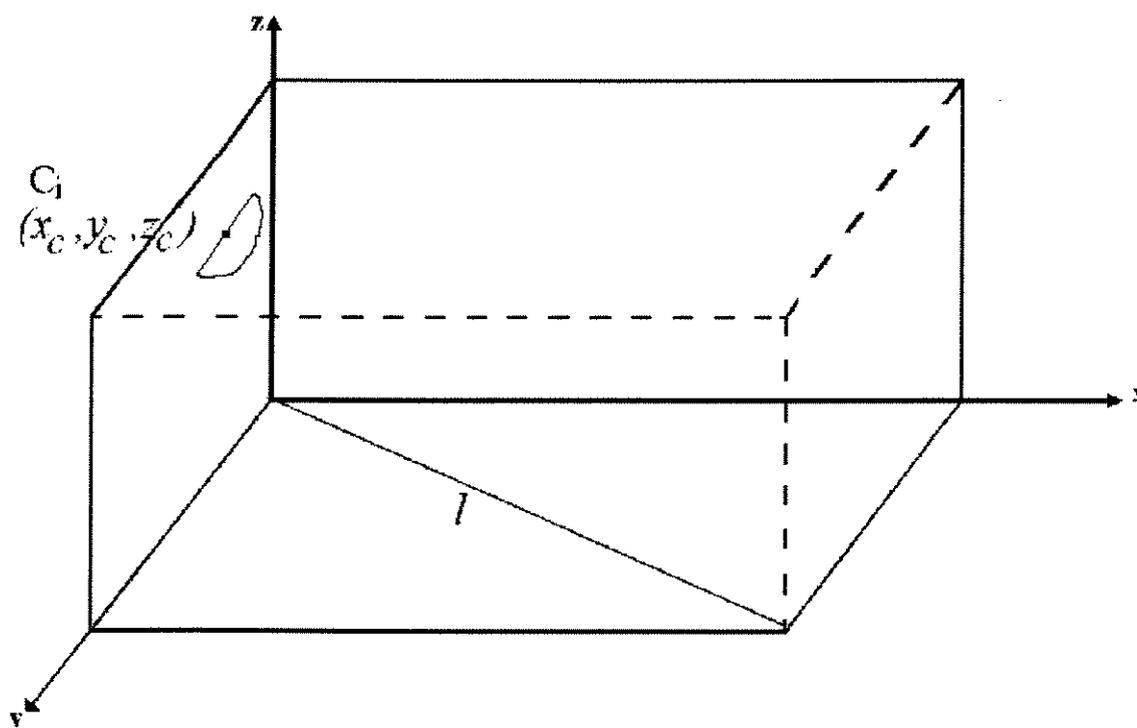


Figura 3-10: Sorteio aleatório da posição C_i , no plano yz que representa o germe do objeto a ser criado. C_i carrega consigo os parâmetros sorteados h e w que definem a semi-elipse (grão). O domínio tridimensional (D) é igual ao domínio dos dados e sua diagonal no plano xy é l .

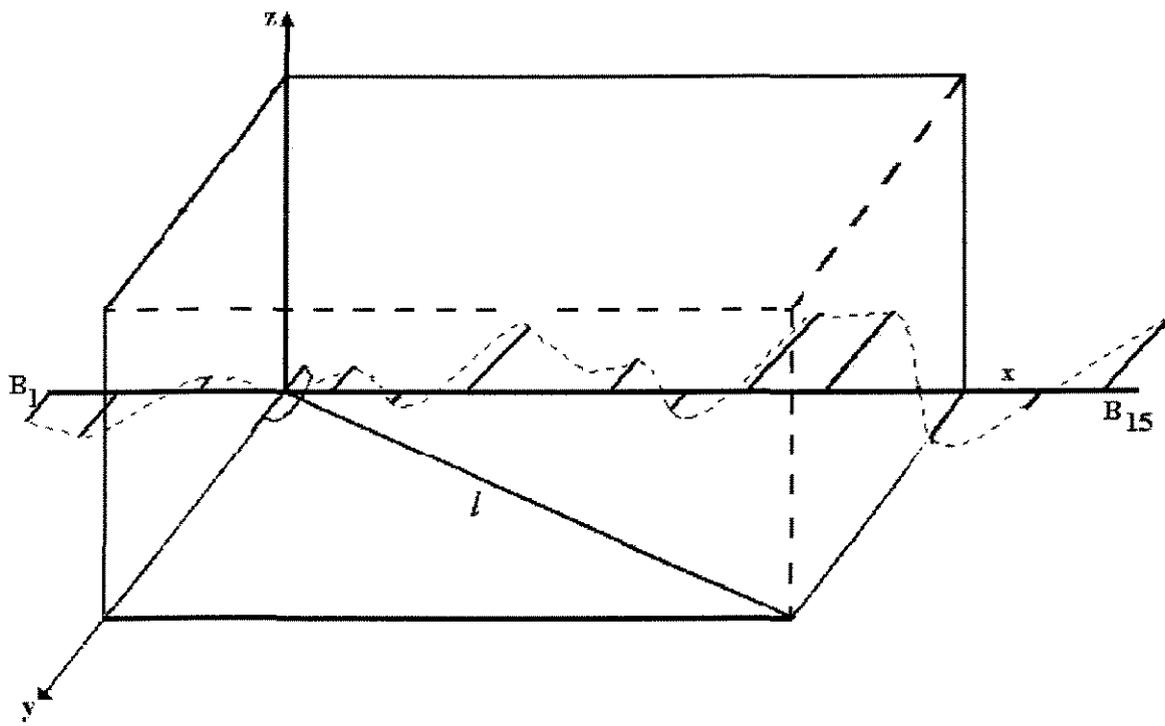


Figura 3-11: Construção da curva geratriz (linha tracejada) sobre a reta diretriz de comprimento $2l$. Entre B_1 e B_{15} estão os pontos de controle da *spline* (B_i) afastados entre si por um valor constante e igual a d .

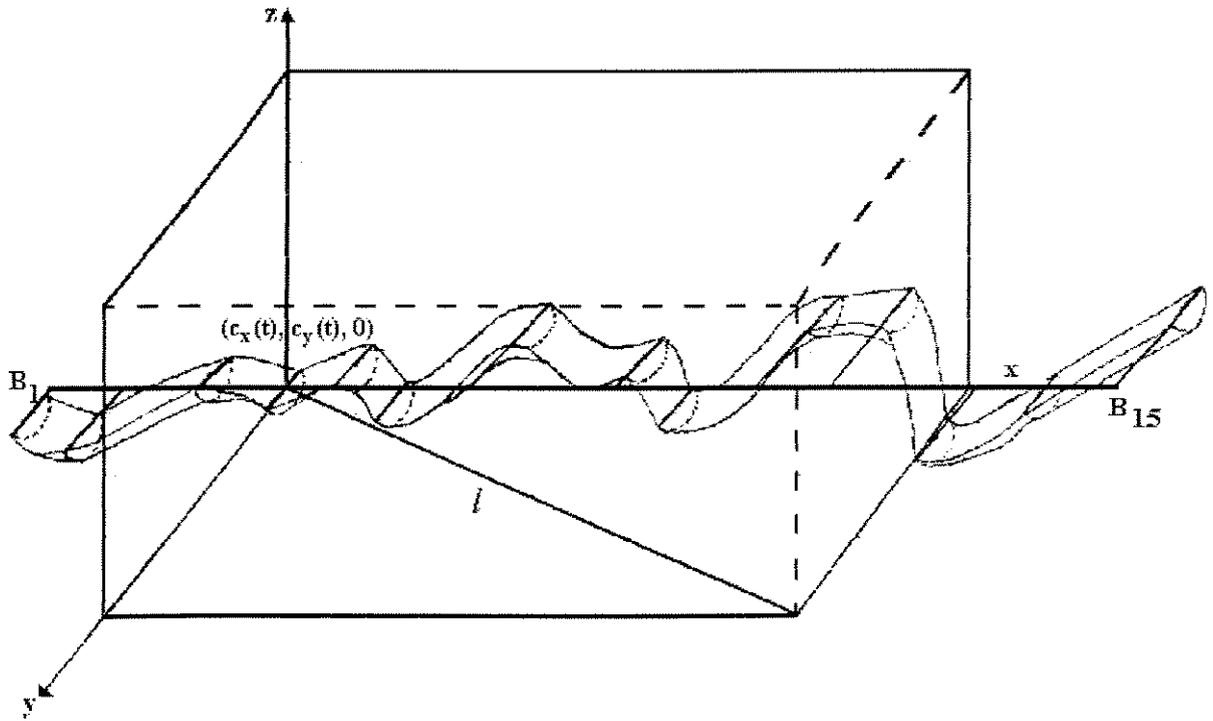


Figura 3-12: Superfície envoltória das semi-elipses construída por modelagem geométrica discreta de superfícies (MGD) dando forma ao objeto canal.

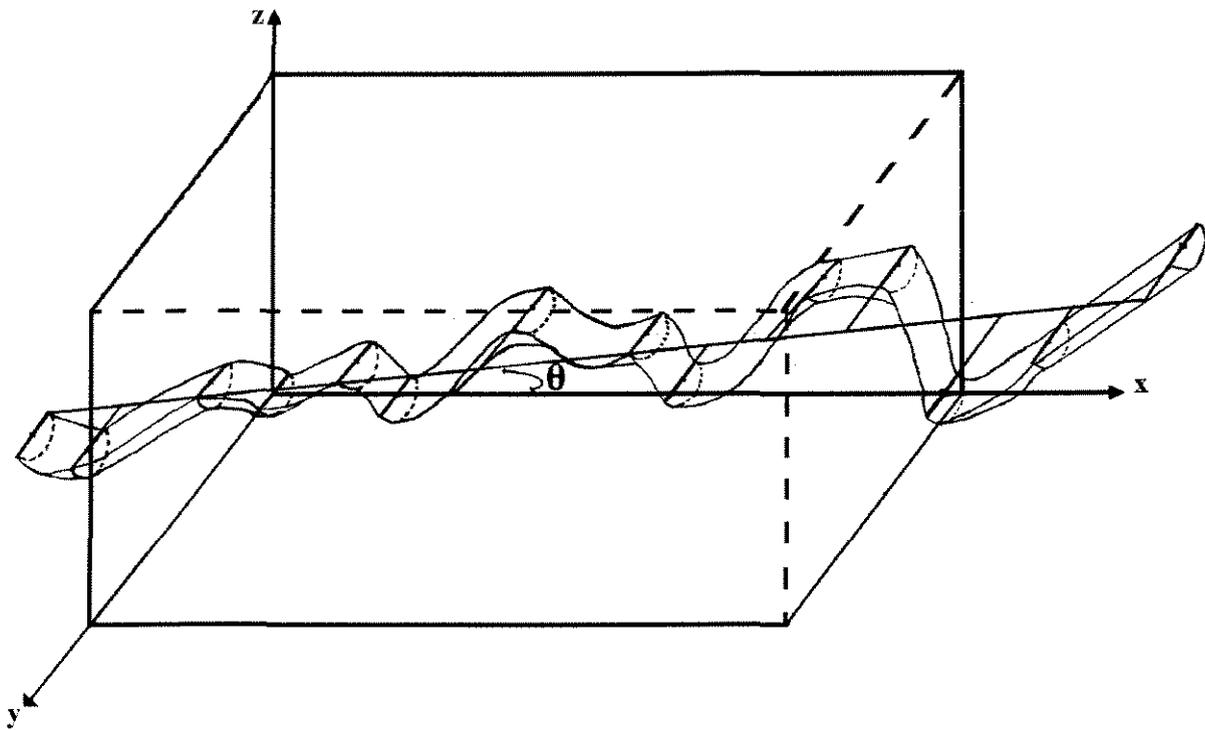


Figura 3-13: Rotação do objeto de θ graus em relação ao eixo x, correspondendo a direção preferencial d amostrada.

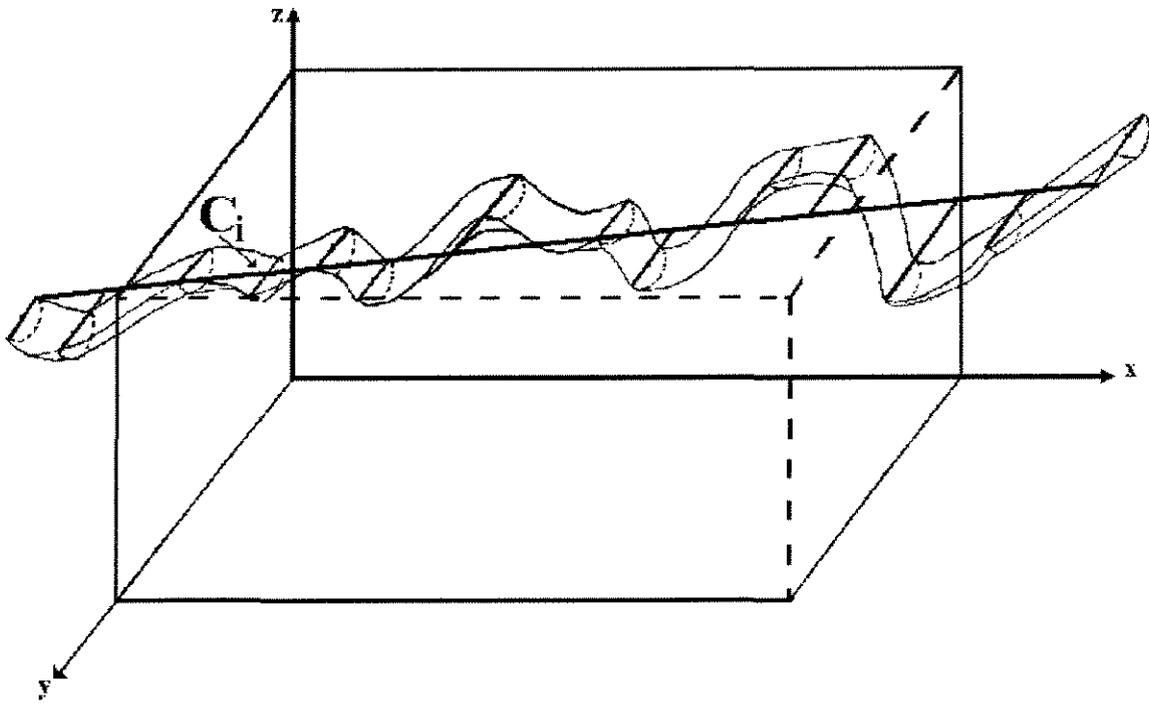


Figura 3-14: Translação do objeto de volta ao ponto de origem C_i .

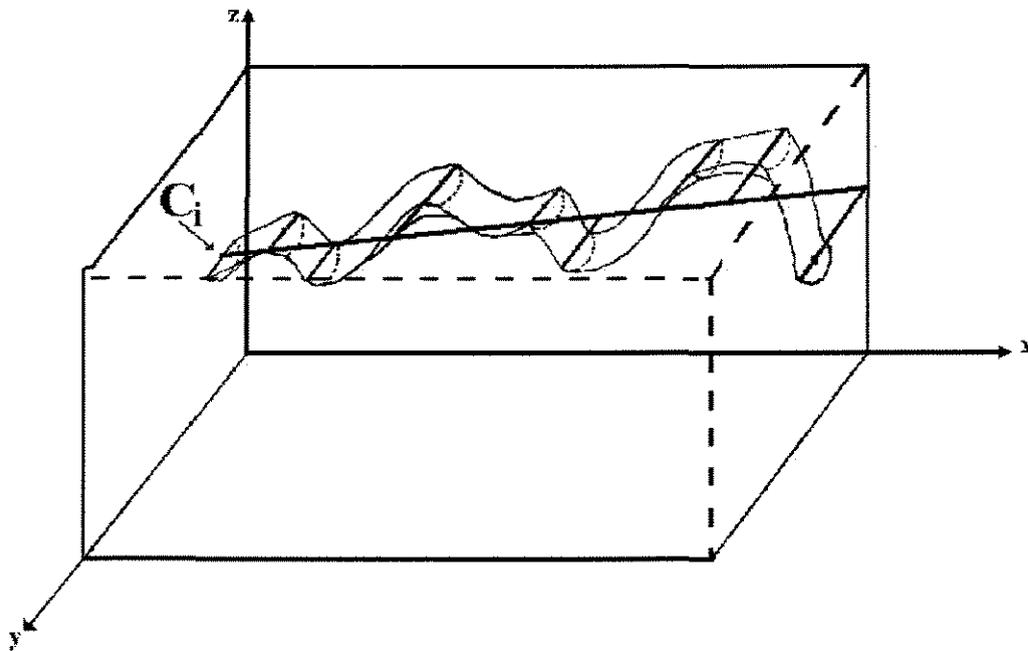


Figura 3-15: Eliminação das superfícies que ultrapassam o domínio dos dados.

3.4.3. Cálculo da interioridade e volume de reservatório

O cálculo da interioridade é utilizado para estimar o volume de reservatórios no domínio simulado. Este procedimento utiliza a formulação implícita da elipse (Equação 2-7). O domínio de simulação é dividido segundo os eixos x , y , z em 100 partes cada um, o que resulta em 10^6 blocos. O centro de cada bloco é o ponto $A(x, y, z)$, a ser testado se é interior ou não ao objeto definido pelos parâmetros $(x_c, y_c, z_c, h, w, d, \theta)$. Para isso são feitas as seguintes operações:

1) translada-se o ponto A para a origem através de:

$$(x', y', z') = (x - x_c, y - y_c, z - z_c)$$

2) aplica-se uma rotação de $-\theta$ segundo o eixo z para que a reta diretriz do canal se alinhe com o eixo x através da matriz de rotação:

$$(x'', y'', z'') = \begin{bmatrix} \cos(-\theta) & -\text{sen}(-\theta) & 0 \\ \text{sen}(-\theta) & \cos(-\theta) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} (x', y', z')$$

Determina-se o parâmetro $t = x''$ e o ponto A é interior ao canal se as seguintes inequações forem verdadeiras:

$$\frac{(y'' - c_y(t))^2}{\left(\frac{w}{2}\right)^2} + \frac{(z'')^2}{h^2} \leq 1$$

$$-h \leq z'' \leq 0 \quad (3 - 5)$$

As inequações 3-5 são adaptações da Equação 2-7 para a semi-elipse. O somatório dos volumes dos blocos que as atendem irá fornecer a estimativa do volume total de objetos (canais) da realização. Portanto, a proporção p de reservatórios é aproximadamente igual a:

$$p = \frac{\sum \text{vol. blocos in}}{10^6} \quad (3 - 6)$$

Na seqüência, as operações (1, 2) são executadas na ordem inversa (2, 1), revertendo cada ponto A para a sua posição original.

3.4.4. Ajuste do canal ao poço condicionante

Quando um objeto canal intercepta um poço num intervalo onde não foi constatado canal ele é rejeitado, e o processo retorna à geração de outro objeto. O objeto é aceito quando intercepta o poço onde foi constatado canal.

Para que todo o poço condicionante não fique posicionado no centro de um canal ou tangenciando suas bordas, optou-se por produzir uma perturbação aleatória lateral no ajuste de posicionamento, de maneira que continue consistente com o dado de campo.

A Figura 3-16 mostra três objetos posicionados em relação a um poço em situações possíveis, mas que foram evitadas nesta dissertação, porque um canal muito espesso poderia tangenciar um poço e ser aceito (como na figura) para condicionar um intervalo delgado, e também, para evitar poços localizados exatamente no centro do canal.

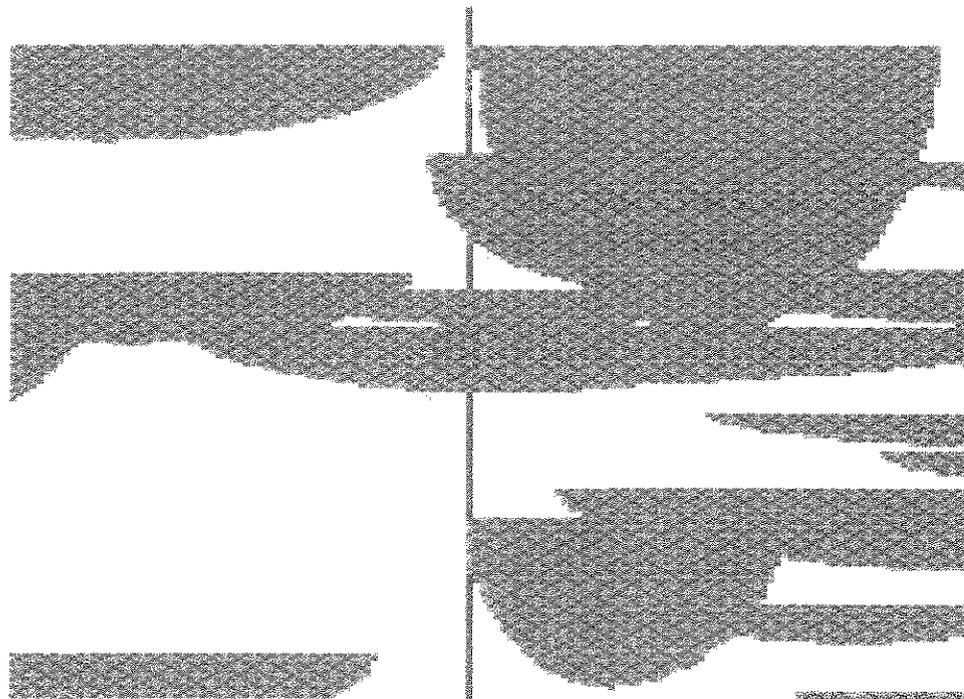


Figura 3-16: Nesta dissertação são evitadas as situações de tangência do poço em relação ao objeto e/ou de estar localizado exatamente na sua espessura máxima, apesar de serem consistentes com os dados de campo, estas situações são possíveis, mas pouco prováveis. No poço, a cor amarela indica reservatório e a verde não reservatório.

Assim sendo, definiu-se que é desejável colocar os poços aleatoriamente dentro da faixa de variação de 85% da largura w de um canal, desde que se permaneça também dentro da faixa de variação de 50% da espessura h , sabendo-se que a largura de um canal depende da sua espessura segundo Lorenz et al. (1985).

A solução deste problema é obtida através da Equação 2-7, sendo dados: $x = \frac{w}{2} \cdot \frac{85}{100}$; e fazendo-se $\frac{x^2}{\left(\frac{w}{2}\right)^2} + \frac{y^2}{h^2} = 1$. Resolvendo esta equação encontra-se que $y = \pm 0.53h$

Portanto, a perturbação de posicionamento é obtida multiplicando-se toda a amostra de espessura h por um número aleatório $i \in (0,53, 1,0)$. Em relação ao poço, o canal é posicionado ao longo de 85% de w , na espessura $H = h \cdot i$, à direita ou à esquerda do poço, a depender do sinal \pm obtido por outro sorteio de número aleatório $ii \in (-1, +1)$.

Entretanto existem outros detalhes para ajustar um canal a um poço condicionante. Sabendo-se que um ou mais canais podem compor a medida linear de reservatórios constatados num poço. Outras situações possíveis de ajuste são mostradas na Figura 3-17. A espessura do corpo arenoso amostrado pode ser maior, menor ou igual ao intervalo condicionante (Z_i, Z_{i+1}). Sendo maior, só existem duas posições de ajuste em que a espessura no objeto é igual a espessura no poço, à direita ou à esquerda dele, desde que a posição escolhida, não implique em sair da faixa de 85% de w . Se for menor, existem infinitas posições para o ajuste, respeitando a condição de posicionamento em w . Se for igual, não necessita de ajuste lateral.

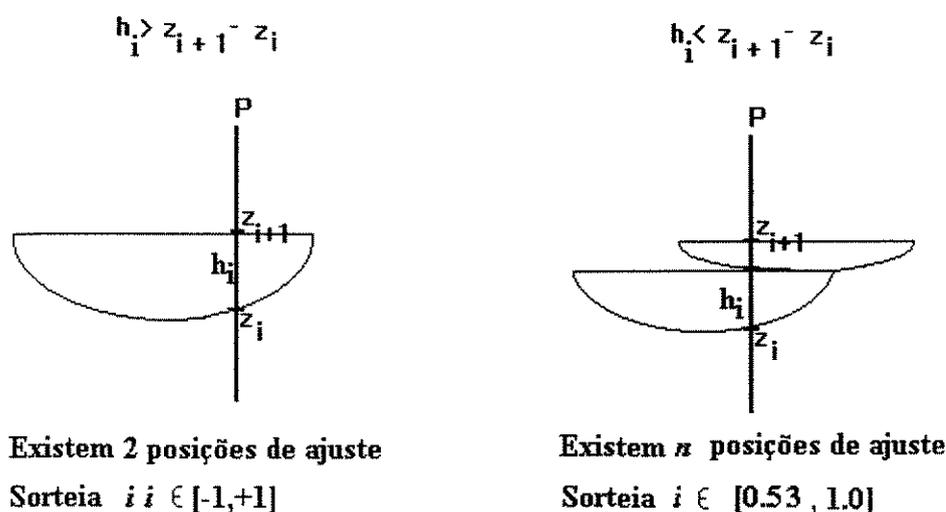


Figura 3-17: Ajuste de um canal ao intervalo condicionante $[z_i, z_{i+1}]$. O posicionamento é definido por números aleatórios, (ii) para posicionar o objeto à esquerda ou à direita do poço, (i) para manter-se na faixa de 85% de w .

3.4.4.1. Algoritmo de simulação

O algoritmo usado nas simulações foi desenvolvido pela equipe multidisciplinar e interinstitucional, formada por geólogos, engenheiros de reservatório e matemáticos (Tavares *et al.*, 1996, Manual do Usuário e de Referência). Ele baseia-se em: modelagem geométrica discreta (MGD), fórmulas paramétrica e implícita de superfícies, cálculo de interioridade, estratégia dos corpos compostos, perturbação aleatória de posicionamento lateral e funções de distribuição experimentais de parâmetros. À medida que evoluíam os testes e o estudo de caso com dados reais, o algoritmo foi sofrendo alterações, que são apresentadas no Capítulo 4.

Os tipos de simulações de objetos geométricos que podem ser realizadas com este algoritmo são:

- 1- simulação não condicional, requisitos: domínio xyz , funções de distribuição experimental de parâmetros FDEP's, e a proporção p de objetos desejada,
- 2- simulação condicional a poços, requisitos: idem a 1, mais uma lista de poços Lp com intervalos lp informando presença ou ausência do objeto a ser simulado,
- 3- simulação condicional a poço e à curva de proporção de fácies, requisitos: idem a 2, mais uma curva de proporção vertical de fácies CPVF ou de objetos do domínio,
- 4- simulação condicional à curva de proporção de fácies, requisitos: idem a 1, mais a CPVF,
- 5- simulação dos tipos 1 a 4 (acima) condicional a topo e base de camadas, requisitos: de 1 a 4, mais o topo e base dos marcos,

No Anexo 6 é apresentado o fluxograma simplificado dos tipos de simulação 2 e 3.

4. Análise de sensibilidade e testes do programa

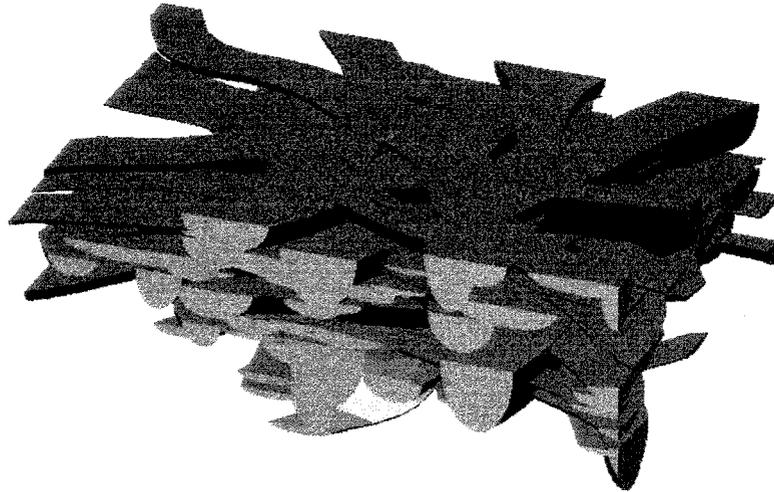
Neste capítulo são apresentadas as implementações que o algoritmo de simulação foi incorporando no decorrer desta dissertação. Estas alterações tornaram-se necessárias à medida que os testes com dados reais foram sendo realizados.

Inicialmente a simulação realizava-se interativamente, em domínio maior que o domínio dos dados. Os canais tinham sinuosidade constante, o condicionamento aos poços era feito com um só objeto por intervalo, com o poço localizado na espessura máxima do objeto. Isto acarretava dificuldades na convergência do programa.

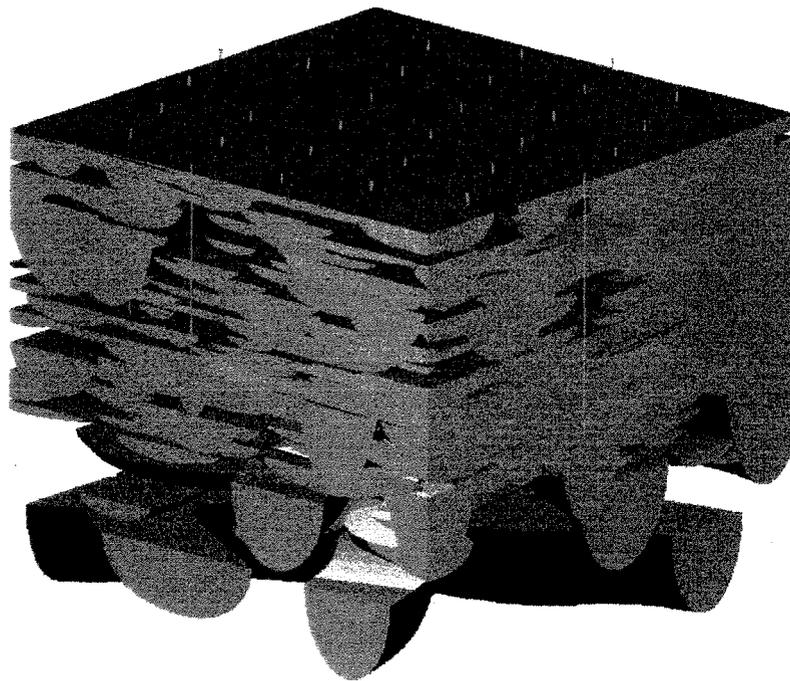
O domínio de simulação sendo maior que o domínio dos dados, implica em distorções na aceitabilidade dos corpos, além de deixar a representação com inadequado aspecto estético, que pode ser observado na Figura 4-1a, onde os limites da simulação estão afastados à certa distância além dos limites dos dados. Na Figura 4-1b os limites laterais e superior coincidem com os limites dos dados, exceto na face inferior. A operação de limitar o domínio de simulação segundo o domínio dos dados é aqui denominada *trimming-back*, porque simula-se em domínio maior, que depois é “aparado” por planos que passam nos limites dos dados.

Condicionar poços com objetos centralizados é uma situação por demais idealizada e difícil de aceitar em se tratando de dados reais. Assim sendo, foi adotada a estratégia dos *corpos compostos* associada com a perturbação lateral de posicionamento (citado no Capítulo 3), para honrar intervalos condicionantes. A adoção de *corpos compostos* e o posicionamento aleatório, resultou em representações realistas da arquitetura de reservatórios fluviais, exibindo o empilhamento diagonal de canais e as

feições erosivas do ambiente fluvial (Figura 4-2). O uso dos *corpos compostos* melhorou a convergência do programa, passando o tempo de duração da simulação interativa da escala de 12 a 15 horas, para cerca de 40 a 120 minutos. Ao ser implementada a possibilidade de simulação em modo *batch*, estes tempos reduziram-se para alguns minutos.



(a)



(b)

Figura 4-1: Representação tridimensional de reservatórios simulados em domínio maior que o domínio dos dados. (a) Não há restrição próximo as faces. (b) Há restrições, exceto na face inferior, onde se observam objetos com formas diferentes do restante do domínio.

A decisão de adotar os *corpos compostos* foi tomada porque não se conhecem os limites de cada objeto. É difícil afirmar, em subsuperfície, onde começa ou onde termina determinada litofácies, exceto nos poucos poços testemunhados.

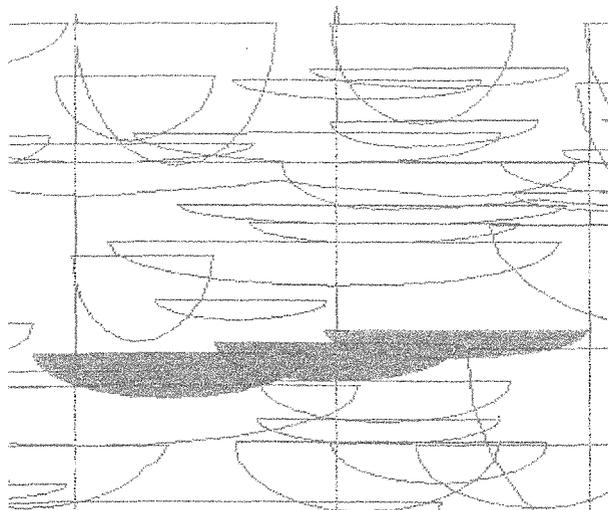


Figura 4-2: Corte vertical numa realização mostrando os corpos compostos sobrepondo-se e o condicionamento sendo respeitado. No destaque, em amarelo, o empilhamento diagonal de canais, que é observado em afloramentos.

Em alguns casos foi constatado que podem acontecer ilusões de não condicionamento aos poços, supondo problemas no algoritmo ou nos dados. Isto pode ocorrer de duas maneiras: a primeira, por problema de precisão numérica da máquina, quando o plano que delimita o domínio ou o plano de corte do usuário, não passa exatamente sobre o poço e a segunda, quando for estabelecido um número de iterações não suficiente, para que os objetos simulados atinjam a proporção de corpos necessária, para honrar todos os poços (Figura 4-3a e 4-3b).

O critério de truncamento por erosão, adotado no programa, é o mesmo da estratigrafia. Com isto, consegue-se reproduzir a situação geológica, de canais mais jovens erodindo canais mais antigos, e também, ao atribuir propriedades petrofísicas, na área de intersecção de objetos deve prevalecer as propriedades do objeto estratigraficamente superior. Se houver empate nas profundidades de objetos sobrepostos, prevalecem as propriedades do último objeto gerado no simulador. (Figura 4-4).

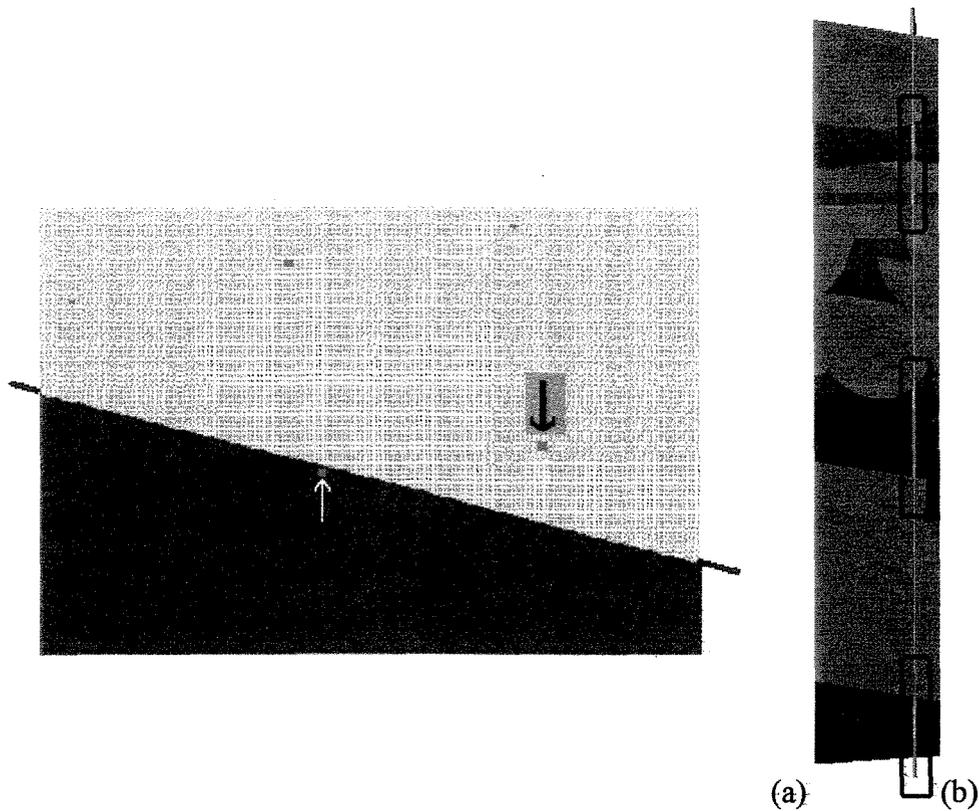


Figura 4-3: Ilusão de não condicionamento, (a) causado por problema de precisão numérica nos limites do domínio (marcado pela linha vermelha), a seta branca indica poço fora e a seta preta indica poço dentro do domínio, (b) número de iterações não suficiente para condicionar todos os intervalos de reservatório, marcados pelos retângulos.

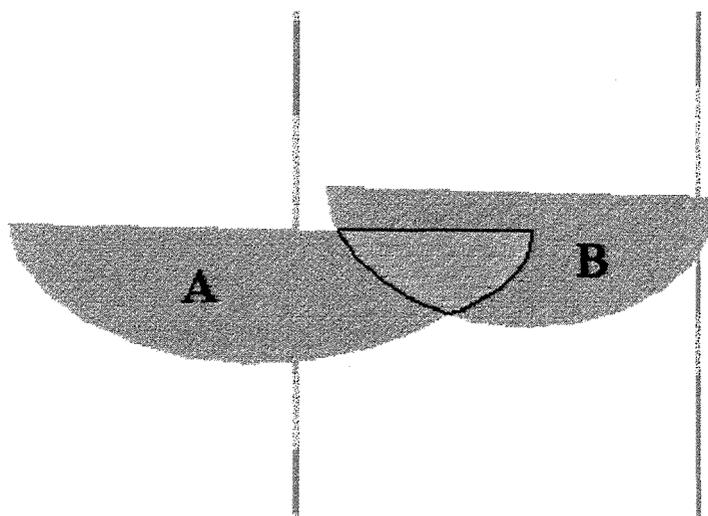


Figura 4-4: Truncamento e união de objetos. A e B são dois objetos distintos. A operação $A \cup B$ resulta num terceiro objeto mais complexo. Na região $A \cap B$ (em cinza) prevalecem as propriedades de B.

Podem ser confundidas dimensões aparentes como verdadeiras, quando os sólidos são representados no plano. São os problemas de visualização estereográfica que não tem relação com a qualidade das simulações.

Alguns exemplos de problemas estereográficos são mostrados nas Figuras 4-5a e 4-5b, ocasionados por cortes verticais segundo direções não ortogonais ao eixo dos canais. Desta maneira larguras aparentes podem ser observadas em seções, destacando-se daquelas em que se baseou a amostragem, ou também encontrar poços localizados fora da faixa de posicionamento de w exigida (comentada no Capítulo 3).

Também foram feitas análises quantitativas das simulações para investigar sua qualidade através de comparações estatísticas entre os parâmetros de entrada e os parâmetros simulados. No exercício cujo resumo é apresentado da Tabela 4-1, e a realização equiprovável na Figura 4-6, foi utilizado um histograma de larguras de canais para obter amostras de w . Como resultado, constatou-se inadequado o uso de funções de distribuição de espessuras h e larguras w em separado, para entrada no simulador, porque observa-se que há preferência por aceitar corpos de larguras similares (maioria até 93 m neste exercício). Isto pode ser explicado no histograma de entrada onde a moda pertence à classe de 38 a 100 m, portanto, esta classe predominará na amostragem através do método de inversão, porque os objetos com larguras menores colidem menos com os poços em situações de inconsistência, sendo por isso pouco rejeitados.

No cálculo da média e variância dos dados simulados, utilizou-se a ponderação pela frequência da seguinte maneira:

$$\text{média: } m = \sum_{i=1}^n \bar{x}_i f_i, \quad (4-1)$$

$$\text{variância: } \sigma^2 = \sum_{i=1}^n f_i (\bar{x}_i - m)^2 = \sum_{i=1}^n f_i \bar{x}_i^2 - m^2 \quad (4-2)$$

sendo, f_i , frequência, e \bar{x}_i , o valor médio da classe.

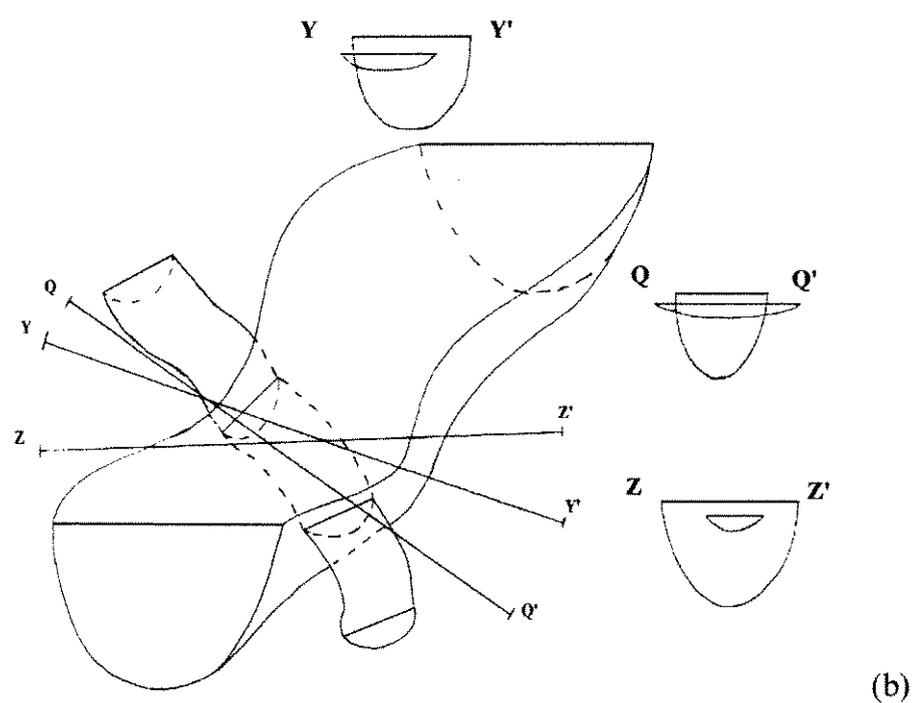
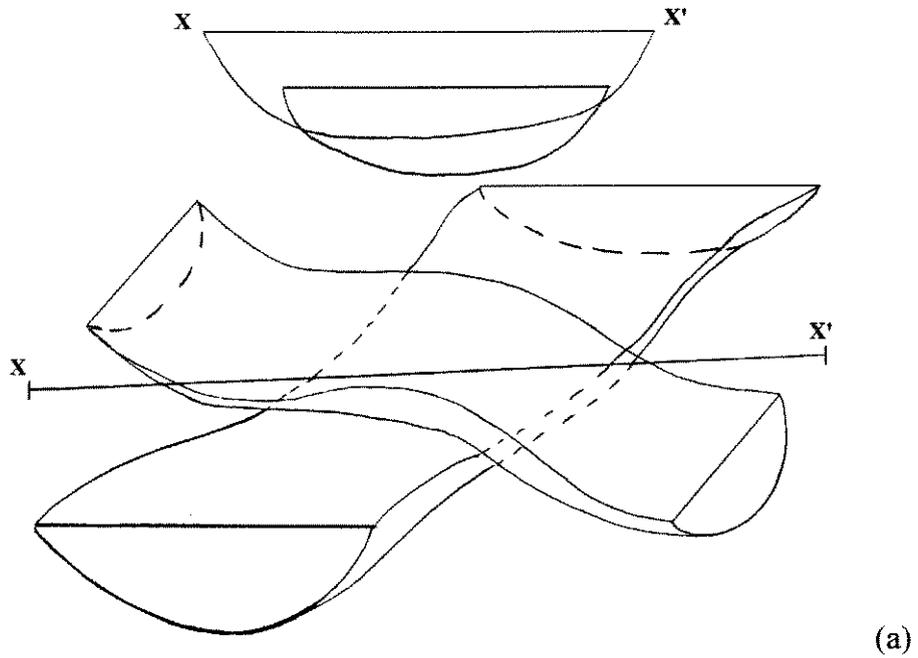


Figura 4-5: Dimensões aparentes causadas por cortes não ortogonais (XX' , YY' , QQ') aos eixos dos canais. (a) O canal superior é mais estreito que o canal inferior, mas o corte XX' mostra o contrário. (b) O corte ZZ' é o que mais se aproxima da relação verdadeira entre as dimensões dos dois canais.



Figura 4-6: Exercício de simulação (s44.sim) utilizando um histograma para amostrar larguras w . Nota-se a predominância de larguras similares.

Tabela 4-1: Comparação das estatísticas de larguras w obtidas por simulação utilizando um histograma de larguras ao invés de equação de correlação com a espessura h .

	Classe Modal (m)	%	Média	σ^2	Dados
Entrada	38 a 101	27	265,4	34241,8	45
Simulado.	38 a 93	69,6	108,9*	8710,8*	875

*média e variância ponderadas pela freqüência

O uso de valores de sinuosidade constante na modelagem também foi descartado, pois não são observados nos sistemas fluviais do Recente. Isto foi solucionado através da amostragem aleatória de um valor de sinuosidade, em várias posições ao longo da reta diretriz, a intervalos fixos de segmentação. Porém, nos exercícios realizados observou-se o aumento do tempo gasto na simulação, quando foram introduzidos valores constantes de sinuosidade s na entrada de dados (Tabela 4-2). Uma estação com 64 Mb RAM,

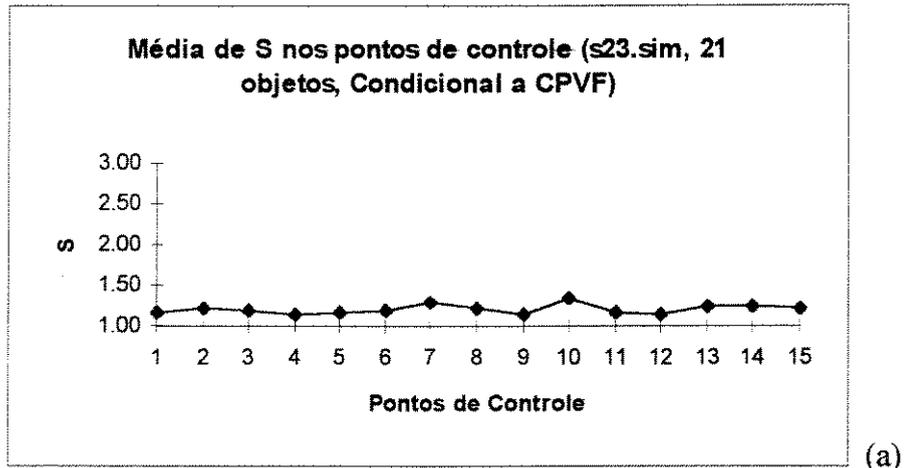
operando em modo *batch*, gastou em média 12,5 minutos para concluir uma simulação com s constante e igual a 1. Com s igual a 3, o tempo médio foi de 43,3 minutos, ou seja, 3,5 vezes maior. Isto se deve à maior facilidade de construir canais retos e consistentes com os poços.

Tabela 4-2: Comparação das estatísticas de sinuosidades s , obtidas por simulação, utilizando sinuosidades constantes como dado de entrada.

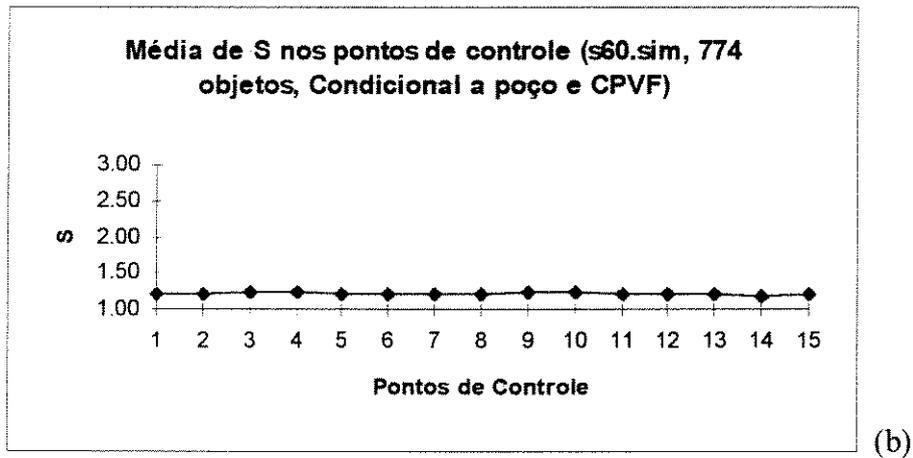
	Classe Modal	%	Média	Dados
Entrada $s = 1$	1	100	1	1
Simulado	1	100	1	546
Entrada $s = 3$	3	100	3	1
Simulado	3	100	3	835

Foi pesquisado também o comportamento simulado da sinuosidade ao longo da reta diretriz numa realização. O objetivo é verificar como varia este parâmetro conjuntamente em todos os objetos da realização, nos pontos de controle. Para retornar os valores de amplitude para valores de sinuosidade foi utilizada a Equação 3-3. Nas Figuras 4-7a e 4-7b são mostrados os resultados. Observa-se que a média de s simuladas, por ponto de controle, oscila em torno da média amostral (1,26), e quando o número de objetos é muito grande os valores médios simulados se aproximam, mais ainda, da média amostral.

Por outro lado, o comportamento simulado deste parâmetro, em 4 pontos de controle de duas realizações, mostra melhor aleatoriedade da amostragem. Neste caso não é feita a média. Todos os valores nos pontos escolhidos (1, 5, 10 e 15) são mostrados nas Figuras 4-8a e 4-8b.

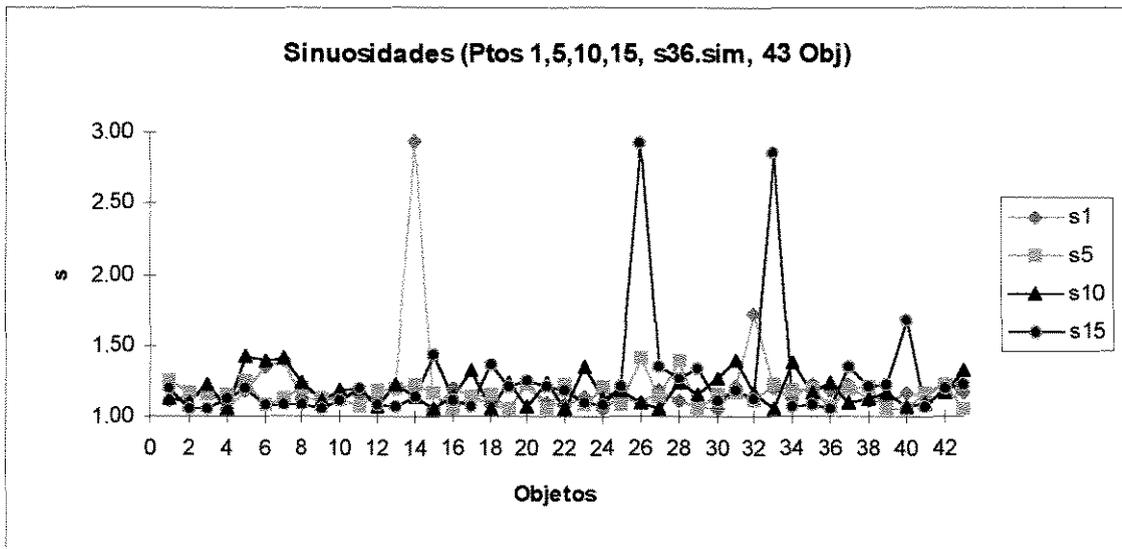


(a)

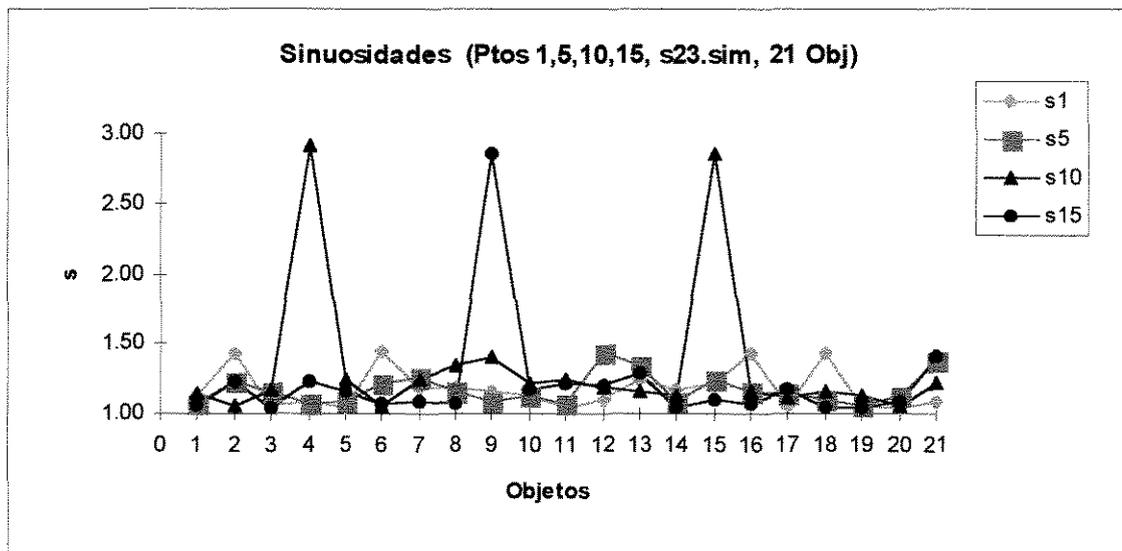


(b)

Figura 4-7: Sinuosidades médias por ponto de controle, ao longo da reta diretriz, em duas realizações. (a) Realização com 315 amostras. (b) Realização com 11610 amostras. A simulação condicional a poços e a CPVF exige um número grande de objetos para honrar todos os poços e a curva. Neste caso, o valor médio das sinuosidades simuladas converge para média amostral (1,26).



(a)



(b)

Figura 4-8: Comportamento do parâmetro sinuosidade nos pontos de controle s1, s5, s10 e s15, em duas realizações: (a) s36.sim e (b) s23.sim. Em ambas, o comportamento aleatório da amostragem é evidenciado.

O teste de sensibilidade em relação à direção preferencial d consistiu em informar uma distribuição (hipotética) uniforme entre 0 e 180°, e simular. Em resposta, obteve-se uma distribuição de direções simuladas com média de 90.7°, como era esperado.

Outra análise dos dados simulados foi em relação à forma dos histogramas. Isto foi realizado através de testes, variando-se cada parâmetro em separado, e depois fazendo-se combinações entre eles. Este é um problema complexo de ser analisado, porque são várias as possibilidades de combinações entre parâmetros e tipos de simulações que podem ser feitos, porém, este não é o objetivo desta dissertação.

Apesar disso, nas Figuras 4-9, 4-10 e 4-11, nota-se a existência de similaridade entre os histogramas dos parâmetros simulados indicando a existência de regularidade estatística nas realizações do modelo estocástico. Para melhor compreensão deste teste, as Figuras 4-10 e 4-11 devem ser comparadas com as Figuras 5-4 e 5-5 (dados de entrada), onde também se observa similaridades, o que confirma o condicionamento do modelo geométrico às funções de distribuições experimentais (FDEP's).

Observação: A função de distribuição experimental de espessura utilizada nos testes é proveniente do levantamento executado sobre as seções geológicas de Santos e Poletto (1993) que é diferente da função utilizada nas simulações, que foi obtida nos testemunhos, por isso a comparação entre as Figuras 4-9 e 5-3 não é válida.

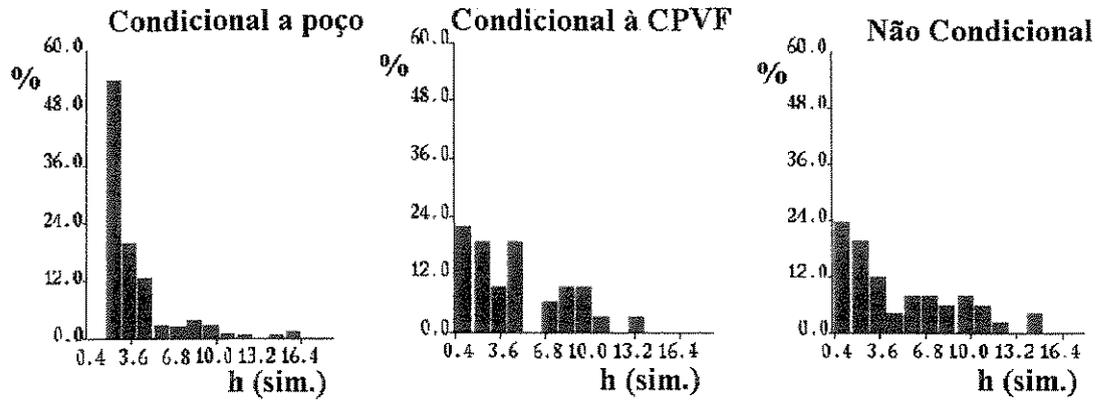


Figura 4-9: Distribuições de espessuras h , dados simulados.

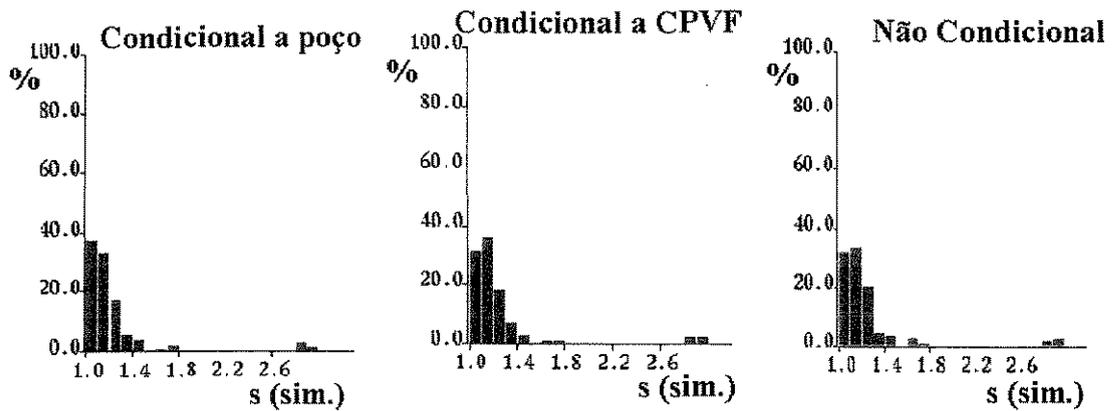


Figura 4-10: Distribuições de sinuosidades s , dados simulados.

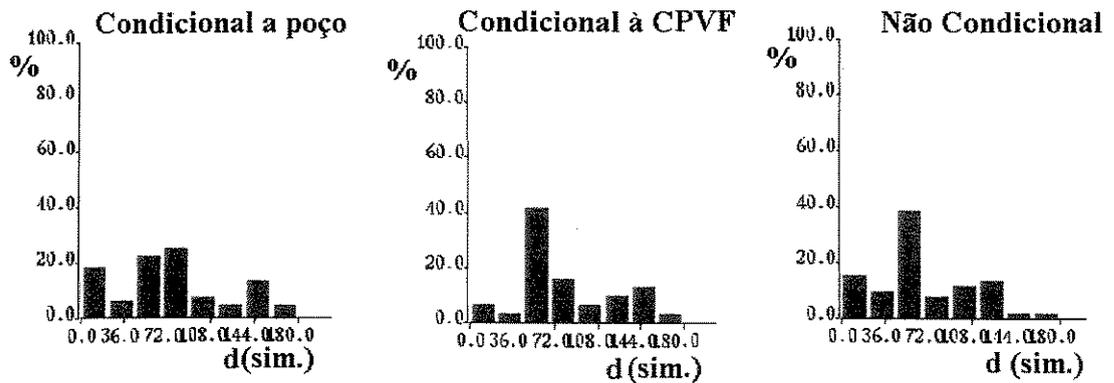


Figura 4-11: Distribuições de direções d , dados simulados.

5. Estudo de caso

A aplicação da metodologia apresentada no Capítulo 3, parte do princípio que as principais heterogeneidades dos reservatórios são causadas pelo processo sedimentológico. Assim sendo, a caracterização de reservatórios pode ser dividida em duas etapas. Na primeira etapa, simula-se o processo sedimentológico cujo produto é o reservatório em questão. Na segunda etapa, simula-se a distribuição das propriedades da rocha. Este estudo de caso fica restrito ao primeiro estágio, através da aplicação da modelagem estocástica de objetos geométricos (MEOG), para a simulação da arquitetura dos reservatórios fluviais, da Unidade Açú 3 da Formação Açú, Bacia Potiguar Emersa.

O modelo MEOG é aplicado em subsuperfície, num volume interno a um campo produtor de petróleo da Bacia Potiguar, densamente perfurado segundo a malha de padrão quadrangular, com espaçamento de 280 m entre os poços.

5.1. Formação Açú, Bacia Potiguar Emersa

A Formação Açú, de idade albo-cenomaniana, representa uma parte da seqüência fluviomarinha transgressiva da Bacia Potiguar emersa. É aflorante nas bordas sul e oeste da Bacia Potiguar, recobre discordantemente a Formação Alagamar e o embasamento cristalino. É composta por depósitos de leques aluviais na porção inferior, passando a depósitos fluviais entrelaçados e meandranes na porção média, que gradam a depósitos transicionais no topo.. A Formação Açú foi subdividida por Vasconcelos *et al.* (1990) em quatro unidades estratigráficas operacionais, com base em características de perfis elétricos, denominadas da base para o topo de: Açú-1, Açú-2, Açú-3 e Açú-4.

A parte da Unidade Açú 3, focalizada nesta dissertação, foi depositada em ambiente fluvial de baixa sinuosidade, segundo os dados levantados. É caracterizada pela alternância de ciclos fluviais de alta e baixa energia, que resultam em sucessões gradacionais normais, variando desde granulometria grossa até fina, truncadas em ciclos de 2 a 16 metros de espessura (após a descompactação). É caracterizada litologicamente por folhelhos com grau incipiente de laminação e arenitos arcoseanos.

As seções geológicas abaixo ilustram os depósitos de preenchimento de canal, interpretados no modelo geológico de Santos e Poletto (1993), onde se observa a descontinuidade lateral tanto dos reservatórios quanto das camadas selantes (Figura 5-1).

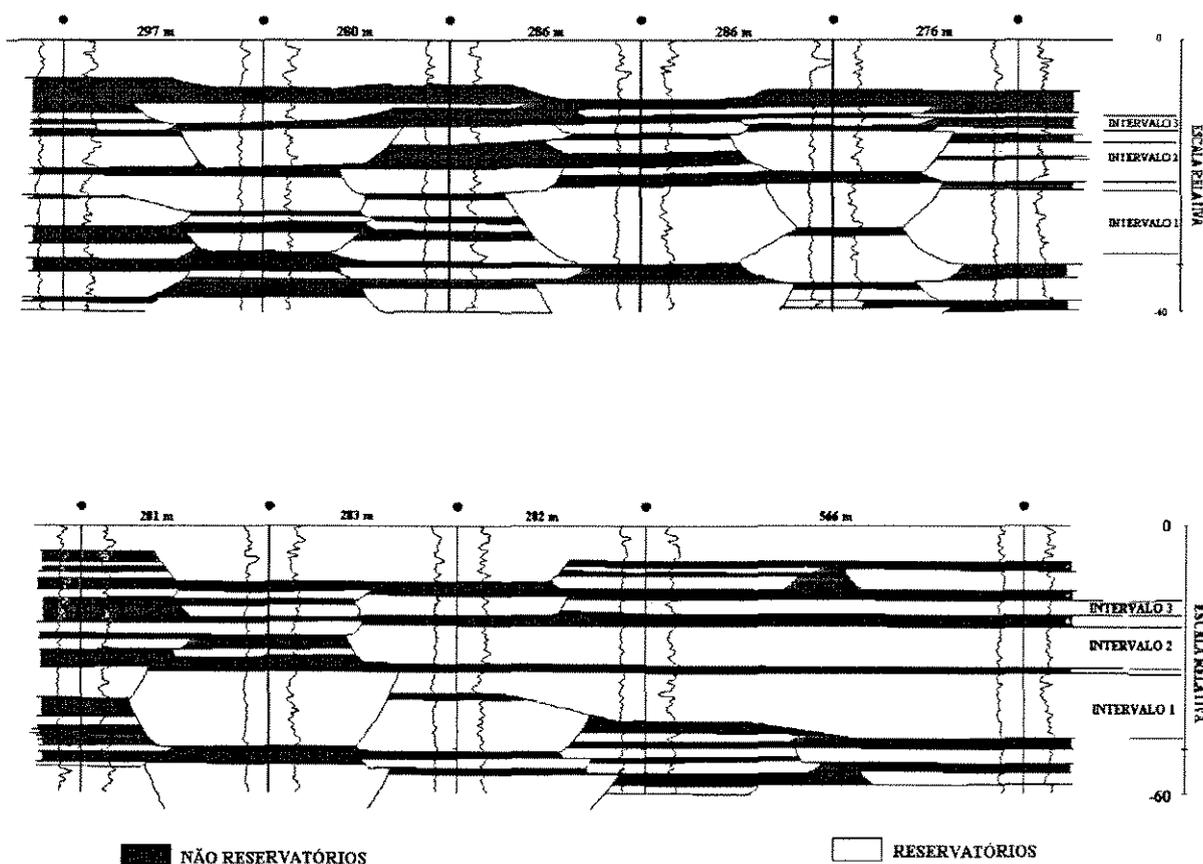


Figura 5-1: Seções estratigráficas na Unidade Açú 3, da Formação Açú. As seções são ortogonais entre si. Escala: horizontal 1/2700, vertical 1/600, (adaptado de Santos e Poletto, 1993).

5.2. Curva experimental da proporção vertical de fácies

Os dados para a construção da curva de proporção experimental foram levantados manualmente sobre as seções geológicas de Santos e Poletto (1993), numa área de 2,7 Km², contendo 30 poços, no intervalo entre os marcos de topo e base da zona estratigráfica a ser modelada, considerando o padrão de resposta das litofácies reservatório e não reservatório em perfis elétricos.

Estes dados, foram transformados em coordenadas estratigráficas conforme a Equação 3-1, e em proporções relativas no programa Petbool. O resultado é a curva de proporção experimental mostrada na Figura 5-2.

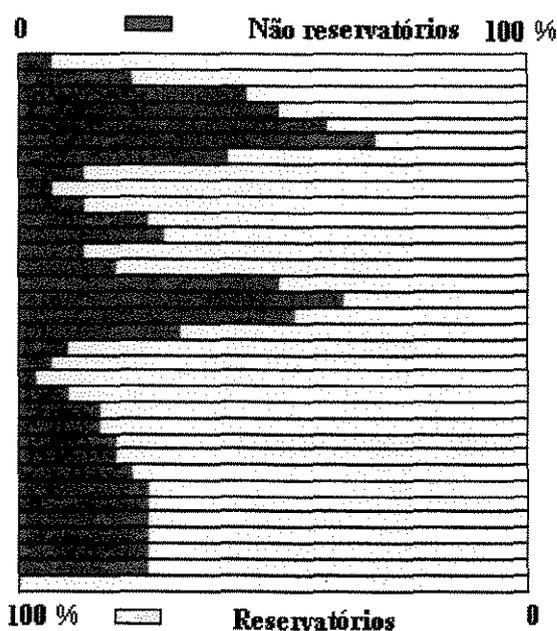


Figura 5-2: Curva de Proporção vertical de fácies (CPVF) calculada com 30 poços. Observa-se dois níveis argilosos separando o intervalo em três subzonas.

A comparação entre as Figuras 3-2 e 5-2, indica grande similaridade. Portanto, estes reservatórios tem um comportamento estratigráfico previsível na área, isto é, o intervalo é composto por três sucessões de granodecrescência ascendente facilmente identificáveis pela presença de dois níveis argilosos proeminentes.

Calculando-se a proporção global de reservatórios através da curva da Figura 5-2 chegou-se também ao valor médio de 75% (este valor médio é igual ao calculado no Item 3.2), com mínimo de 30%, máximo de 100% (na base do intervalo), e mediana em 76%.

Durante as simulações utilizando-se o condicionamento a poços e a CPVF, foi observado que tal combinação exige grande esforço computacional para convergir, e que o número de objetos necessários para isso, é cerca de três vezes maior do que quando sem este condicionamento.

5.3. Histogramas experimentais

Conforme citado no Item 3.3.2, as amostras de espessuras h escolhidas para representar a área, foram medidas em 4 testemunhos do reservatório, embora também pudessem ser utilizados os dados obtidos nas seções geológicas, devido à similaridade entre elas, mostrada na Tabela 3-2.

O uso do parâmetro de espessura variando ao longo do canal não é incorporado neste trabalho, porém a grande proporção de reservatórios constatada, faz com que todos os canais estejam espacialmente em contato entre si, e isto anula o efeito estético causado pela espessura constante.

Como a simulação é feita em ambiente compactado, é utilizada a função de distribuição experimental das espessuras compactadas medidas nos testemunhos (Figura 5-3).

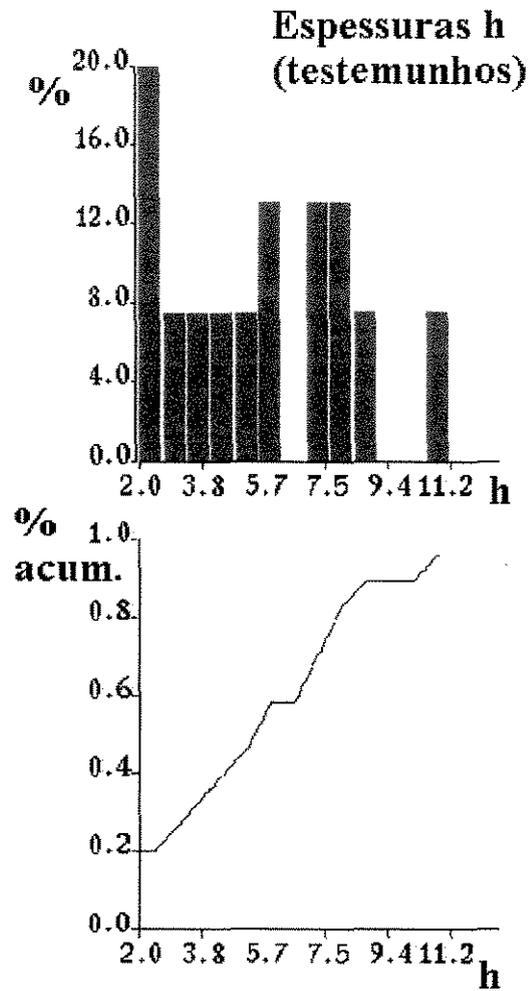


Figura 5-3: Função de distribuição experimental das espessuras (h), dos depósitos de preenchimento de canal, nos poços testemunhados. Estatística: média aritmética 5,72 m; mínimo 2,0 m; máximo 11,2 m; mediana 5,6 m; n° de amostras 15; variância 6,8.

As larguras w dos canais foram estimadas através da Equação 4-1, que é uma adaptação da Equação 2-1, para as correções de descompactação e fatores de Hirst *et al.* (1993) citados nos Itens 3.3.2 e 3.3.3 (Anexo 7).

$$w = 16,372h^{1.54} \quad (4-1)$$

Como w é dependente de h , suas distribuições tem histogramas semelhantes, porém, w tem a seguinte estatística: média aritmética 265,39 m; variância 34241; mediana 217,47 m; mínimo 38,35 m; máximo 848,02 m.

O uso de uma equação para calcular w é justificado porque para cada valor de h existe uma largura w relacionada. Isto não aconteceria se fossem amostrados aleatoriamente h e w em distribuições diferentes, e poderia acontecer de aceitar um canal estreito e profundo numa realização, o que consistiria exceção à regra.

Em relação ao parâmetro sinuosidade s , optou-se por medir seus valores nos mapas de Santos e Poletto (1993) que apesar de ser um modelo de subsuperfície, foi baseado nas seguintes informações: 30 poços de desenvolvimento, dados de pressão de reservatório, 13 mapas geológicos de subsuperfície, 21 seções geológicas compondo um diagramas de cerca, e nos resultados preliminares de um projeto de injeção de água. A função de distribuição experimental do parâmetro sinuosidade s está na Figura 5-4.

O parâmetro direções preferenciais d , foi levantado no mesmo modelo acima citado. Sua distribuição é compatível com as direções de paleocorrentes feitas nos afloramentos análogos por Becker *et al.* (1992), Lanzarini (1995) e com a análise do FMS¹ em Zapparolli *et al.* (1992), havendo uma ampla distribuição entre NW e NE. A função de distribuição experimental das direções preferenciais dos canais utilizadas na simulação está na Figura 5-5.

¹ Formation Micro Scanner™ Schlumberger

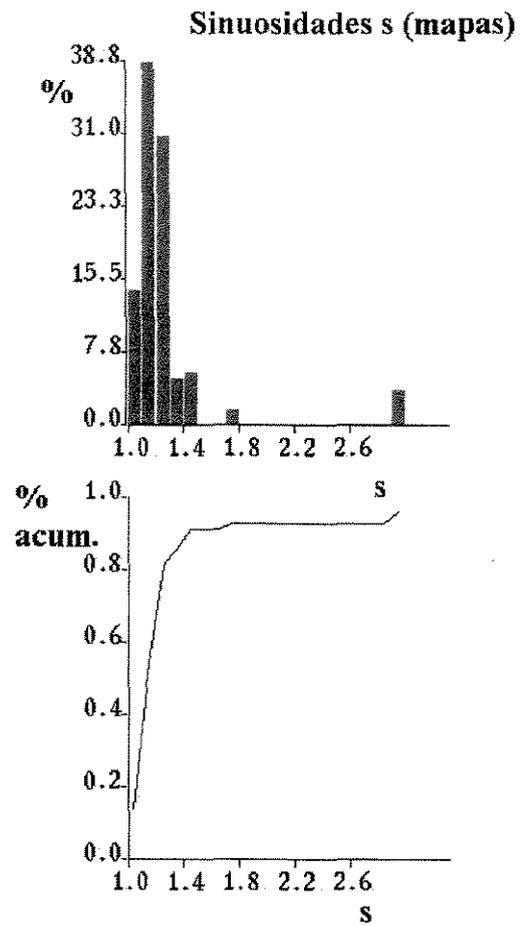


Figura 5-4: Função de distribuição experimental das sinuosidades (s) dos canais, obtidas nos mapas de Santos e Poletto (1993). Estatística: média aritmética 1,26 m; mínimo 1,0m; máximo 3,0 m; mediana 1,14 m;, n° de amostras 49; variância 0,15.

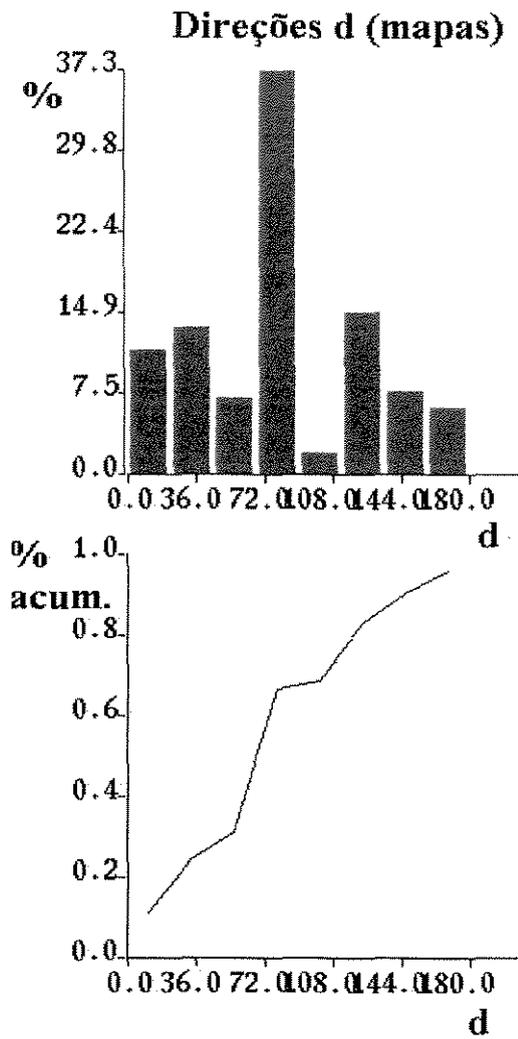


Figura 5-5: Função de distribuição experimental das direções preferenciais (d). Estatística: média aritmética 85°, mínimo 0°, máximo 180°, mediana 90°, n° de amostras 110, variância 2059,96.

5.4. Simulações

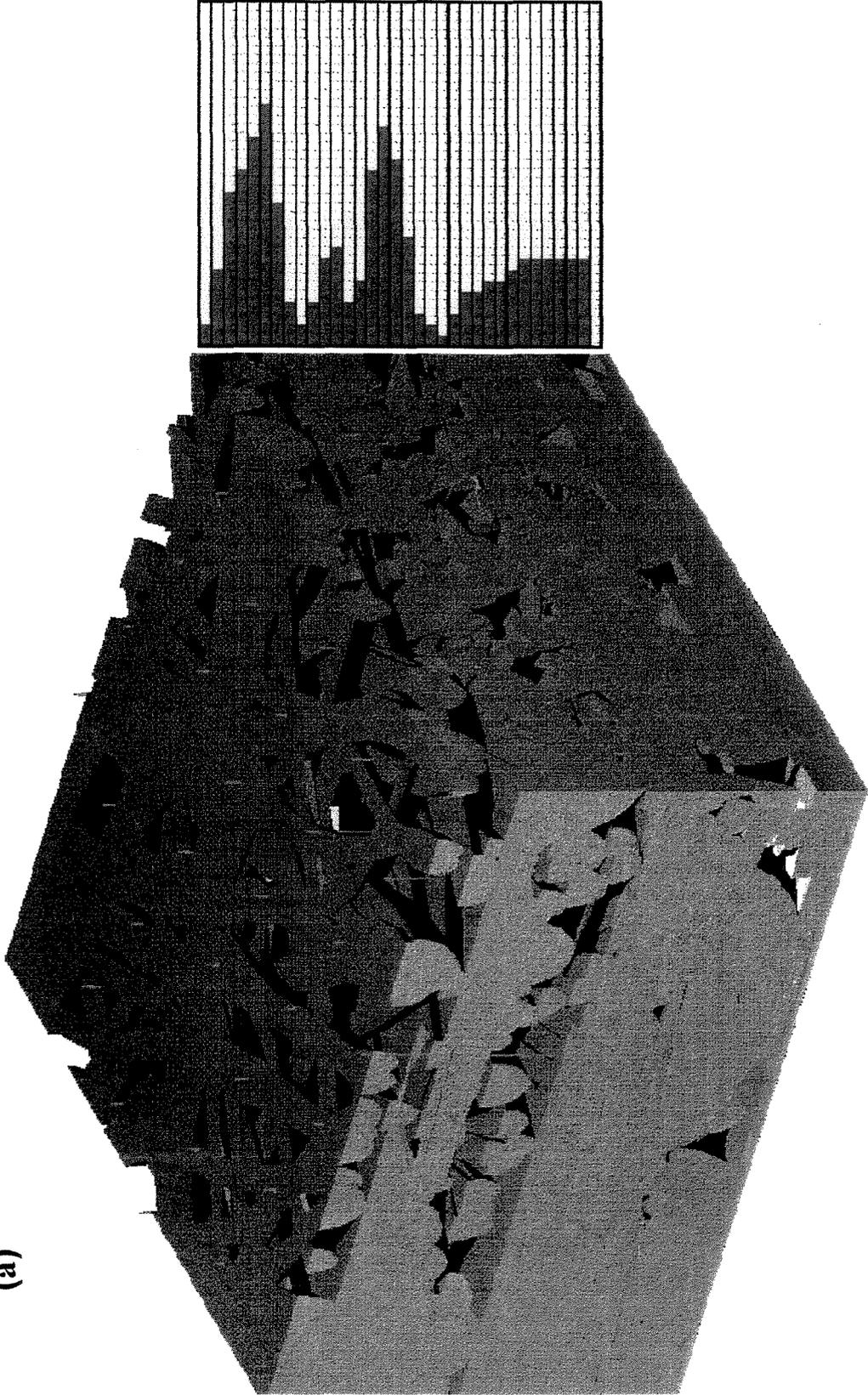
As simulações estocásticas da geometria e da arquitetura dos reservatórios foram realizadas em domínio tridimensional D, medindo 1631.9 x 1629.8 x 34m, subdividido em 10^6 blocos. As realizações são equiprováveis e obedecem as funções de distribuição experimental de cada parâmetro. São consistentes com os dados de campo, com a curva de proporção vertical de fácies (CPVF) e obedecem a uma geometria específica. Só é simulada a litofácies reservatório e os vazios (*voids*, ver a Figura 2-12) são considerados rocha não reservatório.

As Figuras 5-6a e 5-6b mostram duas realizações condicionais e equiprováveis da arquitetura dos reservatórios, consistentes com 30 poços de desenvolvimento (representados pelas marcas verdes sobre a face superior em D), e com a CPVF. Nas faces laterais do domínio D pode ser observado o condicionamento. Os objetos (canais), os vazios e os dois níveis argilosos correspondem respectivamente nos poços com os intervalos de reservatórios, os intervalos de não reservatórios e com os dois picos verdes da CPVF.

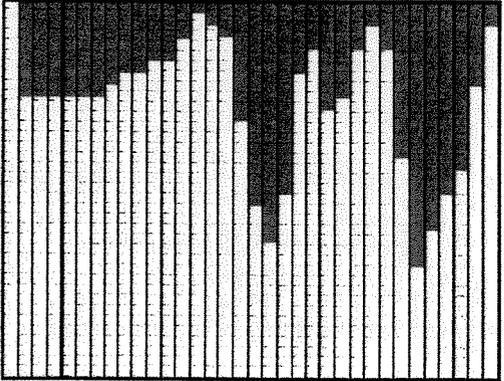
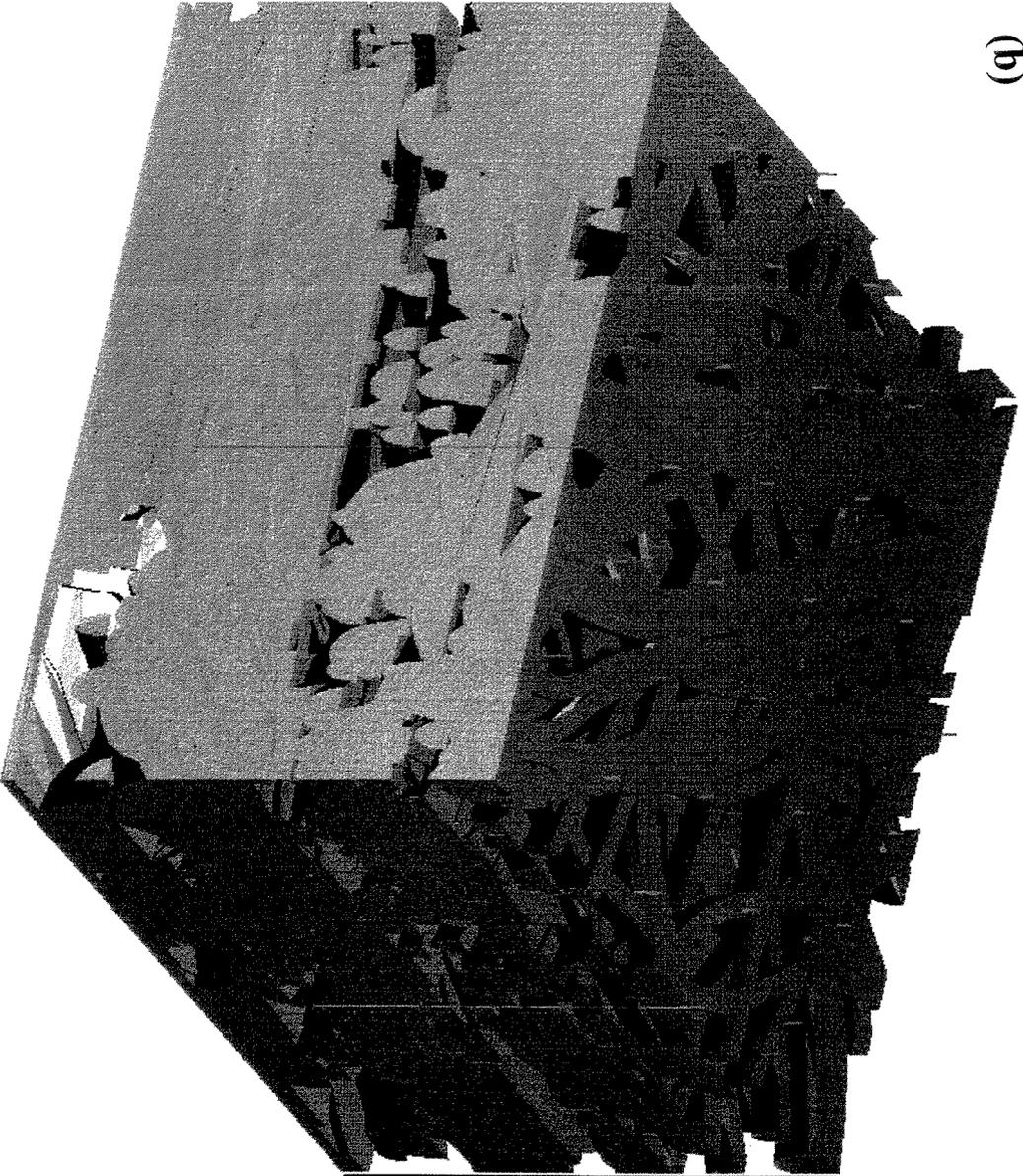
A Figura 5-7a é parte de uma seção geológica de Santos e Poletto (1993), adaptada para o mesmo *datum* da simulação. A linha vertical à direita de cada poço indica os intervalos condicionantes fornecidos ao programa. A Figura 5-7b é um corte numa realização equiprovável, através de um plano que passa no mesmo local da seção geológica. Como pode ser constatado, o condicionamento aos poços, nos intervalos fornecidos, é exato. A simulação fornece uma representação mais realista da geometria e arquitetura dos reservatórios fluviais, podendo ser repetida e atualizada com novos dados de campo, de maneira automática e estocástica.

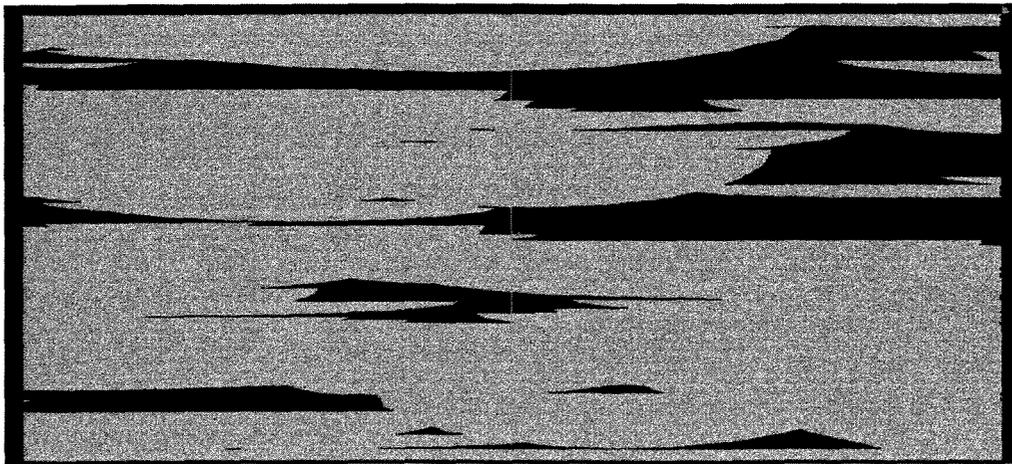
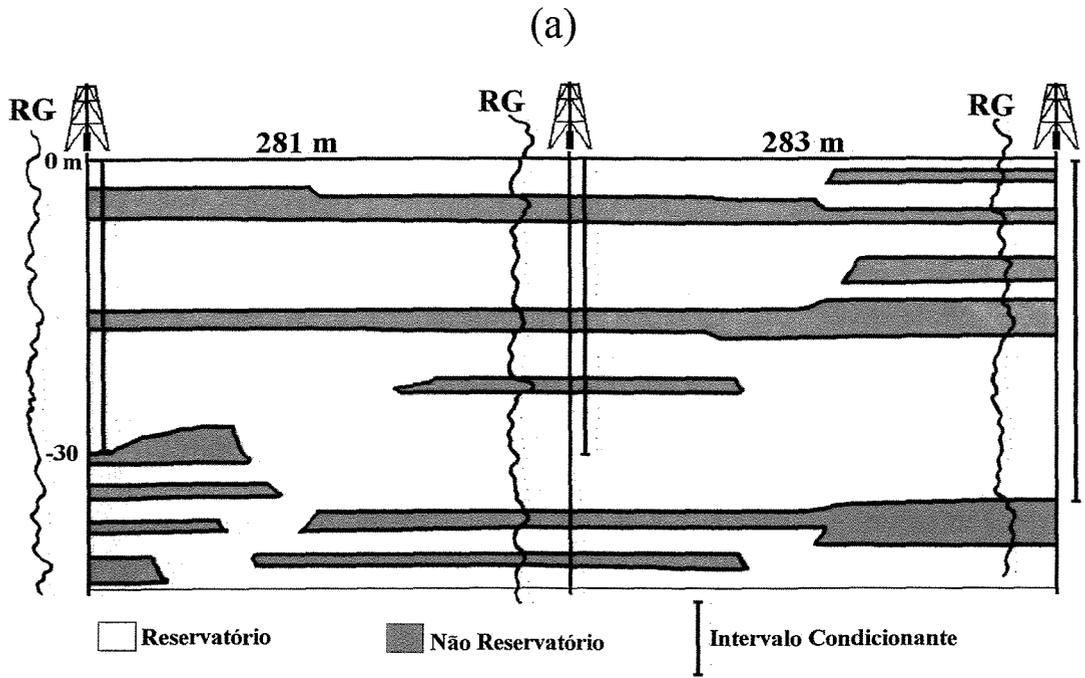
Figura 5-6: Realizações equiprováveis de simulação condicional a 30 poços e CPVF, (a) com 79,7%, (b) com 79,0% em volume relativo de reservatórios. Notam-se que os dois níveis argilosos da CPVF coincidem com dois níveis em predominam os vazios (voids). O domínio D mede 1631,9 x 1629,8 x 34 m. Exagero vertical: 30 vezes.

(a)



(b)





(b)

Figura 5-7: Comparação entre a seção geológica interpretada e a simulada. (a) Seção geológica de Santos e Poletto (1993), adaptada para o mesmo *datum* da simulação. RG: Perfil de Raios Gama. (b) Mesma seção simulada. A cor verde no poço coincide com os vazios (voids) e representam não reservatórios, em amarelo os reservatórios. Nota-se o condicionamento exato aos intervalos fornecidos .

5.4.1. Estatísticas dos parâmetros simulados

No Anexo 5 é apresentada uma tabela com o resumo de 29 simulações de natureza diversas conforme o Item 3.4.41. A seguir são mostradas as estatísticas destes resultados.

5.4.1.1. Espessuras simuladas de reservatórios e não reservatórios

Na Tabela 5-1 é apresentada a estatística da espessura dos corpos gerados em 4 realizações, condicionais a 30 poços e CPVF.

Tabela 5-1: Estatísticas das espessuras dos corpos gerados em 4 realizações condicionais.

	s60	s61	s62	s64
Num. Objetos	774	809	904	797
h_{MEDIO}	3.12	3.15	3.29	3.25
variância _h	2.306	2.286	2.774	2.656

A estimativa da espessura média dos corpos gerados é menor que a espessura média amostral nos testemunhos (5,72 m). O fato de o valor médio das espessuras simuladas ser ligeiramente menor que a média amostral, é um reflexo da estratégia dos *corpos compostos* adotada no algoritmo. Isto significa que, um objeto delgado será facilmente aceito para honrar um determinado intervalo $[z_i, z_{i+1}]$, justamente quando for menor do que intervalo, já que a probabilidade de serem iguais é zero, e a probabilidade de ser maior é pequena porque, conforme a Figura 5-3, os valores delgados são mais

freqüentes.

Outro estimador de espessuras foi por amostragem segundo o eixo z , a cada 10 posições (i, j) no plano xy , da matriz que representa o domínio simulado (Tabela 5-2).

Tabela 5-2: Estatística da espessura dos *corpos compostos* de reservatórios (TH) e dos corpos de não reservatórios (VDH), em 4 realizações condicionais, medidas em 100 posições da matriz que representa o domínio simulado.

	s60		s61		s62		s64	
	TH	VDH	TH	VDH	TH	VDH	TH	VDH
Num. Obietos	301		318		287		304	
TH _{MÉDIO}	7.55		7.62		7.67		7.31	
variância _{TH}	19.167		17.691		18.090		15.089	
VDH _{MÉDIO}		4.23		3.91		4.06		4.13
Variância _{VDH}		3.082		1.929		2.636		2.513

Este estimador mede a distribuição da espessura dos corpos compostos de reservatórios (TH) e também a distribuição da espessura dos corpos de não reservatórios (VDH). Ambas são contagens das indicatrizes 1 e 0 no arquivo de dados simulados.

Em 10 realizações (4 são apresentadas no Anexo 5), verificou-se que, a espessura dos *corpos compostos* segue uma distribuição lognormal, com valores de frequência decrescentes desde 2,0 a 25,8 m, cuja média é 7,4m. A classe mais freqüente está entre 3,7 e 5,4 m. Por sua vez, os corpos de folhelhos tem em média 4,0 m de espessura.

5.4.1.2. Larguras simuladas(dimensões dos reservatórios)

A média de larguras w , simuladas em 20 realizações, ficou entre 94 e 188m. Tais valores são compatíveis com os dados de campo, pois na malha atual de drenagem é difícil correlacionar com segurança um mesmo objeto, em dois poços.

O raios de investigação dos testes de formação a poço revestido indicam dimensões de reservatórios variando desde 3 até 491m. Devido aos tempos curtos de duração dos testes, estas informações são inadequadas para estimar as dimensões dos reservatórios. Porém, são citados aqui, na intenção de fazer comparações qualitativas. Apenas pode-se dizer que as larguras simuladas e os dados dos testes não são compatíveis.

Quanto a razão w/h , os dados simulados variam de 21 a 53, o que enquadra estes reservatórios como originados por rios de padrão entrelaçado na classificação de Swanson (1993), e nos rios de canais móveis segundo Friend (1979).

5.4.1.3. Sinuosidades simuladas

A função de distribuição experimental das sinuosidades é bastante concentrada com média e moda semelhantes. Isto se reflete também nas simulações, onde o valor médio está entre 1,2 e 1,3 e com variância de 0,12. Seriam rios pouco sinuosos considerando o limite de 1,5 de Leeder (1973) (Anexos 5).

5.4.1.4. Direções preferenciais simuladas

As direções preferenciais simuladas refletem o espalhamento na respectiva função de distribuição experimental. Enquanto os dados amostrais tem maior frequência na classe entre 67,5 e 90°, com média de 85°, em 10 realizações as direções simuladas variam de 69 a 75°, com média de 71,4° (Anexos 5).

5.4.2. Estimativa do volume relativo de reservatórios

Ao todo foram realizadas 74 simulações e durante estes exercícios, constatou-se que a simulação condicional a poços e a CPVF aumentava muito o tempo de máquina necessário para concluir uma realização.

Desta forma, verificou-se que a CVPF é um parâmetro muito exigente para ser atendido, especialmente se a margem de erro absoluto, nível a nível, for muito pequena. Neste trabalho, admitiu-se o condicionamento à curva de proporção com o erro absoluto $\pm 12\%$ por nível, conforme a relação:

$$\text{erro absoluto} = |x_{\text{calc}} - x_{\text{orig}}| \leq 0.12$$

onde, x_{calc} é o valor da proporção de reservatórios calculada no nível que está sendo preenchido por um corpo e x_{orig} é o valor condicionante retirado da curva de proporção no mesmo nível.

As Figuras 5-8a e 5-8b são curvas de proporções calculadas em duas realizações condicionais a poço e a CPVF. Observou-se que são muito semelhantes entre si e também à Figura 5-2. As pequenas variações devem-se a margem de erro absoluto acima citada. Portanto, há uma variação estatística da proporção de reservatórios a cada realização.

A estimativa do volume relativo de reservatórios é feita por extrapolação dos volumes informados ao longo da simulação. Isto é, no início de uma realização a proporção de reservatórios é zero. Após condicionar todos os poços, o algoritmo informa o volume relativo de reservatórios necessário para honrar todos os poços (VFCW) do domínio (Tabela 5-3), o que acontece invariavelmente até 10.000 iterações. A realização prossegue para a área entre os poços utilizando a CPVF, e termina quando a curva for satisfeita ou quando a simulação atingir o limite de iterações estabelecido pelo usuário.

Tabela 5-3: Volumes relativos de reservatórios após honrar os 30 poços do domínio.

Simulação	s56	s57	s58	s59	s60	s61	s62	s63	s64	s65
*VFCW(%)	61,01	60,3	57,2	63,0	56,1	57,6	55,4	61,5	58,5	57,2

*Volume For Conditioning Wells

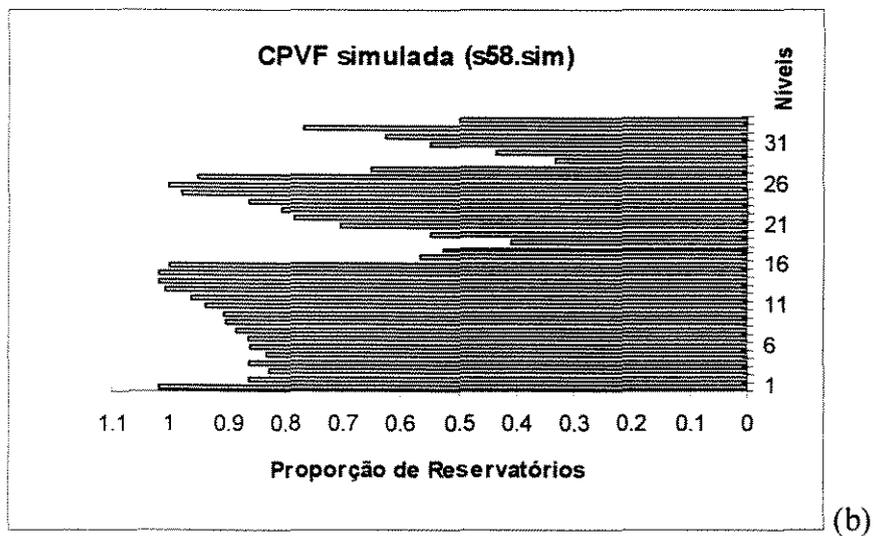
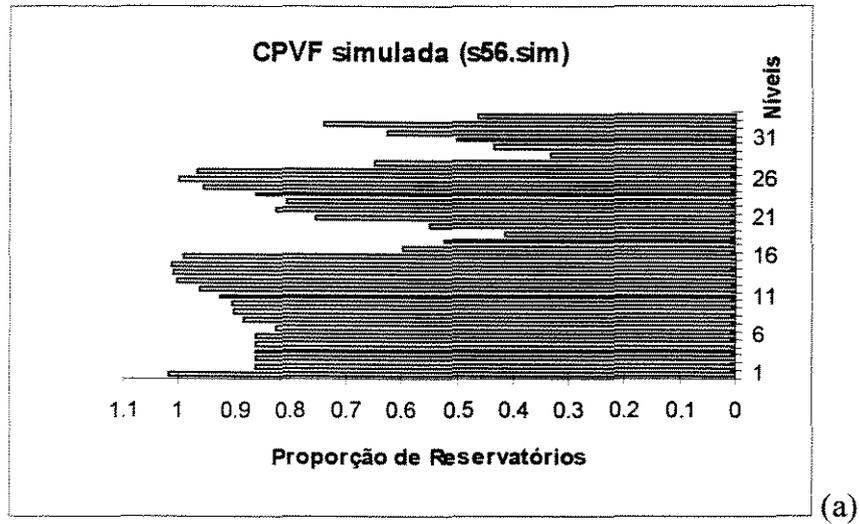


Figura 5-8: Curva de proporção vertical de fácies simuladas em duas realizações (a) e (b).

Considerando que, na simulação s56.sim, após 12 horas e 353.653 iterações (Anexo 5), a proporção de reservatórios atingiu o valor de 809.648 blocos *in*, no cálculo de interioridade, pelas Equações 3-5 e 3-6, e que a partir deste ponto era acrescentado apenas 0,01% no volume de reservatórios por objeto aceito; então, estima-se que o volume relativo de reservatórios no domínio D situa-se entre 80 e 85%, na hipótese de extrapolar a tendência da curva até um milhão de iterações (Figura 5-9). Em consequência, o volume de rochas não reservatório é estimado entre 15 e 20% do volume total.

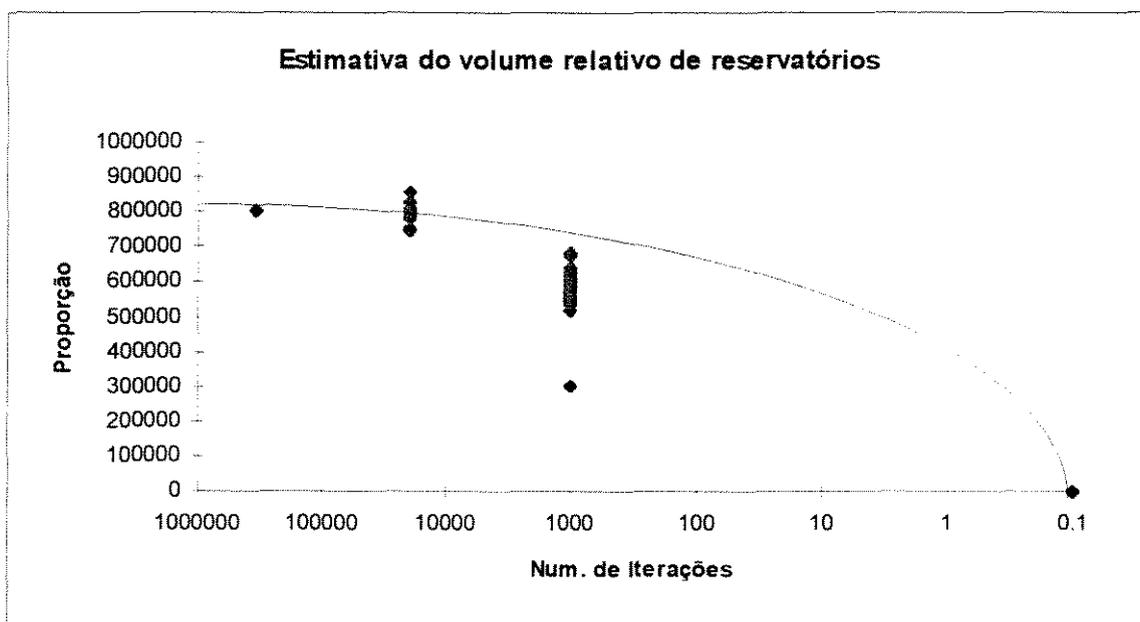


Figura 5-9: Estimativa do volume relativo de reservatórios entre 80 e 85% considerando a hipótese de atingir 1.000.000 de iterações no programa PetBool.

6. Conclusões

Os modelos booleanos e orientados a objetos existentes na literatura, com exceção do modelo aqui proposto, incorporam formas geométricas simplificadas e algoritmos de simulação condicionada a um número pequeno de poços. Tradicionalmente, a sua principal dificuldade tem sido o condicionamento aos poços em domínios tridimensionais, e são úteis para subsidiar a análise de prospectos de custo elevado, na fase em que poucas informações são disponíveis.

Neste trabalho, a unidade genética geologicamente conceituada como depósitos de preenchimento de canal fluvial sinuoso, é parametrizada e modelada geometricamente como um objeto, em ambiente computacional de alta interatividade.

Os parâmetros que definem o objeto canal em três dimensões são: sua seção transversal em forma de semi-elipse, a espessura, a largura, a sinuosidade, a direção preferencial e a declividade.

A similaridade entre as curvas de proporção da área de reconhecimento e da área modelada, indicam a estacionariedade da razão clástica, não sendo necessário sua compartimentação em domínios menores. Portanto, o intervalo tem comportamento estratigráfico previsível, marcado por dois níveis argilosos proeminentes que separam três sucessões de granodecrescência ascendente.

Os dados amostrais de sinuosidade, de razão w/h e proporção clástica indicam o padrão misto de múltiplos canais móveis entre pouco sinuosos a meandrante.

O algoritmo de Modelagem Estocástica de Objetos Geométricos (MEOG)

baseia-se em: modelagem geométrica discreta (MGD), formulações paramétrica e implícita da semi-elipse, cálculo de interioridade, critérios de truncamento e corpos compostos, perturbação aleatória de posicionamento lateral e curva de proporção vertical de fácies.

O MEOG retornou respostas e desempenho, coerentes na análise de sensibilidade quanto à variação nos parâmetros de entrada. Forneceu representações realistas da geometria e arquitetura de reservatórios fluviais, e os resultados esperados, em relação a diversos tipos de condicionamento, tais como: a um número grande de poços, às funções de distribuições experimentais de parâmetros e à curva de proporção vertical de fácies.

Ao comparar simulações de condicionamentos diferentes, observa-se que a combinação de condicionamento a poço e à curva de proporção, gasta o dobro do tempo para ser concluída, e utiliza aproximadamente três vezes mais objetos. Isto indica que a curva é um parâmetro muito exigente para ser atendido.

O condicionamento à curva de proporção de fácies favorece a distribuição espacial dos objetos na área interpoços, compatível com os dados. Como nesta modelagem foi utilizado um número relativamente grande de poços para condicionar o modelo, e para construir a curva, é de supor que, a distribuição espacial dos objetos a ela condicionados, seja bastante representativa.

A comparação entre as seções simulada e a interpretada, mostra como era esperado, que os dados coincidem nos poços, além disso, a seção simulada reproduz melhor a geometria dos canais e o seu empilhamento diagonal.

A comparação entre as distribuições dos parâmetros de entrada e simulados, do estudo de caso, indica que os histogramas são similares quanto à forma, porém não exatamente iguais, havendo uma regularidade estatística do modelo estocástico.

O fato da espessura média de reservatórios simulados ser ligeiramente menor que a média amostral deve-se à estratégia dos corpos compostos, que pode utilizar vários

canais para honrar um determinado intervalo de reservatório no poço. Isto acarreta a diminuição da média de espessuras geradas.

O cálculo da proporção relativa de reservatórios, feito sobre a curva de proporção, indica 75%, porém a indicação das simulações é entre 80 e 85%. Ambos os cálculos estão corretos, a discrepância das estimativas está relacionada com as dimensões onde são feitas. Ao serem utilizados volumes para honrar medidas lineares, é esperado que as proporções diverjam, portanto a estimativa das simulações representa melhor o volume de reservatórios.

Esta metodologia indica que, a geometria e a arquitetura de reservatórios fluviais, podem ser reproduzidas em ambiente interativo, com base nos depósitos de preenchimento de canal fluvial, de maneira estocástica e consistente com os dados de campo. No entanto, as incertezas quanto a distribuição de volumes de reservatórios permanecem, devido a natureza estocástica dos processos fluviais, contudo, a técnica aqui apresentada fornece os meios necessários à sua quantificação, através da análise das distribuições de volumes de reservatório e de volumes conectados ao(s) poço(s).

As realizações tridimensionais são equiprováveis e representam apenas uma possibilidade entre várias. O mais importante é o condicionamento aos poços, que tradicionalmente tem sido a maior dificuldade enfrentada pelos métodos booleano e orientado a objetos.

Neste trabalho foram estabelecidos critérios para a modelagem do objeto canal. Outros critérios, apropriados para outros objetos, precisam ser definidos para a modelagem dos reservatórios equivalentes.

Com a incorporação de funções de distribuição de propriedades de rocha e de transferência de escala, este algoritmo poderá subsidiar os estudos de comportamento de fluxo de reservatórios e a liberação de locações.

GLOSSÁRIO

Análogo: Diz-se do afloramento bem exposto ou do reservatório densamente perfurado cujas rochas foram formadas em condições similares às do reservatório em estudo. São usados critérios de *similaridade* para escolher um análogo.

Caracterização de reservatórios: A descrição e quantificação das propriedades das rochas (*porosidade, permeabilidade, saturação de fluidos*) e da sua variabilidade espacial.

Cinturão meandrante: Conjunto de canais empilhados vertical e diagonalmente, na planície de inundação.

Consistente: É o dado simulado que honra o dado condicionante.

Correções de Hirst: Nesta dissertação, são as correções devidas à probabilidades de um poço atravessar um canal na sua espessura máxima. Segundo Hirst et al. (1993), as espessuras de canais atravessadas por poços são mais provavelmente frações da espessura máxima.

CPH: Curva de proporção horizontal de fácies.

CPVF, CPVFH: Curva de proporção vertical de fácies. Curva de proporção vertical de fácies construída no programa HERESIM.

Domínio D, ou W: Domínio em \mathfrak{R}^3 que é definido pelos dados de entrada xyz .

Estocástico: Propriedade estatística de certos modelos, em que o mesmo conjunto de variáveis, em sendo simuladas, não conduzem ao mesmo resultado, porém há uma regularidade estatística deles.

Handle Edge: Estrutura de dados da modelagem geométrica discreta para a representação de superfícies abertas e fechadas (orientação pela mão direita).

Operadores de Morse: São operadores topológicos.

Ôndulas: Marcas de onda de pequena escala.

TH: *Thickness histogram*. espessura contínua dos corpos compostos (canais) simulados.

VDH: *Vertical distance histogram*. espessura de não reservatórios simulados.

VFCW: *Volume for conditioning wells*. é o volume relativo de canais necessário para condicionar todos os poços do domínio.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALLEN, J.R.L. Sedimentary structures: Their character and physical basis.. New York: Elsevier, 1984. p.53-70. (Developments in Sedimentology, v. 30).
- ATHY, I.F. Density, Porosity, and compaction of sedimentary rocks. **The American Association of Petroleum Geologists Bulletin**, Tulsa, v.14, n.1, p.1-24. 1930.
- AUGEDAL, H.O., OMRE, H., STANLEY, K. O. SISABOSA: a program for stochastic modelling and evaluation of reservoir geology. In: NITTEBERG, J. PROCEEDINGS OF A CONFERENCE ON A RESERVOIR DESCRIPTION AND SIMULATION WITH EMPHASIS ON EOR. 1986, Oslo. Institute for Energy Technology.
- BAKER, V.R. Adjustment of fluvial systems to climate and source terrain in tropical and sub tropical environments. MIALL, A.D. Fluvial Sedimentology. Calgary: Canadian Society of Petroleum Geologists, 1978. p. 211- 230. Memoir 5.
- BALDWIN, B., BUTLER, C. O. Compaction curves. **The American Association of Petroleum Geologists Bulletin**, Tulsa, v.69, n.4, p.622-626. 1985.
- BARTON, M., et al. Characterization of heterogeneity style and permeability structure in fluvial reservoirs. Bureau of Economic Geology. The University of Texas at Austin. (Relatório final, contrato N° 6502032931). 42p. (anexos). 1995.
- BECKER, M.R., et al. Estudos de afloramentos para a modelagem geológica e geoestatística do reservatório fluvial da Formação Açu, Bacia Potiguar. In: SEMINÁRIO DE GEOLOGIA DE DESENVOLVIMENTO DE RESERVATÓRIO, 5, 1992, Rio de Janeiro. Anais... Rio de Janeiro, PETROBRAS, 1992. p.45-56. v.1.
- BRIDGE, J.S., MACKAY, S.D. A theoretical study of fluvial sandstone body dimensions. In: The Geological Modeling of Hydrocarbon Reservoirs and Outcrop Analogues. **Spec. Pubs. int. Ass. Sediment**, 15. p.213-236. 1993.
- BRISTOW, C.S. Recent developments in fluvial sedimentology. **SEPM Special Publication**. 1987. v.39. Brahmaputra River: channel migration and deposition. p.63-74.
- BRYANT, I.D., FLINT, S.S. The Geological Modeling of Hydrocarbon Reservoirs and Outcrop Analogues. **Spec. Pubs. Int Sediment**. 1993. v.15. Quantitative clastic reservoir geological modelling: problems and perspectives. p.3-20.
- BUSSAB, W.O., MORETTIN, P.A. Estatística Básica. Métodos Quantitativos. 4. ed. São Paulo. Atual, 1940. p.1-111.
- CHESSA, A.G. Conditional simulation of spatial stochastic models for reservoir heterogeneity. The Netherlands, 1995, 173p. Tese de Doutorado em heterogeneidades de reservatórios. Delft University.

- CLEMENTSEN, et al. A computer program for evaluation of fluvial reservoirs. In: BULLER, A. T., KING, P.R. North Sea Oil and Gas Reservoirs - II. London: Graham Trotman, 1990. p. 373-386.
- COLEMAN, J.M. Brahmaputra River: channel processes and sedimentation. *Sedimentary Geology*, v.3, p.129-239. 1969.
- CRESSIE, N.A.C. Statistics for spatial data. EUA: John Wiley, 1991. p.726-731.
- DAMSLETH, E., et al. A two-stage stochastic model applied to a north sea reservoir. **Society of Petroleum Engineers**, Dallas, SPE 20605. p.791-802. 1990.
- DEUTSCH, C.V., LANG, W. Hierarchical Object-Based Stochastic Modeling of Fluvial Reservoirs. In: STANFORD CENTER FOR RESERVOIR FORECASTING (SCRF). Report 9, May 16-17 1996. Stanford University. 51p.
- DUBRULE, O. Geostatistics. The Netherlands: Kluwer Academic Publishers, 1989. v.2. A review of stochastic models for petroleum reservoirs. p.493-506.
- DUBRULE, O. Introducing more geology in stochastic reservoir modelling. In: CONGRESSO DE GEOESTATÍSTICA, 1992, Tróia. Anais... Portugal. 1992. p.351-369.
- FARIAS, P.R.C. Evolução do ambiente deposicional da Formação Açú no campo de Canto do Amaro/Alto da Pedra. In: SEMINÁRIO DA LINHA DE CIARNEIRA DE AREIA BRANCA, 1988, Natal. PETROBRAS/DEBAR. 10p.
- FRANÇA, R.L. Análise estratigráfica da Fm Açú no campo de Fazenda Belém - Bacia Potiguar, CE. Ouro Preto, 1987. 101p. Dissertação de Mestrado em Estratigrafia, Universidade Federal de Ouro Preto.
- FREULON, X.C., DUNDERDALE, I.D. Integrating field measurements with conceptual models to produce a detailed 3D geological model. **Society Of Petroleum Engineers**, Dallas, SPE 28877. p.99-108. 1994.
- FRIEND, P.F., Towards de Field Classification of alluvial architecture or sequence. In: COLLINSON, J.D., LEWIN, J. Modern and Ancient Fluvial Systems. Int. Assoc. Sediment. Spec. Publ., 6. 1983. p:345-354.
- GUNDESø, R., EGELAND, O. SESIMIRA - A new geological tool for 3-D modeling of heterogeneous reservoirs. In: BULLER, A.T. KING, P.R. North Sea Oil and Gas Reservoirs - II. London: Graham & Trotman, 1990. p.363-371.
- GRIVET, M., et al. Modeling digital terrain. Pré-publicação nº 21/95. Rio de janeiro: Deptº de Matemática Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, 1995. 15p.
- HALDORSEN, H.H. Reservoir characterization procedures for numerical simulation. Texas, 1983, 556p. Tese de Doutorado em Caracterização de Reservatórios e Simulação Numérica de Fluxo, University of Texas.

- HALDORSEN, H.H., LAKE, L.W. A new approach to shale management in field-scale models. **Society of Petroleum Engineers**, Dallas, p. 447-452. Aug.1984.
- HALDORSEN, H.H., McDONALD, C.J. Stochastic modeling of underground reservoir facies (SMURF). **Society of Petroleum Engineers**, Dallas, SPE 16751, p.99-113. 1987.
- HALDORSEN, H.H., DAMSLETH, E. Stochastic modeling. **Journal of Petroleum Technology**. Richardson, Texas, p.404-412. Apr.1990.
- HAMILTON, D.E., JONES, T. A. Computer modeling of geologic surfaces and volumes. In: Computer Application in Geology. Tulsa: American Association of Petroleum Geologists, 1992. 297p. n.1.
- HATLØY, A.S.. Numerical Facies Modeling Combining Deterministic and Stochastic Methods. In: YARUS, J M., CHAMBERS, R. Stochastic Modeling and Geostatistics, Principles, Methods and Case Studies. Computer Applications in Geology. Tulsa: American Association of Petroleum Geologists, 1994. p.109-120. n.3.
- HIRST, J.P.P., BLACKSTOCK, C.R., TYSON, S. Stochastic modelling of fluvial sandstone bodies. In: STEPHEN S. F., BRIANT, I.D. The Geological Modeling of Hydrocarbon Reservoirs and Outcrop Analogs. Spec. Publs. int. Assoc.of Sediment Blackwell Scientific Publication, 1993. p.237-252. v.15
- JACKSON, R. G. 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.
- JOHNSON, C.R., JONES, T.A. Putting geology into reservoir simulations: A three-dimensional modeling approach. ANNUAL TECHNICAL CONFERENCE AND EXHIBITION, Oct 2-5, 1988, Houston. Society of Petroleum Engineers, Dallas, SPE 18321, 1988. p.585-594.
- KEIJZER, J.H., KORTEKAAS, R.F.M. Comparison of deterministic and probabilistic simulation models of channel sands in the Statfjord reservoir, Brent Field. The Hague. **Society of Petroleum Engineers**, Dallas, SPE 20947. 1990. (apresentado na EUROPEC 90).
- KERR, D.R., JIRIK, L.A. Fluvial architecture and reservoir compartmentalization in the oligocene middle Frio Formation, South Texas. Transactions - **Gulf Coast Association of Geological Societies**. v.XL. p.373-380. 1990.
- KIANG, H.C., et al. Manual do Sistema de Simulação de Bacias BaSS, Versão 2.0. Rio de Janeiro: Petrobrás/Cenpes/Divex, 1991. P.27-28 e p.386-389.
- KRUM, G.L., JOHNSON, C.R.. A 3-D modelling approach for providing a complex reservoir description for reservoir simulation. **Spec. Publs. int. Ass. Sediment.**, 15. p.253-258. 1993.

- LANTUÉJOUL, C. Random sets and functions from models to conditional simulations. 1995. 141p. (notas).
- LANZARINI, W.L. Fácies sedimentares e geometria deposicional da Formação Açu, (Unidade Açu-3), Cretáceo Superior da Bacia Potiguar. In: SIMPÓSIO SOBRE O CRETÁCEO DO BRASIL, 3, 1994, Rio Claro-SP. Boletim... Universidade Estadual de São Paulo, p.39-41.
- LANZARINI, W.L. Modelos e Simulações de Fácies e Sequências Sedimentares Fluviais e Eólicas de Reservatórios Petrolíferos. São Paulo, 1995, 205p. Tese de Doutorado em modelos deposicionais e geomatemáticos de sistemas fluviais e eólicos. Universidade de São Paulo.
- LANZARINI, W.L., et al. Petbool - Modelador estocástico/booleano da geometria e heterogeneidades de reservatórios petrolíferos. In: WORKSHOP SOBRE CARACTERIZAÇÃO E ENGENHARIA DE RESERVATÓRIOS, I, 1995, Campinas. Anais...Campinas, Cepetro Universidade Estadual de Campinas, 1995. p.26-27.
- LANZARINI, W.L., et al.. Modelagem Estocástica/Booleana da geometria tridimensional de reservatórios de petróleo. In: CONGRESSO LATINO AMERICANO DE HIDROCARBUROS, 5, 13-17/10/96, Rio de Janeiro.1996a. (CONEXPO ARPEL'96).
- LANZARINI, W.L., et al. Modelagem Geológica Orientada a Objetos. Rio de Janeiro: Pré-publicação nº 03/96. Deptº de Matemática, Pontificia Universidade Católica do Rio de Janeiro. 15p. 1996b.
- LEEDER, M.R. Fluvialite fining-upward cycles and the magnitude of paleochannels. **Geological Magazine**. v.110. p.265-276. 1973.
- LEOPOLD, L.B., WOLMAN, M.G. River meanders. **Geological Society of America Bulletin**, v.71. p.769-794. 1960.
- LOPES, H., PESCO, S., TAVARES, G. The MatComp Visualization Environment: A Description. Rio de Janeiro. Pré-publicação nº 22/95. Deptº de Matemática, Pontificia Universidade Católica do Rio de Janeiro, 21p. 1995.
- LORENZ, J.C., et al. Determination of Widths of Meander-Belt Sandstone Reservoirs from Vertical Downhole Data, Mesa Verde Group, Piceance Creek Basin, Colorado. **American Association of Petroleum Geologists Bulletin**, Tulsa, v.69. n.5. p.710-721. 1985.
- MALLET, J.L. Discrete Smooth Interpolation. **ACM Transactions on Graphics**, v.8, n.2 p.:121 -144. Apr.1989.
- MALLET, J.L. Discrete Smooth Interpolation in geometric modelling. **CAD**, v.24, n.4, p.177 -191. 1992.

- MACDONALD, A.C., HALLAND, E.K. Sedimentology and Shale Modeling of a Sandstone-Rich Fluvial Reservoir: Upper Statfjord Formation, Statfjord Field, Northern North Sea. **American Association of Petroleum Geologists Bulletin**, Tulsa, v.77, n.6, p.1016-1040. 1993.
- MAGARA, K. Compaction and fluid migration. Practical petroleum geology. New York: Elsevier, 1978. p.11-29.
- MATHERON, G. Eléments pour une théorie des milieux poreux. Paris: Masson, 1967.
- MATHERON, G. Random sets and Integral Geometry. New York: John Wiley, 1975.
- McBRIDE, E. F. A classification of common sandstones. **Journal of Sedimentary Petrology**, v.33, n.3, p.664-669. Sept.1963.
- MARTIN, J.H. A review of braided fluvial hydrocarbon reservoirs: the petroleum engineer's perspective. In: BEST, J.L., BRISTOW, C.S. Braided Rivers. London: Geological Society Special Publication n. 75, 1993. p.333-367.
- MARTIN, J.H., COOPER, J.A. An integrated approach to the modelling of permeability barrier distribution in a sedimentologically complex reservoir. In: ANNUAL TECHNICAL CONFERENCE AND EXHIBITION, 59TH, Sept. 16-19, 1984, Houston. Anais... Dallas, Society of Petroleum Engineers, SPE 13051, 1984. 10p.
- MATHERON, G., et al. Conditional simulation of the geometry of fluvio-deltaic reservoirs. In: ANNUAL TECHNICAL CONFERENCE AND EXHIBITION, 62TH, Sept. 27-30, 1987, Dallas. Anais...Dallas, Society of Petroleum Engineer, SPE 16753, 1987. p.123-131.
- MIALL, A.D. Fluvial sedimentology. Calgary: Canadian Society of Petroleum Geologists, 1978. 859p. Memoir 5.
- MIALL, A.D. Architectural-Element Analysis: a New Method of Facies Analysis Applied to Fluvial Deposits. *Earth Science*, Amsterdam, v.22, p. 261-308. 1985.
- MIALL, A.D. Reservoir heterogeneities in fluvial sandstones: lessons from outcrop studies. **American Association of Petroleum Geologists Bulletin**, Tulsa, v.72, n.6, p.682-697. 1988a.
- MIALL, A.D. Architectural Elements and Bounding Surfaces in Fluvial Deposits: Anatomy of the Kayenta Formation (Lower Jurassic), Southwest Colorado. **Sedimentary Geology**, v.55, p.233-262. 1988b.
- NIBRATEN, G., SKOLEM, E., ØSTBY, K. Reservoir simulation of the Snorre Field . In: NORTH SEA OIL AND GAS RESERVOIRS, II, May 8-11, 1989, Trondheim, Norway. Anais...London, Norwegian Institute of Technology, 1990. p.103-114.

- NONATO, L.G., TAVARES, G. Reconstrução tridimensional de imagens tomográficas. Rio de Janeiro. Pré-publicação n° 23/95. Dept° de Matemática. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. 27p. 1995.
- POLETTI, C.A. et al. Campo de Canto do Amaro: Levantamento litológico via computador. In: SEMINÁRIO DE GEOLOGIA DE DESENVOLVIMENTO DE RESERVATÓRIOS, 5, 1993, Rio de Janeiro. Anais... Rio de Janeiro, PETROBRAS/DEPEX, 1993. p.787-798. v.2.
- POLETTI, C.A. et al. Parametrização e modelagem geométrica de canais fluviais dos reservatórios da Formação Açu. In: SEMINÁRIO DE RESERVAS E RESERVATÓRIOS, 1, 1996, Rio de Janeiro. Anais... Rio de Janeiro, PETROBRAS, 1996. p.269-275.
- REMACRE, A.Z. Conceitos Introdutórios de Simulação Estocástica, Campinas, 1995. 65p. Universidade Estadual de Campinas. (versão provisória).
- RIPLEY, B.D. Stochastic Simulation. New York: John Wiley, 1987. p.100-117.
- RIPLEY, B.D. Spatial Statistics. New York: John Wiley, 1981. p.13-14.
- RUBEY, W.W., HUBBERT, M.K. Role of Fluid Pressure in Mechanics of Overthrust Faultings. **Geological Society of America Bulletin**, v.70, p.167-206. 1959.
- SANTOS, M.B., POLETTI, C.A. Análise Faciológica dos Arenitos Fluviais da Formação Açu, Zona 400 - Campo de Canto do Amaro. In: SEMINÁRIO DE GEOLOGIA DE DESENVOLVIMENTO DE RESERVATÓRIOS, 5, 1993, Rio de Janeiro. Anais... Rio de Janeiro, PETROBRAS/DEPEX, 1993. p.505-520. v.2.
- SCHENK, C.J. Geometry of Fluvial Point-Bar Sandstones and Application to Horizontal Drilling. In: SCHMOCKER, J.W., COALSON, E.B., BROWN C.A. Geological Studies Relevant to Horizontal Drilling: Examples from Western North America. Rocky Mountain Association of Geologists, 1992. p.61-66.
- SIMON, V.H., UZUMAKI, E.T. Curvas de Proporções. In: WORKSHOP SOBRE CARACTERIZAÇÃO E ENGENHARIA DE RESERVATÓRIOS, 1, 1995, Campinas. Anais... Campinas: CEPETRO/UNICAMP. 1995. p.104-106.
- SMITH, R.M.H. Morphology and Depositional history of exhumed Permian point bars in the Southwest Karoo, South Africa. **Journal of Sedimentary Petrology**, v.57, p.19-29. 1987.
- SRIVASTAVA, M.R. An Overview of Stochastic Methods for Reservoir Characterization. In: YARUS, J. M., CHAMBERS, R. Stochastic Modeling and Geostatistics, Principles, Methods and Case Studies, Computer Applications in Geology. Tulsa: American Association of Petroleum Geologists, 1994. p.3-17. n.3.

- STANLEY, K.O. et al. Stochastic Modeling of Reservoir Sand Bodies for Input to Reservoir Simulations, Snorre Field, Northern North Sea, Norway. In: NORTH SEA OIL AND GAS RESERVOIRS, II, May 8-11, 1989, Trondheim, Norway. Anais...London, Norwegian Institute of Technology, 1990. p. 91-102.
- STOYAN, D., KENDALL, W.S., MECKE, J. Stochastic Geometry and its Applications. Berlin: John Wiley. 1987. 345 p.
- SURO-PEREZ, V., MARTINEZ, L.R., PINO, A.V. An algorithm for stochastic simulation of sand bodies. **Society of Petroleum Engineers**, Dallas, SPE 27024, p.1171-1178. 1994.
- SVANES, T., et al. Detailed stochastic modelling of a proximal fluvial reservoir with realizations used in flow simulation. **Society of Petroleum Engineers**, Dallas, SPE 28873, p.69-87. 1994.
- SWANSON, D.C. The importance of Fluvial Processes and Related Reservoir Deposits. **Journal of Petroleum Technology**. Richardson, Texas, v.45, n.4, p.368-377. Apr.1993.
- TAVARES, G., et al. Simulação orientada a objetos de reservatórios petrolíferos: Condicionamento a poços. Rio de Janeiro. Pré-publicação n° 04/96. Dept° de Matemática, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. 30p. 1996a.
- TAVARES, G., et al. PetBool 1.0 Manual do Usuário e de Referência. Rio de Janeiro: Laboratório MatComp/Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro/Petrobras/Cenpes. 1996b. 77p.
- TAVARES, G., LANZARINI, W.L. Projeto PetBool - Relatório de Especificação da Abrangência do Projeto. Rio de Janeiro, 1996, 11p. Petrobras/Cenpes/Diger-Laboratório MatComp. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. (figuras).
- TETZLAFF, D.M., HARBAUGH, J.W. Simulating clastic sedimentation. New York: Van Nostrand. 1989. 202 p.
- 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. Stochastic Modeling and Geostatistics, Principles, Methods and Case Studies, Computer Applications in Geology. Tulsa: American Association of Petroleum Geologists, 1994. p.77-89. v.3.
- VAN VARK, W., et al. Construction and validation of a numerical model of a reservoir consisting of meandering channels. **Society of Petroleum Engineers**, Dallas, p.9-14. Feb.1994.
- VASCONCELOS, E.P., LIMA NETO, F F., ROOS, S. Unidades de Correlação da Formação Açú, Bacia Potiguar. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 36, 1990, Natal. Anais...Natal, Sociedade Brasileira de Geologia, 1990. p.227-240. v.1.

- STANLEY, K.O. et al. Stochastic Modeling of Reservoir Sand Bodies for Input to Reservoir Simulations, Snorre Field, Northern North Sea, Norway. In: NORTH SEA OIL AND GAS RESERVOIRS, II, May 8-11, 1989, Trondheim, Norway. Anais...London, Norwegian Institute of Technology, 1990. p. 91-102.
- STOYAN, D., KENDALL, W.S., MECKE, J. Stochastic Geometry and its Applications. Berlin: John Wiley. 1987. 345 p.
- SURO-PEREZ, V., MARTINEZ, L.R., PINO, A.V. An algorithm for stochastic simulation of sand bodies. **Society of Petroleum Engineers**, Dallas, SPE 27024, p.1171-1178. 1994.
- SVANES, T., et al. Detailed stochastic modelling of a proximal fluvial reservoir with realizations used in flow simulation. **Society of Petroleum Engineers**, Dallas, SPE 28873, p.69-87. 1994.
- SWANSON, D.C. The importance of Fluvial Processes and Related Reservoir Deposits. **Journal of Petroleum Technology**. Richardson, Texas, v.45, n.4, p.368-377. Apr.1993.
- TAVARES, G., et al. Simulação orientada a objetos de reservatórios petrolíferos: Condicionamento a poços. Rio de Janeiro. Pré-publicação n° 04/96. Dept° de Matemática, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. 30p. 1996.
- TAVARES, G., et al. PetBool 1.0 Manual do Usuário e de Referência. Rio de Janeiro: Laboratório MatComp/Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro/Petrobras/Cenpes. 1996. 77p.
- TAVARES, G., LANZARINI, W.L. Projeto PetBool - Relatório de Especificação da Abrangência do Projeto. Rio de Janeiro, 1996, 11p. Petrobras/Cenpes/Diger-Laboratório MatComp. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. (figuras).
- TETZLAFF, D.M., HARBAUGH, J.W. Simulating clastic sedimentation. New York: Van Nostrand. 1989. 202 p.
- 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. Stochastic Modeling and Geostatistics, Principles, Methods and Case Studies, Computer Applications in Geology. Tulsa: American Association of Petroleum Geologists, 1994. p.77-89. v.3.
- VAN VARK, W., et al. Construction and validation of a numerical model of a reservoir consisting of meandering channels. **Society of Petroleum Engineers**, Dallas, p.9-14. Feb.1994.
- VASCONCELOS, E.P., LIMA NETO, F.F., ROOS, S. Unidades de Correlação da Formação Açú, Bacia Potiguar. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 36, 1990, Natal. Anais...Natal, Sociedade Brasileira de Geologia, 1990. p.227-240. v.1.

- WALKER, R.G. Facies Models. 2.ed. Toronto: Geoscience Canada, reprint series 1. 1984 317p.
- WEBER, K.J. How heterogeneity affects oil recovery. In: LAKE, L.W., CARROL, H.B. Reservoir Characterization. Orlando: Academic Press, 1986. p.487-544.
- WEBER, K.J., VAN GEUNS, L.C. Framework for Constructing Clastic Reservoir Simulation Models. **Journal of Petroleum Technology**, Richardson, Texas, p.1248-1253. Oct.1990.
- ZAPAROLLI, L.H., et al. Relatório de avaliação da Ferramenta FMS. Natal. PETROBRAS/DEBAR. 1992. (Rel. Int.).

Anexos

Anexo 1

ESPESSURAS DAS SUCESSÕES DE GRANODECRESCÊNCIA
ASCENDENTE MEDIDAS NOS TESTEMUNHOS, CORRIGIDAS PARA OS
FATORES DE DESCOMPACTAÇÃO E HIRST et al. (L993).

ESPESSURAS DAS SUCESSÕES DE GRANODECRESCÊNCIA
ASCENDENTE E DEPÓSITOS DE TRANSBORDAMENTO DE CANAL, MEDIDAS
NAS SEÇÕES GEOLÓGICAS.

RAZÃO *w/h* NAS SEÇÕES GEOLÓGICAS.

ESPESSURAS DAS SUCESSÕES DE GRANODECRESCÊNCIA ASCENDENTE (TESTEMUNHOS)
 correção de descompactação (23%)

	POÇO A #	POÇO B #1	POÇO C #3	POÇO D #4
topo	677.2	680	659.2	657.4
base	681.8	682.4	666.2	666
espessur	4.6	2.4	7	8.6
				#5 #6
topo	681.8	691.2	666.2	666
base	687.2	697	673.8	668.8
espessur	5.4	5.8	7.6	2.8
		#2		
topo	687.2	698.8	676	670
base	689.8	707	687.2	674
espessur	2.6	8.2	11.2	4
topo		707	689.6	674
base		709	695.2	682
espessura		2	5.6	8

$$Wc=6.8 h^{1.54} \text{ (m)} \quad Wm=7.44 Wc^{1.01} \text{ (ft)} \quad Rm=3.25Wc \quad Wpb=1.8 Rm$$

Esp. T(m)	Desc.(23%)	corr. Hirst	Wc(m)	Wc(ft)	Wm(ft)	Wm(m)	Rm(m)	Wpb
4.6	5.66	9.43	215.41	706.75	5614.73	1711.37	700.07	1260.12
5.4	6.64	11.07	275.74	904.70	7205.11	2196.12	896.15	1613.07
2.6	3.20	5.33	89.47	293.55	2311.66	704.60	290.77	523.39
2.4	2.95	4.92	79.09	259.50	2041.06	622.12	257.05	462.69
5.8	7.13	11.89	307.81	1009.94	8052.14	2454.29	1000.40	1800.71
8.2	10.09	16.81	524.67	1721.43	13798.16	4205.68	1705.17	3069.30
2	2.46	4.10	59.73	195.98	1537.08	468.50	194.12	349.42
7	8.61	14.35	411.21	1349.17	10787.99	3288.18	1336.42	2405.56
7.6	9.35	15.58	466.73	1531.33	12260.06	3736.87	1516.86	2730.35
11.2	13.78	22.96	848.02	2782.35	22409.33	6830.36	2756.06	4960.91
5.6	6.89	11.48	291.62	956.81	7624.42	2323.92	947.77	1705.99
8.6	10.58	17.63	564.60	1852.44	14859.15	4529.07	1834.94	3302.88
2.8	3.44	5.74	100.28	329.03	2594.09	790.68	325.92	586.66
4	4.92	8.20	173.69	569.89	4517.72	1377.00	564.50	1016.10
8	9.84	16.40	505.09	1657.20	13278.27	4047.22	1641.54	2954.77

Valores médios:

6	7	12	328	1075	8593	2619	1065	1916
---	---	----	-----	------	------	------	------	------

Correção de Hirst: +40%

Estim. da Larg. do canal **Wc**, e Larg. do cinturão meandrante **Wm** (Leeder, 1973 e Leopold & Wolman, 1960)

Estimativas do Raio de Curvatura do meandro, **Rm** (Allen, 1984)

Estimativas do Comprim. longitudinal da barra em pontal, **Wpb** (Schenk, 1992)

ESPESSURAS DAS SUCESSÕES DE GRANODECRESCÊNCIA ASCENDENTE (TESTEMUNHOS)
 correção de descompactação (23%)

	POÇO A #	POÇO B #1	POÇO C #3	POÇO D #4
topo	677.2	680	659.2	657.4
base	681.8	682.4	666.2	666
espessur	4.6	2.4	7	8.6
				#5 #6
topo	681.8	691.2	666.2	666
base	687.2	697	673.8	668.8
espessur	5.4	5.8	7.6	2.8
		#2		
topo	687.2	698.8	676	670
base	689.8	707	687.2	674
espessur	2.6	8.2	11.2	4
topo		707	689.6	674
base		709	695.2	682
espessura		2	5.6	8

$$Wc=6.8 h^{1.54} \text{ (m)} \quad Wm=7.44 Wc^{1.01} \text{ (ft)} \quad Rm=3.25Wc \quad Wpb=1.8 Rm$$

Esp. T(m)	Desc.(23%)	corr. Hirst	Wc(m)	Wc(ft)	Wm(ft)	Wm(m)	Rm(m)	Wpb
4.6	5.66	8.08	169.89	557.40	4417.74	1346.53	552.13	993.84
5.4	6.64	9.49	217.47	713.52	5669.06	1727.93	706.78	1272.20
2.6	3.20	4.57	70.56	231.51	1818.85	554.38	229.33	412.79
2.4	2.95	4.22	62.38	204.66	1605.93	489.49	202.73	364.92
5.8	7.13	10.19	242.77	796.52	6335.52	1931.07	789.00	1420.19
8.2	10.09	14.41	413.79	1357.66	10856.56	3309.08	1344.83	2420.70
2	2.46	3.51	47.11	154.56	1209.40	368.62	153.10	275.58
7	8.61	12.30	324.31	1064.07	8488.12	2587.18	1054.01	1897.22
7.6	9.35	13.35	368.10	1207.73	9646.36	2940.21	1196.32	2153.38
11.2	13.78	19.68	668.82	2194.39	17631.93	5374.21	2173.66	3912.58
5.6	6.89	9.84	230.00	754.62	5998.99	1828.49	747.49	1345.48
8.6	10.58	15.11	445.29	1460.98	11691.36	3563.53	1447.18	2604.93
2.8	3.44	4.92	79.09	259.50	2041.06	622.12	257.05	462.69
4	4.92	7.03	136.99	449.46	3554.60	1083.44	445.21	801.38
8	9.84	14.06	398.36	1307.00	10447.50	3184.40	1294.65	2330.38

Valores médios:

6	7	10	258	848	6761	2061	840	1511
---	---	----	-----	-----	------	------	-----	------

Correção de Hirst: +30%

Estim. da Larg. do canal Wc , e Larg. do cinturão meandrante Wm (Leeder, 1973 e Leopold & Wolman, 1960)

Estimativas do Raio de Curvatura do meandro, Rm (Allen, 1984)

Estimativas do Comprim. longitudinal da barra em pontal, Wpb (Schenk, 1992)

ESPESSURAS DAS SUCESSÕES DE GRANODECRESCÊNCIA ASCENDENTE (TESTEMUNHOS);
correção de descompactação (23%)

	POÇO A #1	POÇO B #1	POÇO C #3	POÇO D #4
topo	677.2	680	659.2	657.4
base	681.8	682.4	666.2	666
espessur	4.6	2.4	7	8.6
				#5 #6
topo	681.8	691.2	666.2	666
base	687.2	697	673.8	668.8
espessur	5.4	5.8	7.6	2.8
		#2		
topo	687.2	698.8	676	670
base	689.8	707	687.2	674
espessur	2.6	8.2	11.2	4
topo		707	689.6	674
base		709	695.2	682
espessura		2	5.6	8

$$Rm=3.25Wc$$

$$Wc=6.8 h^{1.54} \text{ (m)}$$

$$Wm=7.44 Wc^{1.01} \text{ (ft)}$$

$$Wpb=1.8 Rm$$

Esp. T(m)	Desc.(23%)	corr. Hirst	Wc(m)	Wc(ft)	Wm(ft)	Wm(m)	Rm(m)	Wpb(m)
4.6	5.66	7.07	138.31	453.79	3589.21	1093.99	449.51	809.11
5.4	6.64	8.30	177.05	580.89	4605.86	1403.87	575.41	1035.73
2.6	3.20	4.00	57.45	188.48	1477.73	450.41	186.70	336.06
2.4	2.95	3.69	50.78	166.62	1304.75	397.69	165.05	297.09
5.8	7.13	8.92	197.64	648.47	5147.32	1568.90	642.34	1156.22
8.2	10.09	12.61	336.88	1105.31	8820.47	2688.48	1094.87	1970.76
2	2.46	3.08	38.35	125.83	982.58	299.49	124.64	224.36
7	8.61	10.76	264.03	866.29	6896.22	2101.97	858.10	1544.58
7.6	9.35	11.68	299.68	983.25	7837.24	2388.79	973.96	1753.13
11.2	13.78	17.22	544.50	1786.51	14325.15	4366.31	1769.63	3185.34
5.6	6.89	8.61	187.25	614.36	4873.91	1485.57	608.55	1095.39
8.6	10.58	13.22	362.52	1189.43	9498.70	2895.21	1178.19	2120.74
2.8	3.44	4.30	64.39	211.27	1658.27	505.44	209.27	376.69
4	4.92	6.15	111.53	365.92	2887.95	880.25	362.46	652.43
8	9.84	12.30	324.31	1064.07	8488.12	2587.18	1054.01	1897.22

Valores médios:

6	7	9	210	690	5493	1674	684	1230
---	---	---	-----	-----	------	------	-----	------

Correção de Hirst: +20%

Estim. da Larg.do canal **Wc**, e Larg. do cinturão meandrante **Wm** (Leeder, 1973 e Leopold & Wolman, 1960)

Estimativas do Raio de Curvatura do meandro, **Rm** (Allen, 1984)

Estimativas do Comprim. longitudinal da barra em pontal, **Wpb** (Schenk, 1992)

ESPESSURAS DE RESERVATÓRIOS NAS SEÇÕES GEOLÓGICAS
(Santos & Poletto, 1993)

Obs: As larguras medidas nas seções são interpretações. (Medidas 2D)

Os poços das extremidades das seções não foram considerados p/larguras w,
nem os das seções N-S.

ESCALAS: H = 1 : 2700 V = 1 : 600

POÇO	CANAIS			CREVASSE			
	espess.(m)	larg. (cm)	larg. (m)	espess.(cm)	espess. (m)	larg. (cm)	larg. (m)
5C8	2.4			0.2	1.2		
	4.4						
	2						
	3.4						
	4.8						
	5						
2C85	5.4	12.5	337.5				
	4.6						
1C62	2.4	11	297		1.2	11	297
	8.6	13	351				
	8.2	10	270				
2C64	5.2	12	324	0.1	0.6	11	297
	4.3	10	270				
	1.6	10	270				
	5.6	11.3	305.1				
	2	12	324				
	12	13.5	364.5				
1C44	3.6	10.5	283.5		1.2	9.5	256.5
	10.4	12	324				
	4.6	11.2	302.4				
	2.6	12.5	337.5				
	2.2						
2C1	2.2			0.1	0.6		
	4						
	2.6						
	3.8						
	2.8						
	1.6						
3D32	1.6						
	6.6						
	8.8						
	6.8						
7D9	4.4	11.5	310.5		1.4	9.5	256.5
	7.8	11.7	315.9				
	7.8	11	297				
2D70	1.8						
	4.6	10.1	272.7				
	1.6						
	9						
	4						
5D2	1.2				1.4	8.5	229.5
	2.2				1.6	8.5	229.5
	1.8						
	2.4						
	2.6						
	3.2						

POÇO	CANAIS			CREVASSE			
	espess.(m)	larg. (cm)	larg. (m)	espess.(cm)	espess. (m)	larg. (cm)	larg. (m)
	6						
2D62	4.6	14	378				
	6.2						
	4.8	11	297				
	4	8.8	237.6				
	8.2						
D'44	1.2						
	8						
	3						
	3						
	2						
1F94	11.4						
	4.4						
3F6	8.4	13	351				
	5.2	11	297				
	11.6	13.1	353.7				
2F26	8				1		
	8						
	2.6						
2F7	4			0.2	1.2		
	5.4						
	2						
	5.2						
	2.4						
	4.4						
1J79	3.2						
	9.2						
	14.4						
2I76	3.2			0.2	1.2		
	1.6			0.1	0.6		
	6.2						
	3.8						
	7.6						
7H6	2				1.6		
	1.4				0.8		
	7						
	13.8						
H48	2.8				2.4		
	8.4						
	10.6						
1H69	4	8.5	229.5		1	9	243
	5.4	9	243		1.2	10.7	288.9
	2.2	10	270		0.8	11	297
2G3	2.1	10.5	283.5		1.6	13	351
	1.8	11.5	310.5		1.2	12.5	337.5
	6.4	24.8	669.6		2	12	324
	8.4	21.5	580.5				
1G56	10				2		
	10.2						
2B86	2.4						
	6.6						
	1.8						
3B31	1.6	10.5	283.5		1.2	10	270
	2.4	9.5	256.5				
	16.5	14.2	383.4				

POÇO	CANAIS			CREVASSE			
	espess.(m)	larg. (cm)	larg. (m)	espess.(cm)	espess. (m)	larg. (cm)	larg. (m)
2.00E+72	1.2						
	0.9						
	6.6						
	4.2						
	6						
	1.2				1.2		
	3						
	4.8						
	16.2						
	6A5	4.8				2.2	
3A5	3.4						
	8.2						
	1.4	10	270				
	2	10.5	283.5				
1A1	9						
	10	13	351				
	3.2						
	9.4						
	8.4						

RAZÃO W/H NAS SEÇÕES GEOLÓGICAS

h medido (m)	larg. (cm)	larg. (m)	Desc 23%	Hirst4	w/h4	Hirst7	w/h5	Hirst8	w/h8
5.4	12.5	337.5	6.64	9.30	36.30	8.63	39.09	7.97	42.34
2.4	11	297	2.95	4.13	71.86	3.84	77.39	3.54	83.84
8.6	13	351	10.58	14.81	23.70	13.75	25.52	12.69	27.65
8.2	10	270	10.09	14.12	19.12	13.11	20.59	12.10	22.31
5.2	12	324	6.40	8.95	36.18	8.31	38.97	7.68	42.21
4.3	10	270	5.29	7.40	36.46	6.88	39.27	6.35	42.54
1.6	10	270	1.97	2.76	98.00	2.56	105.53	2.36	114.33
5.6	11.3	305.1	6.89	9.64	31.64	8.95	34.07	8.27	36.91
2	12	324	2.46	3.44	94.08	3.20	101.31	2.95	109.76
12	13.5	364.5	14.76	20.66	17.64	19.19	19.00	17.71	20.58
3.6	10.5	283.5	4.43	6.20	45.73	5.76	49.25	5.31	53.35
10.4	12	324	12.79	17.91	18.09	16.63	19.48	15.35	21.11
4.6	11.2	302.4	5.66	7.92	38.18	7.36	41.11	6.79	44.54
2.6	12.5	337.5	3.20	4.48	75.38	4.16	81.18	3.84	87.95
4.4	11.5	310.5	5.41	7.58	40.98	7.04	44.13	6.49	47.81
7.8	11.7	315.9	9.59	13.43	23.52	12.47	25.33	11.51	27.44
7.8	11	297	9.59	13.43	22.11	12.47	23.81	11.51	25.80
4.6	10.1	272.7	5.66	7.92	34.43	7.36	37.07	6.79	40.16
4.6	14	378	5.66	7.92	47.72	7.36	51.39	6.79	55.67
4.8	11	297	5.90	8.27	35.93	7.68	38.70	7.08	41.92
4	8.8	237.6	4.92	6.89	34.49	6.40	37.15	5.90	40.24
8.4	13	351	10.33	14.46	24.27	13.43	26.13	12.40	28.31
5.2	11	297	6.40	8.95	33.17	8.31	35.72	7.68	38.70
11.6	13.1	353.7	14.27	19.98	17.71	18.55	19.07	17.12	20.66
4	8.5	229.5	4.92	6.89	33.32	6.40	35.88	5.90	38.87
5.4	9	243	6.64	9.30	26.13	8.63	28.14	7.97	30.49
2.2	10	270	2.71	3.79	71.27	3.52	76.75	3.25	83.15
2.1	10.5	283.5	2.58	3.62	78.40	3.36	84.43	3.10	91.46
1.8	11.5	310.5	2.21	3.10	100.17	2.88	107.88	2.66	116.87
6.4	9.5	256.5	7.87	11.02	23.27	10.23	25.06	9.45	27.15
8.4	11	297	10.33	14.46	20.53	13.43	22.11	12.40	23.95
1.6	10.5	283.5	1.97	2.76	102.90	2.56	110.81	2.36	120.05
2.4	9.5	256.5	2.95	4.13	62.06	3.84	66.84	3.54	72.41
16.5	14.2	383.4	20.30	28.41	13.49	26.38	14.53	24.35	15.74
1.4	10	270	1.72	2.41	112.00	2.24	120.61	2.07	130.66
2	10.5	283.5	2.46	3.44	82.32	3.20	88.65	2.95	96.04
10	13	351	12.30	17.22	20.38	15.99	21.95	14.76	23.78
médias					46.03		49.57		53.70

Anexo 2

LEVANTAMENTO DAS SINUOSIDADES SOBRE O MODELO GEOLÓGICO
DE SANTOS E POLETTO (1993)

HISTOGRAMA DE RAIO DE CURVATURA DE MEANDROS R_m ESTIMADO
ATRAVÉS DA EQUAÇÃO DE ALLEN (1984), A PARTIR DAS ESPESSURAS DAS
SUCESSÕES DE GRANODECRESCÊNCIA ASCENDENTE MEDIDAS NOS
TESTEMUNHOS

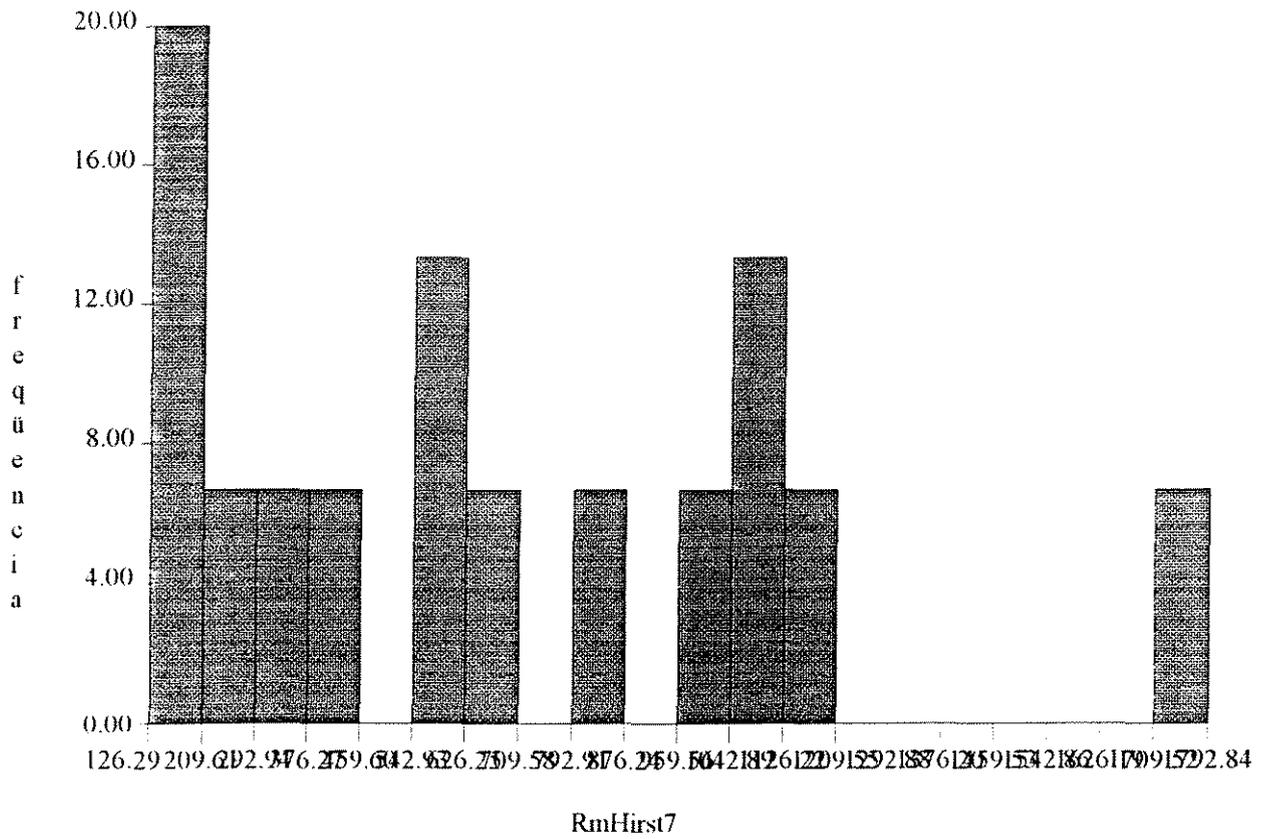
HISTOGRAMA DE RAIO DE CURVATURA DE MEANDROS R_m ESTIMADO
ATRAVÉS DA EQUAÇÃO DE ALLEN (1984), A PARTIR DAS ESPESSURAS DAS
SUCESSÕES DE GRANODECRESCÊNCIA ASCENDENTE MEDIDAS NAS SEÇÕES
GEOLÓGICAS DE SANTOS E POLETTO (1993)

LEVANTAMENTO DE SINUOSIDADES POR INTERVALO
(mapas de Santos e Poletto, 1993)

INTERVALO 3	<i>Medidas</i>				<i>Sinuos.(média)</i>
<i>Topo</i>	1.1	1.1	1.1	1.3	1.2
<i>a</i>	1.03	1.1	1.1	1.2	1.1
<i>Base</i>	1.2	1.3	1.1		1.2

INTERVALO 2	<i>Medidas</i>						<i>Sinuos.(média)</i>
<i>Topo</i>	1.2	1.3	1.1	1.04			1.2
<i>b</i>	1.1	1.1	1.1	1.03	1.14	1.1	1.1
<i>a</i>	1.3	1.1	1.2	1.1			1.2
<i>Base</i>	1.14	1	1.14	1			1.1

INTERVALO 1	<i>Medidas</i>				<i>Sinuos.(média)</i>
<i>Topo</i>	1.2	1.2	1.3	1.1	1.2
<i>d</i>	1.5	1.3	1	1.2	1.3
<i>c</i>	1.5	1.1	1.3		1.3
<i>b</i>	4.1	1.5			2.8
<i>a</i>	4	1	1.1		2.0
<i>Base</i>	1.4	1.7	1.4	1.2	1.4



No. de dados = 15

Média = 692.4800

Variância = 210439.0925

Coefficiente de variação = 458.7364

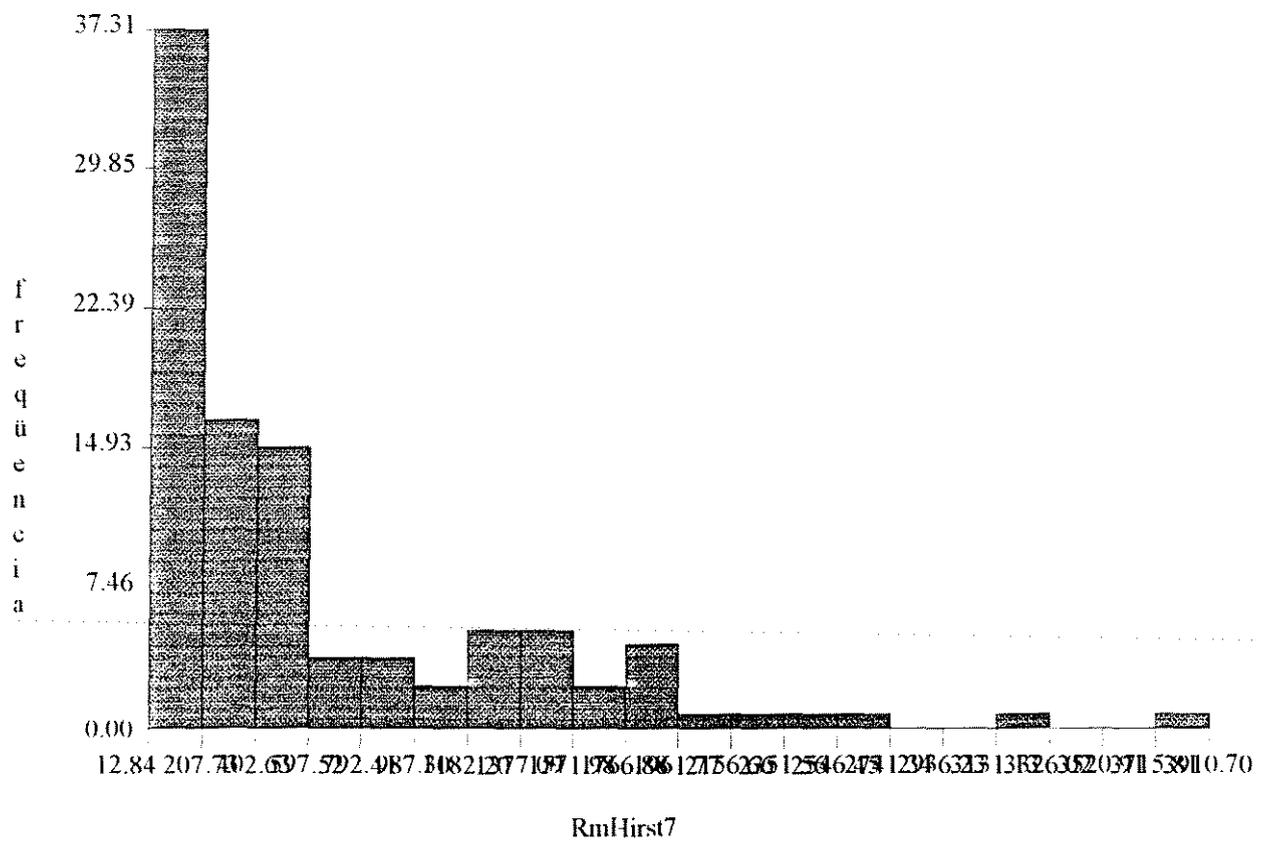
Mínimo = 126.286

1 Quartil = 212.014

Mediana = 616.529

3 Quartil = 986.743

Máximo = 1792.843



No. de dados = 134	Mínimo = 12.84
Média = 632.6577	1 Quartil = 153.1
Variância = 500631.9388	Mediana = 315.740
Coefficiente de variação = 707.5535	3 Quartil = 962.7
	Máximo = 3910.7

Anexo 3

SINUOSIDADE DE CURVAS REPRESENTANDO CANAIS FLUVIAIS

EXEMPLO 1

EXEMPLO 2

Sinuosidade de curvas representando canais fluviais

Em Tavares *et al.* (1996) é apresentado o cálculo de sinuosidades de curvas em função do parâmetro t . Então, considerando o canal fluvial como uma curva $C(t)$, pode-se estimar seu comprimento numa área restrita da seguinte maneira:

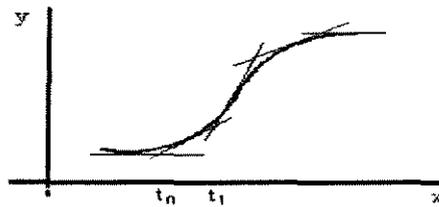


Figura 1: Curva $C(t)$ representando um canal fluvial.

Seja $C(t)$ a curva da Figura 1 definida por $C(t) = [x(t), y(t)]$ onde $t \in [t_0, t_1]$, o seu comprimento é a integral:

$$\int_{t_0}^{t_1} \sqrt{[x'(t)]^2 + [y'(t)]^2} dt$$

Sendo $C(t) = [t, y(t)]$ então $x(t) = t$, fica igual a:

$$\int_{t_0}^{t_1} \sqrt{1 + [y'(t)]^2} dt$$

Então a sinuosidade (s) será pela definição na Figura 2-2 (Capítulo 2):

$$S = \frac{\int_{t_0}^{t_1} \sqrt{1 + [y'(t)]^2} dt}{t_1 - t_0}$$

Exemplo 1:

Cálculo da sinuosidade de uma semi-circunferência $C(t) = (t, \sqrt{1-t^2})$ e $t \in [-1, 1]$, que equivale a semi-circunferência de raio 1 da Figura A-2:

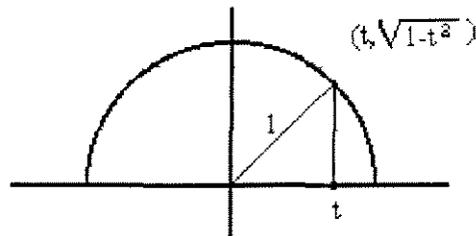


Figura 2: Semi-circunferência de raio $r = 1$.

Sua sinuosidade da semi-circunferência será:

$$S = \int_{-1}^1 \sqrt{1 + \left(\frac{t}{\sqrt{1-t^2}}\right)^2} dt = \frac{\pi}{2} = 1.5708$$

Este cálculo também pode ser feito de outra maneira:

Considerando o perímetro do círculo como $P = 2\pi r$, então na Figura 2 o perímetro da semi-circunferência será:

$$P = \frac{2\pi}{2} = \pi$$

e a sinuosidade por definição:

$$s = \frac{\pi}{2} = 1.5708$$

Exemplo 2)

Cálculo da sinuosidade de uma reta.

Seja $C(t) = (t, 0)$ uma reta correspondendo ao eixo x, da Figura 3:



Figura 3: Reta correspondendo ao eixo x.

Então pela Equação 3-3 (Capítulo 3) $B_i = 0$ e a sinuosidade será por definição:

$$S = \frac{\int_{t_0}^{t_1} \sqrt{(1+0)} dt}{t_1 - t_0} = \frac{t_1 - t_0}{t_1 - t_0} = 1$$

Anexo 4

Fluxograma simplificado da simulação condicionadas a poços e à curva de proporção vertical de fácies

É apresentada a sequência do processo de geração de objetos condicionado aos parâmetros do modelo geológico. Para mais detalhes consultar Tavares *et al.* (1996a, 1996b) e Lanzarini *et al.* (1996).

dados:

- 1) uma lista L_p do conjunto dos poços $P_i (x_p, y_p)$, do domínio D , informando os intervalos $L_p [(z_0, z_1), (z_1, z_2), \dots (z_{n-1}, z_n)]$, com presença ou ausência de reservatórios, onde, x_p e y_p são as coordenadas dos poços, D é um espaço tridimensional, $z_0 \dots z_n$ são as profundidades;
- 2) as funções de distribuições experimentais dos parâmetros (FDEP) dos canais, construídas com os histogramas de espessura (h) dos depósitos de preenchimento de canais, de sinuosidade (s) da curva que descreve o canal e de direção preferencial (d). A largura (w) dos canais é relacionada com a espessura, através de uma equação;
- 3) a proporção (p) de reservatórios em D ou a curva de proporção vertical das litofácies reservatório e não reservatório (CPVF).

FLUXOGRAMA SIMPLIFICADO DAS SIMULAÇÕES

SIMULAÇÃO CONDICIONADA A POÇO

Dados: poços $P_i (x_p, y_p) \in L_p$; subintervalos $[(z_0, z_1), (z_1, z_2) \dots (z_{n-1}, z_n)] \in I_p$; Funções de Distribuições Experimentais dos Parâmetros (FDEP) $h(w)$, s , d e a proporção p de canais especificada.

1. Ler poços $P_i \in L_p$ e subintervalos $(z_i, z_{i+1}) \in I_p$, fazer $p = 0$, sortear um ponto C_i no plano yz e os parâmetros nas FDEP.

2. Tomar um poço P_i e ajustar C_i , testar as intersecções nos outros poços $P_k \in L_p$, ($k \neq i$)

2a. Não há intersecção(ões) em P_k : C_i é aceito se incrementar p .

2b. Há intersecção(ões) em P_k : C_i é aceito se é(são) consistente(s) com I_p e incrementar p

2b1. Caso contrário, rejeita C_i

3. Atualiza subintervalo z_i

4. Atingiu n° de iterações especificado ?

4a. Sim, vai para 6,

4b. Não, vai para 5,

5. Todos os poços honrados ?

5a. Sim, vai para 6,

5b. Não, vai para 2, tomar $p_{i+1} \in L_p$, continuar o processo.

6. **FIM**

SIMULAÇÃO CONDICIONADA A POÇO E CURVA DE PROPORÇÃO

Dados: os anteriores mais a curva de proporção vertical de fácies (CPVF) com erro abs $\pm 12\%$.

(Cont. de 5.)

(5. Todos os poços honrados ?

5a. Não, vai para 2, tomar poço $i+1$ em L_p , continuar o processo.

5b. Sim mas p não foi atingida, vai para 6,

6. Prossegue a simulação condicionada a CPVF na área entre os poços,

7. Sorteia: $C_i(x_c, y_c, z_c) \notin (x_p, y_p)$ e os parâmetros nas FDEP,

8. Testar intersecções com poços de L_p

7a. Há intersecção(ões): C_i é aceito se é(são) consistentes com I_p , e incrementar p , e obedece a tolerância na CPVF,

7b. Caso contrário, rejeita C_i

9. Atingiu o n° máximo de iterações ?

9a. Não, vai para 7

9b. Sim **FIM**

Anexo 5

TABELA RESUMO DE 29 SIMULAÇÕES DIVERSAS

TABELA COM O TIPO DE SIMULAÇÃO VERSUS NÚMERO DE OBJETOS

PLANILHAS COM AS FREQUÊNCIAS DE ESPESSURA DOS CORPOS GERADOS (2), DOS CORPOS COMPOSTOS DE DE RESERVATÓRIOS (2) E DOS CORPOS NÃO RESERVATORIOS

Tabela resumo de 29 simulações diversas no programa PetBool

O cálculo de média e variância dos parâmetros simulados foi feito ponderando-se o valor médio da classe (z_i) pela respectiva frequência (f_i) conforme Equações 3-6 e 3-7 (Capítulo 3).

WFCW é o volume de reservatórios necessário para condicionar todos os poços do domínio D.

TH e VDH são respectivamente a espessura contínua de reservatórios e não reservatórios amostradas em 100 posições na matriz da simulação.

TABELA RESUMO DE 29 SIMULAÇÕES DIVERSAS NO PetBool

SIMULAÇÕES CONDICIONAIS A 9 POÇOS E W = HISTOGRAMA													
Simulação	Esp Méd(h)	Var(h)	Larg Méd(w)	Var(w)	Sinuo Méd(s)	Var(s)	Dir Méd(d)	Var(d)	Proportion (p)	1-p	Simulação	VFCW	OBJ TOTAL
s46 sim			106 54	6627 513					792595	207405	s46 sim	542000	349
s47 sim			140 38	12829 462							s47 sim	579343	
s48 sim			187 96	24833 094					750000	250000	s48 sim	306565	235
s49 sim			155 35	24322 11					754693	245307	s49 sim	551873	117
s50 sim			155 3	21353 412					752721	247279	s50 sim	542349	111
s51 sim			153 2	15595 215					750286	249714	s51 sim	541387	128
SIMULAÇÕES CONDICIONAIS A 9 POÇOS, CPVF E W = HISTOGRAMA													
Simulação	Esp Méd(h)	Var(h)	Larg Méd(w)	Var(w)	Sinuo Méd(s)	Var(s)	Dir Méd(d)	Var(d)	Proportion (p)	1-p	Simulação	VFCW	OBJ TOTAL
s52 sim			109 68	8676 281					827790	172210	s52 sim	538257	614
s53 sim			150 34	17416 417					810210	189790	s53 sim		206
SIMULAÇÕES CONDICIONAIS A 30 POÇOS, CPVF E W = HISTOGRAMA													
Simulação	Esp Méd(h)	Var(h)	Larg Méd(w)	Var(w)	Sinuo Méd(s)	Var(s)	Dir Méd(d)	Var(d)	Proportion (p)	1-p	Simulação	VFCW	OBJ TOTAL
s 54 sim			138 28	15182 213					860175	139825	s 54 sim	680490	780
SIMULAÇÕES CONDICIONAIS A 30 POÇOS, CPVF E W = HISTOGRAMA													
Simulação	Esp Méd(h)	Var(h)	Larg Méd(w)	Var(w)	Sinuo Méd(s)	Var(s)	Dir Méd(d)	Var(d)	Proportion (p)	1-p	Simulação	VFCW	OBJ TOTAL
s55 sim			141 98	14626 655					832307	167693	s55 sim	685089	730
SIMULAÇÕES CONDICIONAIS A 30 POÇOS, CPVF W = 16.372*H^1.54													
Simulação (s56 sim)	Esp Méd(h)	Var(h)	Larg Méd(w)	Var(w)	Sinuo Méd(s)	Var(s)	Dir Méd(d)	Var(d)	Proportion (p)	1-p	Simulação (s56 sim)	VFCW	OBJ TOTAL
s56 sim	3 2	2 596	106 63	9676 014	1 22	0 117	74 84	1982 19	809848	190152	s56 sim	610861	754
s57 sim	3 18	2 49	104 98	9029 152	1 22	0 12	70 76	1867 544	790111	209889	s57 sim	602929	800
s58 sim	3 18	2 325	104 03	8092 846	1 22	0 115	69 04	1896 68	784162	215838	s58 sim	571820	818
s59 sim	3 23	2 582	108 92	9567 586	1 23	0 126	71 96	1924 953	792096	207904	s59 sim	630087	808
s60 sim	3 13	2 306	100 74	8307 375	1 23	0 128	72 85	1962 053	793799	206201	s60 sim	561100	774
s61 sim	3 15	2 286	103 41	8363 369	1 23	0 122	71 27	1834 488	784435	215565	s61 sim	575502	809
s62 sim	3 29	2 774	93 91	5289 559	1 23	0 125	71 68	1923 513	797189	202811	s62 sim	554098	904
s63 sim	3 17	2 304	103 92	8381 818	1 23	0 122	70 48	1917 706	788791	211209	s63 sim	615261	756
s64 sim	3 25	2 656	108 47	9963 135	1 22	0 114	69 91	1875 143	790917	209083	s64 sim	585448	797
s65 sim	3 12	2 055	100 98	7129 973	1 23	0 12	70 9	1848 943	792521	207479	s64 sim	585448	797
									795299	204701	s65 sim	572137	814
SIMULAÇÕES CONDICIONAIS A 30 POÇOS, CPVF, W = 16.372*H^1.54, E S = 1													
Simulação	Esp Méd(h)	Var(h)	Larg Méd(w)	Var(w)	Sinuo Méd(s)	Var(s)	Dir Méd(d)	Var(d)	Proportion (p)	1-p	Simulação	VFCW	OBJ TOTAL
s66 sim					1	0			804796	195204	s66 sim	645416	817
s68 sim									794549	205451	s68 sim	594288	772
s69 sim									806888	193112	s69 sim	642195	797
s71 sim									799280	200720	s71 sim	619826	799
SIMULAÇÕES CONDICIONAIS A 30 POÇOS, A CPVF, W = 16.372*H^1.54, E S = 3													
Simulação	Esp Méd(h)	Var(h)	Larg Méd(w)	Var(w)	Sinuo Méd(s)	Var(s)	Dir Méd(d)	Var(d)	Proportion (p)	1-p	Simulação	VFCW	OBJ TOTAL
s67 sim									787436	212564	s67 sim	590684	800
s70 sim									788163	211837	s70 sim	540377	847
s72 sim					3	0			788652	211348	s72 sim	520876	835
SIMULAÇÃO NAO CONDICIONAL, W = 16.372*H^1.54, E S = 1													
Simulação	Esp Méd(h)	Var(h)	Larg Méd(w)	Var(w)	Sinuo Méd(s)	Var(s)	Dir Méd(d)	Var(d)	Proportion (p)	1-p	Simulação	VFCW	OBJ TOTAL
s73 sim					1	0			750237	249763	s73 sim		546
SIMULAÇÃO CONDICIONAL A 30 POÇOS, A CPVF, W = 16.372*H^1.54, E D = HISTOGRAMA C/ DISTRIB. UNIFORME													
Simulação	Esp Méd(h)	Var(h)	Larg Méd(w)	Var(w)	Sinuo Méd(s)	Var(s)	Dir Méd(d)	Var(d)	Proportion (p)	1-p	Simulação	VFCW	OBJ TOTAL
s74 sim							77 23	2513 085	798582	201418	s74 sim	564155	830

(CONTINUAÇÃO)

ESTAT (TH) (VDH) NOS 100 "POÇOS" DA MATRIZ 3D

OBJ REJEIT 19651	ITERAÇÕES 20000	Simulação s46 sim s47 sim							OBS tempo min
19765	20000	s48 sim							108 Obj p/VCFW
19883	20000	s49 sim							
19889	20000	s50 sim							
19872	20000	s51 sim							
OBJ REJEIT 19386	ITERAÇÕES 20000	Simulação s52 sim							OBS
19794	20000	s53 sim							
OBJ REJEIT 19220	ITERAÇÕES 20000	Simulação s 54 sim							OBS
OBJ REJEIT 19270	ITERAÇÕES 20000	Simulação s55 sim							OBS
OBJ REJEIT	ITERAÇÕES	Simulação	TH Méd	Var (TH)	VDH Méd	Var (VDH)	Obj 100 poços	OBS	
	353643	(s56 sim)						Abort t>12horas	
9246	10000	s56 sim	7 44	13 966	4 01	2 674	303	t = 26' a 30'	
9200	10000	s57 sim	7 52	18 175	3 84	1 813	315	t = 26' a 30'	
9182	10000	s58 sim	7 26	15 169	4 1	2 424	304	t = 26' a 30'	
9192	10000	s59 sim	7 47	15 169	3 94	1 984	311	t = 26' a 30'	
9226	10000	s60 sim	7 55	19 167	4 23	3 082	301	t = 26' a 30'	
9191	10000	s61 sim	7 62	17 691	3 91	1 929	318	t = 26' a 30'	
9096	10000	s62 sim	7 67	18 09	4 06	2 636	287	t = 26' a 30'	
9244	10000	s63 sim	7 19	15 301	4 02	2 266	310	t = 26' a 30'	
9203	10000	s64 sim	7 31	15 089	4 13	2 513	304	t = 26' a 30'	
9186	10000	s65 sim	7 14	15 51	3 97	2 366	317	t = 26' a 30'	
OBJ REJEIT 9183	ITERAÇÕES 10000	Simulação s66 sim							OBS t = 12'
9228	10000	s68 sim							t = 13'
9203	10000	s69 sim							t = 12'
9201	10000	s71 sim							t = 13'
OBJ REJEIT 9200	ITERAÇÕES 10000	Simulação s67 sim							OBS t = 50'
9153	10000	s70 sim							t = 40'
9165	10000	s72 sim							t = 40'
OBJ REJEIT 9454	ITERAÇÕES 10000	Simulação s73 sim							OBS. t = 1' (809 iter.)
OBJ REJEIT 9170	ITERAÇÕES 10000	Simulação s74 sim							OBS. t = 27'

Plan1

SIMULAÇÕES CONDICIONAIS A 9 POÇOS

Simulação	Num. Objetos
s1.sim	68
s2.sim	54
s3.sim	75
s5.sim	71
s6.sim	84
s7.sim	76
s9.sim	110
s10.sim	124
s12.sim	115
s13.sim	124
s14.sim	117
s15.sim	120
s16.sim	133
s17.sim	120
s18.sim	130
Média	101.4

SIMULAÇÃO CONDIC. A 28 POÇOS

s43.sim	385
---------	-----

SIMULAÇÃO CONDIC. A 30 POÇOS E CPVF

s44.sim	875
s54.sim	780
s55.sim	730
Média	795

SIMULAÇÃO NÃO CONDICIONAL A POÇO E CONDIC. A CPVF

Simulação	Num. Objetos
s20.sim	31
s21.sim	32
s22.sim	30
s23.sim	21
s24.sim	45
s25.sim	37
s26.sim	32
s27.sim	29
s28.sim	34
s29.sim	27
s30.sim	46
Média	33.09

SIMULAÇÃO NÃO CONDICIONAL

s31.sim	52
s32.sim	51
s33.sim	49
s34.sim	65
s35.sim	55
s36.sim	43
s37.sim	59
s38.sim	44
s39.sim	58
s40.sim	55
Média	53.1

ESPESSURAS DE RESERVATÓRIOS SIMULADAS (CORPOS GERADOS)

Arquivo	hts60.hst	intv classe	zi médio (zim)	zim*fi	fi*(zim-m)^2
xmin	2	0.70769	0.35		
xmax	11.2				
ymax(obj)	60				
classes	13	intv			
frequência	65.6331	2.7	2.35	1.5449022	0.38808079
frequência	10.9819	3.4	3.06	0.33621509	0.00041213
frequência	8.01034	4.1	3.77	0.3019282	0.03347315
frequência	4.90956	4.8	4.48	0.21979722	0.09002427
frequência	3.87597	5.5	5.18	0.20095414	0.16477088
frequência	1.16279	6.2	5.89	0.06851516	0.08918808
frequência	0.258398	7.0	6.60	0.01705427	0.03124272
frequência	1.93798	7.7	7.31	0.14162162	0.3394049
frequência	1.42119	8.4	8.02	0.11391384	0.34019587
frequência	0.645995	9.1	8.72	0.05635064	0.20260415
frequência	0	9.8	9.43	0	0
frequência	0.645995	10.5	10.14	0.06549395	0.31795566
frequência	0.516796	11.2	10.85	0.05605249	0.30826991
Total	100.000014				
Média ponderada p/freq.				3.12	
Variância	" "				2.306

ESPESSURAS DE RESERVATÓRIOS SIMULADAS (CORPOS GERADOS)

Arquivo	hts62.hst	intv classe	zi médio (zim)	zim*fi	fi*(zim-m)^2
xmin	2	0.70769	0.35		
xmax	11.2				
ymax(obj)	60				
classes	13	intv			
frequência	60.8407	2.7	2.35	1.43209648	0.53067092
frequência	11.0619	3.4	3.06	0.33866432	0.005662
frequência	9.73451	4.1	3.77	0.36691615	0.02256421
frequência	4.86726	4.8	4.48	0.21790349	0.06882618
frequência	3.87168	5.5	5.18	0.20073172	0.13930263
frequência	2.10177	6.2	5.89	0.12384276	0.14257506
frequência	1.54867	7.0	6.60	0.10221222	0.16990163
frequência	2.21239	7.7	7.31	0.16167465	0.35751569
frequência	1.43805	8.4	8.02	0.11526524	0.32140787
frequência	0.884956	9.1	8.72	0.07719539	0.26143782
frequência	0	9.8	9.43	0	0
frequência	0.663717	10.5	10.14	0.06729069	0.3114947
frequência	0.774336	11.2	10.85	0.08398567	0.44237067
Total	99.999939				
Média ponderada p/freq.				3.29	
Variância	" "				2.774

ESTIMADORES PONDERADOS PELA FREQUÊNCIA:

$\text{média (m)} = \text{SOMA}(\text{zim} \cdot \text{fi})$ $\text{variância} = \text{SOMA}(\text{zim} - \text{m})^2$
--

ESPESSURAS DE RESERVATÓRIOS SIMULADAS EM 100 POÇOS NA MATRIZ 3D

Arquivo	TH60.hst	intv classe	fi	zi médio (zim)	zim*fi	fi*(zim-m)^2
xmin	0.343434	1.70000		0.85		
xmax	34.3434					
ymax(obj)	86					
classes	20	intv				
Num.(Objs)	0	2.0	0.00	1.19	0	0
Num.(Objs)	41	3.7	0.14	2.89	0.39412189	2.95009341
Num.(Objs)	86	5.4	0.29	4.59	1.3124085	2.49286819
Num.(Objs)	47	7.1	0.16	6.29	0.98269475	0.24547162
Num.(Objs)	36	8.8	0.12	7.99	0.95602441	0.02380971
Num.(Objs)	26	10.5	0.09	9.69	0.83730578	0.3978671
Num.(Objs)	29	12.2	0.10	11.39	1.0977052	1.4252456
Num.(Objs)	13	13.9	0.04	13.09	0.5654966	1.3285069
Num.(Objs)	7	15.6	0.02	14.79	0.34403301	1.22109328
Num.(Objs)	7	17.3	0.02	16.49	0.38356786	1.86125502
Num.(Objs)	3	19.0	0.01	18.19	0.18132973	1.12964361
Num.(Objs)	0	20.7	0.00	19.89	0	0
Num.(Objs)	2	22.4	0.01	21.59	0.14347783	1.31092865
Num.(Objs)	2	24.1	0.01	23.29	0.1547735	1.64745296
Num.(Objs)	0	25.8	0.00	24.99	0	0
Num.(Objs)	0	27.5	0.00	26.69	0	0
Num.(Objs)	1	29.2	0.00	28.39	0.09433025	1.44372866
Num.(Objs)	1	30.9	0.00	30.09	0.09997809	1.68880129
Num.(Objs)	0	32.6	0.00	31.79	0	0
Num.(Objs)	0	34.3	0.00	33.49	0	0
Total	301		1.00			

Média ponderada p/freq. 7.55
Variância " " 19.167

Arquivo	TH62.hst	intv classe	fi	zi médio (zim)	zim*fi	fi*(zim-m)^2
xmin	0.343434	1.70000		0.85		
xmax	34.3434					
ymax(obj)	75					
classes	20	intv				
Num.(Objs)	0	2.0	0.00	1.19	0	0
Num.(Objs)	34	3.7	0.12	2.89	0.34277585	2.70022706
Num.(Objs)	75	5.4	0.26	4.59	1.20037363	2.46971741
Num.(Objs)	55	7.1	0.19	6.29	1.20605764	0.36190113
Num.(Objs)	34	8.8	0.12	7.99	0.94695643	0.01257348
Num.(Objs)	30	10.5	0.10	9.69	1.01324996	0.42896786
Num.(Objs)	24	12.2	0.08	11.39	0.95276011	1.16081715
Num.(Objs)	10	13.9	0.03	13.09	0.45621677	1.02575167
Num.(Objs)	9	15.6	0.03	14.79	0.46390514	1.59230056
Num.(Objs)	4	17.3	0.01	16.49	0.22987342	1.08563494
Num.(Objs)	7	19.0	0.02	18.19	0.44374186	2.70224163
Num.(Objs)	1	20.7	0.00	19.89	0.06931503	0.52079963
Num.(Objs)	1	22.4	0.00	21.59	0.07523837	0.67570408
Num.(Objs)	0	24.1	0.00	23.29	0	0
Num.(Objs)	2	25.8	0.01	24.99	0.1741701	2.09186195
Num.(Objs)	1	27.5	0.00	26.69	0.09300839	1.26125342
Num.(Objs)	0	29.2	0.00	28.39	0	0
Num.(Objs)	0	30.9	0.00	30.09	0	0
Num.(Objs)	0	32.6	0.00	31.79	0	0
Num.(Objs)	0	34.3	0.00	33.49	0	0
Total	287		1.00			

Média ponderada p/freq. 7.67
Variância " " 18.090

ESPESSURAS DE NÃO RESERVATÓRIOS SIMULADAS EM 100 POÇOS NA MATRIZ 3D

Arquivo	VDH60.hst	intv classe	fi	zi médio (zim)	zim*fi	fi*(zim-m)^2
xmin	0.343434	1.70000		0.85		
xmax	34.3434					
ymax(obj)	150					
classes	20	intv				
Num.(Objs)	0	2.0	0.00	1.19	0	0
Num.(Objs)	150	3.7	0.50	2.89	1.44190936	0.88534544
Num.(Objs)	91	5.4	0.30	4.59	1.38871132	0.04074418
Num.(Objs)	45	7.1	0.15	6.29	0.94087795	0.63881069
Num.(Objs)	10	8.8	0.03	7.99	0.26556234	0.47146467
Num.(Objs)	4	10.5	0.01	9.69	0.12881627	0.39719904
Num.(Objs)	0	12.2	0.00	11.39	0	0
Num.(Objs)	0	13.9	0.00	13.09	0	0
Num.(Objs)	0	15.6	0.00	14.79	0	0
Num.(Objs)	0	17.3	0.00	16.49	0	0
Num.(Objs)	1	19.0	0.00	18.19	0.06044324	0.64810552
Num.(Objs)	0	20.7	0.00	19.89	0	0
Num.(Objs)	0	22.4	0.00	21.59	0	0
Num.(Objs)	0	24.1	0.00	23.29	0	0
Num.(Objs)	0	25.8	0.00	24.99	0	0
Num.(Objs)	0	27.5	0.00	26.69	0	0
Num.(Objs)	0	29.2	0.00	28.39	0	0
Num.(Objs)	0	30.9	0.00	30.09	0	0
Num.(Objs)	0	32.6	0.00	31.79	0	0
Num.(Objs)	0	34.3	0.00	33.49	0	0
Total	301		1.00			
Média ponderada p/freq.					4.23	
Variância	" "					3.082

Arquivo	VDH61.hst	intv classe	fi	zi médio (zim)	zim*fi	fi*(zim-m)^2
xmin	0.343434	1.70000		0.85		
xmax	34.3434					
ymax(obj)	181					
classes	20	intv				
Num.(Objs)	0	2.0	0.00	1.19	0	0
Num.(Objs)	181	3.7	0.57	2.89	1.64689023	0.59341828
Num.(Objs)	95	5.4	0.30	4.59	1.37225103	0.13770403
Num.(Objs)	32	7.1	0.10	6.29	0.63330094	0.56948936
Num.(Objs)	8	8.8	0.03	7.99	0.20109249	0.41855707
Num.(Objs)	2	10.5	0.01	9.69	0.06096493	0.21003758
Num.(Objs)	0	12.2	0.00	11.39	0	0
Num.(Objs)	0	13.9	0.00	13.09	0	0
Num.(Objs)	0	15.6	0.00	14.79	0	0
Num.(Objs)	0	17.3	0.00	16.49	0	0
Num.(Objs)	0	19.0	0.00	18.19	0	0
Num.(Objs)	0	20.7	0.00	19.89	0	0
Num.(Objs)	0	22.4	0.00	21.59	0	0
Num.(Objs)	0	24.1	0.00	23.29	0	0
Num.(Objs)	0	25.8	0.00	24.99	0	0
Num.(Objs)	0	27.5	0.00	26.69	0	0
Num.(Objs)	0	29.2	0.00	28.39	0	0
Num.(Objs)	0	30.9	0.00	30.09	0	0
Num.(Objs)	0	32.6	0.00	31.79	0	0
Num.(Objs)	0	34.3	0.00	33.49	0	0
Total	318		1.00			
Média ponderada p/freq.					3.91	
Variância	" "					1.929

Anexo 6

PESQUISA SOBRE ESTIMATIVA DAS DIMENSÕES DE RESERVATÓRIOS FLUVIAIS

1) USANDO O RAIO DE INVESTIGAÇÃO DOS TESTES DE FORMAÇÃO A POÇO REVESTIDO

2) INCORPORANDO AS CORREÇÕES DE HIRST & BLACKSTOCK & TYSON (1993) NUM ÚNICO HISTOGRAMA DE h DOS TESTEMUNHOS E A PARTIR DELE ESTIMAR W_c COM A EQUAÇÃO DO LORENZ *et al.* (1985) $W_c=6.78h^{1.54}$
(FEITO ANTERIORMENTE)

3) INCORPORANDO AS CORREÇÕES DE HIRST & BLACKSTOCK & TYSON (1993) NUM ÚNICO HISTOGRAMA DE h DOS TESTEMUNHOS E A PARTIR DELE ESTIMAR W_c COM A EQUAÇÃO COMBINADA DO BRIDGE & MACKEY (1993) $W_c= 15.85h^{1.58}$

4) INCORPORANDO AS CORREÇÕES DE HIRST & BLACKSTOCK & TYSON (1993) NUM ÚNICO HISTOGRAMA DE h DOS TESTEMUNHOS E A PARTIR DELE ESTIMAR W_c COM A EQUAÇÃO STUDY DO BRIDGE & MACKEY (1993) $W_c=8.85h^{1.82}$

5) INCORPORANDO AS CORREÇÕES DE HIRST & BLACKSTOCK & TYSON (1993) NUM ÚNICO HISTOGRAMA DE h DOS TESTEMUNHOS E A PARTIR DELE ESTIMAR W_c COM A EQUAÇÃO CRANE (1982) $W_c=12.82h^{1.59}$

6) FAZER CORRELAÇÕES ENTRE AS ESPESSURAS h NOS TESTEMUNHOS COM AS LARGURAS W_c NAS SEÇÕES GEOLÓGICAS.

7) INCORPORANDO AS CORREÇÕES DE HIRST & BLACKSTOCK & TYSON (1993) NUM ÚNICO HISTOGRAMA DE h DAS SEÇÕES GEOLÓGICAS E A PARTIR DELE ESTIMAR W_c COM A EQUAÇÃO COMBINADA DO BRIDGE & MACKEY (1993) $W_c= 15.85h^{1.58}$

8) INCORPORANDO AS CORREÇÕES DE HIRST & BLACKSTOCK & TYSON (1993) NUM ÚNICO HISTOGRAMA DE h DAS SEÇÕES GEOLÓGICAS E A PARTIR DELE ESTIMAR W_c COM A EQUAÇÃO STUDY DO BRIDGE & MACKEY (1993) $W_c=8.85h^{1.82}$

9) INCORPORANDO AS CORREÇÕES DE HIRST & BLACKSTOCK & TYSON (1993) NUM ÚNICO HISTOGRAMA DE h DAS SEÇÕES GEOLÓGICAS E A PARTIR DELE ESTIMAR W_c COM A EQUAÇÃO DO CRANE (1982) $W_c=12.82h^{1.59}$

10) INCORPORANDO AS CORREÇÕES DE HIRST & BLACKSTOCK & TYSON (1993) NUM ÚNICO HISTOGRAMA DE h DAS SEÇÕES GEOLÓGICAS E A PARTIR DELE ESTIMAR W_c COM A EQUAÇÃO DE LEEDER (1973) $W_c=6.78h^{1.54}$

CONCLUSÕES

OS DADOS DOS TFR'S NÃO SÃO CONFIÁVEIS DEVIDO AO TEMPO DE BUILD-UP NÃO TER SIDO SUFICIENTE PARA ESTABILIZAR O CRESCIMENTO DE PRESSÃO. PODEM SER ÚTEIS EM TERMOS QUALITATIVOS PARA SE TER NOÇÃO DAS DIMENSÕES, ONDE PREDOMINAM OS TAMANHOS DE 50m VARIANDO ATÉ APROXIMADAMENTE 500m

USAR O HISTOGRAMA DE h OBTIDO NOS TESTEMUNHOS, CUJAS ESPESSURAS DAS SUCESSÕES DE GRANODECRESCÊNCIA ASCENDENTE VAI DE 2,0 m ATÉ 11,2 m

PORÉM A EQUAÇÃO DE LEEDER (1973) APLICADA AOS DADOS DE TESTEMUNHOS RESULTA EM VALORES DE W_c , W_{pb} , W_m e R_m COMPATÍVEIS COM OS DADOS DE CAMPO. AS MAIORES FREQUÊNCIAS DE LARGURAS W_c ESTIMADAS COM ESTA EQUAÇÃO SÃO DE 100 m, VARIANDO ATÉ APROXIMADAMENTE 800 m.

A EQUAÇÃO COMBINADA DE BRIDGE & MACKAY (1993) APLICADA AOS DADOS DE TESTEMUNHOS RESULTA EM VALORES DE W_c APROXIMADAMENTE 2,5 VEZES MAIORES SE COMPARADOS COM A EQUAÇÃO DO LEEDER (1973).

A EQUAÇÃO STUDY DE BRIDGE & MACKAY (1993) APLICADA AOS DADOS DE TESTEMUNHOS RESULTA EM VALORES DE W_c APROXIMADAMENTE 1,8 A 3,0 VEZES MAIORES SE COMPARADOS COM A EQUAÇÃO DO LEEDER (1973).

A EQUAÇÃO CRANE (1982) APLICADA AOS DADOS DE TESTEMUNHOS RESULTA EM VALORES DE W_c APROXIMADAMENTE 2,0 VEZES MAIORES SE COMPARADOS COM A EQUAÇÃO DO LEEDER (1973).

NÃO HOUE ÊXITO NA TENTATIVA DE FAZER CORRELAÇÕES DAS ESPESSURAS h MEDIDAS NOS TESTEMUNHOS COM LARGURAS w MEDIDAS NAS SEÇÕES GEOLÓGICAS PORQUE DOIS POÇOS TESTEMUNHADOS ESTÃO FORA DAS SEÇÕES UM POÇO ESTÁ NA

Anexo b (cont.)

EXTREMIDADE DE DUAS SEÇÕES, E SOMENTE UM POÇO É APROVEITÁVEL, O QUE RESULTA EM APENAS 4 PARES DE AMOSTRAS.

O MESMO ESTUDO SOBRE OS DADOS DAS SEÇÕES GEOLÓGICAS INDICA QUE APLICANDO A EQUAÇÃO DE LEEDER (1973) E TODAS AS CORREÇÕES DE HIRST (1993) OS VALORES MAIS FREQUENTES DE W_c SÃO DE ATÉ 120 m.

APLICANDO A EQUAÇÃO DE BRIDGE & MACKEY COMBINADA (1993) E TODAS AS CORREÇÕES DE HIRST (1993) SOBRE OS DADOS DAS SEÇÕES GEOLÓGICAS INDICA QUE OS VALORES MAIS FREQUENTES DE W_c SÃO DE ATÉ 320 m.

APLICANDO A EQUAÇÃO DE STUDY DE BRIDGE & MACKEY (1993) E TODAS AS CORREÇÕES DE HIRST (1993) SOBRE OS DADOS DAS SEÇÕES GEOLÓGICAS INDICA QUE OS VALORES MAIS FREQUENTES DE W_c SÃO DE ATÉ 410 m.

APLICANDO A EQUAÇÃO DE CRANE (1982) E TODAS AS CORREÇÕES DE HIRST (1993) SOBRE OS DADOS DAS SEÇÕES GEOLÓGICAS INDICA QUE OS VALORES MAIS FREQUENTES DE W_c SÃO DE ATÉ 270 m.

Exercício:

Estimativa de largura w de um canal, a partir da espessura média dos depósitos de preenchimento de canal medidas nos testemunhos da área.

OBS: O sombreado marca a equação usada na modelagem.

h Testmo (m)	Equação para w	w estimado (m)
5,72	Leeder ($6,8h^{1.54}$)	99,74
5,72	B&M Comb. ($15,85h^{1.58}$)	249,29
5,72	B&M Study ($8,8h^{1.82}$)	210,35
5,72	Crane ($12,82h^{1.59}$)	205,18
5,72	Poletto seções ($3,696h + 266,61$)	287,75
5,72	Poletto T +23%+Hirst ($16,372h^{1.54}$)	240,15