



UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS

INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOCIÊNCIAS - ÁREA DE  
GEOENGENHARIA DE RESERVATÓRIOS

Mario Sérgio dos Santos Braga

**CONSTRUÇÃO DE MATRIZES DE PROPORÇÃO DE FÁCIES PARA A  
MODELAGEM GEOLÓGICA 3D DE RESERVATÓRIOS DELTAICOS DA BACIA  
DO RECÔNCAVO (BA)**

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

**Orientador: Dr. Olinto Gomes de Souza Junior**

**Co-Orientador: Dr. Carlos Henrique Lima Bruhn**

Este exemplar corresponde à  
redação final da dissertação defendida  
por Mario Sérgio dos Santos Braga  
e aprovada pela Comissão Julgadora  
em 16/12/98.

  
ORIENTADOR

CAMPINAS - SÃO PAULO

Dezembro - 1998

9912573





**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS**

**INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS**

**PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOCIÊNCIAS - ÁREA DE  
GEOENGENHARIA DE RESERVATÓRIOS**

**Mario Sérgio dos Santos Braga**

**CONSTRUÇÃO DE MATRIZES DE PROPORÇÃO DE FÁCIES PARA A  
MODELAGEM GEOLÓGICA 3D DE RESERVATÓRIOS DELTAICOS DA BACIA  
DO RECÔNCAVO (BA)**

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

**Orientador: Dr. Olinto Gomes de Souza Junior - PETROBRÁS**

**Co-Orientador: Dr. Carlos Henrique Lima Bruhn - PETROBRÁS**

**CAMPINAS - SÃO PAULO**

Dezembro - 1998

**FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA  
BIBLIOTECA do I.G. – UNICAMP**

Braga, Mario Sérgio dos Santos

Si57e      Construção de matrizes de proporção de fácies para a modelagem geológica 3D de reservatórios deltaicos da Bacia do Recôncavo (BA): área de geoengenharia de reservatórios/Mario Sérgio dos Santos Braga - Campinas, SP: [s.n.], 1998.

Orientador: Olinto Gomes de Souza Junior

Co-Orientador: Carlos Henrique Lima Bruhn.

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual de Campinas, Instituto de Geociências.

1. Fácies (Geologia). 2. Reservatórios – Recôncavo (BA). 3. Modelagem geológica. 4. Geoestatística. I. Souza Junior, Olinto Gomes. II. Bruhn, Carlos Henrique Lima. III. Universidade Estadual de Campinas, Instituto de Geociências. IV. Título.



UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS

INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOCIÊNCIAS - ÁREA DE  
GEOENGENHARIA DE RESERVATÓRIOS

**AUTOR: Mario Sérgio dos Santos Braga**

**TÍTULO DA DISSERTAÇÃO: CONSTRUÇÃO DE MATRIZES DE PROPORÇÃO  
DE FÁCIES PARA A MODELAGEM GEOLÓGICA 3D DE RESERVATÓRIOS  
DELTAICOS DA BACIA DO RECÔNCAVO (BA)**

**ORIENTADOR: Dr. Olinto Gomes de Souza Junior**

**CO-ORIENTADOR: Dr. Carlos Henrique Lima Bruhn**

**Aprovada em: \_\_\_\_/\_\_\_\_/\_\_\_\_**

**PRESIDENTE: Dr. Olinto Gomes de Souza Junior**

A handwritten signature in black ink, corresponding to the name of the president, Dr. Olinto Gomes de Souza Junior.

**EXAMINADORES:**

**Dr. Olinto Gomes de Souza Junior - Orientador**

**Prof. Dr. Armando Zaupa Remacre**

A handwritten signature in black ink, corresponding to the name of the examiner, Prof. Dr. Armando Zaupa Remacre.

**Dr. Mauro Roberto Becker**

A handwritten signature in black ink, corresponding to the name of the examiner, Dr. Mauro Roberto Becker.

Campinas, 17 de dezembro de 1998

aos meus pais e a minha esposa.

## **Agradecimentos**

À PETROBRAS, pela oportunidade de realizar deste curso.

Aos meus orientadores Olinto e Bruhn, pelo apoio e pelas sugestões.

A Marcelo e Tereza, João e Marli, Cláudio e Sandra, Márcio e Ana Paula, Júlio e Renata, Paulo e Nilza e a Marisa, pelos bons momentos passados em Campinas.

A Carlos Soares, pela ajuda na aquisição dos dados para esta dissertação.

A Rosane Trajano, Marcelo Monteiro e Cristiano Sombra, pelo auxílio na “pilotagem” do Heresim e do AnaSeTe.

A Jorge Campos e Fernando César, pela edição das figuras.

A Jonas Castro e Paulo Paraízo, pela revisão dos textos e pelas sugestões dadas.

Aos demais colegas da GERET, que estavam sempre presentes quando precisei.

E finalmente, a Ana, pelo apoio e paciência que teve comigo durante todo o curso e também pela revisão e montagem desta dissertação.

# SUMÁRIO

	pag
DEDICATÓRIA	i
AGRADECIMENTOS	ii
SUMÁRIO	iii
LISTA DE FIGURAS	vi
LISTA DE TABELAS	ix
RESUMO	x
ABSTRACT	xi
CAPÍTULO 1 - O PROJETO DE PESQUISA E A APRESENTAÇÃO DOS DADOS	1
1.1 - Introdução	1
1.2 - As Heterogeneidades dos Reservatórios	2
1.3 - A Modelagem do Reservatório	5
1.4 - Objetivos e Metodologia de Trabalho	7
1.5 - Definição da Área do Projeto	10
1.6 - Coleta e Tratamento dos Dados	10
CAPÍTULO 2 - ARCABOUÇO GEOLÓGICO DA ÁREA DO PROJETO	13
2.1 - Introdução	13
2.2 - Características Estratigráficas e Estruturais da Área	13
2.3 - Descrição das Litofácies	16
2.4 - Modelo Geológico Conceitual	21
CAPÍTULO 3 - DEFINIÇÃO DOS LITOTIPOS	24
3.1 - Introdução	24
3.2 - Análise Estatística Multivariada	24
3.2.1 - Análise dos Componentes Principais (ACP)	25
3.2.2 - Análise Discriminante (AD)	26
3.2.3 - Análise de Agrupamento (AA)	28
3.3 - Análise dos Resultados	30

3.3.1 - Análise dos Componentes Principais	30
3.3.2 - Abordagem Supervisionada	32
3.3.3 - Abordagem Não-Supervisionada	34
<b>CAPÍTULO 4 - ANÁLISE DA DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL DOS LITOTIPOS</b>	<b>40</b>
4.1 - Introdução	40
4.2 - Distribuição dos Litotipos no Intervalo Total	41
4.2.1 - Mapas e Seções Geológicas	41
4.2.2 - Curvas de Proporção Horizontal e Vertical	44
4.2.3 - Análise Variográfica das Proporções de Litotipos	46
4.3 - Distribuição dos Litotipos na Zona B	49
4.3.1 - Variografia Direta das Indicatrizes	50
4.3.2 - Variografia Cruzada das Indicatrizes	52
4.3.3 - Krigagem das Indicatrizes	55
4.4 - Distribuição dos Litotipos nas Zonas A e C	59
<b>CAPÍTULO 5 - CONSTRUÇÃO DAS MATRIZES DE PROPORÇÃO</b>	<b>62</b>
5.1 - Introdução	62
5.2 - Métodos de Construção das Matrizes de Proporção	63
5.2.1 - Métodos das Áreas	63
5.2.2 - Método da Krigagem das Proporções das Fácies dos Poços	63
5.2.3 - Método da Krigagem das Proporções das Fácies com um Condicionador	65
5.2.4 - Combinação dos Métodos Anteriores	65
5.3 - Métodos Utilizados na Área de Estudo	66
5.4 - Estabelecimento do <i>Grid</i> da Matriz de Proporção	67
5.5 - Construção de Matrizes de Proporção para a Zona B	67
5.5.1 - Matriz de Proporção pelo Método das Áreas	67
5.5.2 - Matriz de Proporção pelo Método da Krigagem das Proporções nos Poços	69
5.5.3 - Matriz de Proporção pelo Uso de Condicionador Adicional	70
5.6 - Construção de Matrizes de Proporção para as Demais Zonas	73
5.6.1 - Matriz de Proporção da Zona A	73
5.6.2 - Matriz de Proporção da Zona C	75
5.6.3 - Matriz de Proporção do Intervalo Total	77

CAPÍTULO 6 - SIMULAÇÃO ESTOCÁSTICA CONDICIONAL DOS LITOTIPOS	79
6.1 - Introdução	79
6.2 - Simulação Estocástica Não-Estacionária dos Litotipos	80
6.2.1 - Preparação e Estrutura 3D dos Dados para a Simulação	80
6.2.2 - Análise Variográfica das Indicatrizes	80
6.2.3 - O Modelo Estrutural da Função Gaussiana $Y(x)$	81
6.2.4 - A Simulação Condicional de $Y(x)$	83
6.2.5 - A Anamorfose de $Y(x)$	85
6.3 – Resultados	86
6.3.1 – Zona B	86
6.3.2 - Intervalo Total	89
CAPÍTULO 7 – CONCLUSÕES	96
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	98

## Lista de Figuras

	pag
1.1 - Classificação das heterogeneidades de Pettijohn	3
1.2 - Classificação das heterogeneidades de Weber	4
1.3 - Tipos de reservatório de acordo com a distribuição das heterogeneidades	5
1.4 - Fluxograma das principais etapas do projeto	8
1.5 - Mapa de localização da Bacia do Recôncavo e da área de estudo	11
1.6 - Mapas de distribuição dos principais corpos arenosos e dos perfis elétricos	12
2.1 - Mapa geológico regional	14
2.2 - Carta estratigráfica da Bacia do Recôncavo	15
2.3 - Intervalo de estudo (subciclo) inserido num ciclo estratigráfico completo de transgressão do lago	17
2.4 - Testemunhos das litofácies 1,2,3 e 4	19
2.5 - Testemunhos das litofácies 5,6,7 e 8	20
2.6 - Diagrama simplificado dos principais subambientes do sistema deltaico	22
2.7 - Geometria externa típica dos lobos de deltas dominados por rios	22
2.8 - Perfil esquemático do poço P25, mostrando os zoneamentos efetuados no intervalo estratigráfico do projeto	23
3.1 - Passos para a análise dos componentes principais	26
3.2 - Representação gráfica da análise da função discriminante aplicada a duas distribuições bivariadas idealizadas	27
3.3 - Representação de eletrofáceis, no espaço tridimensional dos perfis	27
3.4 - Distribuição tridimensional das variáveis de perfis e distribuição bidimensional dos dois componentes principais	30
3.5 - Histogramas das distribuições dos valores dos perfis e dos valores dos componentes principais	32
3.6 - Distribuição das classes modais conforme os K vizinhos mais próximos	35
3.7 - Perfil esquemático do poço P25, mostrando os zoneamentos estratigráficos, as litofáceis, as curvas dos perfis e os resultados da análise de agrupamento das variáveis de perfis e dos componentes principais	37
4.1 - Regra para a mudança de suporte vertical dos litotipos de 0,2 para 1,0m	41
4.2 - Mapas de proporção de espessuras dos litotipos do intervalo estratigráfico total	42
4.3 - Seções geológicas estratigráficas da região em estudo	43
4.4 - Mapa de localização das seções estratigráficas e seções das curvas de proporção horizontal	43
4.5 - Curvas de proporção dos litotipos do intervalo total	45
4.6 - Variogramas experimentais horizontais das proporções dos litotipos	

do intervalo total	47
4.7 - Variogramas experimentais verticais das proporções dos litotipos do intervalo total	47
4.8 - Perfil esquemático do poço P25, mostrando os zoneamentos estratigráficos, as litofáceis, as curvas dos perfis, os resultados da análise de agrupamento das variáveis de perfis e dos componentes principais e a subdivisão do intervalo estudado para efeito de modelagem 3D	49
4.9 - Variogramas experimentais horizontais das indicatrizes das proporções dos litotipos da Zona B	51
4.10 - Variogramas experimentais verticais das indicatrizes das proporções dos litotipos da Zona B	51
4.11 - Curvas de probabilidade condicional horizontal	54
4.12 - Curvas de probabilidade condicional vertical	55
4.13 - <i>Grid</i> para a krigagem da indicatriz dos litotipos da Zona B	56
4.14 - Bloco-diagrama das krigagens das indicatrizes dos litotipos	57
4.15 - Seções horizontais da krigagem das indicatrizes dos litotipos 1 e 2	57
4.16 - Seções verticais, paralelas ao eixo de deposição NW/SE, da krigagem das indicatrizes dos litotipos 1 e 2	57
4.17 - Seções verticais, transversais ao eixo de deposição SW/NE, da krigagem das indicatrizes dos litotipos 1 e 2	57
4.18 - Seções horizontais da krigagem da indicatriz do litotipo 1	58
4.19 - Seções horizontais da krigagem da indicatriz do litotipo 3	58
4.20 - Seções verticais, paralelas ao eixo de deposição NW/SE, da krigagem das indicatrizes dos litotipos 1 e 3	59
4.21 - Seções verticais, transversais ao eixo de deposição SW/NE, da krigagem das indicatrizes dos litotipos 1 e 3	59
4.22 - Variogramas experimentais das proporções dos litotipos da Zona C	60
4.23 - Variogramas experimentais das proporções dos litotipos da Zona A	61
5.1 - Recobrimento do grid de simulação pelo grid da matriz de proporção	62
5.2 - Geração de proporções de litotipos pelo processo de suavização	64
5.3 - Métodos de construção de matrizes das proporções dos litotipos utilizados segundo duas abordagens de modelagem da repartição espacial dos litotipos	66
5.4 - Mapa com o cut off de 0,65 da razão $(ltp1 + ltp2)/ltp$ total	68
5.5 - Matriz de proporção da Zona B, obtida a partir da divisão do grid em áreas de predominância de rochas reservatório e não-reservatório	69
5.6 - Modelagem dos variogramas das proporções de litotipos da Zona B	70
5.7 - Matriz de proporção da Zona B, obtida a partir da krigagem das das proporções dos litotipos dos poços	71

5.8 - Mapa da razão litotipo 1/litotipo total da Zona B, obtido a partir da suavização dos mapas krigados das indicatrizes dos litotipos	72
5.9 - Matriz de proporção da Zona B, obtida a partir das curvas de proporção definidas nos poços e do uso de um condicionador da ocorrência da rocha de reservatório	72
5.10 - Refinamento das matrizes de proporção construídas pelos métodos: (a) krigagem das proporções e (b) krigagem com condicionador	73
5.11 - Modelagem dos variogramas das proporções dos litotipos da Zona A	74
5.12 - Matriz de proporção da Zona A, obtida a partir das curvas de proporção dos poços	75
5.13 - Modelagem dos variogramas das proporções dos litotipos da Zona C	76
5.14 - Matriz de proporção da Zona C, obtida a partir das curvas de proporção dos poços	77
5.15 - Modelagem dos variogramas das proporções dos litotipos do intervalo total	78
5.16 - Matriz de proporção do intervalo estratigráfico total, obtido a partir das curvas de proporção dos poços	78
6.1 - Modelagem dos variogramas das indicatrizes dos litotipos da Zona B, com o modelo exponencial fatorizado	84
6.2 - Modelagem dos variogramas das indicatrizes do litotipo 1 das zonas A, C e total com o modelo exponencial fatorizado	85
6.3 - Mapa de localização das seções verticais analisadas na simulação da repartição dos litotipos do intervalo estudado	87
6.4 - Seções estratigráficas horizontais (nível -10 m) das simulações da Zona B	88
6.5 - Seções estratigráficas horizontais (nível -20 m) das simulações da Zona B	88
6.6 - Seções estratigráficas horizontais (nível -30 m) das simulações da Zona B	89
6.7 - Seções estruturais verticais, longitudinais (NW/SE) e transversais (SW/NE) ao eixo geral de deposição dos sedimentos, das simulações da Zona B	91
6.8 - Seções estratigráficas horizontais das simulações do intervalo total:	92
6.9 - Seções estruturais verticais, longitudinais (NW/SE) e transversais(SW/NE) ao eixo geral de deposição dos sedimentos, das simulações do intervalo total.	93
6.10 - Mapas de isópacas dos litotipos do intervalo total gerados por simulações	94
6.11 - Seções verticais estruturais, longitudinais (NW/SE) e transversais (SW/NE) ao eixo geral de deposição dos sedimentos, das três simulações do intervalo total.	95

## Listas de Tabelas

3.1 - Autovalores dos três componentes principais das variáveis de perfis	31
3.2 - Autovetores dos três componentes principais das variáveis de perfis	31
3.3 - Composição do “grupo de aprendizagem” para a Análise Discriminante	32
3.4 - Taxas de erro na reclassificação das litofácies	33
3.5 - Matriz de confusão dos grupos formados a partir da litofácies	33
3.6 - Distribuição das observações nos grupos formados segundo as variáveis de perfis e de componentes principais	36
3.7 - Características da qualidade de reservatório dos grupos formados pela Análise de Agrupamento dos componentes principais	38
3.8 - Matriz de confusão dos grupos formados a partir da Análise de Agrupamento dos componentes principais	39
3.9 - Estimativas de erro para os grupos formados a partir da Análise de Agrupamento dos componentes principais	39
5.1 - Parâmetros da modelagem dos variogramas dos litotipos da Zona B	70
5.2 - Parâmetros da modelagem dos variogramas dos litotipos da Zona A	74
5.3 - Parâmetros da modelagem dos variogramas dos litotipos da Zona C	76
5.4 - Modelos teóricos de variogramas ajustados para os litotipos do intervalo total	77
6.1 - Alcances dos variogramas das indicatrizes dos litotipos das zonas A, C e total, ajustados com o modelo exponencial fatorizado	84



**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS**

**INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS**

**PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOCIÊNCIAS - ÁREA DE  
GEOENGENHARIA DE RESERVATÓRIOS**

**CONSTRUÇÃO DE MATRIZES DE PROPORÇÃO DE FÁCIES PARA A  
MODELAGEM GEOLÓGICA 3D DE RESERVATÓRIOS DELTAICOS DA BACIA  
DO RECÔNCAVO (BA)**

**RESUMO**

**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO**

**Mário Sérgio dos Santos Braga**

A matriz de proporção de fácies é uma ferramenta que permite estabelecer modelos 3D da distribuição espacial das heterogeneidades dos reservatórios, a partir das informações obtidas nos poços e na sísmica. O presente trabalho objetivou a construção de matrizes de proporção de fácies dos depósitos sedimentares deltaicos da Formação Pojuca da Bacia do Recôncavo, segundo diferentes metodologias. Precedendo a construção das matrizes de proporção, foi efetuada a correlação rocha-perfil através da utilização de duas abordagens não-paramétricas, uma supervisionada e outra não-supervisionada. O resultado da correlação permitiu a definição de quatro litotipos (conjuntos de fácies permo-porosas) cuja análise do arranjo espacial mostrou que o intervalo estratigráfico estudado poderia ser dividido em três zonas com características litológicas distintas. As matrizes de proporções de fácies, construídas para estas zonas e para o intervalo total, possibilitaram compreender as relações de continuidade lateral e vertical existentes entre os litotipos. Além disto, as três matrizes de proporção construídas para a zona predominantemente arenosa mostraram distintos padrões de continuidade dos litotipos. Por fim, os arranjos espaciais dos litotipos tanto desta zona como do intervalo estratigráfico total, obtidos das matrizes de proporção, foram simulados através de um algoritmo estocástico gaussiano truncado. As imagens geradas confirmaram que os padrões de continuidade dos litotipos variaram em função da matriz de proporção utilizada e ratificaram a importância do emprego da matriz de proporção na modelagem de reservatórios heterogêneos.



UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS

INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOCIÊNCIAS - ÁREA DE  
GEOENGENHARIA DE RESERVATÓRIOS

FACIES PROPORTION MATRIXES BUILDING FOR 3D GEOLOGIC  
MODELLING OF RECÔNCAVO BASIN DELTAIC RESERVOIRS (BA)

ABSTRACT

MASTER DISSERTATION

**Mário Sérgio dos Santos Braga**

The facies proportion matrix is a tool which enables the construction of 3D models for the distribution of reservoir heterogeneities by using well and seismic information. This work aimed to build proportion matrixes of the deltaic facies of the Pojuca Formation in the Recôncavo Basin through different methodologies. The first step before building the proportion matrixes was to perform a core vs. log estimation based on two different non-parametric approaches, one supervised and another non-supervised. As a result of such estimation, four lithotypes (different facies grouped by similar porosity and permeability characteristics) were defined. By its turn, the spatial distribution of these lithotypes determined the division of the studied stratigraphic section into three zones with distinctive lithological characteristics, one of them sand-rich and more important in relation to reservoir aspects. The facies proportion matrixes built for these zones and for the studied stratigraphic section significantly improved the understanding of the relations in horizontal and vertical continuities that exist among the lithotypes. Finally, the spatial distribution of the lithotypes (i) of the whole stratigraphic section and (ii) of the sand-rich zone were simulated through a truncated Gaussian algorithm. The generated images confirm that the lithotype patterns of continuity depend on the type of proportion matrix which is used, they also corroborate the importance in using proportion matrixes to model heterogeneous reservoirs.

## **CAPÍTULO 1 – O PROJETO DE PESQUISA E A APRESENTAÇÃO DOS DADOS**

### **1.1 - INTRODUÇÃO**

Na última década, a indústria do petróleo tem dado importância cada vez maior ao estudo detalhado das acumulações em fase de produção, visando, em última análise, aumentar a eficiência da recuperação de hidrocarbonetos. Tal política é, unicamente, reflexo do custo e da dificuldade crescentes envolvidos na descoberta de campos de grandes dimensões.

Para atingir esta meta, têm sido desenvolvidas ferramentas e técnicas que, direta ou indiretamente, auxiliam a caracterização geológica mais detalhada e realista dos reservatórios, podendo ser empregadas ao longo de toda a história do campo, isto é, desde a perfuração dos primeiros poços (fase exploratória) até o estágio mais avançado da produção (fase exploratória). Como exemplos relacionados à fase exploratória, podem ser citadas as técnicas de perfuração de poços horizontais e multilaterais e aquela que permite a obtenção de novos perfis elétricos e radioativos. Na fase exploratória, ressaltam-se o uso da sísmica 4D, novas técnicas de estimulação e de completação e a construção de simuladores de fluxo mais potentes e específicos. A interpretação geológica dos reservatórios, efetuada durante aquelas duas etapas, utiliza, entre outras técnicas, a análise de imagem de lâminas delgadas, a minipermeamtria, o estudo de afloramentos análogos aos reservatórios, a estratigrafia de alta resolução, o emprego da estatística multivariada, da geoestatística e da sísmica de alta resolução.

O emprego deste volume enorme de informações na caracterização geológica de qualquer reservatório exige a integração de várias disciplinas (Geologia, Geofísica, Engenharia, Estatística, Geoestatística etc.), uma vez que estas informações provêm de fontes distintas, tais como perfis, sísmica, petrofísica, análises de fluidos e de rocha.

Um exemplo de como esta integração pode ser utilizada é descrito por Souza Jr. (1997), segundo o qual a modelagem de reservatório pode ser dividida em quatro etapas principais:

- elaboração de um modelo geológico (e sísmico) conceitual do reservatório;

- construção do modelo matemático (determinístico ou probabilístico) para representar o modelo geológico e, como consequência, os modelos de distribuição de porosidade, permeabilidade, saturação de óleo etc.;

- mudança de suporte (*up scaling*) entre a malha de simulação de heterogeneidades e a malha de simulação de fluxo no reservatório;

- simulação do deslocamento de fluidos.

A elaboração do modelo geológico conceitual representa uma etapa decisiva na caracterização ou modelagem de um reservatório pois, ao estabelecer os modelos deposicional, diagenético e estrutural do reservatório, permite a predição tanto da geometria e distribuição dos corpos porosos como das barreiras de permeabilidade ou heterogeneidades a eles associadas. Como resultado, produzem-se modelos 3D que espelham mais fielmente o arranjo espacial destas heterogeneidades a diferentes escalas, controlando, assim, a distribuição da permeabilidade e aumentando a confiabilidade das simulações de fluxo.

## 1.2 – AS HETEROGENEIDADES DOS RESERVATÓRIOS

Pode-se dizer que um dos aspectos mais relevantes da caracterização de reservatórios é a identificação dos padrões de distribuição de suas heterogeneidades, uma vez que elas influenciam sobremaneira a quantificação de volumes, a previsão do comportamento da produção e a escolha de técnicas que visam o aumento da recuperação de petróleo.

A importância atribuída à presença das heterogeneidades é ratificada pela grande quantidade de estudos realizados sobre o assunto, que resultaram, muitas vezes no estabelecimento de classificações das heterogeneidades segundo aspectos de naturezas distintas, como por exemplo sua origem genética (sedimentológica, diagenética, tectônica etc.), a escala de observação utilizada e sua influência sobre o fluxo.

Dentre as classificações existentes, destacam-se aquelas propostas por Pettijohn et al. (1973), Weber (1986) e Weber & van Geuns (1990). Pettijohn et al. (1973) dividem as heterogeneidades segundo a escala de ocorrência (Figura 1.1). De acordo com esta classificação, as heterogeneidades distribuem-se desde a escala de quilômetros (gigaescala), abrangendo um ou mais campos, passando pelas heterogeneidades de megaescala (reservatório), de macroescala ( fácies sedimentares do reservatório), de mesoescala

(arcabouço textural e estrutural das rochas), até as heterogeneidades de microescala (arranjo mineralógico).

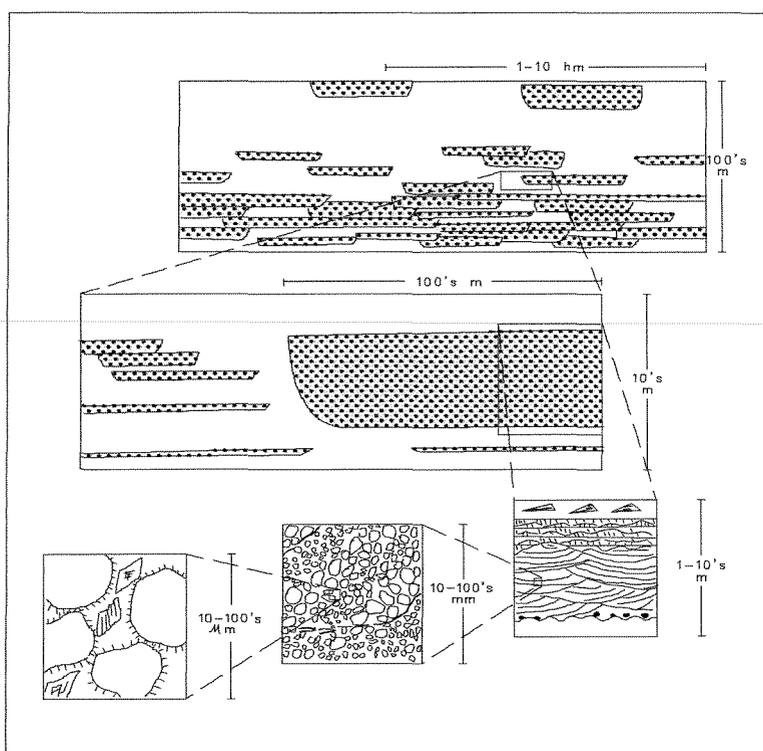


Figura 1.1 - Classificação das heterogeneidades segundo a escala de observação (modificado de Pettijohn et al., 1973).

A classificação proposta por Weber (1986) (Figura 1.2), mostra estreitas ligações com a classificação de Pettijohn et al. (1973). Nela, as heterogeneidades são divididas em sete tipos, que incluem, desde falhas regionais, selantes ou não, passando por limites de unidades genéticas, zonas permeáveis ou barreiras de permeabilidade dentro destas unidades, fraturas abertas ou fechadas até as estruturas e texturas sedimentares e a composição mineralógica das rochas reservatório. Paraizo (1993) salienta que a classificação de Weber (1986), por ser baseada nos tipos, apresenta maior nível de detalhamento.

Weber & van Geuns (1990) confirmam a importância da distribuição das heterogeneidades para a modelagem de fluxo, ao agruparem os reservatórios em três tipos: “bolo em camadas” (*layercake*), “quebra-cabeça” (*jigsaw-puzzle*) e “labirinto” (*labyrinth*) (Figura 1.3).

Os reservatórios do tipo “bolo em camadas” consistem de extensos e homogêneos pacotes de rochas reservatório cujas propriedades, quando representadas através de mapas, não mostram grandes discontinuidades, como as permeabilidades vertical e horizontal. Os

limites entre as camadas podem coincidir com as mudanças mais significativas das propriedades para o fluxo (Figura 1.3a).

Tipos de heterogeneidades de reservatório	
1 Falha selante Falha semi-selante Falha não-selante	
2 Limites de unidades genéticas	
3 Zonamento de permeabilidade dentro de unidades genéticas	
4 Barreiras dentro de unidades genéticas	
5 Laminação, estratificação cruzada ...	
6 Heterogeneidade microscópica, tipos de texturas, mineralogia ...	
7 Fratura aberta e fechada	

Figura 1.2 - Classificação dos tipos de heterogeneidades (modificado de Weber, 1986).

Os reservatórios do tipo “quebra-cabeça” são compostos por uma série de corpos de rocha reservatório que ficam em contato uns com os outros, ocorrendo, ocasionalmente barreiras de permeabilidade efetivas entre as unidades. Internamente, certas unidades podem apresentar-se muito heterogêneas, sendo necessária, então, sua quantificação pela modelagem.

Os reservatórios do tipo “labirinto” são, tipicamente, complexos arranjos de rochas reservatório, cuja continuidade depende da direção de deposição, sendo freqüentemente prejudicada pela presença de rochas com baixa permeabilidade. São raros os modelos 3D detalhados efetuados sobre estes reservatórios, Weber & van Geuns (1990), porém, sugerem o uso de modelos probabilísticos.

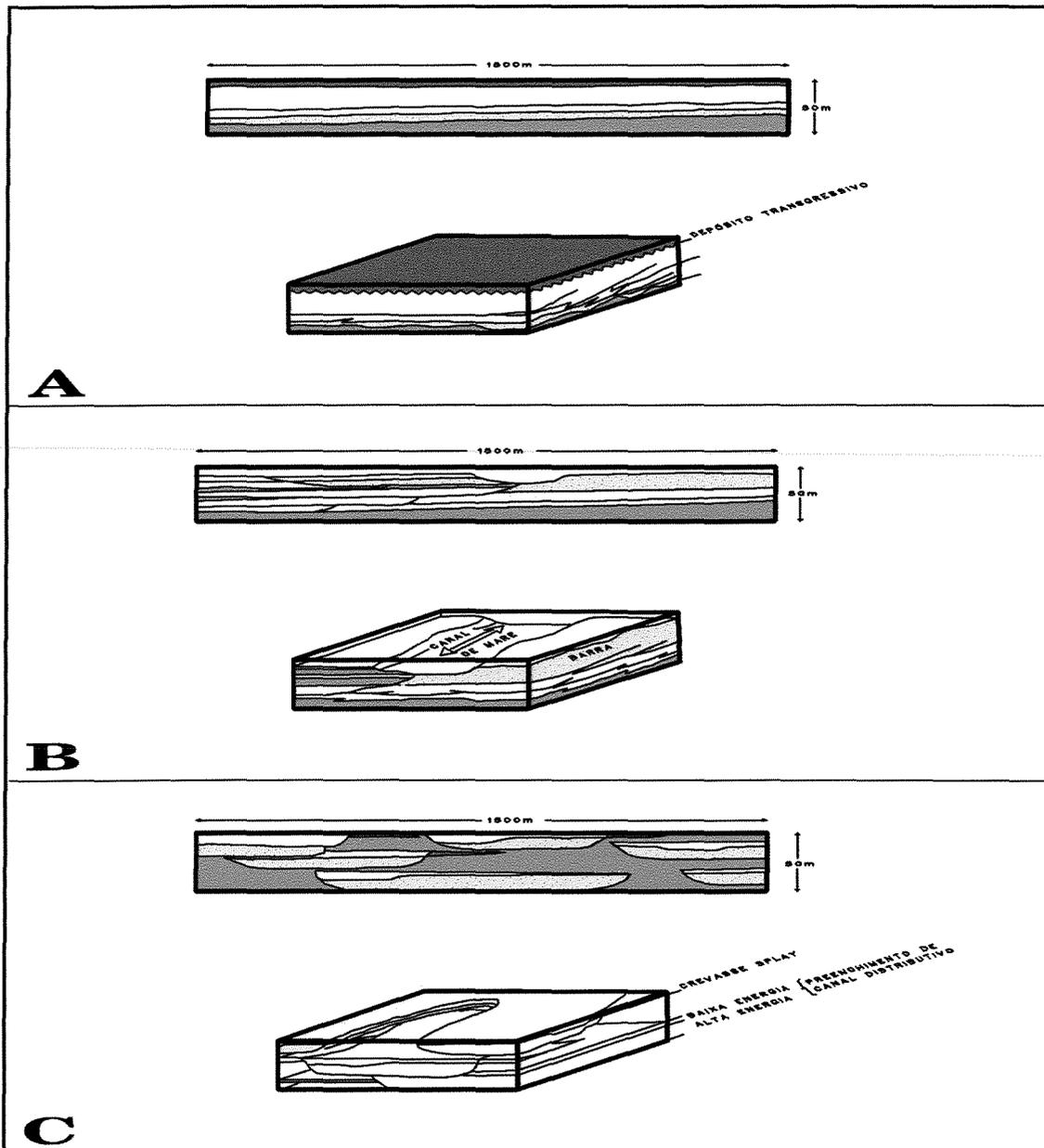


Figura 1.3 - Tipos de reservatórios de acordo com a distribuição das heterogeneidades (modificado de Weber & van Geuns, 1990): (a) “bolo em camadas”; (b) “quebra-cabeça” e (c) labirinto.

### 1.3 – A MODELAGEM DO RESERVATÓRIO

Tradicionalmente, as tentativas para caracterizar geologicamente as heterogeneidades são efetuadas a partir de dados pontuais ou quase pontuais, representados pelas descrições de testemunhos de rocha que, em conjunto com as medidas de perfis e com o auxílio de técnicas de análise estatística, modelam a seqüência vertical observada nos poços.

A correlação desta modelagem 1D entre todos os poços e o conhecimento do modelo geológico conceitual da área permite a definição de superfícies que delimitam o reservatório no tempo e no espaço. Como resultado, são fornecidos modelos preditivos bastante robustos, que possibilitam a modelagem 2D clássica, representada por mapas e seções verticais das propriedades médias ( $\phi$ ,  $K$  etc.) ou de totalização (isópaca total, *net pay*, *hphiso* etc.) do reservatório. Entretanto, uma vez que esses dados representam apenas uma fração da percentagem do volume do reservatório, o processo de caracterização requer a extrapolação espacial dos dados entre os poços de controle. Esta extrapolação pode ser obtida através da geração de uma modelagem 3D que incorpore tanto as informações dos poços, 1D, como aquelas adquiridas com o modelo geológico conceitual e, eventualmente, com a sísmica.

Até recentemente, a modelagem 3D era uma metodologia ainda pouco empregada nos estudos de reservatório devido à dificuldade na análise dos resultados obtidos com a aplicação de métodos mais sofisticados, como os métodos geoestatísticos, o que levava à adoção de modelos muito simplificados. Entretanto, sua aplicação foi favorecida com o desenvolvimento de *softwares* voltados para este tipo de modelagem.

Segundo Tinker (1996), o uso de técnicas de análise e interpretação 3D propicia a geração de um modelo tridimensional do reservatório, que serve como parâmetro de entrada para simulações de fluxo, além de permitir a tomada de decisões gerenciais, o controle da qualidade dos dados e os cálculos volumétricos.

Dentro deste contexto, o emprego da matriz de proporção de fácies possibilita a utilização integral das informações obtidas dos poços e da sísmica, de modo que, ao acessar o volume interpoços, se torne possível a modelagem do reservatório em três dimensões.

A matriz de proporção de fácies permite resumir a estratigrafia local e conhecer a arquitetura do reservatório. Compõe-se de um conjunto de curvas de proporções verticais de fácies distribuídas em um *grid* 2D que recobre toda a área do reservatório. É uma ferramenta de fácil construção, na qual integram-se técnicas próprias à análise do arranjo espacial das fácies, em particular, as geoestatísticas.

O emprego das proporções das fácies obtidas pela construção da matriz de proporção, em conjunto com a simulação estocástica gaussiana, possibilita a modelagem 3D mais confiável do reservatório.

## 1.4 – OBJETIVOS E METODOLOGIA DE TRABALHO

Seguindo a tendência atual que busca a compreensão mais apurada do comportamento permo-poroso do reservatório, através da caracterização de seus elementos arquiteturais e de suas heterogeneidades, esta dissertação apresenta como objetivo principal a construção de matrizes de proporção de fácies dos reservatórios deltaicos da Formação Pojuca, pertencentes a um importante campo da Bacia do Recôncavo. A partir do uso das informações disponíveis, buscou-se compreender as relações geométricas existentes entre as fácies sedimentares presentes nas regiões entre os poços, para, numa etapa subsequente, efetuar uma modelagem geológica 3D probabilística mais realista, através da simulação estocástica gaussiana truncada.

Do ponto de vista acadêmico, o estudo possibilitou o emprego de uma metodologia que integrasse o conceito qualitativo da Geologia com a natureza quantitativa da Estatística Multivariada e da Geoestatística, de modo que seu resultado respeitasse ambos aspectos.

Do ponto de vista técnico, este trabalho permitiu a formação de uma nova maneira de visualizar o reservatório e, para estudos futuros, uma metodologia que pode ser estendida para além dos limites da área aqui estudada.

Para atingir o objetivo proposto, cinco etapas foram ultrapassadas, cada uma delas visando a um objetivo secundário, conforme pode ser observado no fluxograma da Figura 1.4.

Na primeira etapa foi escolhida a área e o intervalo estratigráfico de interesse, selecionados os poços e coletadas todas as informações referentes aos perfis, às descrições de testemunhos, às análises petrofísicas e à bibliografia. Em seguida, foi efetuado o tratamento dos dados visando a montagem de um banco de dados que serviu como *input* para a realização das etapas seguintes. Neste banco de dados estão presentes, a cada 0,20 m de profundidade, o nome do poço, sua cota, os valores dos perfis elétricos e radioativos (raios-gama, potencial espontâneo, resistividade, densidade, neutrônico e sônico), a porosidade e permeabilidade petrofísicas, as fácies sedimentares descritas em testemunhos e o zoneamento do intervalo.

Na segunda etapa, foi realizada correlação rocha-perfil, isto é, a partir das feições grafoelétricas (ou de seus componentes principais), registradas nos poços, e de suas relações com as litofácies descritas nos intervalos testemunhados, foram definidos, ao longo de todos os poços, conjuntos de litofácies, denominados de litotipos, cada um deles descrevendo, em última análise, a qualidade permo-porosa do intervalo estudado.

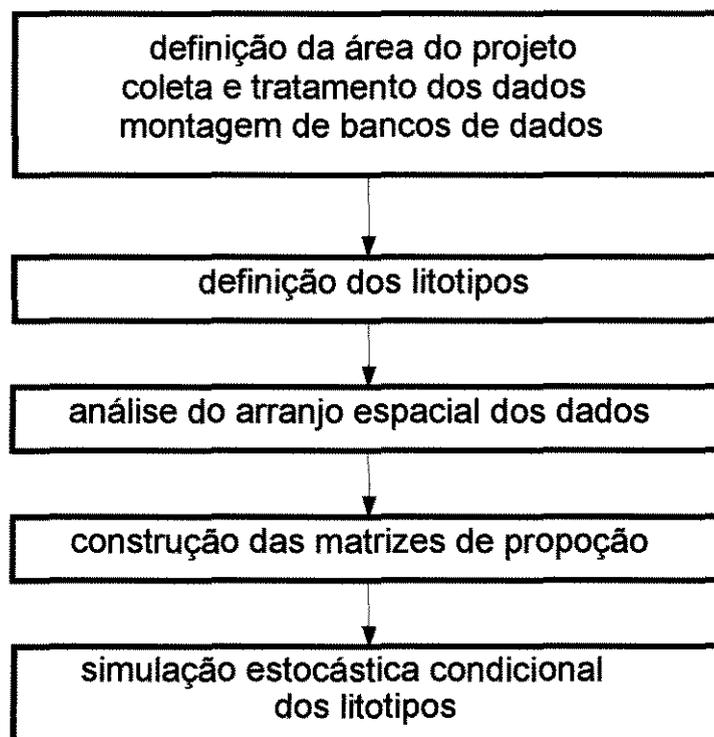


Figura 1.4 - Fluxograma das principais etapas do projeto.

Para tanto foram utilizadas, através do pacote estatístico SAS, técnicas de Análise Estatística Multivariada, seguindo-se duas abordagens não-paramétricas distintas: uma supervisionada e outra não-supervisionada.

Na abordagem supervisionada, partiu-se de um número preestabelecido de grupos (as litofácies descritas nos testemunhos) para, com base nas relações entre essas variáveis e as de perfis, gerar funções discriminantes que melhor separassem os grupos de litofácies e, que em seguida os extrapolassem para as demais amostras. Na abordagem não-supervisionada, o estabelecimento dos grupos de litofácies baseou-se unicamente na estrutura intrínseca dos valores dos perfis.

A partir da confrontação dos resultados obtidos por ambas as abordagens com os dados de rocha e petrofísica foram escolhidos os grupos de litotipos.

A terceira etapa consistiu na análise do arranjo espacial dos litotipos definidos nos poços, de modo a se obter um modelo numérico que possibilitasse a extrapolação destes litotipos para toda a área de estudo. Inicialmente, foi efetuada a mudança de suporte dos dados de 0,2 m para 1,0 m. Em seguida, foram utilizadas várias técnicas, entre elas as geoestatísticas, para o exame da distribuição espacial dos litotipos, tornando possível assumir a hipótese de não-estacionariedade vertical e horizontal e subdividir o intervalo estratigráfico

estudado em três zonas: Zona A, superior, Zona C, inferior, predominantemente pelíticas, e a Zona B, intermediária e arenosa. Com base nesta análise, decidiu-se analisar a área de estudo segundo dois enfoques distintos: um considerando unicamente a zona onde há a predominância de corpos arenosos e o outro considerando o intervalo estratigráfico total. Para esta etapa foram utilizados os *softwares* geoestatísticos HERESIM e ISATIS.

Na quarta etapa, objetivo principal desta dissertação, investigaram-se diferentes metodologias para a geração de matrizes de proporção dos litotipos, conforme os dois enfoques definidos na etapa anterior, o que possibilitou a elaboração de modelos de repartição espacial de fácies. Para a construção destas matrizes estabeleceu-se um *grid* que abrangeu toda a área de interesse, com cada célula apresentando 100m x 100m x 1m.

Para a Zona B, foram empregados três métodos para a construção das matrizes de proporção: (1) por área; (2) a krigagem das proporções dos litotipos presentes nos poços e (3) a inclusão de uma variável condicionadora na krigagem das proporções.

Para o intervalo total, utilizou-se o método da krigagem das proporções dos litotipos dos poços na construção das matrizes de proporção das zonas A e C e também de todo o intervalo estratigráfico.

As matrizes de proporção permitiram visualizar a continuidade e as relações entre os litotipos por toda a área e intervalo estratigráfico estudados. Possibilitaram também verificar, para a Zona B, as diferenças existentes na arquitetura do reservatório, pela adoção dos diferentes métodos de construção.

A quinta e última etapa desta dissertação compreendeu a realização de simulações condicionais dos litotipos considerando os dois enfoques estudados, permitindo o estabelecimento da correspondência entre um determinado modelo probabilístico da função aleatória gaussiana truncada e o modelo geológico assumido para a área. Assim, em um *grid* com células de 50m x 50m x 1m, estas simulações basearam-se no truncamento de uma função aleatória gaussiana pelos valores das proporções dos litotipos existentes em cada célula das matrizes de proporção.

Para a Zona B, utilizando-se a mesma semente, foi realizada uma simulação para cada tipo de matriz de proporção e, em seguida, comparadas as imagens geradas.

Para o intervalo total, também empregou-se a mesma semente, para realizar a simulação das zonas A e C e de todo intervalo, com base nas matrizes construídas. Além disso, foi efetuada uma outra simulação com base na curva de proporção vertical global dos

litotipos. A comparação das imagens obtidas para esse intervalo teve o propósito de atestar a importância da matriz de proporção na modelagem de reservatórios heterogêneos.

## 1.5 - DEFINIÇÃO DA ÁREA DO PROJETO

A área de estudo está localizada na porção central da Bacia do Recôncavo (Figura 1.5). Apresenta 6 km<sup>2</sup>, em forma de um retângulo de 2 km x 3 km, e engloba parte de um importante campo de petróleo.

Sua escolha baseou-se nos resultados obtidos por Soares (1997), que identificou ao longo do intervalo estratigráfico a ser analisado seis pacotes de corpos arenosos "... geneticamente relacionados, que apesar de refletir um alto grau de ciclicidade, distribuem-se de forma aleatória ...". Na Figura 1.6, pode-se observar o mapa da distribuição de alguns desses pacotes na área em foco. Também foi decisivo para a escolha da área de estudo, a densidade de poços que apresentavam a *suíte* de perfis elétricos e radioativos GR/RHOB/NPHI. Estes perfis nortearam a definição dos litotipos utilizados na construção das matrizes de proporção.

Outro aspecto de grande importância foi a orientação dessa área. Procurou-se orientá-la segundo as direções de maior e menor continuidade dos arenitos, respectivamente NW-SE e NE-SW.

## 1.6 - COLETA E TRATAMENTO DOS DADOS

Definida a área de interesse, foram coletados os dados necessários ao estudo, como por exemplo os perfis dos poços, os intervalos testemunhados e as análises petrofísicas.

Em seguida foi efetuada a triagem desses dados, que totalizaram 151 poços, 11 deles testemunhados. Uma vez que os objetivos da dissertação encontram-se dentro de um contexto estratigráfico, e nesse sentido prioriza-se o caráter deposicional dos sedimentos, principalmente o litológico/mineralógico, foram escolhidos aqueles poços que apresentavam, pelo menos, a *suíte* de perfis de raios-gama (GR), densidade (RHOB) e neutrônico (NPHI).

Embora os perfis de potencial espontâneo (SP) mostrem-se sensíveis à distinção entre rochas reservatório e não-reservatório e os perfis de resistividade (ILD) auxiliem grandemente

na correlação (Soares, 1997; Mato, 1984) eles são muito influenciados pelos fluidos presentes. O perfil sônico (DT) por sua vez, foi corrido em poucos poços.

Foram excluídos os poços que atingiram somente parte do intervalo estudado, os que apresentam ausência de algum dos arenitos devido a falhamentos e os que possuem problemas na qualidade dos perfis.

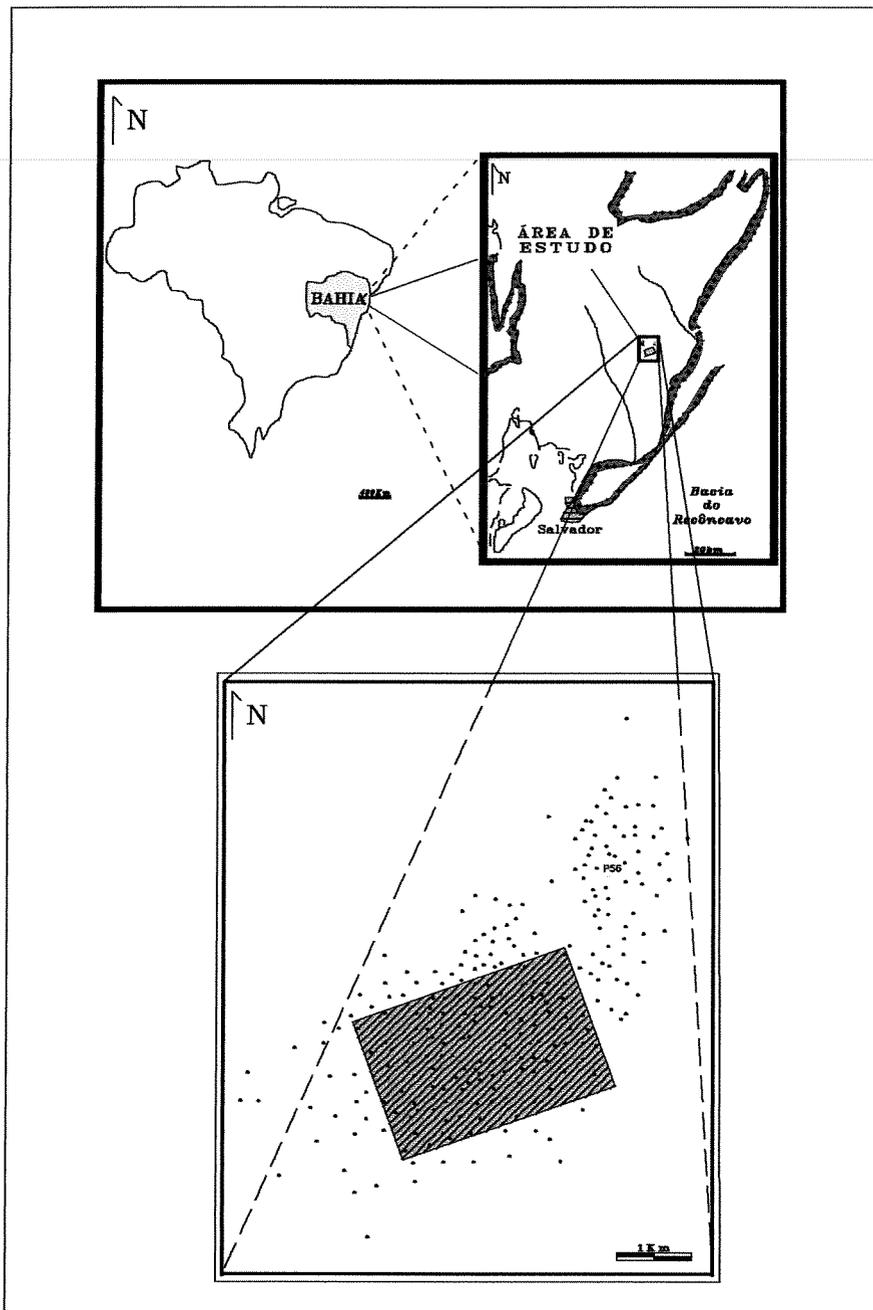


Figura 1.5 - Mapa de localização da Bacia do Recôncavo e da área de estudo.

Dessa forma, foram utilizados apenas 55 poços, três deles testemunhados. Como o número de poços testemunhados era muito baixo, o que poderia não dar robustez à correlação

rocha-perfil, incluiu-se, para esse fim, mais um poço testemunhado, situado fora da área, que também apresentava a *suite* de perfis requerida.

O passo seguinte foi o tratamento desses dados, visando a montagem de um banco de dados com todos os poços e as correspondentes características litológicas, de perfis e petrofísicas. Esse tratamento compôs-se da verticalização dos poços direcionais, da correção dos perfis neutrônicos em alguns poços, calibrados originalmente para matriz arenito, da reamostragem das profundidades das leituras de outros perfis, de polegadas para centímetros, e do ajuste de profundidade entre perfis, descrições de testemunhos e análises petrofísicas. Nesse ajuste foi utilizado o *software* AnaSeTe (PUC-Rio/Tecgraf & PETROBRÁS, 1995), que além da construção gráfica de perfis integrados, permite a obtenção de listagens contendo estes mesmos dados, que foram úteis na montagem do banco de dados.

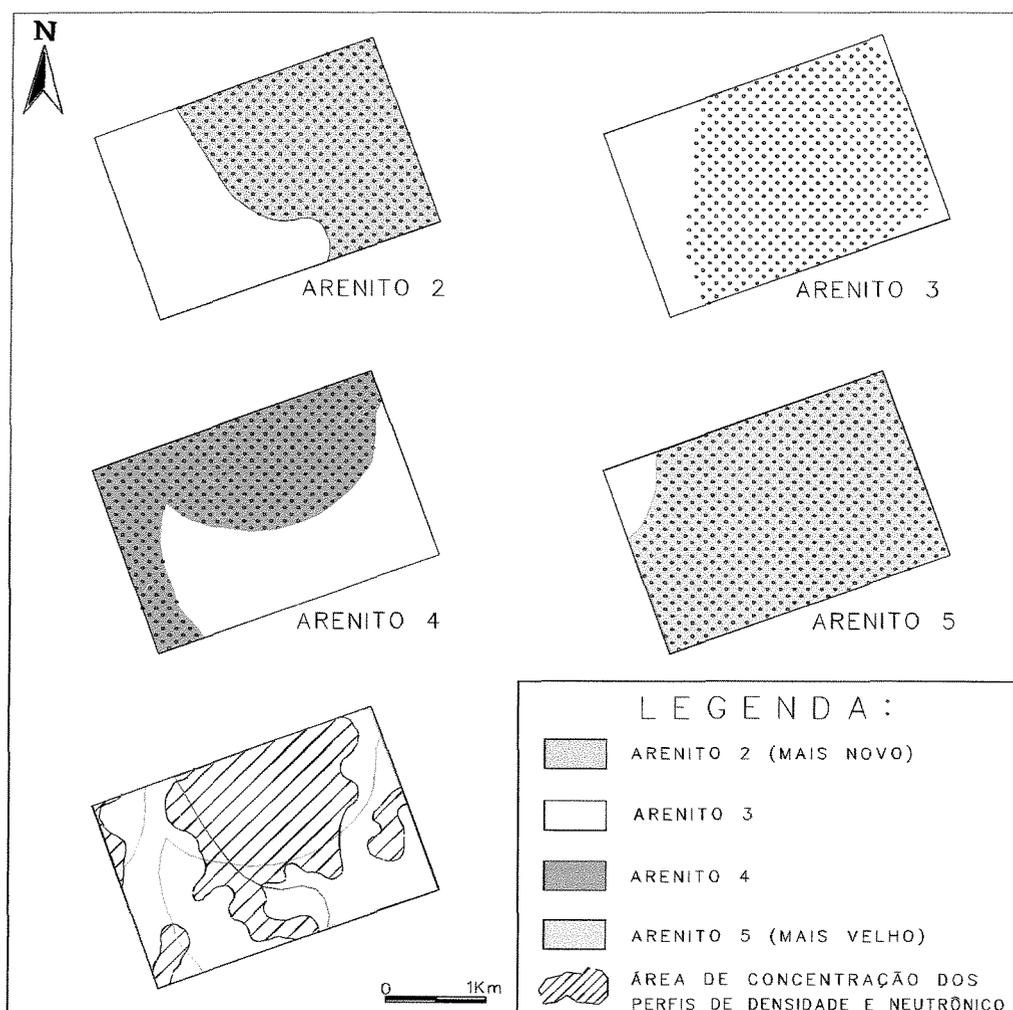


Figura 1.6 - Mapas da distribuição dos principais corpos arenosos e da área de concentração dos perfis de densidade e neutrônico na área do projeto.

## CAPÍTULO 2 - ARCABOUÇO GEOLÓGICO DA ÁREA DO PROJETO

### 2.1 - INTRODUÇÃO

Qualquer estudo que tenha por objetivo a caracterização e quantificação do reservatório, seja ele visando a simulação de fluxo ou o cálculo de reservas, por exemplo, deve estar suportado firmemente pelo seu modelo geológico conceitual.

A elaboração do modelo geológico conceitual de um reservatório passa, por sua vez, necessariamente pela definição do modelo deposicional, que é baseada na descrição das litofácies e na análise de suas variações laterais, nos tipos de relações existentes entre aquelas litofácies e na interpretação dos processos atuantes durante a deposição destes sedimentos.

Os reservatórios estudados foram posicionados em um contexto estratigráfico, não tendo sido abordados os aspectos tectônicos nem o comportamento dinâmico dos fluidos presentes.

### 2.2 - CARACTERÍSTICAS ESTRATIGRÁFICAS E ESTRUTURAIS DA ÁREA

A área do estudo faz parte de um dos mais importantes campos da Bacia do Recôncavo, no qual a produção de petróleo teve início em 1937 (Soares, 1997).

A Bacia do Recôncavo situa-se na região nordeste do Brasil e limita-se a leste, nordeste e oeste pelo Cinturão Granulítico Atlântico, a norte e a noroeste pela Bacia Tucano Sul, através dos altos de Aporá e de Dom João, e a sul pela Bacia de Camamu, através do sistema de falhas da Barra (Figura 2.1). Apresenta a forma de um meio-*graben* alongado na direção NE-SW e sua evolução, iniciada no Jurássico Superior, relaciona-se ao processo de ruptura do paleo-continente Gondwana e de formação do Oceano Atlântico Sul.

O intervalo estratigráfico objeto dessa dissertação pertence à Megasequência Estratigráfica do Lago definida por Asmus e Porto (1980) e corresponde aos sedimentos deltaico-lacustrinos da Formação Pojuca depositados durante a fase *rift* da bacia (Figura 2.2).

A fase *rift* é composta por sedimentos aluviais, fluviais e deltaico-lacustrinos. Sua implantação ocorreu durante o Andar Rio da Serra (145-135 Ma) com o início dos falhamentos da borda leste da bacia e a deposição progressiva dos conglomerados da

Formação São Salvador e dos espessos pacotes de folhelhos e siltitos intercalados a carbonatos e arenitos turbidíticos, pertencentes às formações Candeias e Maracangalha.

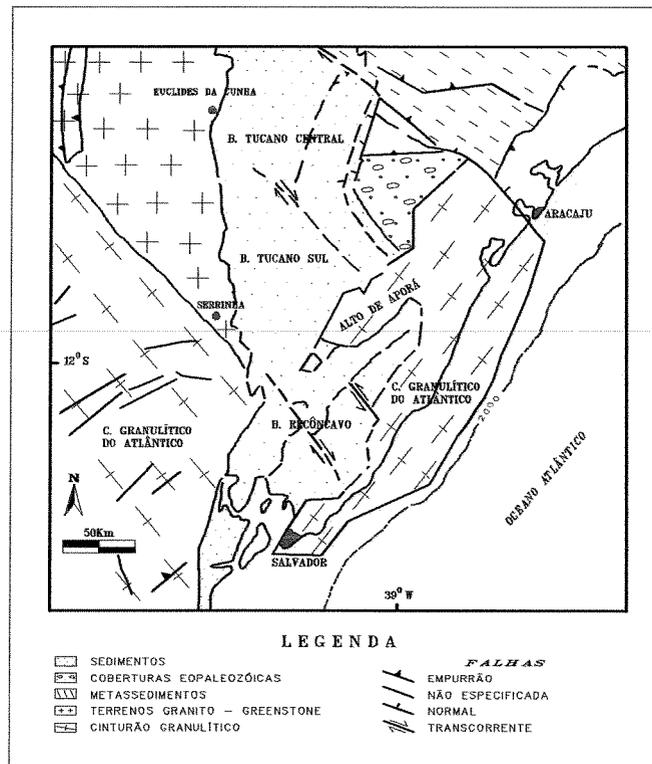


Figura 2.1 – Mapa geológico regional (modificado de Milani, 1987).

No final do Andar Rio da Serra, a diminuição da atividade tectônica e, conseqüentemente, menor taxa de subsidência, resultou na instalação de um complexo deltaico progradante, a partir de NW, sobre os sedimentos lacustres, que perdurou durante grande parte do Andar Aratu (135-128 Ma). Esse complexo deltaico é representado pelos sedimentos do Grupo Ilhas, constituído pelas formações Marfim, Pojuca e Taquipe. Os reservatórios estudados fazem parte da Formação Pojuca, que apresenta espessuras entre 600 e 1000 metros e caracteriza-se pela geometria tabular de seus diversos pacotes arenosos, com intercalações de pelitos gerados nas fases lacustres transgressivas. Esse caráter cíclico, condicionado a uma subsidência pulsante e progressivamente atenuada (Ghignone, 1979), permitiu o desenvolvimento de marcos litológicos e elétricos rastreáveis regionalmente. O intervalo estudado apresenta espessura máxima de 91 metros e compõe-se de arenitos finos a muito finos intercalados por lamitos, argilitos e calcilutitos, depositados entre 128-130 Ma, (Soares, 1997).

O final da fase *rift* deu-se através da deposição dos arenitos grossos e friáveis de origem fluvial pertencentes ao Grupo Massacará.

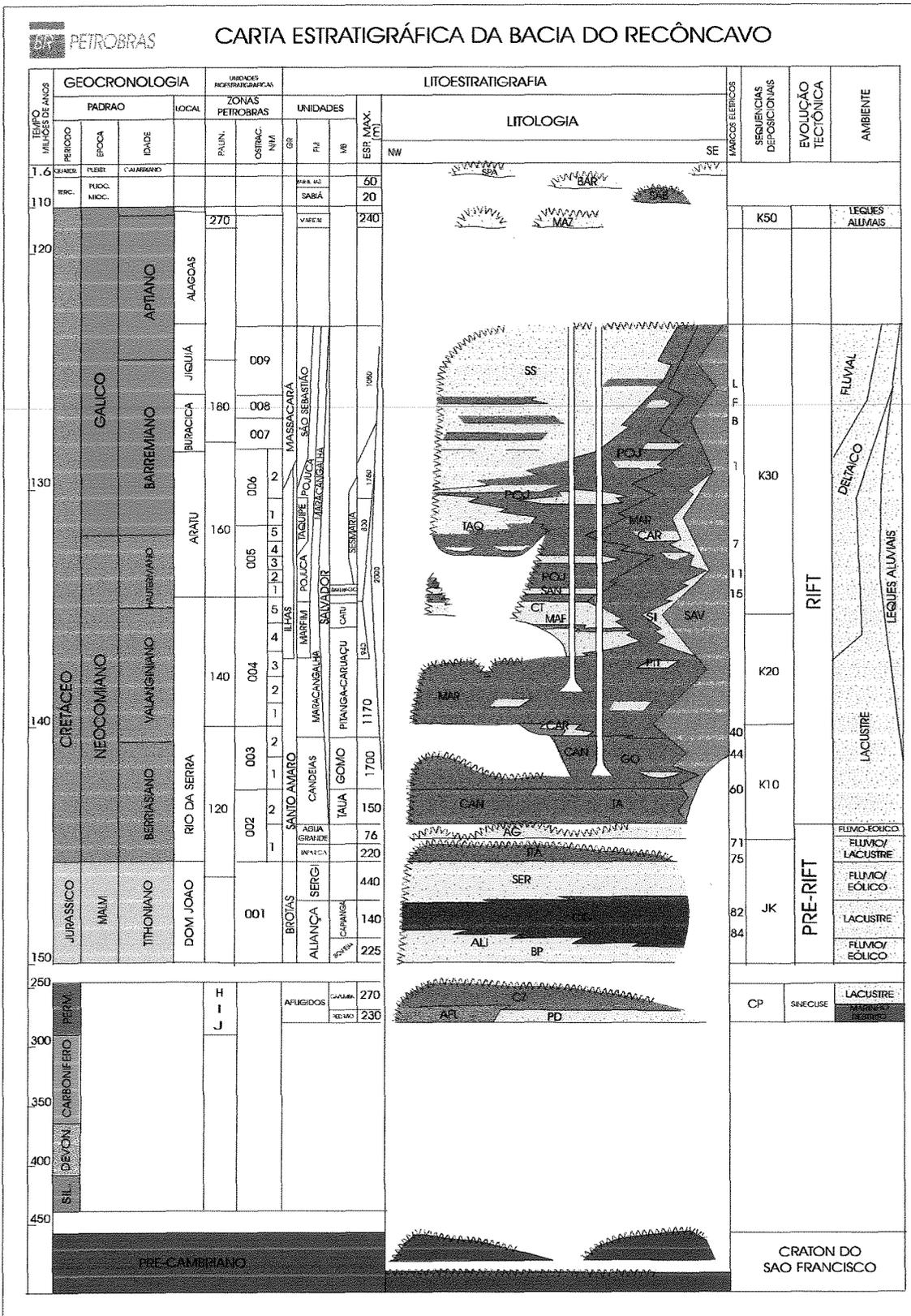


Figura 2.2 - Carta estratigráfica da Bacia do Recôncavo (Caixeta *et al.*, 1994).

A escolha do intervalo estratigráfico levou em conta o fato de que no Andar Aratu a bacia atravessava uma fase de estabilidade tectônica, o que facilitou as correlações e, assim, deu sustentação às análises estratigráficas e ao modelo sedimentar adotado.

O intervalo de pesquisa é delimitado por duas camadas-guia reconhecíveis por toda a bacia. O topo é definido pelo **marco 11**, que por ser uma feição grafoelétrica típica foi escolhido como *datum* estratigráfico para este estudo. Litologicamente este marco é, provavelmente, constituído por biocalcarenitos ostracoidais (Mato, 1992). A base do intervalo é definida pelo **marco 12**, constituído por pelitos.

Segundo Soares (1997), este intervalo engloba um subciclo que faz parte de um ciclo maior que apresenta tendência geral à granodecrescência ascendente e está limitado por dois horizontes que correspondem às superfícies máximas de inundação do lago do Recôncavo (Figura 2.3).

Além dos marcos 11 e 12, este intervalo apresenta alguns horizontes pelíticos contínuos que constituem níveis de afogamento do sistema deltaico pelo lago e que servem como marcos estratigráficos efetivos na correlação de corpos arenosos. Também ocorrem intercalações de arenito muito fino, siltito e lamito que representam rochas não-reservatório. Com base nas diferenças litológicas, Soares (1997) efetuou o zoneamento estratigráfico do campo, subdividindo o intervalo em corpos arenosos, em horizontes pelíticos e nos níveis de rochas não-reservatório.

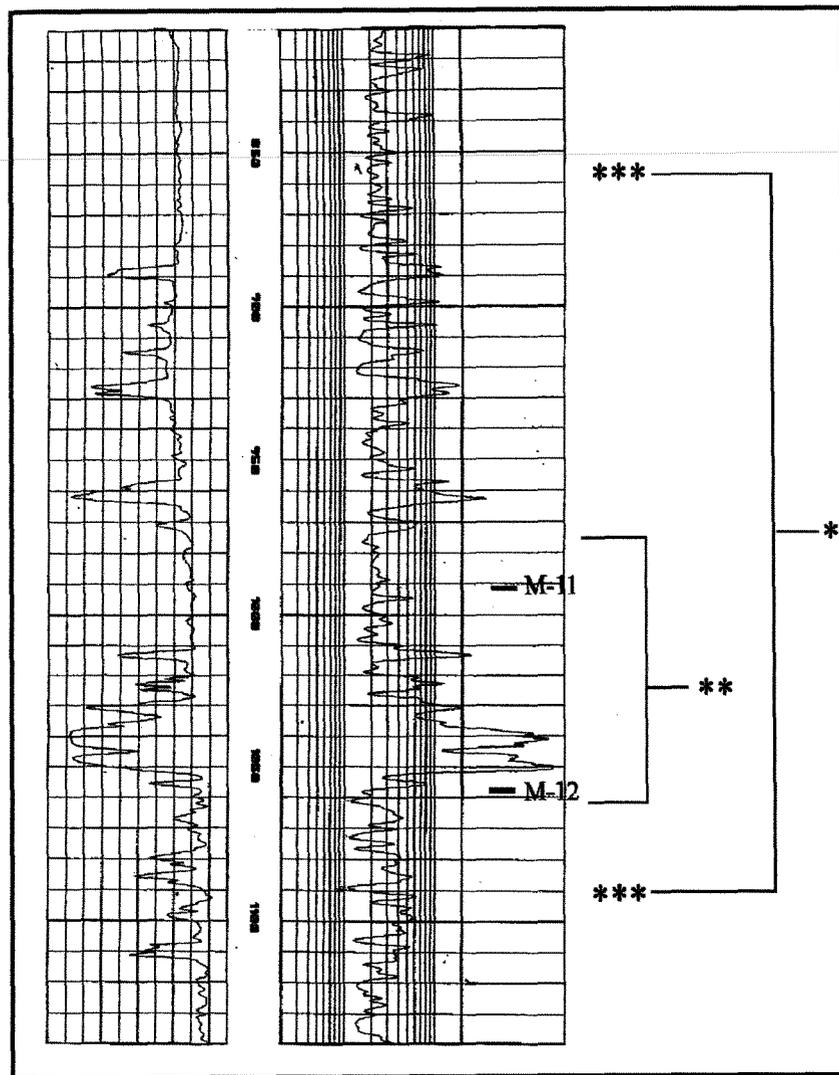
### 2.3 – DESCRIÇÃO DAS LITOFÁCIES

De acordo com as análises de testemunhos efetuadas por Mato (1984) e Soares (1997) em 15 poços do campo, o intervalo estratigráfico em foco apresenta um total de oito litofácies distintas. Seguindo a nomenclatura utilizada pelo segundo autor tem-se:

- Litofácies 1 - Arenito fino a muito fino, localmente médio, com laminação plano-paralela (Figura 2.4a) e cruzada de baixo ângulo, por vezes maciço. Localmente são observadas estruturas de deformação (*slumps*) e de escape de fluidos. Mostra comumente contatos abruptos e níveis de intraclastos de folhelho e fragmentos de restos vegetais na base. Também são frequentes horizontes arenosos sobrepostos, exibindo ciclos de *fining upward* e nível erosional na base do pacote.

Constitui a principal litofácies do reservatório sendo responsável pelas maiores espessuras de arenitos da área analisada.

As estratificações e estruturas observadas, associadas à boa continuidade dos corpos, indicam que esta litofácies depositou-se através de processos trativos, em águas relativamente rasas, num subambiente de frente deltaica, compondo lobos deltaicos amalgamados.



- \* - CICLO ESTRATIGRÁFICO
- \*\* - SUB-CICLO (INTV. ESTUDADO)
- \*\*\* - SUPERFÍCIE MÁXIMA DE INUNDAÇÃO DO LAGO

Figura 2.3 - Intervalo de Estudo (Sub-ciclo) Inserido num Ciclo Estratigráfico Completo de Transgressão do Lago (Soares, 1997).

- Litofácies 2 - Arenito muito fino a fino, com laminação cruzada acanalada de pequeno porte e migração das marcas de corrente (*ripple drift*) definidas por níveis micáceos,

de matéria orgânica ou de intraclastos argilosos. Localmente apresenta-se bioturbado, com marcas de raízes (Figura 2.4b) e feições de escorregamento (*slump*).

Esta litofácies está relacionada a um ambiente de menor energia do que a Litofácies 1, dominado por processos de tração e também de suspensão, com alta taxa de sedimentação (Mato, 1984).

Constituem depósitos tanto de lobos de frente deltaica como de rompimento dos diques marginais dos canais distributários por sobre a área interdistributária, estes últimos quando associados às fácies 4 e 3.

- Litofácies 3 - Arenito muito fino, síltico, intercalado com lamito e/ou siltito, bioturbado. Mostra as mesmas estratificações e estruturas que a Litofácies 2 e também gretas de contração na base, algumas fraturas (Figura 2.4c) e feições de sobrecarga.

A associação das estratificações, indicativas de processos de tração e suspensão, com a presença de lamitos, indicativos de depósitos de suspensão, sugerem um subambiente de frente deltaica, preferencialmente nas áreas interlobos ou de superposição de limites de lobos. Também podem se relacionar, em parte, a depósitos interdistributários, devido à ocorrência de estruturas indicativas de ambiente subaéreo.

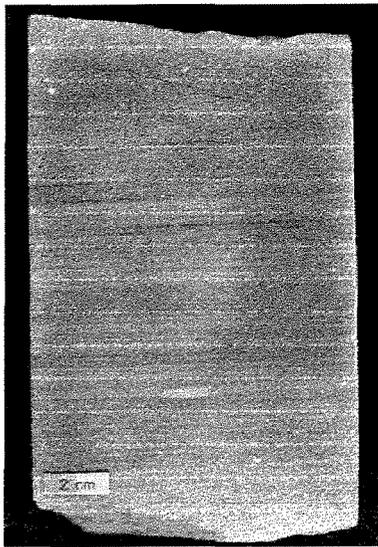
- Litofácies 4 - Interlaminado de siltito esverdeado, lamito e arenito muito fino, localmente bioturbado (Figura 2.4d). Ocorrem perfurações por organismos, marcas de raízes e algumas estruturas de sobrecarga.

Distingue-se da Litofácies 3 pela predominância da fração mais fina. Sua origem está associada à depósitos de área interdistributária e/ou depósitos de interlobos ou de superposição de limites de lobos.

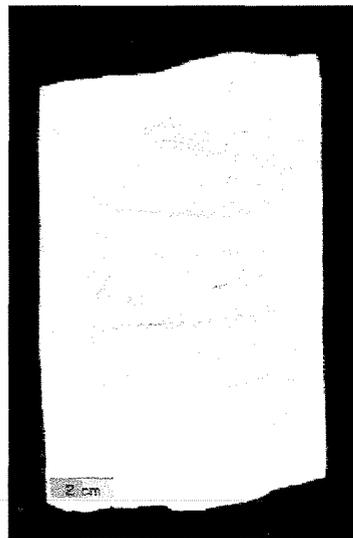
- Litofácies 5 - Siltito cinza esverdeado, algo argiloso (Figura 2.5a), bioturbado. Exibe laminação paralela, perfurações por organismos e estruturas de sobrecarga.

A granulometria e a bioturbação evidenciam um ambiente calmo e de baixa taxa de sedimentação, provavelmente relacionado à áreas interdistributárias.

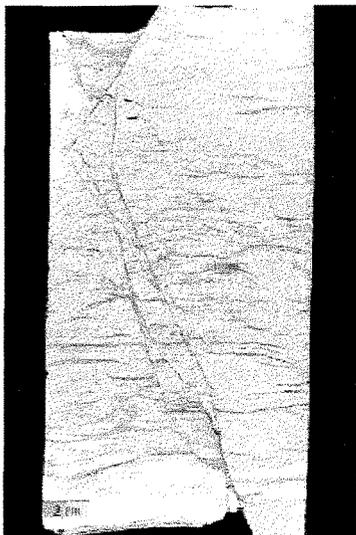
- Litofácies 6 - Calcissiltito ostracoidal cinza esverdeado (Figura 2.5b), podendo ocorrer associado a pequenos níveis de arenito muito fino, síltico. Ocorre sotoposta aos folhelhos da Litofácies 7, caracterizando os sedimentos que antecedem a transgressão do lago sobre o sistema deltaico.



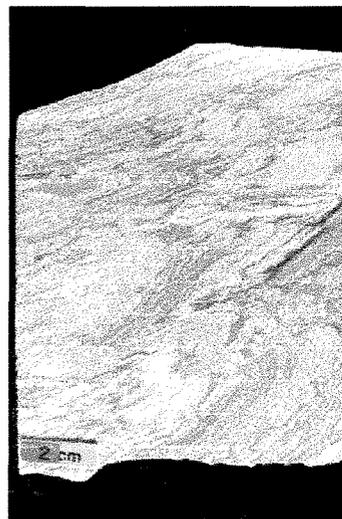
(A)



(B)



(C)



(D)

Figura 2.4 - Testemunhos: (A) Fácies 1 Arenito Fino com Estratificação Plano-paralela; (B) Fácies 2 Arenito Muito Fino c/ Marcas de Raízes; (C) Fácies 3 Intercalações de Arenito, Lamito e Siltito c/ Fraturas e (D) Fácies 4 Intercalações de Siltito, Lamito e Arenito c/ Bioturbação.

- Litofácies 7 - Folhelho cinza escuro/esverdeado (Figura 2.5c - litologia predominante), fossilífero, finamente laminado, por vezes com intercalações de calcarenito. Localmente ocorrem restos de matéria orgânica, concreções de calcita e *slickensides*.

A granulometria siltico-argilosa dessa litofácies denota a deposição em ambiente de baixa energia, no qual prevalecem os processos de deposição por gravidade. Deste modo estas rochas estariam relacionadas à superfícies de afogamento do delta pelo lago.

- Litofácies 8 - Conglomerado intraformacional composto de intraclastos e matriz lamosa (Figura 2.5d). Essa litofácies caracteriza-se por encontrar-se na porção basal de grande parte dos corpos arenosos das litofácies 1 e 2.

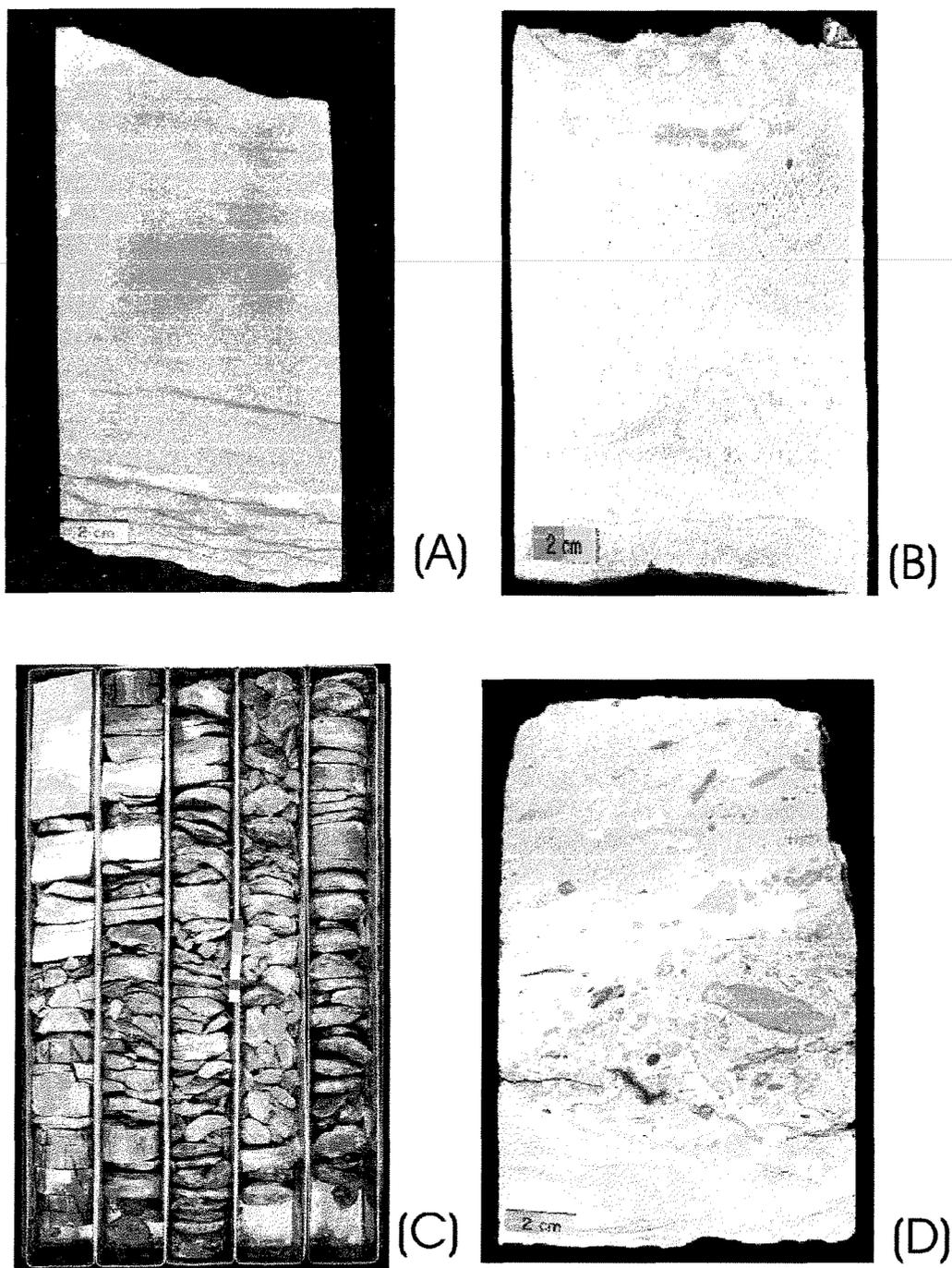


Figura 2.5 - Testemunhos: (A)Fácies 5 - Siltito; (B) Fácies 6 - Calcissiltito Ostracoidal; (C) Fácies 7 - Folhelho Cinza Esverdeado e (D) Fácies 8 - Conglomerado Intraformacional c/Intraclastos e Matriz Lamosa.

## 2.4 - MODELO GEOLÓGICO CONCEITUAL

A pouca atividade tectônica reinante durante a sedimentação do intervalo estratigráfico estudado, propiciou a deposição das areias deltaicas num ambiente de baixa energia, que é atestado pela granulometria fina a muito fina e pela abundância de estratificação cruzada de pequeno porte destes sedimentos. Por outro lado, a presença de estruturas de correntes unidirecionais (*ripple drift*) naqueles sedimentos indica que este delta seria dominado por rios. Este ambiente de baixa energia favoreceu a formação de corpos arenosos lateralmente contínuos, com espessamentos e afinamentos gradativos, e reduziu a atuação de processos erosionais.

A sedimentação do intervalo analisado iniciou-se com a deposição de arenitos descontínuos e, a medida que a sedimentação deltaica prosseguia, alguns destes pacotes acomodaram-se segundo arranjos de compensação, com espessuras semelhantes entre si. O grande aporte sedimentar, proveniente dos canais distributários, associado aos processos de subsidência intensificaram a deposição das areias e promoveram o rápido soterramento desse material. A ocorrência de inúmeras estruturas sedimentares, como feições de sobrecarga, escape de fluidos e *slumps*, ratificam a atuação daqueles processos. Posteriormente, formaram-se os depósitos argilo-arenosos das áreas interdistributárias, juntamente com a sedimentação de areias com menor espessura e também folhelhos gerados nos períodos de afogamento do delta, perfazendo um típico padrão *fining upward*. O caráter regressivo do delta deslocou os limites das areias para NW.

A maioria dos pacotes de arenitos constitui agrupamentos de corpos lobados formados pela amalgamação das barras de desembocadura dos canais distributários na frente deltaica e, secundariamente, pelas acumulações provenientes do rompimento dos diques marginais dos canais distributários (Figura 2.6).

Tipicamente, a geometria externa dos corpos arenosos deste tipo de ambiente deposicional corresponde a formas sigmoidais e lenticulares, quando observadas, respectivamente, em seções paralela (*dip*) e transversal (*strike*) aos seus eixos de deposição (Figura 2.7). Entretanto, devido ao grande porte que esta feição apresenta, em relação à área aqui analisada, não foi possível caracterizar a geometria sigmoidal. Já em seção *strike* (NE-SW), percebeu-se a forma externa aproximadamente lenticular do conjunto de lobos amalgamados, mais espessa no centro e afinando para as bordas deste conjunto.

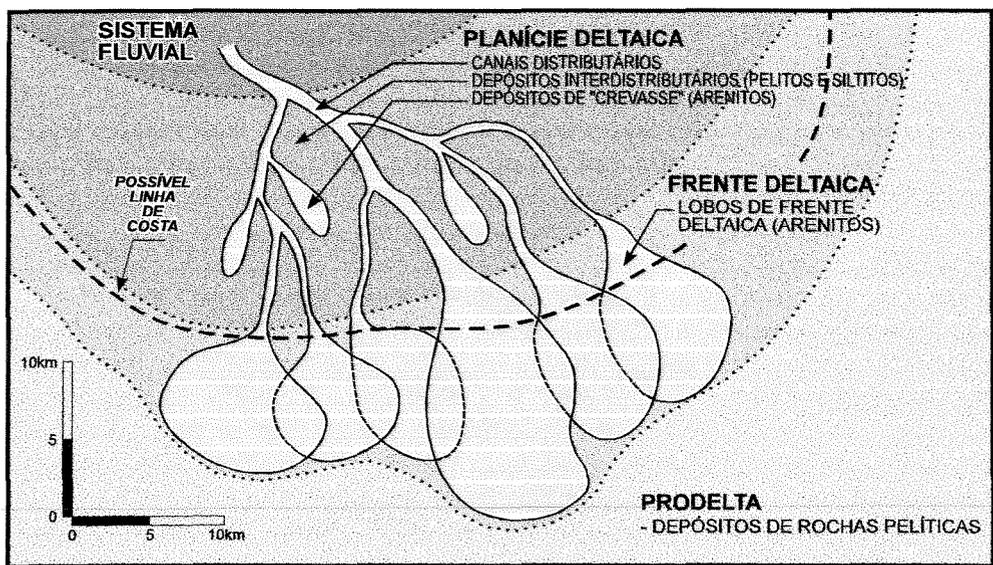


Figura 2.6 - Diagrama simplificado dos principais subambientes do sistema deltaico (Soares, 1997).

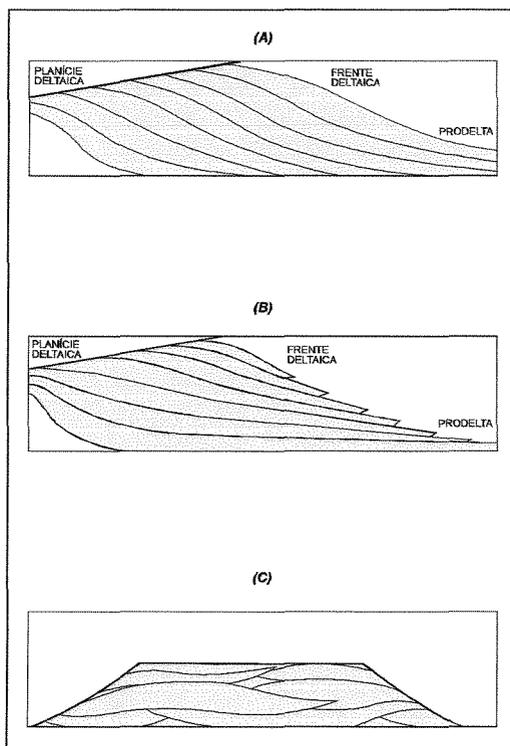


Figura 2.7 - Geometria externa típica dos lobos de deltas dominados por rios (modif. de Bhattacharya & Walker, 1992: (a) seção *dip* - progradação deltaica; (b) seção *dip* - retrogradação deltaica; (c) seção *strike*).

As rochas não-reservatório, representadas por arenitos muito finos intercalados com lamitos e/ou siltitos e por folhelhos prodeltaicos com geometria tabular e boa continuidade, correspondem respectivamente a rochas depositadas nas áreas interdistributárias e aos depósitos distais relacionados a períodos de afogamento do sistema deltaico pela transgressão

do lago. Todas estas rochas constituem importantes heterogeneidades sin-deposicionais, por representarem barreiras verticais ao fluxo, sejam elas regionais, como os folhelhos das superfícies de inundação do lago, ou locais, como as demais rochas pelíticas. Embora com menor magnitude, as variações texturais dos arenitos também concorrem com o direcionamento do fluxo.

De acordo com as classificações de Pettijohn et al. (1973), Weber (1986) e Weber & van Geuns (1990), os reservatórios estudados podem ser considerados como sendo um tipo intermediário entre os tipos “quebra-cabeça” e “labirinto”, onde os corpos de arenitos apresentam contatos uns com os outros, por vezes ocorrendo camadas métricas de sedimentos argilo-arenosos e folhelhos entre aquelas unidades. A distribuição destas heterogeneidades ao longo dos poços analisados pode ser mais bem observada após o refinamento do zoneamento estratigráfico preestabelecido (Figura 2.8). Estes zoneamentos individualizam três tipos de unidades litológicas: os arenitos dos lobos deltaicos, os sedimentos argilo-arenosos das áreas interlobos/interdistributárias e os folhelhos transgressivos.

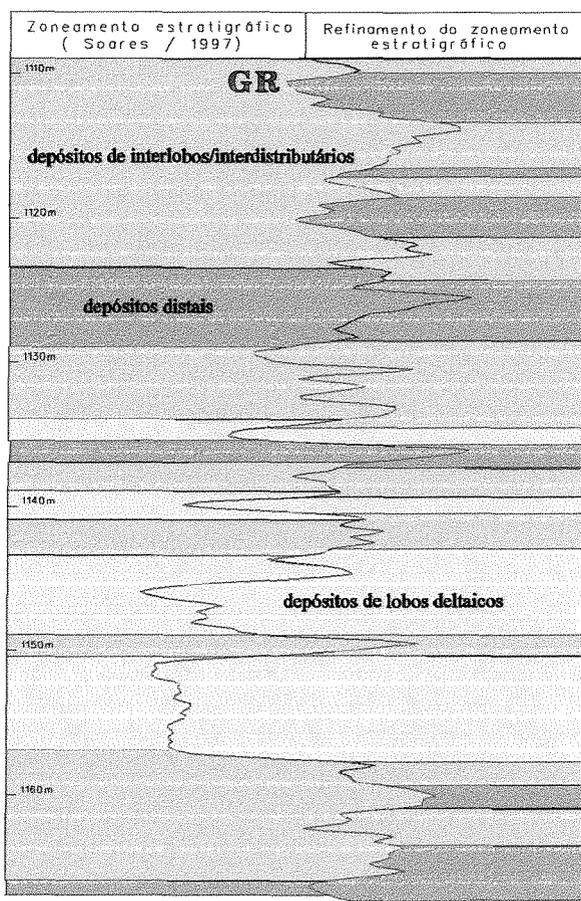


Figura 2.8 – Perfil esquemático do poço P25, mostrando os zoneamentos efetuados no intervalo estratigráfico do projeto.

## CAPÍTULO 3 - DEFINIÇÃO DOS LITOTIPOS

### 3.1 – INTRODUÇÃO

Uma vez efetuado o ajuste de profundidade entre as descrições de testemunhos, as análises petrofísicas e os perfis elétricos e radioativos, e estabelecido o modelo geológico conceitual da área do projeto, procedeu-se à identificação das litofácies nos intervalos não-testemunhados. Para tanto, foram verificadas as relações existentes entre as características dos perfis e das litofácies nos intervalos testemunhados, o que resultou, a cada intervalo de 0,2 m de cada um dos 56 poços estudados, na definição de um litotipo.

A identificação das litofácies seguiu a metodologia descrita por Doveton (1994) e utilizada por Souza Jr. (1997), segundo a qual são aplicadas técnicas não-paramétricas de análise estatística multivariada. Nesta metodologia, são efetuadas duas abordagens: uma Supervisionada e outra Não-Supervisionada. Na primeira abordagem, as litofácies são definidas a partir de um “grupo de aprendizagem”, formado pelas observações que apresentam as litofácies descritas nos testemunhos e suas respectivas respostas de perfis.

Na abordagem Não-Supervisionada, as litofácies são determinadas a partir da análise estrutural multidimensional intrínseca dos dados de perfis e, posteriormente, ratificadas pela interpretação geológica para cada litotipo (Souza Jr., 1997).

Antes, porém, da apresentação dos resultados obtidos, será feita uma breve revisão bibliográfica dos métodos multivariados aqui utilizados.

### 3.2 – ANÁLISE ESTATÍSTICA MULTIVARIADA

Os métodos de análise estatística multivariada foram elaborados, na década de 30, por H. Hotelling que estabeleceu, a partir dos trabalhos de C. Spearman e de K. Pearson, os fundamentos da Análise dos Componentes Principais e da Análise Canônica (Bouroche et al., 1980).

Esses métodos permitem o estudo global das propriedades (variáveis) de um conjunto de observações, pondo em evidência as ligações, semelhanças ou diferenças existentes entre estas observações. Para tanto, as observações e as variáveis são inseridas em espaços

geométricos e transformadas de modo a serem visualizadas num plano ou classificadas em grupos homogêneos, com a mínima perda de informação.

Segundo Davis (1986), os métodos de análise estatística multivariada são poderosos, pois permitem a manipulação de muitas variáveis ao mesmo tempo. Entretanto, apresentam complexidade tanto em sua estrutura teórica como em sua metodologia operacional. Em muitos dos procedimentos, a teoria e os testes estatísticos foram desenvolvidos somente para um conjunto muito restrito de suposições.

Nesta dissertação foram utilizados três métodos: Análise dos Componentes Principais, Análise Discriminante e Análise de Agrupamento.

### 3.2.1 - Análise dos Componentes Principais (ACP)

A Análise dos Componentes Principais é uma técnica de redução da dimensionalidade dos dados que freqüentemente serve como passo intermediário para outras investigações, como por exemplo, a análise de agrupamento.

Na redução dos dados, as  $p$  variáveis originais, que reproduzem a variabilidade total do sistema, podem ser substituídas por  $k$  componentes principais ( $k < p$ ), de modo que estes retenham a maior parte da variabilidade. Assim, um conjunto de dados originais formado por  $p$  variáveis medidas em  $n$  observações é reduzido a um conjunto de dados com  $k$  componentes principais medidos sobre aquelas  $n$  observações (Johnson et al., 1992).

Os componentes principais são, em termos algébricos, combinações lineares de  $p$  variáveis aleatórias  $V_1, V_2, \dots, V_p$ . Geometricamente, essas combinações lineares representam a seleção de novo sistema de coordenadas obtido pela rotação do sistema original tendo como eixos de coordenadas  $V_1, V_2, \dots, V_p$ . Os novos eixos representam as direções com a máxima variabilidade e fornecem uma descrição mais simples da estrutura da covariância.

Os autovetores e os autovalores da matriz de covariância são a essência da ACP. Os primeiros determinam as direções de variabilidade máxima, enquanto os segundos especificam as variâncias.

A ACP é sensível às magnitudes de medidas. Um meio de contornar este problema é obter os componentes principais de variáveis padronizadas, através dos autovetores da matriz de correlação  $[\rho]$  de  $V$ . Elek (1988) ilustra os dois passos principais da ACP, que são a padronização das variáveis e, o posterior cálculo dos autovetores e autovalores (Figura 3.1).

Deste modo, as variáveis devem ser padronizadas quando seus valores apresentarem grande variação ou quando as unidades de medida não forem comensuráveis, como é o caso das leituras dos perfis elétricos e radioativos, evitando-se, assim, a ponderação inadequada e artificial das mesmas.

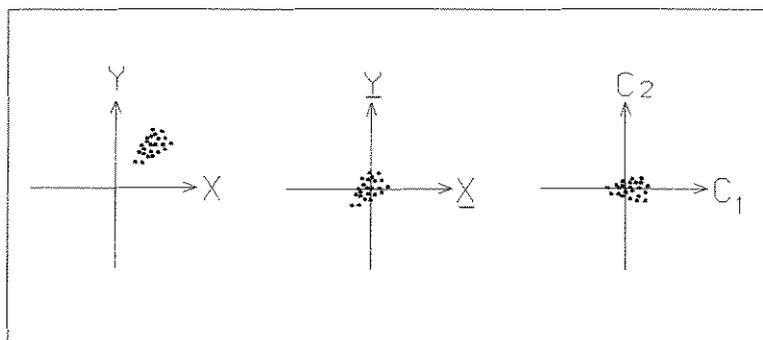


Figura 3.1 – Passos para a ACP: o processo consiste na transformação de coordenadas, com movimentação do ponto da nuvem para a origem (padronização) e, então, na rotação dos eixos até que a direção principal da nuvem fique alinhada ao eixo do primeiro componente principal (Elek, 1988).

### 3.2.2 - Análise Discriminante (AD)

Inicialmente utilizada por Fisher (1936, apud Doveton), a Análise Discriminante cobre uma variedade de técnicas que permite descrever, num conjunto com  $n$  observações, as ligações existentes entre uma variável qualitativa, a ser explicada e que assume  $q$  modalidades, e um conjunto de  $p$  variáveis quantitativas explicativas. Essas ligações são descritas por uma equação linear que melhor diferencia dois grupos distintos. A partir daí, as novas observações, com suas variáveis quantitativas, são classificadas em um dos  $q$  grupos previamente estabelecidos.

Constitui uma técnica supervisionada, uma vez que requer, *a priori*, um conjunto de observações multivariadas de aprendizagem, no qual são identificadas as populações preestabelecidas. Quando as observações são plotadas no espaço multidimensional, no caso de existirem duas populações, estas poderão aparecer como duas nuvens de pontos, distintamente separadas, ou com algum grau de superposição. Pode-se posicionar um eixo entre as nuvens de pontos de forma a maximizar a distância entre elas e, simultaneamente, minimizar a dispersão interna de cada nuvem. Esse eixo define a função linear discriminante que é calculada das médias, variâncias e covariâncias multivariadas dos dois grupos (Figura 3.2).

A projeção de todos os pontos observacionais sobre esse eixo gera locações sobre uma única linha, resultando, assim, na coalizão das muitas variáveis que compõem o conjunto de observações em apenas uma variável composta que melhor discrimina os dois grupos.

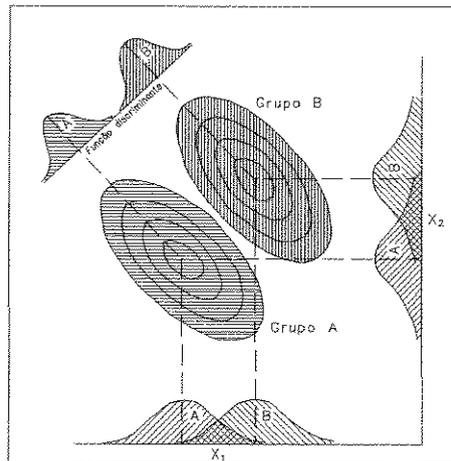


Figura 3.2 – Representação gráfica da análise da função discriminante aplicada a duas distribuições bivariadas idealizadas (Davis, 1986).

As discriminações das observações efetuadas sobre variáveis que apresentam distribuições distintas da normal podem ser obtidas construindo-se um histograma multivariado, no qual, por exemplo, os valores de cada variável de perfil são subdivididos em classes, formando-se, assim, um espaço multidimensional composto por células, tendo os perfis como os eixos ortogonais (Figura 3.3). As respostas desses perfis para cada observação do conjunto de aprendizagem são as coordenadas de um único dado que pode ser posicionado em uma destas células. As frequências dos pontos para cada eletrofácies são computadas para todas as células de modo a criar o histograma da base de dados. Essa base de dados pode ser então utilizada para a classificação de uma nova observação pela inspeção da célula na qual encontram-se as coordenadas de perfis dessa observação.

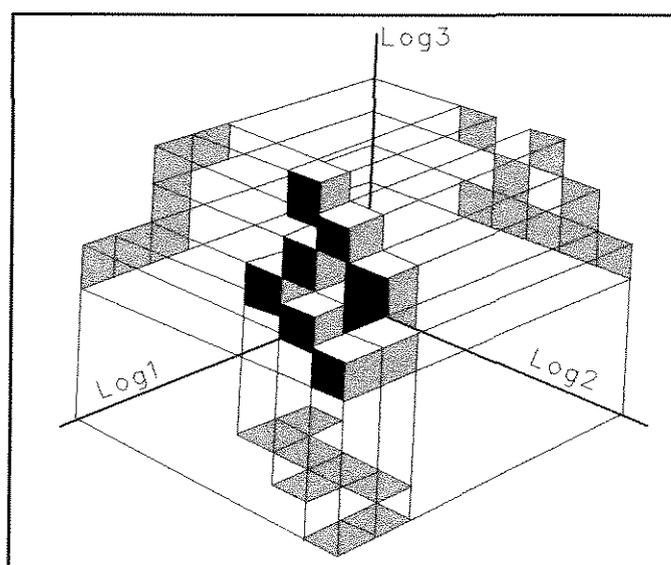


Figura 3.3 – Representação de eletrofácies, no espaço tridimensional dos perfis, como um histograma multivariado no *grid* de células (Doveton, 1994).

Como os demais métodos discriminantes, a melhor medida de qualidade para os métodos não-paramétricos é a matriz de discriminação (matriz de confusão), na qual as frequências das eletrofácies preditas são tabuladas contra as litofácies reais.

### 3.2.3 - Análise de Agrupamento (AA)

A Análise de Agrupamento (*Cluster Analysis*) é uma técnica exploratória que tem por objetivo reunir os dados em grupos, de modo que, dentro de cada grupo formado, esses dados sejam similares entre si e distintos dos demais grupos.

Essa técnica distingue-se da Análise Discriminante (AD) nos seguintes aspectos (Davis, 1986):

- A AA é baseada internamente, isto é, ela não depende do conhecimento *a priori* das relações entre os dados, como acontece na AD;

- Na AD, o número de grupos é definido antes da análise, enquanto na AA o número de grupos gerados durante a análise não pode ser predeterminado;

- Enquanto na AD cada dado original é inserido em um dos grupos especificados, na maioria dos procedimentos de AA os dados podem ser alocados em quaisquer dos grupos que se formam.

A AA fundamenta-se mais na sua praticidade do que no rigor estatístico, causando, desta forma, alguma controvérsia entre os pesquisadores devido ao escasso conhecimento a respeito das propriedades estatísticas de seus vários métodos e dos seus limitados testes para verificar a significância dos resultados (Landim, 1997; Davis, 1986). Por outro lado, o emprego desta técnica diminuiu a tendenciosidade dos pesquisadores no agrupamento dos dados, embora possa impor seus próprios vieses (Woronow, 1987).

A formação de grupos de objetos é baseada nas similaridades (ou proximidades) ou nas distâncias (ou dissimilaridades ou métricas), entre esses dados.

Entende-se como dissimilaridade a distância entre todos os pares de objetos ou entre grupos dentro dos quais os objetos se combinam. Dentre os vários tipos de medidas de dissimilaridade existentes, destaca-se, pelo seu emprego freqüente, a medida de distância euclidiana padronizada  $d(x,y)$ :

$$d(x, y) = \sqrt{\sum_{k=1}^p \left( \frac{Vx_k - Vy_k}{S_{kk}} \right)^2},$$

onde  $d(x,y)$  é a distância entre as observações  $x$  e  $y$ ,  $Vx_k$  é a  $k$ -ésima variável medida na observação  $x$ ,  $Vy_k$  é a  $k$ -ésima variável medida na observação  $y$ ,  $p$  é o número de variáveis medidas em cada observação e  $s_{kk}$  é a variância da  $k$ -ésima variável.

Os métodos de agrupamento podem ser divididos em dois grandes grupos: os métodos não-hierárquicos e os hierárquicos. Os métodos não-hierárquicos produzem diretamente uma partição em um número fixo de classes. O número de grupos pode ser especificado *a priori* ou durante o processo de agrupamento.

Os métodos hierárquicos são os mais amplamente utilizados em Geologia e dividem-se em métodos aglomerativos (ou ascendentes) e divisivos (ou descendentes). Perfazendo mais de uma dezena de técnicas, o método aglomerativo inicia-se com cada objeto constituindo um grupo e, em seguida, os objetos (grupos) mais similares vão se agrupando de modo a criar grupos cada vez maiores, até que no fim do processo todos os objetos constituam um único grupo. Os métodos divisivos trabalham em sentido contrário.

Os diversos estudos comparativos realizados com os vários métodos de AA, a partir de um conjunto de dados com grupos conhecidos, mostraram que a maioria desses métodos apresenta algum tipo de tendenciosidade, como, por exemplo, a formação de grupos com número de observações semelhante, ou com mesma variância. Dentre todos os métodos, os menos tendenciosos são aqueles baseados na estimação de densidade não-paramétrica, tais como os genericamente denominados de *density-linkage* e o *two-stage density-linkage*.

Dentre os tipos de *density linkage* cita-se o *Kth-nearest neighbor*. Este tipo utiliza estimativas de densidade do  $k$ -ésimo vizinho. Seja  $r_k(x)$  a distância de um ponto  $x$  à  $k$ -ésima observação. Considere uma esfera fechada, centrada em  $x$  com raio  $r_k(x)$ . A densidade estimada em  $x$ ,  $f(x)$ , é o número de observações dentro da esfera dividido pelo volume da esfera. A nova medida de dissimilaridade é computada como

$$d^*(xi,xj) = (1/2)(1/f(xi) + 1/f(xj)) \text{ se } d(xi,xj) \leq (r_k(xi),r_k(xj)) \text{ máximo} \\ = \infty, \text{ caso contrário.}$$

O método *two-stage density linkage* é uma modificação do método anterior, na medida em que assegura que todos os pontos sejam repartidos pelos grupos modais antes que estes comecem a se juntar. Num primeiro estágio, quando grupos modais disjuntos são formados, o algoritmo é o mesmo do método anterior, porém com um detalhe: dois grupos serão unidos somente se cada um deles possuir determinado número mínimo de membros. No fim desse

estágio, cada ponto pertencerá a um grupo modal. No segundo estágio, os grupos modais são unidos hierarquicamente pelo método *single linkage*.

Para matrizes de variâncias-covariâncias desiguais ou para distribuições extremamente não-normais devem ser utilizados métodos de estimação de densidade não-paramétrica.

### 3.3 – ANÁLISE DOS RESULTADOS

Antecedendo as abordagens Supervisionada e Não-Supervisionada, foi empregada a Análise dos Componentes Principais (ACP) sobre todas as observações, considerando como variáveis originais os valores dos perfis de raios-gama (GR), densidade (RHOB) e neutrônico (NPHI). A ACP teve como objetivo reduzir o número de variáveis a somente um ou dois componentes principais, preservando a variabilidade praticamente total dos dados, facilitando, assim, a visualização dos mesmos e o conhecimento de sua estrutura (Figura 3.4).

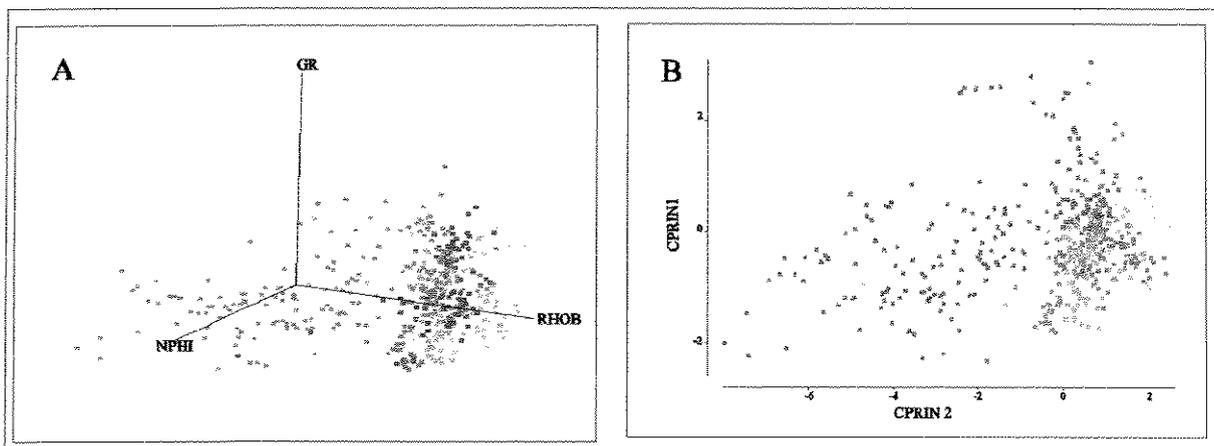


Figura 3.4 –Distribuição tridimensional das variáveis de perfis (a); e distribuição bidimensional dos dois componentes principais (b).

#### 3.3.1 – Análise dos Componentes Principais

Utilizando as três variáveis de perfis e um total de 19491 observações distribuídas nos 56 poços, obtiveram-se os autovalores e os autovetores da matriz de correlação para os três primeiros componentes principais.

Os resultados mostram que utilizando-se apenas os dois primeiros componentes principais (cprin1 e cprin2) capturam-se 90% da variabilidade total dos dados, isto é, as duas novas variáveis possibilitam a redução dos dados com pouca perda de informação (Tabela 3.1).

Tabela 3.1 – Autovalores dos três componentes principais das variáveis de perfis.

	Autovalor	Proporção (%)	Prop. Acumulada (%)
Componente Principal 1	1.565	0.522	0.522
Componente Principal 2	1.138	0.379	0.901
Componente Principal 3	0.297	0.099	1.000

A análise do autovetor do cprin1 mostra que este recebe a contribuição dos três perfis. Entretanto, os valores relativamente mais altos do perfil gr sugerem que o cprin1 responde, particularmente, pela argilosidade das observações. Já o segundo componente principal está mais relacionado à porosidade das observações, apresentando autovetor com valores acentuados nos perfis nphi e rhob e valores inexpressivos no perfil gr (Tabela 3.2).

Tabela 3.2 – Autovetores dos três componentes principais das variáveis de perfis.

	Componente Principal 1	Componente Principal 2	Componente Principal 3
Perfil gr	0.744	0.033	-0.667
Perfil nphi	0.521	-0.653	0.550
Perfil rhob	0.417	0.757	0.503

Os resultados satisfatórios obtidos pelos dois componentes principais asseguram que eles podem substituir as variáveis originais na continuidade do projeto, pois retiveram a maior parte da variabilidade dos dados e relacionam-se com as características de argilosidade e de porosidade dos mesmos. Porém, para efeito de comparação dos resultados gerados na definição dos litotipos, decidiu-se utilizar, paralelamente, as variáveis de perfis.

Tanto a análise das distribuições das variáveis de perfis como a dos dois componentes principais mostram que nenhum dos tipos de variáveis apresenta distribuição gaussiana característica, possibilitando, desta forma, o emprego de técnicas não-paramétricas (Figura 3.5).

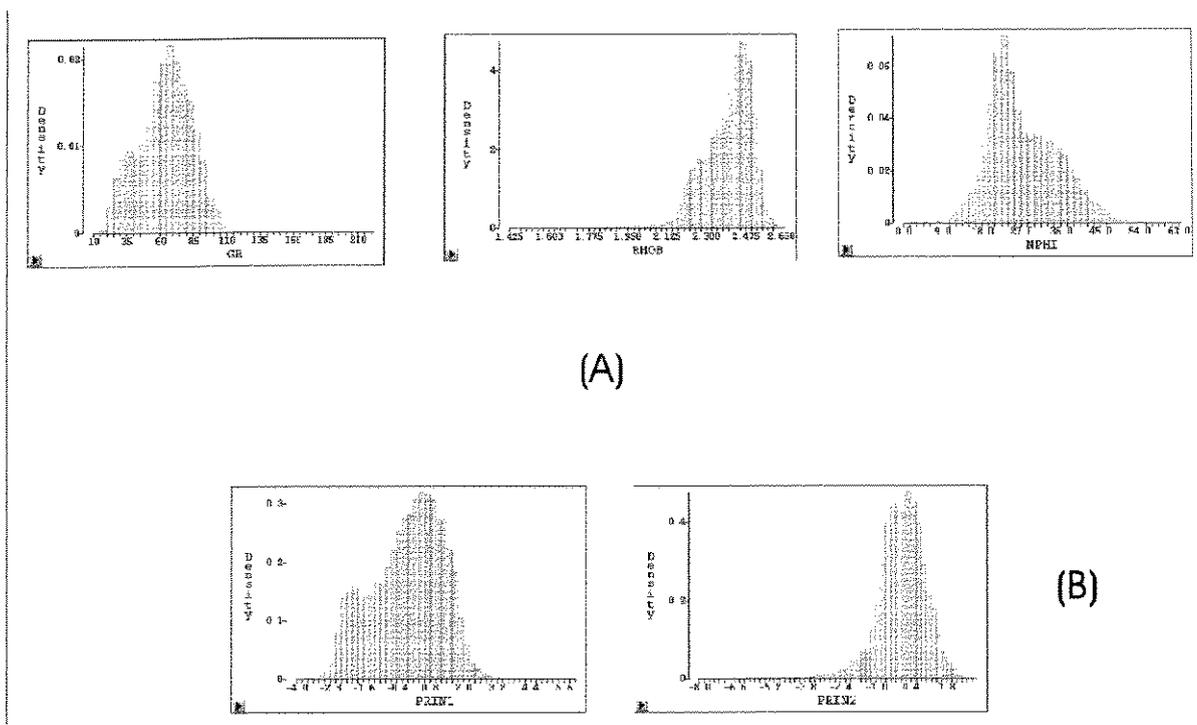


Figura 3.5 – Histogramas das distribuições (A) dos valores dos perfis e (B) dos valores dos componentes principais.

### 3.3.2 – Abordagem Supervisionada

Nesta abordagem partiu-se de um conjunto de observações contendo as litofácies, cada uma representando um grupo de observações, e suas respectivas respostas de perfis. Sobre o conjunto de observações, conhecido como “grupo de aprendizagem”, efetuou-se a Análise Discriminante, de modo a encontrar a função que classificasse as demais observações.

No nosso caso o número de grupos é igual ao número de fácies sedimentares descritas, isto é, sete, e o conjunto de aprendizagem é aquele constituído pelas observações que apresentam as descrições das fácies.

O “grupo de aprendizagem” utilizado é composto por 721 observações, divididas em sete grupos, cada um referente a uma litofácies (Tabela 3.3).

Tabela 3.3 - Composição do “grupo de aprendizagem” para a Análise Discriminante.

Litofácies	1	2	3	4	5	6	7
Frequência	249	63	71	104	60	12	162

A validação cruzada mostrou que um grande número de observações, considerado inicialmente como sendo de uma litofácies, foi reclassificado como outra litofácies (Tabela

3.4), resultando em um erro de classificação elevado, da ordem de 42,67%. A matriz de confusão que apresenta as reclassificações e as respectivas percentagens de cada litofácies pode ser observada na Tabela 3.5.

Tabela 3.4 - Taxas de erro na reclassificação das litofácies.

Fácies	1	2	3	4	5	6	7
Taxa	0.1165	0.4603	0.8873	0.3942	0.7333	0.1667	0.2284

Tabela 3.5 – Matriz de confusão dos grupos formados a partir da litofácies.

De \ Para	Fácies 1	Fácies 2	Fácies 3	Fácies 4	Fácies 5	Fácies 6	Fácies 7
	nº obs. (%)						
Fácies 1	220 (88.35)	23 (9.24)	4 (1.61)	1 (0.40)	1 (0.40)	0 (0.00)	0 (0.00)
Fácies 2	18 (28.57)	34 (53.97)	2 (3.17)	5 (7.94)	4 (6.35)	0 (0.00)	0 (0.00)
Fácies 3	11 (15.49)	23 (32.39)	8 (11.27)	16 (22.54)	8 (11.27)	4 (5.63)	1 (1.41)
Fácies 4	3 (2.88)	20 (19.23)	4 (3.85)	63 (60.58)	8 (7.69)	3 (2.88)	3 (2.88)
Fácies 5	5 (8.33)	18 (30.00)	5 (8.33)	9 (15.00)	16 (26.67)	4 (6.67)	3 (5.00)
Fácies 6	0 (0.00)	0 (0.00)	0 (0.00)	2 (16.67)	0 (0.00)	10 (83.33)	0 (0.00)
Fácies 7	1 (0.62)	4 (2.47)	0 (0.00)	29 (17.90)	1 (0.62)	2 (1.23)	125 (77.16)

A análise desses resultados indica que embora algumas litofácies tenham sido bem classificadas, como é o caso das litofácies 1, 6 e 7, cujos índices de acerto foram superiores a 77%, as outras quatro litofácies foram mal classificadas, principalmente as litofácies 3 e 5, com índices de acerto inferiores à 30%. Tais resultados refletem a dificuldade que o método adotado apresentou para discernir as respostas dos perfis de litofácies que mostram, entre si, gradações de granulometria sutis. Nota-se que somente as litofácies 1 e 7, que constituem os extremos desta variação granulométrica, e a litofácies 6, que mostra composição mineralógica distinta das demais, foram bem classificadas.

Visando diminuir o erro de reclassificação, reagruparam-se as litofácies segundo aspectos sedimentológicos e petrofísicos. Assim, foram formados três grupos compostos pelas seguintes associações de litofácies: grupo A (fácies 1 e 2), grupo B (fácies 3, 4 e 6) e grupo C (fácies 5 e 7). Embora tenham-se obtido taxas de erros de reclassificação mais baixas do que as obtidas antes do reagrupamento, ainda assim os grupos B e C mostraram taxas de erros com valores acima de 20%.

O resultados acima obtidos indicam que esta abordagem, por ficar dependente de um número preestabelecido de grupos que mostram diferenças tais que os perfis não conseguem estabelecer com clareza, apresentou alguma deficiência na classificação das observações. A melhoria na taxa de acerto na reclassificação, com o reagrupamento das litofácies, não foi suficiente para discriminar com exatidão o conjunto de dados.

### 3.3.3 - Abordagem Não-Supervisionada

Nessa abordagem foi utilizada a Análise de Agrupamento e, em seguida, com os grupos formados, empregada a Análise Discriminante.

Na Análise de Agrupamento, empregaram-se os métodos de agrupamento hierárquico aglomerativos não-paramétricos *density linkage* e *two-stage density linkage*, e, para efeito de comparação, também foi utilizado o método paramétrico da variância mínima de Ward (SAS Institute Inc., 1994).

Em ambos os métodos não-paramétricos o número ideal de grupos foi definido com base no método dos K vizinhos mais próximos. Tanto para as variáveis de perfis como para os dois componentes principais, os gráficos de números de classes modais *versus* K indicam que o número ideal de grupos é quatro (Figura 3.6). Pode ser observado nesses gráficos que à medida em que o número de K aumenta, há uma diminuição do número de classes modais (o número ideal de grupos) e aumento da frequência destas classes. Isto se dá porque o aumento do número de K vizinhos implica o aumento da região de pesquisa e, assim, a captura de valores com maiores discrepâncias. Conseqüentemente, formam-se grupos maiores e internamente mais heterogêneos, diminuindo gradativamente o número de grupos distintos entre si.

A análise inicial dos resultados de cada um dos três métodos utilizados indicou que o método *two-stage density linkage* foi o que melhor particionou o conjunto de observações. Os outros dois métodos foram muito influenciados pela presença de valores muito discrepantes. Nestes casos, dos quatro grupos formados, três deles apresentaram uma única observação, enquanto o quarto grupo reteve todas as demais observações. Esta distribuição era esperada para método de Ward, bastante sensível a *outliers*.

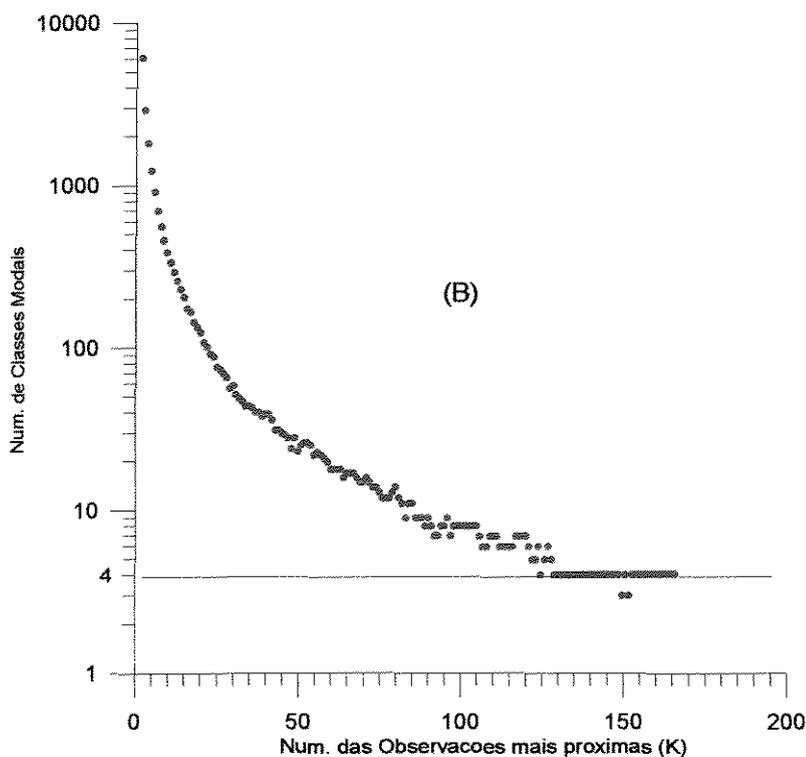
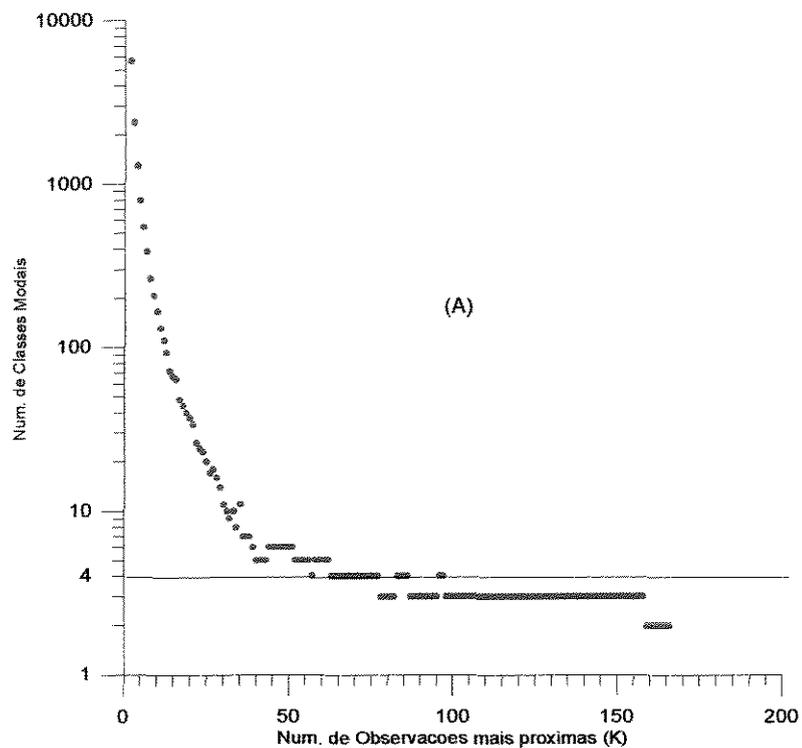


Figura 3.6 – Distribuição das classes modais conforme os K vizinhos mais próximos: (a) variáveis de perfis e (b) componentes principais.

A etapa mais importante da Análise de Agrupamento foi a da validação dos resultados obtidos pelo método adotado (*two-stage density linkage*), isto é, a verificação da existência de correspondência entre os grupos formados e as características geológicas do intervalo estudado, uma vez a modelagem poderá ficar comprometida caso os grupos não tenham qualquer significado geológico.

Para a análise interna dos grupos formados tanto com as variáveis de perfis como com os componentes principais escolheram-se, dentre os K vizinhos mais próximos geradores de quatro classes modais, respectivamente os valores 70 e 140. A escolha destes valores deveu-se unicamente à proximidade de sua localização ao centro de distribuição dos valores de K para a classe modal escolhida (Figura 3.6). As distribuições das observações nos quatro grupos formados, segundo o tipo de variável utilizado, podem ser vistas na Tabela 3.6.

Tabela 3.6 – Distribuição das observações nos grupos formados segundo as variáveis de perfis e de componentes principais.

Variáveis	Componentes Principais	Perfis
Grupo I	4236	4255
Grupo II	1361	3637
Grupo III	6761	5357
Grupo IV	7133	6242

O exame destas distribuições mostra que, para ambos os tipos de variáveis empregados, houve repartições das observações por grupos semelhantes, excetuando-se a do Grupo II, em que se verificou maior variação do número de observações. Foram efetuadas também correlações das observações de cada um dos grupos com as litofácies e com as medidas petrofísicas dos quatro poços testemunhados, e com o zoneamento estratigráfico. Quando correlacionados às litofácies, observa-se que os grupos formados a partir dos dois primeiros componentes principais foram, de modo geral, mais sensíveis às mudanças das litofácies do que o agrupamento gerado através das variáveis de perfis, que, por sua vez, tendem a formar intervalos mais contínuos (Figura 3.7). Estas diferenças provavelmente explicam as discrepâncias verificadas na distribuição das observações dos dois tipos de variáveis utilizados. Uma vez que os grupos gerados com os componentes principais, aparentemente, possuem melhor correlação com os dados de rochas e com o zoneamento estratigráfico, optou-se por utilizá-los na seqüência do estudo.

Dando continuidade à validação dos resultados, ficou evidente que enquanto os grupos I e IV caracterizam-se, respectivamente, pela ampla predominância das litofácies 1 (arenito fino) e 7 (fólhelho) (Tabela 3.7), os grupos II e III compõem-se das demais litofácies (2, 3, 4, 5 e 6). O exame mais criterioso da correlação destes dois últimos grupos mostra que há tendência de predomínio das litofácies areno-argilosas (2 e 3) no grupo II e das litofácies argilo-arenosas (4, 5 e 6) no grupo III. As relações acima descritas indicam que,

possivelmente, os grupos formaram-se em função de suas qualidades de reservatório, predominando, assim, a litofácies 1 (rocha-reservatório) no grupo I, as litofácies 2 (rocha-reservatório) e 3 (não-reservatório) no grupo II, as litofácies 4, 5 e 6 (não-reservatório), no grupo III e finalmente a litofácies 7 (não-reservatório) no grupo IV. Essas relações são confirmadas pela estatística dos dados petrofísicos de cada grupo (Tabela 3.7).

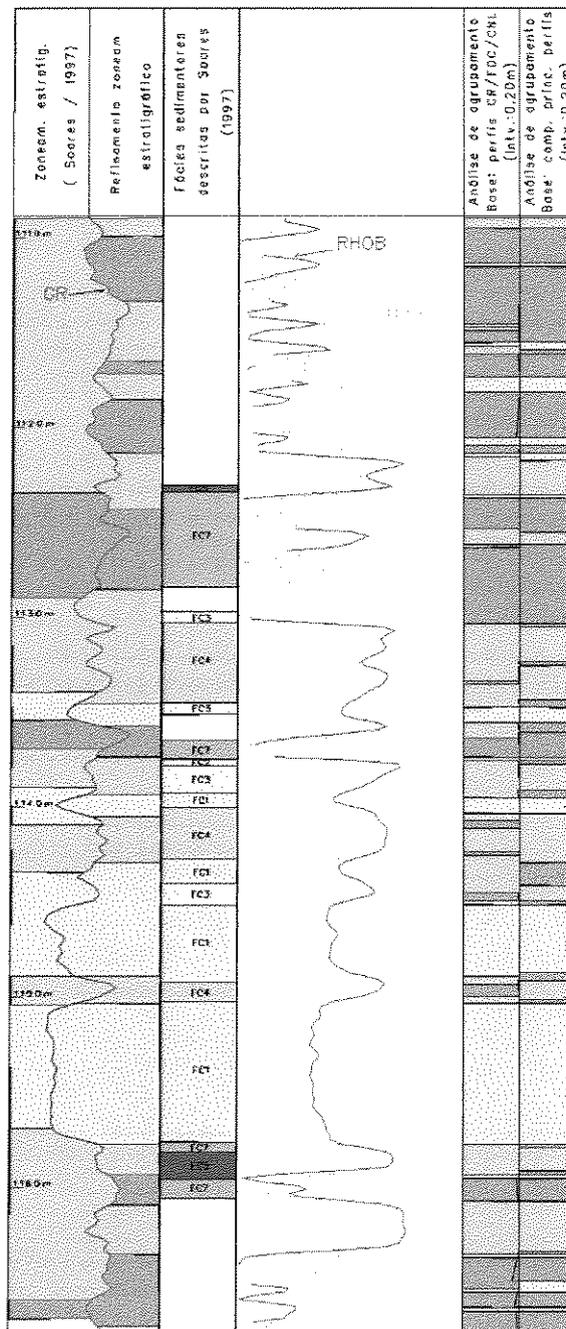


Figura 3.7 – Perfil esquemático do poço P25, mostrando os zoneamentos estratigráficos, as litofácies, as curvas dos perfis e os resultados da análise de agrupamento das variáveis de perfis e dos componentes principais.

Tabela 3.7 – Características da qualidade de reservatório dos grupos formados pela Análise de Agrupamento dos componentes principais.

Grupo	Fácies Predominante	Porcentagem (%)	Porosidade Média (%)	Permeabilidade Média (mD)
I	1	86	21,72	177,5
II	2 e 3	49	17,62	10,3
III	4, 5 e 6	59	16,01	6,7
IV	7	90	12,20	-

A correlação destes grupos com o zoneamento estratigráfico estabelecido mostrou alguns outros aspectos quanto ao significado geológico dos mesmos. Pois, se não há qualquer dúvida sobre a correlação do grupo I com as zonas dos lobos deltaicos, o grupo IV, que deveria estar associado basicamente aos folhelhos lacustres, caracteriza-se, no terço superior do intervalo, pela presença desses folhelhos, mas também das zonas consideradas como sendo de depósitos de interlobos (Figura 3.7). Já, para a porção central do intervalo, onde há predominância das zonas de lobos e de interlobos, os grupos II e III correlacionam-se principalmente a estas últimas zonas e parcialmente à zona de lobos. Assim, aparentemente, o grupo I relaciona-se às zonas dos arenitos de lobos deltaicos, o grupo II tanto às zonas dos arenitos como às zonas dos sedimentos das áreas de interlobos/interdistributárias, o grupo III também a esta última zona e o grupo IV à zona de folhelhos lacustres e também a zona de interlobos.

Foi também realizada a análise da posição relativa de cada grupo em relação a eles mesmos. Observou-se que o grupo II geralmente ocorre no topo ou na base do grupo I, sugerindo que esteja, em termos deposicionais, muito relacionado a este grupo. Por outro lado, verificou-se que o grupo II tende a passar verticalmente para o grupo III, que, por sua vez, passa para o grupo IV.

A integração de todas as análises efetuadas permitiu concluir que:

- o grupo I corresponde aos arenitos dos lobos deltaicos;
- o grupo II, dadas as suas características de rocha reservatório, pode ser interpretado como representando a porção marginal (vertical e lateralmente) dos lobos ou de conjunto de lobos deltaicos;
- o grupo III representa os sedimentos argilo-arenosos, não-reservatório (litofácies 3, 4, 5 e 6) dos interlobos/interdistributários;
- o grupo IV representa tanto os folhelhos lacustres como os sedimentos de interlobos/interdistributários muito argilosos, depositados no terço superior do

intervalo estratigráfico, provavelmente relacionados à redução da energia do ambiente devido à transgressão do lago sobre delta;

- as relações, acima expostas, entre os grupos e suas características geológicas, validam o emprego dos componentes principais como variáveis de entrada para a formação de grupos.

O último passo da abordagem Não-Supervisionada foi o emprego da Análise Discriminante sobre os grupos formados. Utilizando o método não-paramétrico,  $k=140$  e probabilidade *a priori* igual para todos os quatro grupos, a validação cruzada, como era esperado, indicou taxas de erro baixíssimas na classificação destes grupos (Tabela 3.8), ratificando a consistência dos grupos formados pela Análise de Agrupamento (Tabela 3.9).

Tabela 3.8 – Matriz de confusão dos grupos formados a partir da Análise de Agrupamento dos componentes principais.

	Grupo I	Grupo II	Grupo III	Grupo IV	Total
Do \ Para	n <sup>o</sup> obs. (%)				
Grupo I	6552 (96.91)	3 (0.04)	38 (0.56)	168 (2.48)	6761 (100.00)
Grupo II	0 (0.00)	4079 (96.29)	2 (0.05)	155 (3.66)	4236 (100.00)
Grupo III	37 (0.32)	2 (0.03)	7082 (99.29)	12 (0.17)	7133 (100.00)
Grupo IV	0 (0.00)	4 (0.29)	0 (0.00)	1357 (99.71)	1361 (100.00)
Total	6589 (33.81)	4088 (20.97)	7122 (36.54)	1692 (8.68)	19491 (100.00)

Tabela 3.9 - Estimativas de erro para os grupos formados a partir da Análise de Agrupamento dos componentes principais.

	Grupo I	Grupo II	Grupo III	Grupo IV	Total
Taxa de erro	0.0309	0.0371	0.0071	0.0029	0.0195

A abordagem Não-Supervisionada possibilitou a formação de grupos que representam as diferentes características permo-porosas do intervalo estratigráfico estudado. Assim, existe uma gradação na qualidade permo-porosa que se inicia com grupo I, de melhor qualidade de reservatório, passa pelos grupos II, com boa permo-porosidade, e III, com má permo-porosidade, e termina com o grupo IV, de péssima qualidade de reservatório.

Considerando os resultados obtidos pelas duas abordagens, decidiu-se adotar, para a modelagem geológica 3D, os grupos gerados pela abordagem Não-Supervisionada, por mostrarem correlações nítidas com os aspectos geológicos, em particular, com a qualidade permo-porosa do intervalo estudado. A esses grupos denominou-se litotipos.

## CAPÍTULO 4 – ANÁLISE DA DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL DOS LITOTIPOS

### 4.1 – INTRODUÇÃO

A definição dos litotipos ao longo do intervalo estratigráfico dos 55 poços da área de estudo possibilitou o uso de técnicas que forneceram informações a respeito do comportamento espacial daqueles litotipos.

O conhecimento das relações espaciais de cada litotipo, tanto individualmente como os demais, permitiu comparar as interpretações feitas com o modelo geológico conceitual proposto para a área. Além disto, propiciou a tomada de decisões quanto à elaboração de um modelo 3D de repartição de fácies mais coerente com as relações verificadas.

A análise da distribuição espacial dos litotipos foi efetuada, inicialmente, para todo o intervalo estratigráfico escolhido, isto é, aquele situado entre os marcos M-11 e M-12. As interpretações advindas destas análises tornaram possível subdividir o intervalo original em três zonas (A, B e C) com características geológicas distintas. Para cada uma delas, em especial para a Zona B, predominantemente arenosa, realizaram-se novas análises sobre arranjo espacial dos litotipos.

Para tanto, foram utilizados os *softwares* geostatísticos HERESIM (Beicip-Franlab - *Petroleum Consultants*, 1997) e ISATIS (Transvalor & Geovariances, 1997) e utilizadas as seguintes técnicas: mapas de proporção de espessura dos litotipos, seções geológicas verticais, curvas de proporção vertical e horizontal, variografia e krigagem.

Antes de serem descritas as ferramentas usadas e os resultados obtidos na análise da distribuição espacial dos litotipos para cada uma das zonas estratigráficas, foi efetuada a discretização vertical dos litotipos. Tomando como marco M-11 como *datum* estratigráfico, este procedimento visou principalmente à redução do número de dados, através da mudança de suporte da amostra de 0.2 m para 1.0 m, sem prejuízo para a representatividade e variabilidade dos dados. Por constituir uma etapa cujos resultados influenciaram, sobremaneira, todo o processo de modelagem, foram seguidas as seguintes regras (Figura 4.1): a) o litotipo que representar qualquer espessura de um metro será aquele que dentro deste intervalo seja mais espesso que os demais litotipos; b) caso dois litotipos apresentem espessuras de 0.4 m, o escolhido será aquele que possuir essa espessura de forma contínua; c) caso esses dois litotipos apresentem a mesma continuidade, a escolha recairá sobre o litotipo em posição mais inferior, segundo a seqüência de deposição pressuposta, isto é, do mais basal,

litotipo1 (fácies arenosa dos lobos deltaicos), passando pelos litotipos 2 (fácies arenosas das margens dos lobos) e 3 (fácies argilo-arenosas dos interlobos), até o mais superior, litotipo 4 (fácies pelíticas dos depósitos lacustres e de interlobos/interdistributários).

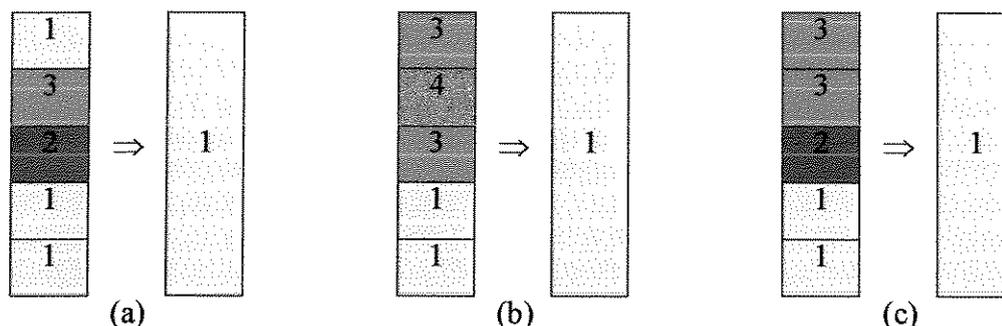


Figura 4.1 – Regra para a mudança de suporte vertical dos litotipos de 0,2 para 1,0 m.

## 4.2 – DISTRIBUIÇÃO DOS LITOTIPOS NO INTERVALO TOTAL

### 4.2.1 - Mapas e Seções Geológicas

Os mapas e seções geológicas traduzem o conhecimento que o geólogo tem da área que estuda. Este conhecimento advém da massa de informações trazida pelas interpretações dos perfis, da sísmica, dos testemunhos, dos testes de formação e do conhecimento dos processos atuantes na formação e evolução daquele ambiente deposicional. Através dos mapas e seções obtêm-se informações a respeito da geometria, distribuição e direções principais de deposição das rochas sedimentares da área.

Para a área em foco, foram construídos mapas de proporção de espessura, baseados no conhecimento geológico da área, que revelam as seguintes características do intervalo:

- o litotipo 1 possui direção preferencial de deposição NNW/SSE e duas regiões principais de concentração: no centro e a nordeste da área de estudo (Figura 4.2a). Esta distribuição está coerente com os mapas de proporção de espessura e com os mapas krigados de espessura dos principais corpos arenosos do intervalo, elaborados por Soares (1997);

- o litotipo 2, embora com baixa proporção global, mostra distribuição semelhante à do litotipo 1, com pequeno deslocamento de seu eixo de deposição (Figura 4.2b);

- o litotipo 3 apresenta a mesma direção de deposição dos litotipos anteriores, porém as maiores proporções encontram-se justamente nas regiões em que se verificam as menores proporções dos litotipos 1 e 2 (Figura 4.2c);

- o litotipo 4 tende a mostrar maiores proporções distribuídas, de forma descontínua, ao longo da direção N/S (Figura 4.2d).

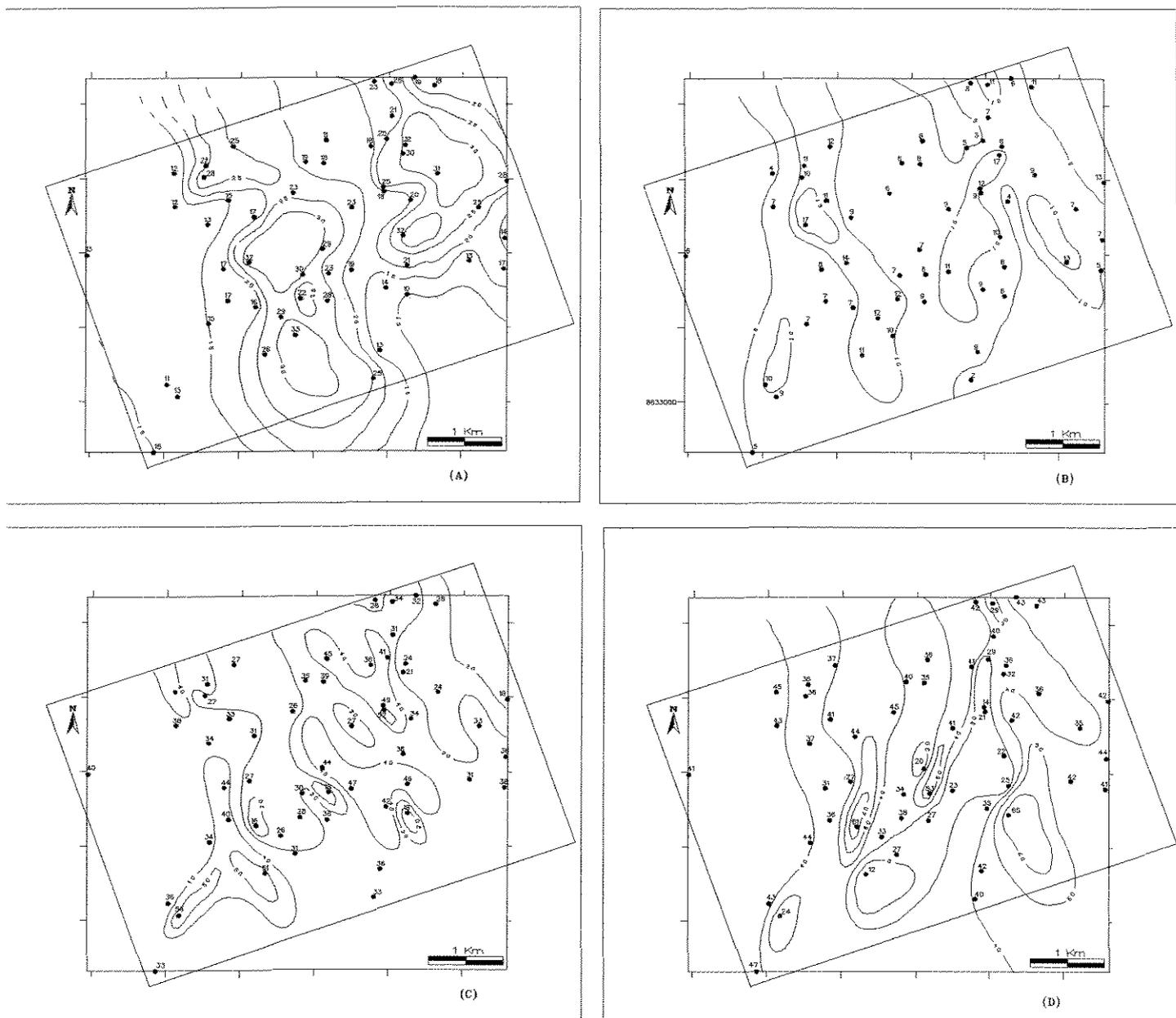


Figura 4.2 – Mapas de proporção das espessuras dos litotipos do intervalo estratigráfico total: (a) litotipo 1; (b) litotipo 2; (c) litotipo 3 e (d) litotipo 4.

As seções estratigráficas, elaboradas por Soares (1997), também evidenciam alguns aspectos do intervalo estudado, como o caráter regressivo das fácies arenosas (litotipos 1 e 2) de NE para SW (Figura 4.3a) e os arranjos de compensação entre aquelas fácies arenosas e as fácies argilo-arenosas de interlobos (litotipo 3), na direção NW/SE (Figura 4.3b). A Figura 4.4 apresenta a localização destas seções estratigráficas.

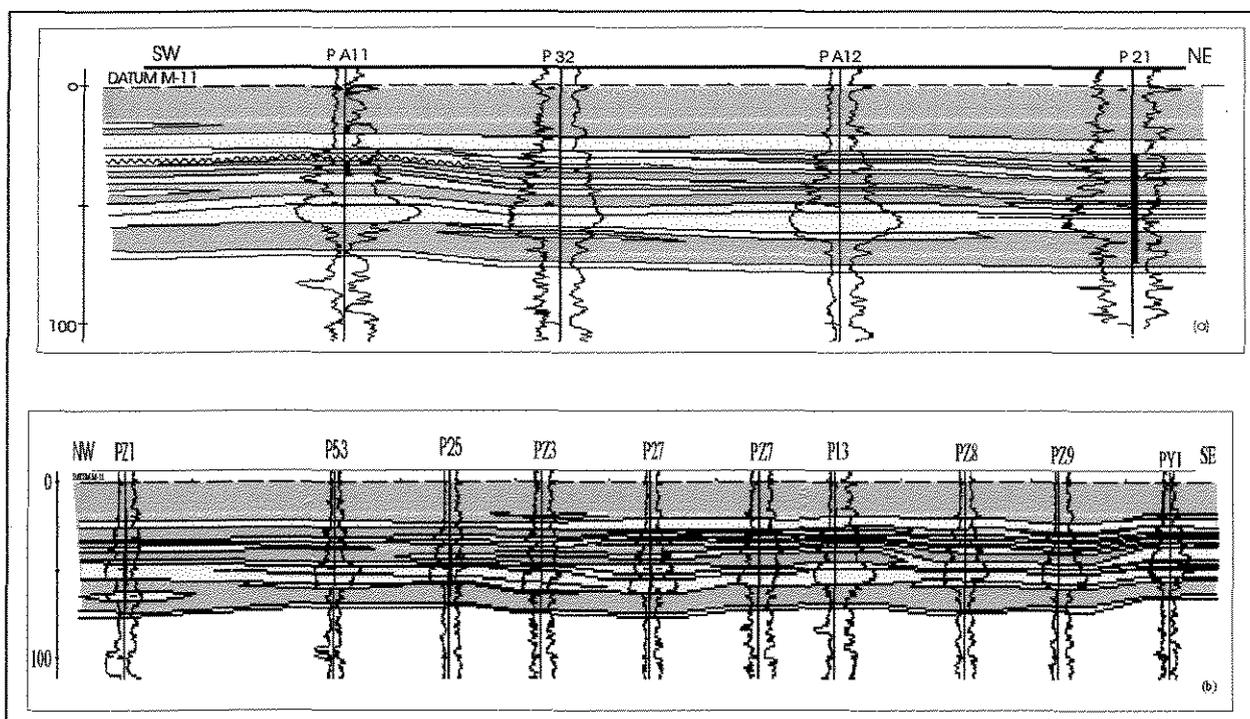


Figura 4.3 – Seções geológicas estratigráficas da região em estudo: (a) seção transversal à deposição; (b) seção longitudinal à deposição. Em amarelo estão representadas as fácies arenosas dos litotipos 1 e 2, em verde as fácies argilo-arenosas do litotipo 3 e em cinza as fácies pelíticas do litotipo 4 (modificado de Soares, 1997).

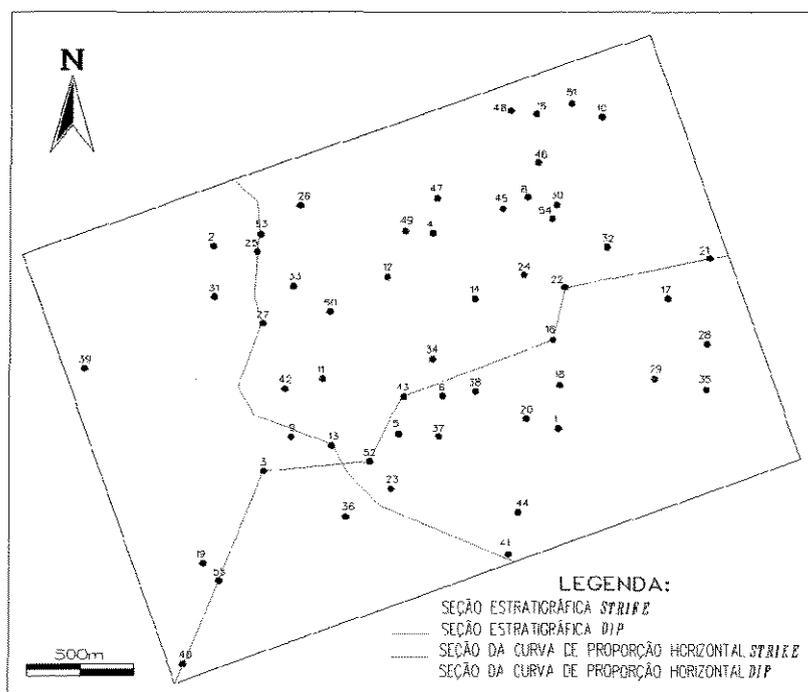


Figura 4.4 - Mapa de localização das seções estratigráficas e seções das curvas de proporção horizontal.

#### 4.2.2 - Curvas de Proporção Horizontal e Vertical

As curvas de proporção horizontal e vertical constituem uma ferramenta muito útil na análise das características gerais de deposição de um intervalo estratigráfico. O sucesso de sua aplicação, contudo, depende necessariamente da escolha de um marco cronoestratigráfico.

A curva de proporção horizontal (cpH) representa a distribuição espacial das percentagens de todos os litotipos numa determinada direção. Ela é calculada poço a poço e, depois, é projetada sobre uma seção vertical. Como a projeção da cpH varia conforme a direção escolhida, torna-se uma ferramenta auxiliar na identificação de *trends* regionais da distribuição dos litotipos.

A curva de proporção vertical (cpV) é, simplesmente, um diagrama de barras que mostra a distribuição vertical das percentagens de todos os litotipos. Seu cálculo é efetuado nível a nível e, considerando que sumariza e quantifica verticalmente, a informação geológica expressa pelos litotipos, apresenta grande utilidade na análise do empilhamento vertical das rochas da área estudada.

A análise das curvas de proporção horizontal e vertical na área de estudo revela alguns aspectos interessantes do intervalo estudado, tais como (Figura 4.5):

- a cpH calculada transversalmente ao *trend* deposicional mostra que o litotipo 1 (lobos deltaicos) apresenta significativa alternância de suas proporções ao longo desta direção. A partir de SW (distância zero) para NE (distância 2750 m), as proporções passam de um patamar de 11%, para os valores de até 28% (1800 m), voltando a proporções em torno de 10% na porção NE (Figura 4.5a). O litotipo 3 (depósitos de interlobos, principalmente), por sua vez, tende a mostrar comportamento inverso do verificado para o litotipo 1, isto é, maiores proporções nas extremidades da curva e menores na região central. A disposição desses dois litotipos reflete, provavelmente, o mecanismo de sedimentação deste ambiente, com as areias dos lobos amalgamadas, lateralmente passando aos sedimentos dos interlobos;

- a cpH calculada paralelamente à direção de deposição dos arenitos deltaicos mostra também algumas variações nas proporções dos litotipos 1 e 3, porém, o que se destaca é o maior “espessamento” do litotipo 4 de NW (distância zero) a SE (1750 m) (Figura 4.5b). Tal situação está de acordo com o modelo geológico concebido, uma vez que é esperado na porção mais distal deste ambiente, o predomínio de sedimentos pelíticos lacustres;

- a cpV mostra como as proporções dos litotipos variam com a profundidade (Figura 4.5c). Da base do intervalo até a profundidade de -65 m, há o predomínio dos litotipos 3 e 4. A partir de -65 m há o rápido crescimento das proporções do litotipo 1 e 2, chegando ao seu máximo em -45 m. A partir daí, até -25 m, ocorre uma redução gradativa destas proporções e



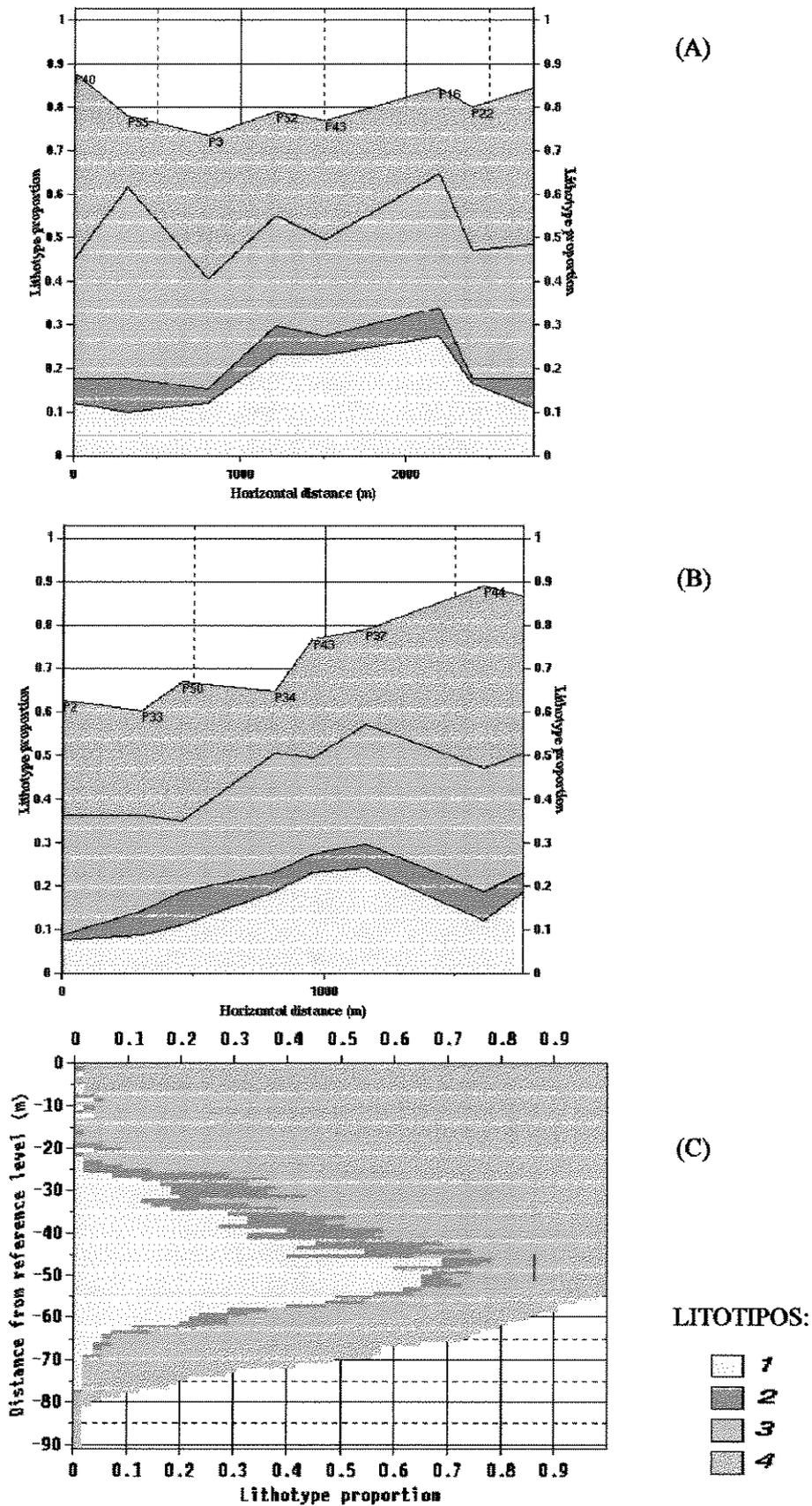


Figura 4.5 – Curvas de proporção dos litotipos do intervalo total: (a) horizontal transversal à deposição; (b) horizontal paralela à deposição e (c) vertical.

o conseqüente crescimento das proporções dos litotipos 3 e 4. De -25 m ao topo do intervalo, verifica-se a alternância das proporções destes últimos litotipos. O exame da cpV evidencia o caráter regressivo da sedimentação deltaica, da base para o topo do intervalo, tanto pela diminuição gradativa dos litotipos 1 e 2 como pelo aumento das proporções do litotipo 4.

#### 4.2.3 - Análise Variográfica das Proporções dos Litotipos

Outra forma de se conhecerem as relações espaciais entre dados é utilizando a Geoestatística, que tem na análise variográfica, uma de suas técnicas básicas. A variografia permite medir, a partir da construção do variograma experimental, a correlação existente entre os valores tomados em dois pontos no espaço e, assim, representar a imagem da variabilidade dos dados na área estudada. O ajuste do variograma experimental, obtido a partir dos dados amostrais, por um variograma teórico, definido por uma função matemática, propicia a definição de parâmetros que são aplicados a outras técnicas geoestatísticas, como a krigagem.

Na construção dos variogramas horizontais das proporções de cada litotipo, foram escolhidos os seguintes parâmetros: passo de 300 m com tolerância de 150 m, tolerância angular de 22,5° e largura da banda de 600 m. Para os variogramas verticais os parâmetros escolhidos foram: passo de 1 m, com tolerância de 0,5 m, e tolerância angular de 0,001.

Os variogramas horizontais do litotipo 1 mostram anisotropia geométrica muito sutil, sendo N20W/S20E a direção de maior continuidade (alcance de 700 m) e N70E/S70W a direção de menor continuidade (alcance de 600 m) (Figura 4.6a). Na vertical, o variograma indica a tendência de deriva, refletindo o crescente aumento da proporção deste litotipo ao longo do intervalo estudado (Figura 4.7a), conforme verificado através da curva de proporção vertical.

Os variogramas horizontais e vertical do litotipo 2 possuem caráter pepítico, com tendência a apresentarem as mesmas direções de anisotropia do ltp1, provavelmente, em função da baixa proporção daquele litotipo (Figuras 4.6b e 4.7b).

Os litotipos 3 e 4 apresentam direções de anisotropia horizontal semelhantes, N50W/S40E e N45E/S45W, porém com alcances algo distintos, 700 e 600 m, para o ltp4, e 600 e 500 m, para o ltp3 (Figuras 4.6c e 4.7d). Os variogramas verticais de ambos os litotipos, sugerem a existência de estruturas imbricadas. No variograma do ltp3, há a formação de dois patamares, o primeiro com um alcance de 6 m e o segundo com alcance 14 m (Figura 4.6c). No variograma do litotipo 4, forma-se um patamar com alcance de 6 m e, para maiores distâncias, mostra deriva à grande escala (Figura 4.7d). Aparentemente, os

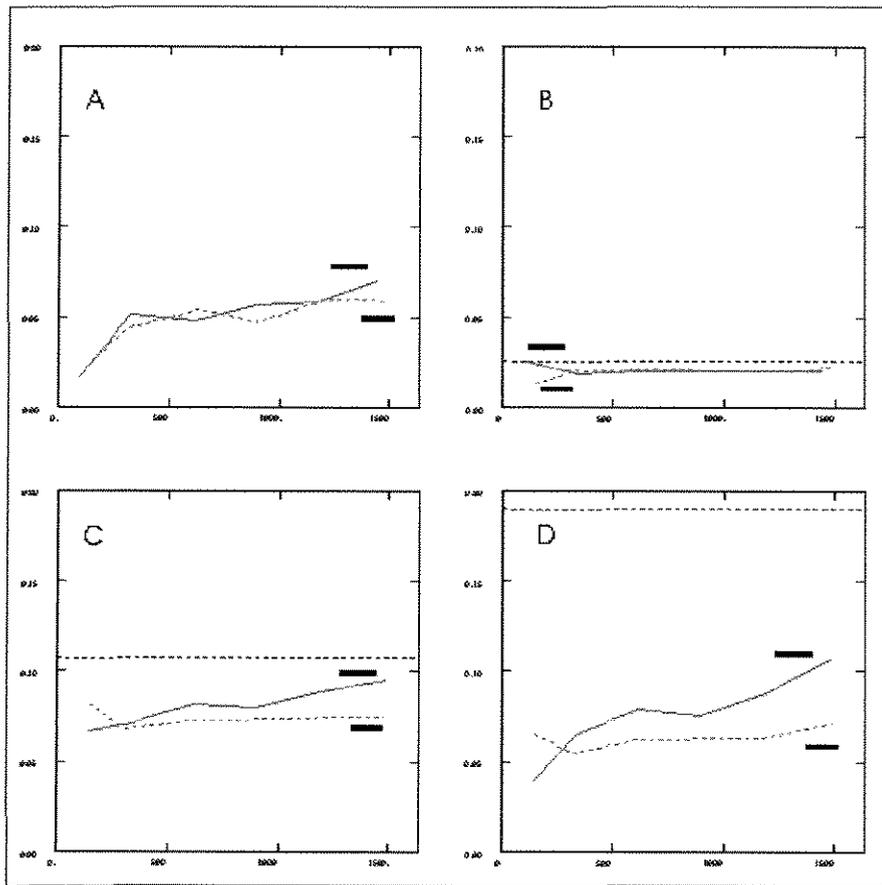


Figura 4.6 – Variogramas experimentais horizontais das proporções dos litotipos: a) litotipo 1; b) litotipo 2; c) litotipo 3 e d) litotipo 4.

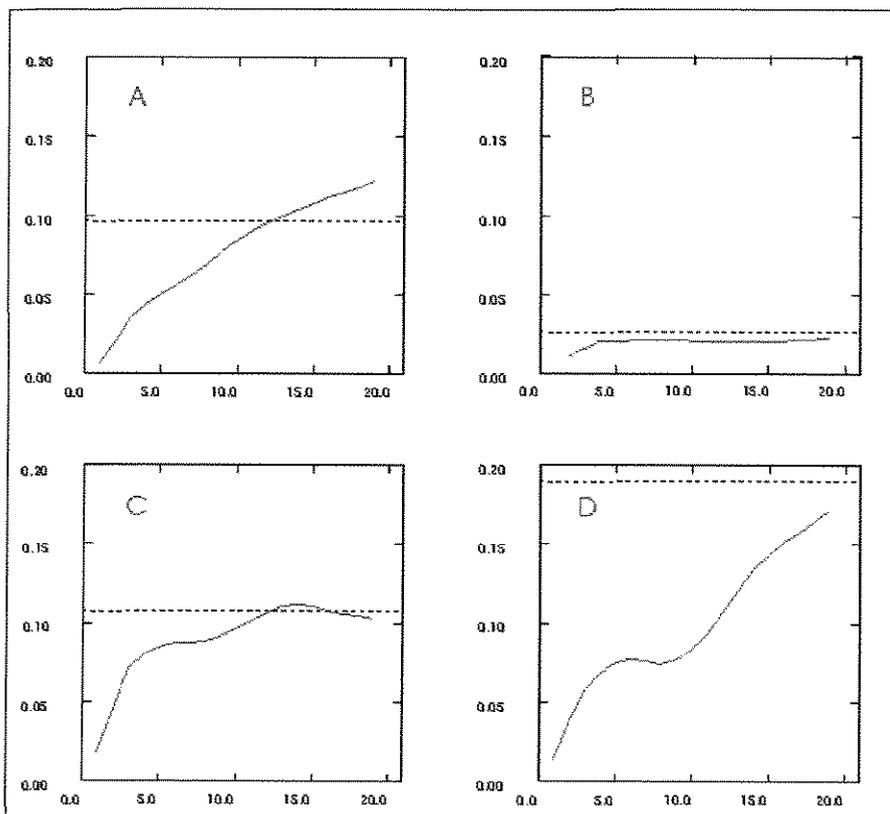


Figura 4.7 – Variogramas experimentais verticais das proporções dos litotipos: a) litotipo 1; b) litotipo 2; c) litotipo 3 e d) litotipo 4.

imbricamentos observados relacionam-se à mudança das proporções ao longo do intervalo estudado.

A integração dos resultados obtidos pelas diferentes ferramentas utilizadas na análise das relações espaciais dos litotipos deste intervalo permitiu concluir que as proporções destes litotipos variam tanto em área como ao longo da seqüência estratigráfica. De modo geral, todos os litotipos apresentam o eixo geral de deposição NW/SE, e relacionam-se entre si através de arranjos espaciais característicos. Verticalmente também evidenciam-se estas relações e variações de proporções. Assim, verifica-se, da base para o topo do intervalo, que inicialmente, predominou a deposição de finos, com rara sedimentação arenosa. Com o avanço do delta sobre o lago, foram depositados, sob a forma de lobos, grandes volumes de areia, que lateralmente mudavam para sedimentos mais finos. Com o avanço do lago sobre o delta, houve um contínuo recuo da frente deltaica, e a conseqüente deposição de pelitos, até cessar qualquer sedimentação arenosa. Esta evolução sedimentar, evidenciada na variação das proporções de cada litotipo, tanto horizontal como vertical, é ratificada pelo modelo geológico conceitual da área.

Isto posto, dada a grande variabilidade espacial dos litotipos na área estudada, assumiu-se a hipótese de não-estacionariedade tanto na horizontal como na vertical deste litotipos. Como conseqüência desta não-estacionariedade e visando aproveitar ao máximo as informações disponíveis, decidiu-se, para efeito da construção das matrizes de proporção e da modelagem, subdividir o intervalo estratigráfico estudado em três zonas: A, B e C (Figura 4.8). A curva de proporção vertical permite observar com mais clareza esta subdivisão (Figura 4.5c). A Zona A, com espessura média de 32 m, situa-se na parte superior do intervalo. Está delimitada, no topo, pelo marco M-11 e, na base, por sedimentos pelíticos do marco M-P3, sendo predominante pelítica. A Zona B, delimitada pelos marcos M-P3 e M- V6, apresenta espessura média de 32 m e é predominantemente arenosa. A Zona C, com 27 m de espessura, está delimitada pelos marcos M-V6 e M-12 e, como a Zona A, é predominantemente pelítica.

A subdivisão do intervalo estratigráfico por zonas propiciou modelar os reservatórios segundo dois enfoques. O primeiro, mais localizado e dada sua importância para o gerenciamento de reservatório. O segundo enfoque, mais amplo, abrangerá todo o intervalo estudado. Torna-se, portanto, necessário analisar o arranjo espacial dos litotipos para cada uma destas zonas.

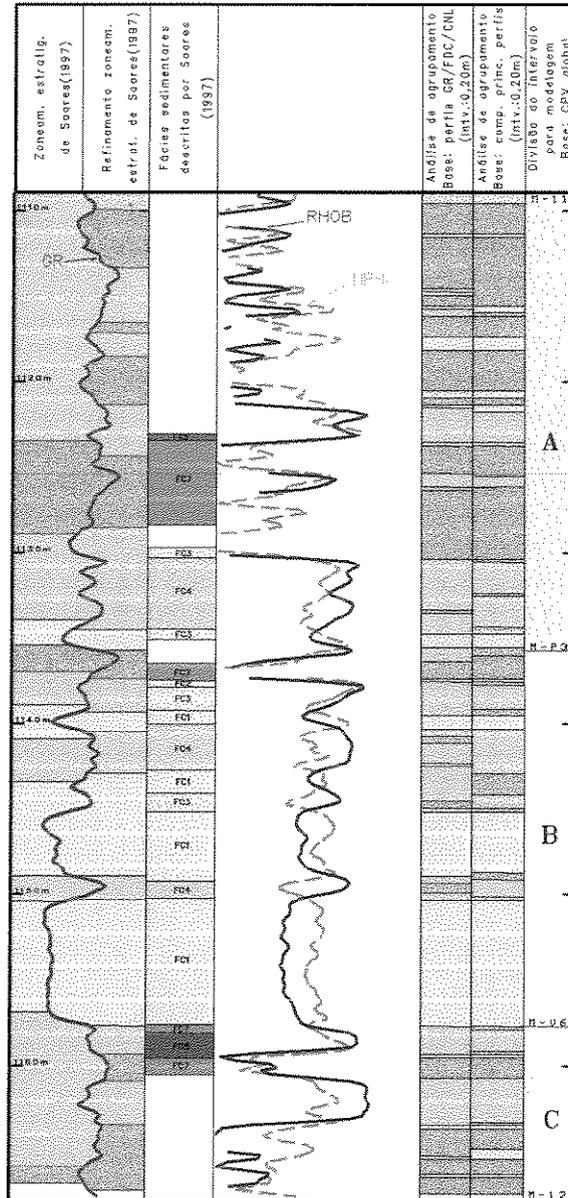


Figura 4.8 – Perfil esquemático do poço P25, mostrando os zoneamentos estratigráficos, as litofácies, as curvas dos perfis, os resultados da análise de agrupamento das variáveis de perfis e dos componentes principais e a subdivisão do intervalo estudado para efeito de modelagem 3D.

### 4.3 – DISTRIBUIÇÃO DOS LITOTIPOS NA ZONA B

A compreensão das relações espaciais dos litotipos desta zona foi obtida com base nas análises variográficas diretas e cruzadas de suas variáveis indicatrizes e, na posterior krigagem indicatriz destas variáveis.

#### 4.3.1 - Variografia Direta das Indicatrizes

A análise variográfica de cada litotipo da Zona B foi efetuada após a transformação dos dados iniciais (litotipos 1, 2, 3 e 4) em variáveis indicatrizes 1 e 0, relacionadas, respectivamente, à presença ou ausência de determinado litotipo. Assim, em cada poço, a cada intervalo de um metro, o litotipo presente terá variável indicatriz 1, enquanto que os demais litotipos terão indicatrizes 0. Essas relações podem ser escritas da seguinte forma:

$$I_{lito1}(z) = 1, \text{ se o litotipo 1 ocorre no ponto } z; \\ = 0, \text{ caso contrário.}$$

$$I_{lito2}(z) = 1, \text{ se o litotipo 2 ocorre no ponto } z; \\ = 0, \text{ caso contrário.}$$

$$I_{lito3}(z) = 1, \text{ se o litotipo 3 ocorre no ponto } z; \\ = 0, \text{ caso contrário.}$$

$$I_{lito4}(z) = 1, \text{ se o litotipo 4 ocorre no ponto } z; \\ = 0, \text{ caso contrário.}$$

Os parâmetros escolhidos para a construção dos variogramas das indicatrizes dos litotipos desta zona foram os mesmos utilizados na análise variográfica das proporções dos litotipos do intervalo total.

Os variogramas horizontais confirmaram que a direção de maior continuidade do ltp1 é N20W/S20E. A anisotropia geométrica observada apresenta patamar em 0.2 com alcances de 900 e 500 m (Figura 4.9a). Nota-se imbricamento na direção vertical, com a primeira estrutura com alcance da ordem de 7,5 m e uma segunda estrutura com alcance de 15 m (Figura 4.10a). Esta estruturação, observada por Soares (1997) na análise variográfica das espessuras dos pacotes arenosos da área, relaciona-se, muito provavelmente, à amalgamação de lobos deltaicos.

Nos variogramas do ltp2, observa-se anisotropia horizontal muito sutil, com maior continuidade para N42W/S48E e alcances em torno de 400 m (Figura 4.9b). Na vertical verifica-se a não-estacionaridade da curva (Figura 4.10b). Uma hipótese para esta configuração pode estar relacionada ao aumento relativo da sedimentação deste litotipo (mais fina que a do ltp1), à medida em que o lago avançava sobre o delta.

Os variogramas do ltp3 mostraram-se semelhantes aos do ltp1, embora as direções de maior e menor continuidades mudem ligeiramente, respectivamente N50W/S40E e

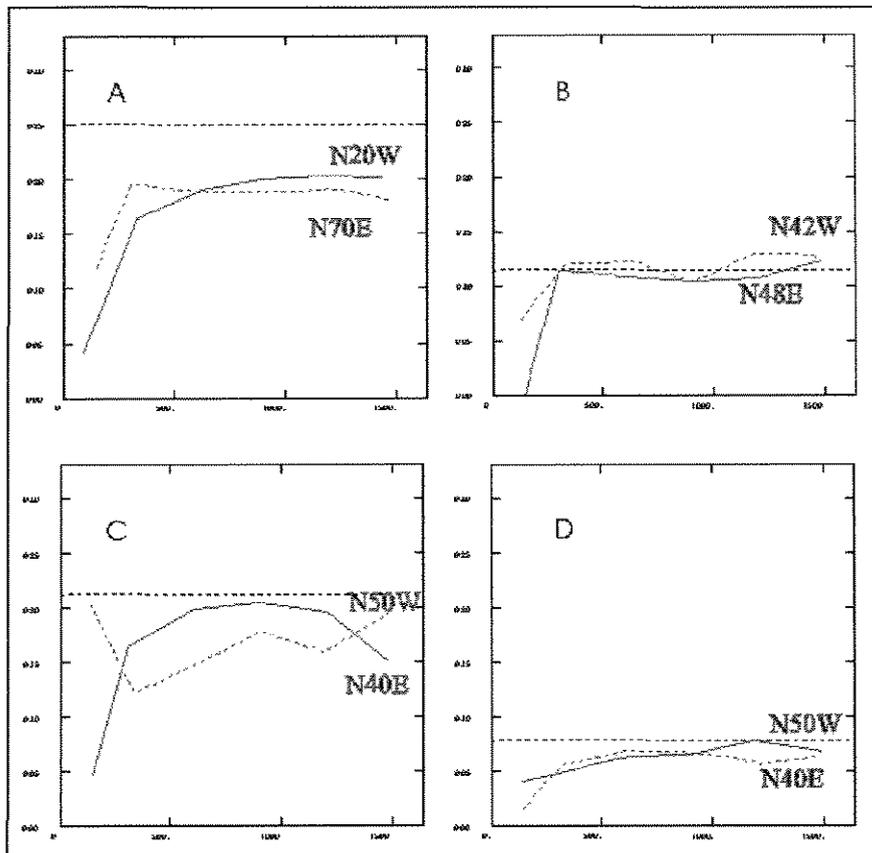


Figura 4.9 – Variogramas experimentais horizontais das indicatrizes das proporções dos litotipos da Zona B: a) litotipo 1; b) litotipo 2; c) litotipo 3 e d) litotipo 4.

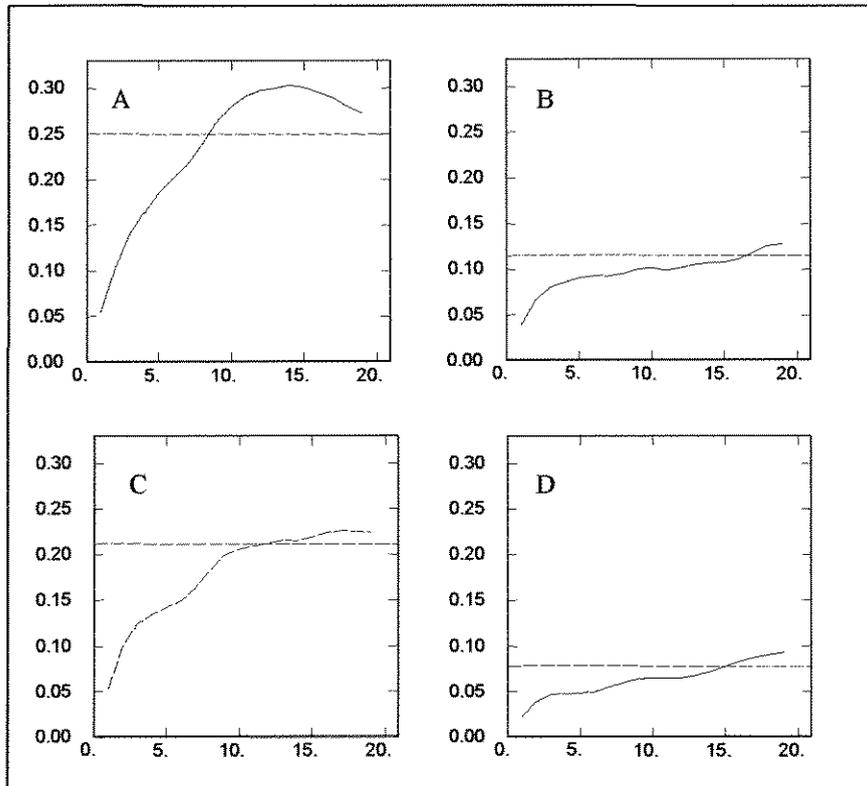


Figura 4.10 – Variogramas experimentais verticais das indicatrizes das proporções dos litotipos da Zona B: a) litotipo 1; b) litotipo 2; c) litotipo 3 e d) litotipo 4.

N40E/S50W (Figura 4.9c). Na vertical, também observam-se estruturas imbricadas, possivelmente relacionadas à amalgamação dos interlobos (Figura 4.10c).

Os variogramas do ltp4 são algo semelhantes aos do ltp3, nota-se, porém, acentuada discrepância em suas variâncias (Figura 4.9d). A deriva que ocorre no variograma vertical pode estar associada ao aumento da sedimentação de pelitos na porção superior da zona (Figura 4.10d).

#### 4.3.2 - Variografia Cruzada das Indicatrizes

Outro tipo de relação espacial importante diz respeito ao arranjo mútuo entre os diferentes litotipos. Rivoirard (1992) propõe algumas ferramentas simples para descrever esses arranjos a partir de curvas de probabilidade condicional geradas pela relação entre o variograma cruzado de duas indicatrizes e seus variogramas diretos.

Recentemente, este tipo de análise estrutural dos dados foi utilizada por Paraizo (1993) e Matto (1994), como forma de auxiliar a fase de simulação estocástica.

A probabilidade condicional traduz a probabilidade de ocorrer um determinado evento dado que um outro evento já tenha ocorrido. Sob a forma matemática ela é descrita como

$$P(A | B) = P(A \cap B) / P(B), \text{ onde}$$

$P(A | B)$  = probabilidade da ocorrência de  $A$  tendo ocorrido  $B$ ;

$P(A \cap B)$  = probabilidade da ocorrência conjunta de  $A$  e  $B$ ;

$P(B)$  = probabilidade da ocorrência de  $B$ .

Quando se divide o variograma cruzado pelo variograma direto, obtém-se a probabilidade condicional da ocorrência de um litotipo dado que outro tenha ocorrido. Isso se dá porque o variograma cruzado entre os litotipos  $A$  e  $B$  pode representar a probabilidade de num dos pontos ocorrer o litotipo  $A$  e no outro ponto, a uma distância  $h$  do ponto anterior, ocorrer o litotipo  $B$ . Já o variograma direto de um litotipo representa a probabilidade de num dos pontos ocorrer este litotipo e o noutro ponto, situado a uma distância  $h$ , não ocorrer o mesmo litotipo.

$$\text{Assim tem-se que: } \frac{\gamma_{ab}(h)}{\gamma_a(h)} = \frac{P(Z(x) = a, Z(x+h) = b)}{P(Z(x) = a, Z(x+h) \neq a)} = \frac{P(a \cap b)}{P(a)} = P(b | a)$$

Como será observado mais adiante, na análise dos resultados, a troca do variograma direto de um dos litotipos do denominador gera probabilidades condicionais diferentes.

Paraizo (1993) assevera que a interpretação das curvas de probabilidade condicional permite obter informações importantes sobre o conjunto de dados, tais como: 1) visualização

do arranjo interno dos litotipos, isto é, o estabelecimento de uma hierarquia de transições no tempo e espaço; 2) a elaboração de um modelo numérico para as transições dos litotipos, dois a dois e para cada h, analisando as ocorrências de proximidade ou distanciamento espacial e sua amplitude; 3) a comparação entre o modelo numérico e o modelo geológico conceitual, de forma a dar robustez ao arranjo geométrico proposto pelo intérprete; 4) a utilização das relações obtidas como instrumento de escolha das imagens estocásticas geradas pelas simulações geoestatísticas; 5) a escolha do algoritmo de simulação estocástica mais apropriado para as relações espaciais observadas.

A interpretação dos resultados obtidos pela análise das curvas de probabilidade condicional sobre as variáveis indicatrizes dos litotipos na área estudada, segundo as probabilidades de transição de um litotipo para os demais, é a seguinte: (Figuras 4.11 e 4.12)

(a) Transição do litotipo 1 para os litotipos 2, 3 e 4: o ltp1 mostra alta probabilidade de transição para o ltp2 para pequenas distâncias, até 3 m, na direção vertical e, inferiores a 250 m, na direção transversal ao eixo geral de deposição dos sedimentos da área (N70E/S70W). Também é notável a relação de proximidade entre o ltp1 e o ltp4, a distâncias de até 250 m, na direção paralela ao eixo deposicional (N20W/N20E). A transição do ltp1 para o ltp3, de modo geral, ocorre com maiores probabilidades para maiores distâncias. Para as demais relações entre o ltp1 e os demais litotipos, verificam-se baixas probabilidades de transição. Essas relações de proximidade e afastamento corroboram a interpretação dada pelo modelo deposicional adotado, uma vez é esperada estreita ligação entre o ltp1 (característico dos lobos deltaicos) e o ltp2 (margem dos lobos), para curtas distâncias, e entre o ltp1 e o ltp3 (interlobos), para maiores distâncias. A influência da sedimentação lacustre sobre o delta fica evidente na relação de proximidade observada entre o ltp1 e o ltp3 na direção paralela à deposição;

(b) Transição do litotipo 2 para os litotipos 1, 3 e 4: verificam-se as relações de proximidade entre o ltp2 e os litotipos 1 e 3 e de distanciamento total entre o ltp2 e ltp4. Para pequenas distâncias, na vertical e paralelamente à deposição, são maiores as probabilidades da passagem do ltp2 para o ltp3, já, na direção transversal à deposição, a probabilidade do ltp2 passar para ltp1 é maior. Para maiores distâncias, acima de 5 m na vertical e a partir de 250 m, na horizontal, há a inversão destas relações de proximidade e afastamento;

(c) Transição do litotipo 3 para os litotipos 1, 2 e 4: o ltp3 apresenta altas probabilidades de transição para o ltp4 em todas as direções. Secundariamente, mostra relação de proximidade com o ltp2. Observa-se, também a relação de distanciamento do ltp3 com o

ltp1, para pequenas distâncias. Estas relações ratificam a seqüência normal de deposição, que prevê o recobrimento dos sedimentos de interlobos por sedimentos lacustres.

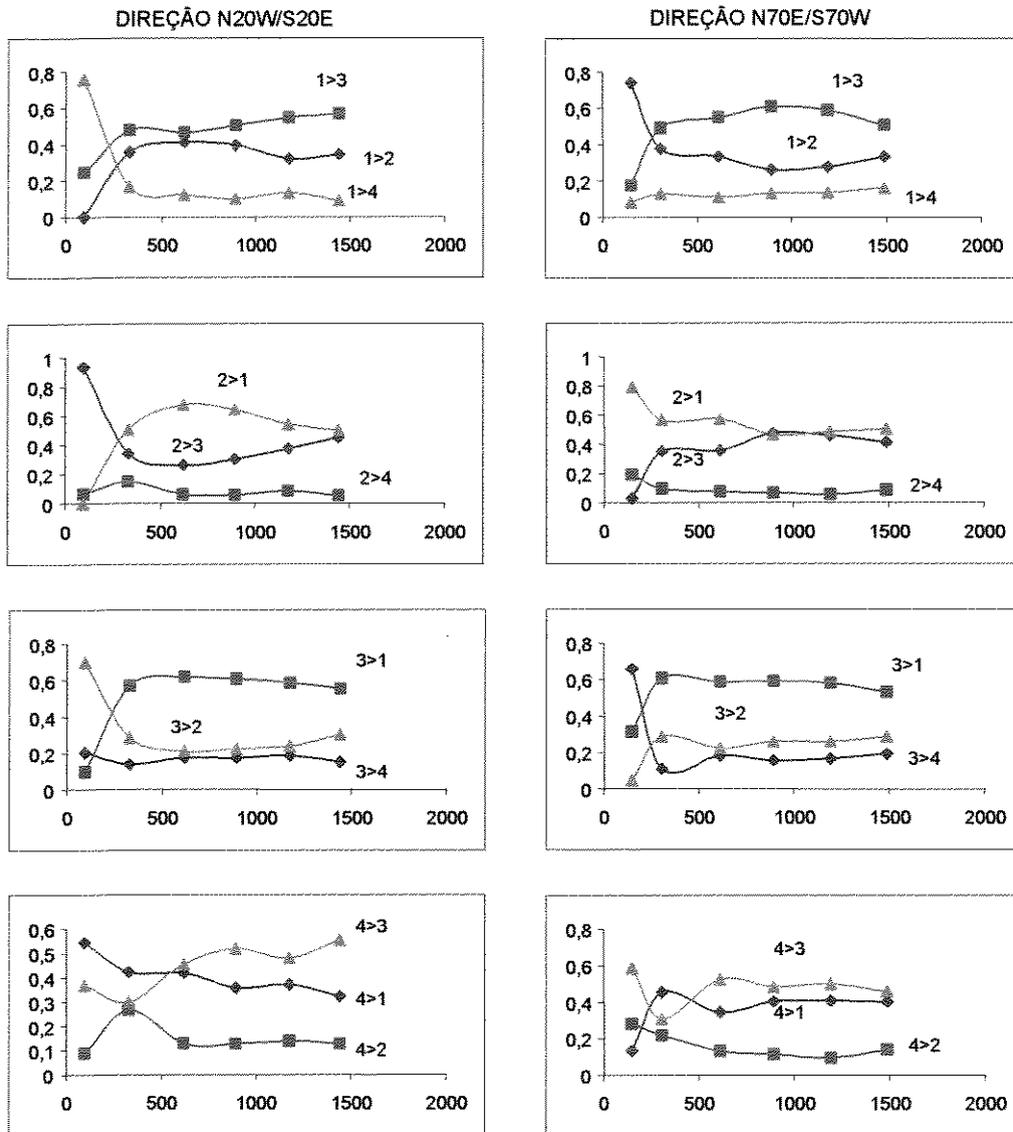


Figura 4.11- Curvas de probabilidade condicional horizontal. A notação 1>2 indica: transição do litotipo 1 para o litotipo 2.

(d) Transição do litotipo 4 para os litotipos 1, 2 e 3: verifica-se aqui também a relação de proximidade entre o ltp4 e o ltp3, para todas as direções. Secundariamente, para grandes espessuras, há proximidade entre o ltp4 e ltp1. Também é confirmado o distanciamento entre os litotipos 2 e 4.

#### DIREÇÃO VERTICAL

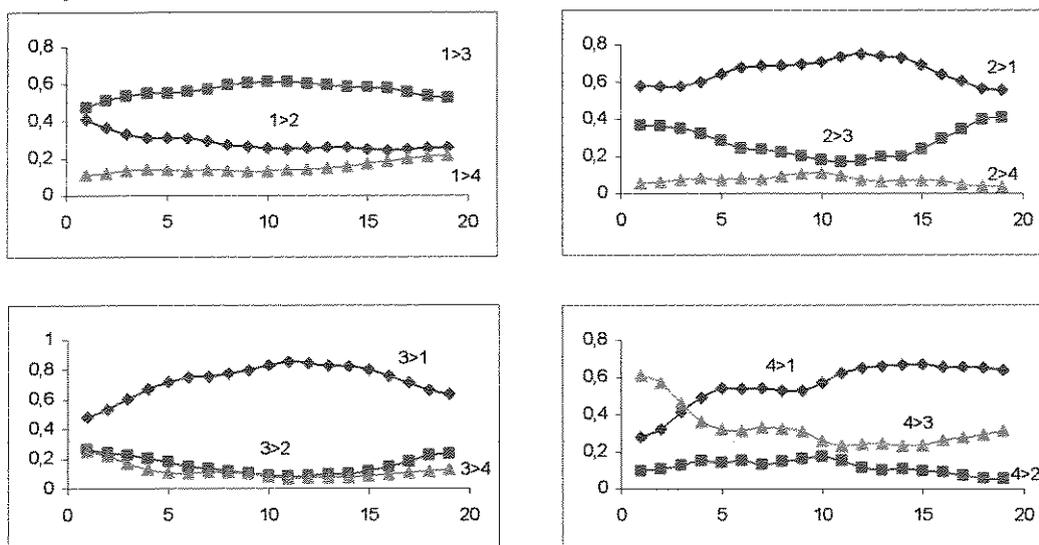


Figura 4.12 – Curvas de probabilidade condicional vertical. A notação 1>2 indica: transição do litotipo 1 para o litotipo 2.

#### 4.3.3 - Krigagem das Indicatrizes

O termo krigagem engloba um conjunto de técnicas de estimativas, baseadas em processos estocásticos, que visam obter, em cada nó de um *grid*, o valor da variável de interesse que melhor se ajuste ao modelo de variograma utilizado. Para tanto, cada nó é calculado através de uma média ponderada dos pontos adjacentes, considerando a distância entre estes pontos e o nó a ser estimado, a relação de proximidade destes pontos e a relação espacial fornecida pelo variograma. São métodos que se caracterizam pela linearidade e não tendenciosidade, em que os valores estimados representam combinações lineares ponderadas, obtidas a partir da solução de um sistema de equações cujo objetivo é obter média zero e variância mínima para o erro de estimativa, eliminando erros sistemáticos de super e subestimativa, (Castro, 1996; Cortez, 1996).

Dentre os diferentes tipos de krigagem, tem-se a krigagem da indicatriz, que estima a probabilidade de ocorrência de variáveis discretas, como por exemplo, os litotipos.

A krigagem da indicatriz de cada litotipo constou das seguintes etapas: modelagem dos variogramas experimentais dos litotipos, escolha do *grid* e definição de parâmetros.

Inicialmente, foi efetuado o ajuste dos variogramas experimentais das indicatrizes dos litotipos, utilizando-se o modelo exponencial. Em seguida, foram escolhidos os *grids* para a krigagem das indicatrizes dos litotipos, que obedecem a mesma orientação da área de estudo, isto é, apresentam dimensões de 2 x 3 km, com as respectivas direções N20W/S20E e

N70E/S20W. A direção vertical possui 31 m, que corresponde à maior espessura verificada nos poços entre os marcos M-P3 e M-V6. Cada célula apresenta as dimensões de 100 x 100 x 1 m, perfazendo um total de 18.600 células (Figura 4.13). A escolha de uma malha vertical regular deve-se às características deposicionais do intervalo estudado, que ocorreu numa época de baixa atividade tectônica e, assim, livre do desenvolvimento de subsidência de magnitude relevante.

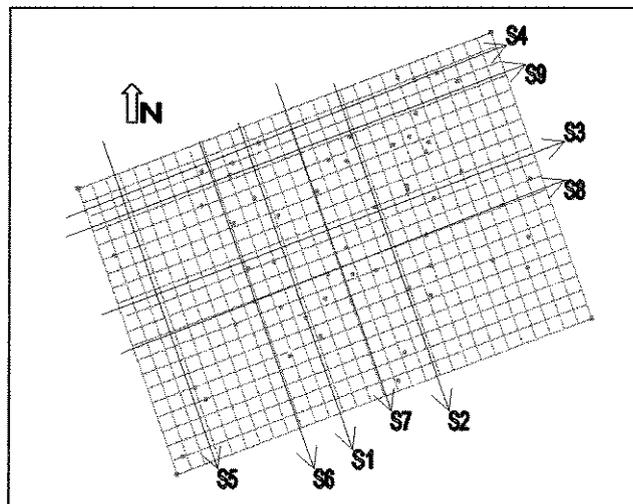


Figura 4.13 – Grid para a krigagem da indicatriz dos litotipos da Zona B.

Adotou-se vizinhança móvel, com os seguintes parâmetros: número mínimo de pontos exigidos = 2, número ideal = 8 e número de setores = 4. As distâncias e ângulos dos raios de busca variaram conforme cada litotipo.

Efetuada a krigagem de cada indicatriz do litotipo foi necessária uma normalização de todas as 4 krigagens de modo que, em cada célula do *grid*, a soma das probabilidades de ocorrência dos 4 litotipos fosse de 100%.

Foram, então, obtidas seções verticais, horizontais e blocos de cada krigagem para uma melhor análise das relações espaciais entre os litotipos.

As relações mais notáveis são aquelas observadas entre o litotipo 1 e os litotipos 2 e 3. Em virtude da escassa ocorrência do litotipo 4 nesta zona (8,5% do total), não foi possível, através da krigagem, verificar com maior detalhe sua associação com os demais litotipos (Figura 4.14).

A inter-relação entre o ltp1 e o ltp2 mostra que este último tende a ocorrer sempre próximo ao ltp1, tanto em seção horizontal (Figura 4.15) como em seções verticais (Figuras 4.16 e 4.17)

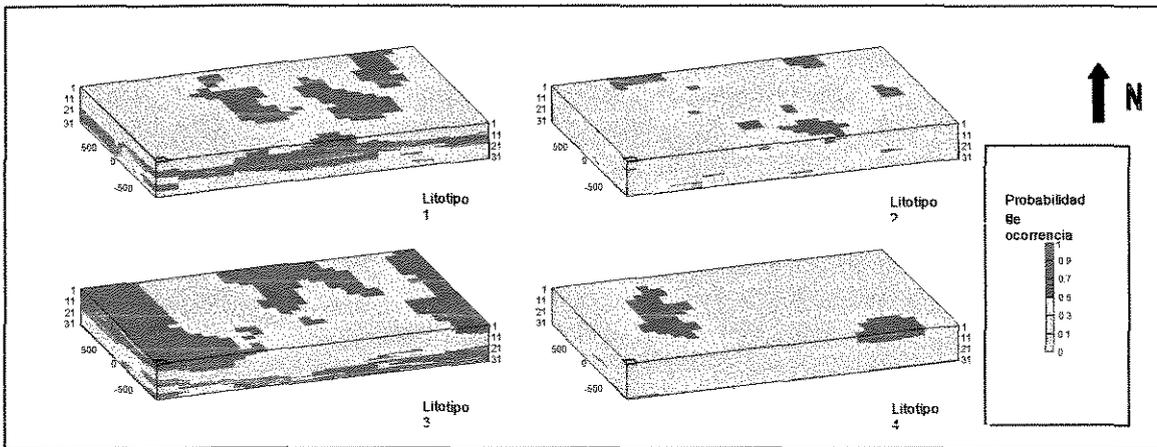


Figura 4.14 - Bloco-diagrama das krigagens das indicatrizes dos litotipos.

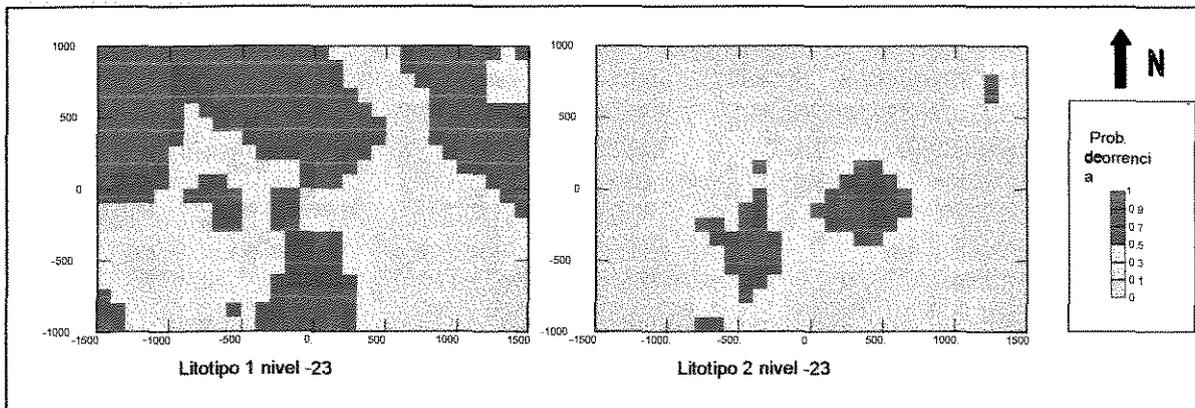


Figura 4.15 – Seções horizontais da krigagem das indicatrizes dos litotipo1 e 2, do nível -23 m.

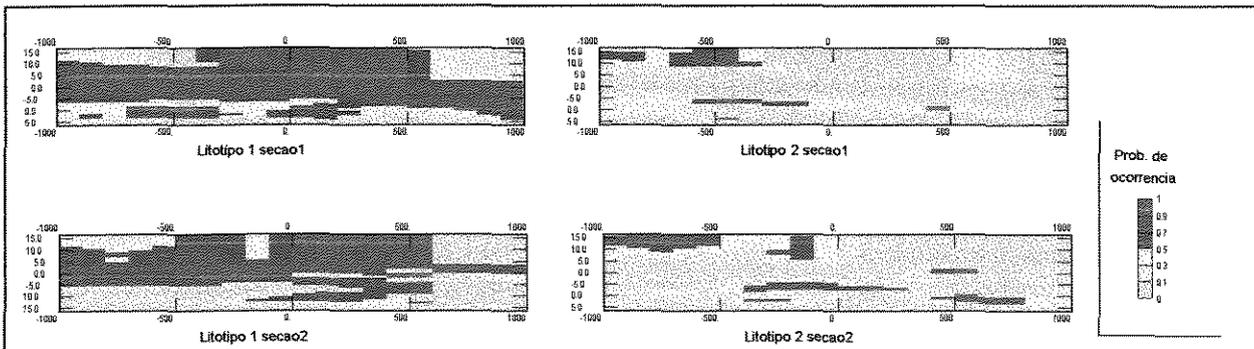


Figura 4.16- Seções verticais, paralelas ao eixo de deposição NW/SE (da esquerda para a direita), da krigagem das indicatrizes dos litotipos 1 e 2. Vide Figura 4.13 para melhor localização.

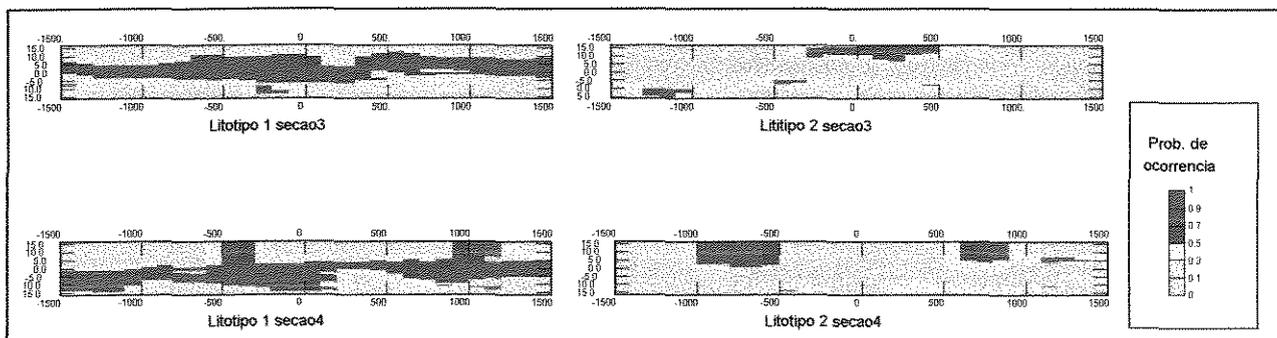


Figura 4.17- Seções verticais, transversais ao eixo de deposição SW/NE (da esquerda para a direita), da krigagem das indicatrizes dos litotipos 1 e 2. Vide Figura 4.13 para melhor localização.

As imagens geradas pela krigagem revelam a existência de forte relação de proximidade entre o ltp1 e ltp3, constatando com a interpretação das curvas de probabilidade condicional. As seções horizontais e verticais (Figuras 4.18 a 4.21) mostram que esta relação ocorre ao longo de toda a área. Verifica-se, em planta, (Figuras 4.18 e 4.19), a geometria lobada do ltp1 e lateralmente, como que preenchendo as porções mais baixas, o ltp3. Nas seções verticais, paralelas à deposição, observar-se o caráter retrogradante, de SE para NW, das areias do ltp1 (Figura 4.20). Por sua vez, as seções verticais, transversais à deposição, mostram a intercalação na sedimentação dos lobos (ltp1) e de interlobos (ltp3) (Figura 4.21).

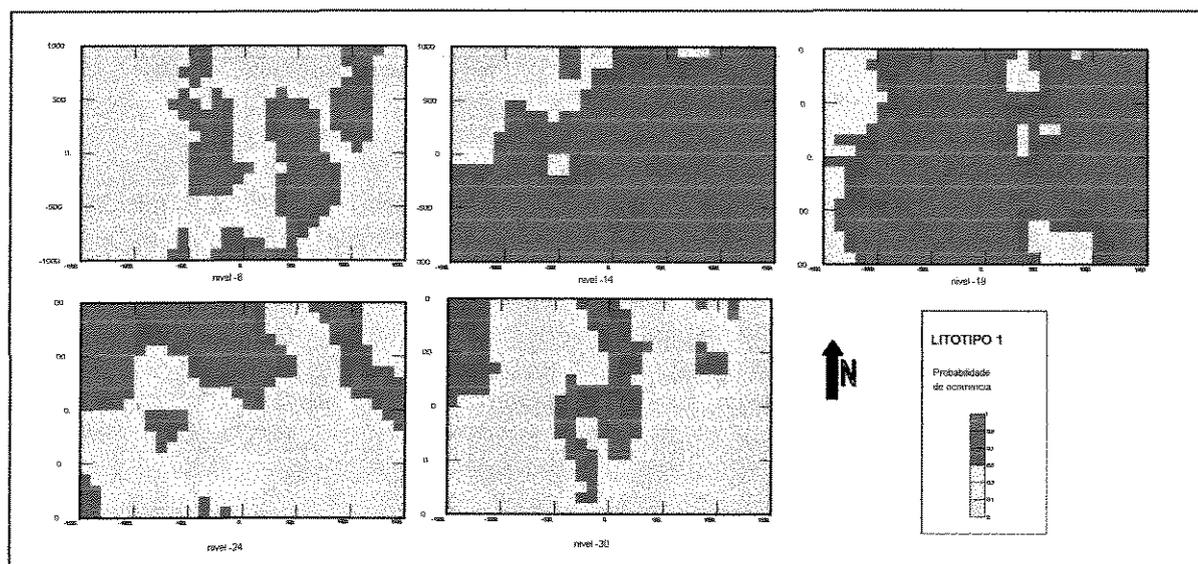


Figura 4.18 – Seções horizontais da krigagem da indicatriz do litotipo1, dos níveis -8, -14, -18, -24 e -30m.

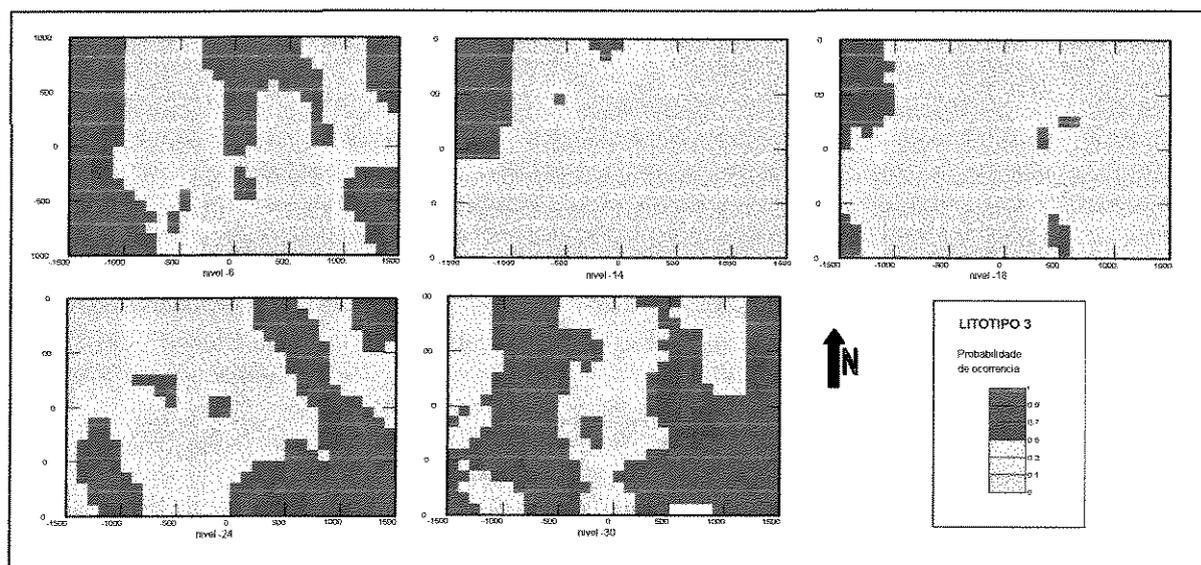


Figura 4.19 – Seções horizontais da krigagem da indicatriz do litotipo3, dos níveis -8, -14, -18, -24 e -30m.

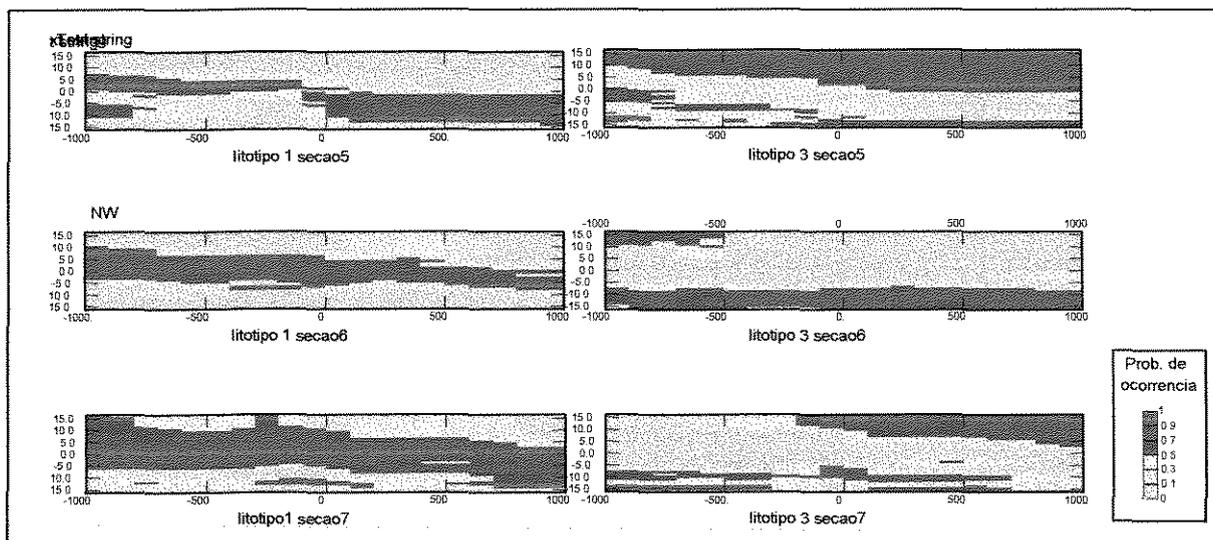


Figura 4.20- Seções verticais, paralelas ao eixo de deposição NW/SE (da esquerda para a direita), da krigagem das indicatrizes dos litotipos 1 e 3. Vide Figura 4.13 para melhor localização.

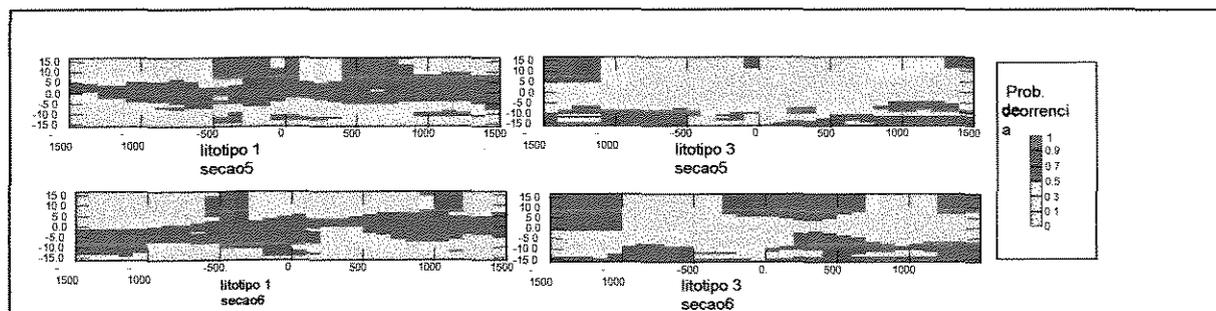


Figura 4.21- Seções verticais, transversais ao eixo de deposição SW/NE (da esquerda para a direita), da krigagem das indicatrizes dos litotipos 1 e 3. Vide Figura 4.13 para melhor localização.

As interpretações dos resultados da análise variográfica, das curvas de probabilidade condicional e da krigagem indicam que existe um seqüenciamento nítido entre os litotipos da Zona B. Estas inter-relações estão presentes em todas as direções examinadas. De modo geral, as análises mostraram que o litotipo 1 passa lateral e verticalmente para o litotipo 2, que por sua vez, grada para o litotipo 3, que é recoberto pelo litotipo 4. A baixa percentagem do ltp2, entretanto, favorece maior proximidade do ltp1 ao ltp3. Todas estas relações espaciais são corroboradas pelo modelo geológico conceitual da área.

#### 4.4 – DISTRIBUIÇÃO DOS LITOTIPOS NAS ZONAS C E A

A análise das relações espaciais dos litotipos das zonas C e A foi realizada através da análise variográfica de suas proporções.

A Zona C apresenta variogramas horizontais com as direções de maior e menor continuidade semelhantes às da Zona B, indicando que, após iniciada, a sedimentação deltaica manteve o mesmo *trend* deposicional (Figura 4.22). Os variogramas verticais de todos os

litotipos mostram padrões de deriva, provavelmente relacionados ao incremento do aporte de sedimentos cada vez mais grossos (litotipos 1 e 2) e há conseqüente diminuição da sedimentação mais fina (litotipos 3 e 4).

Na Zona A, os variogramas horizontais de todos os litotipos apresentam direções de anisotropia semelhantes às da Zona B, indicando a persistência da direção de sedimentação durante a fase de transgressão do lago sobre o delta (Figura 4.23). Os variogramas verticais dos litotipos mais arenosos mostram a existência de deriva, possivelmente devido à gradativa redução do aporte daqueles sedimentos. Os variogramas verticais dos litotipos 3 e 4 apresentam padrões de ciclicidade semelhantes, em torno de 8 m. Esta ciclicidade já fora observada na curva de proporção vertical e reflete a dinâmica nas sedimentações lacustres e deltaicas.

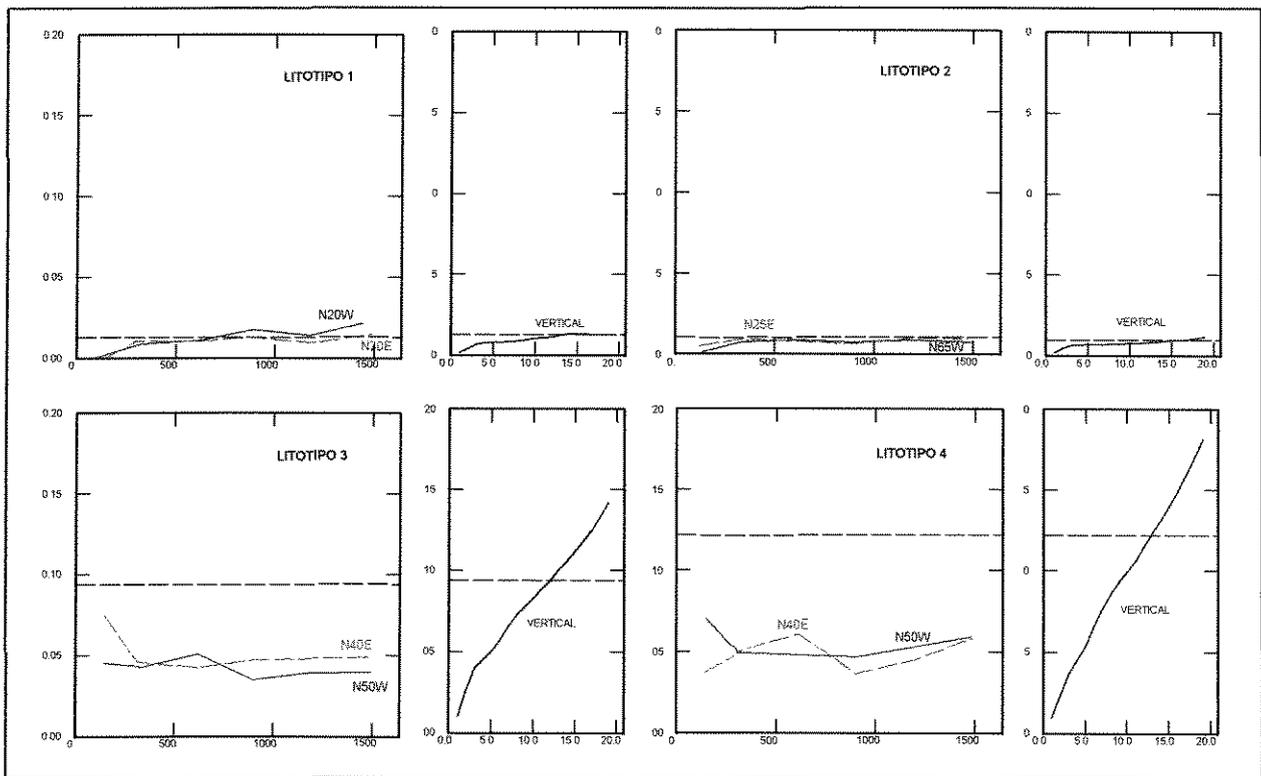


Figura 4.22 – Variogramas experimentais das proporções dos litotipos da Zona C.

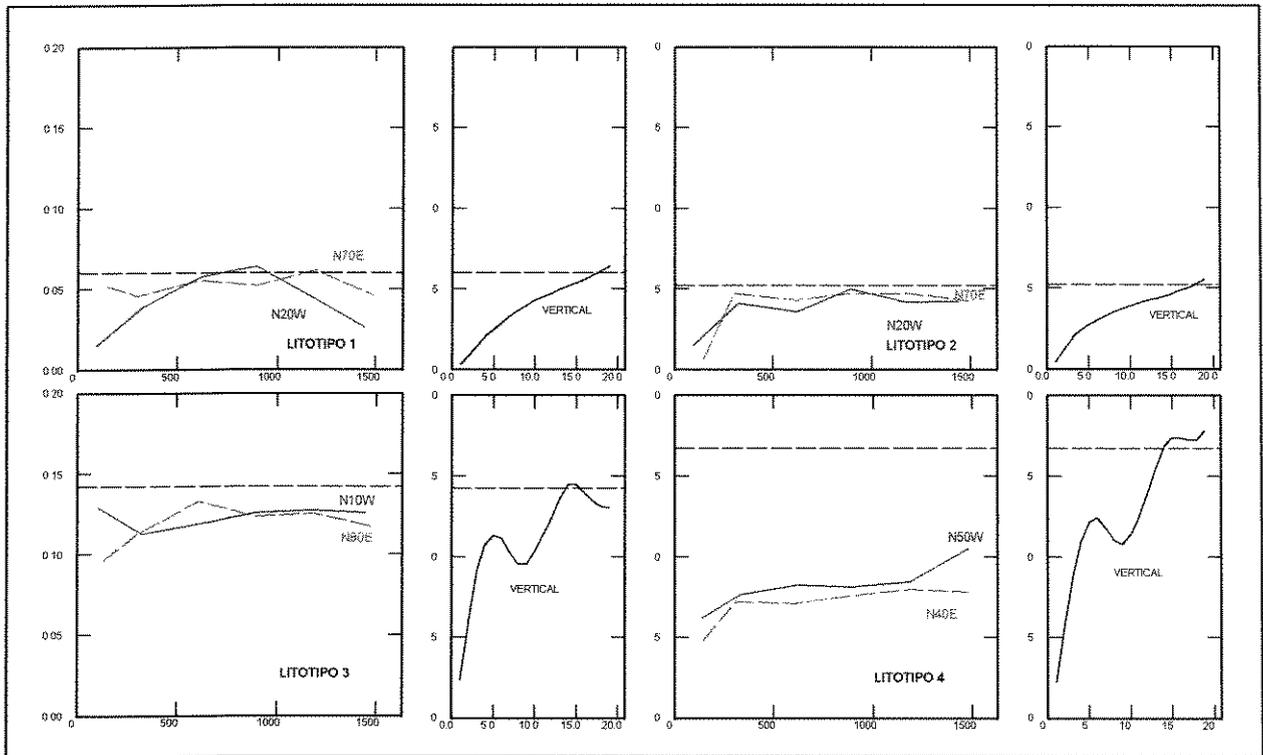


Figura 4.23 – Variogramas experimentais das proporções dos litotipos da Zona A.

## CAPÍTULO 5 – CONSTRUÇÃO DAS MATRIZES DE PROPORÇÃO

### 5.1 - INTRODUÇÃO

Este capítulo irá abordar a construção das matrizes de proporção dos litotipos, etapa primordial para o tipo de modelagem a que se propõe esta dissertação. Contudo, deve-se ter em mente que a construção destas matrizes é extremamente dependente das etapas anteriormente descritas (modelo geológico conceitual, correlação rocha-perfil e análise espacial dos dados).

Poucas referências sobre as matrizes de proporção são encontradas na literatura. Dentre estas citam-se o manual do *software* HERESIM 3D 4.0 (Beicip-Franlab - *Petroleum Consultants*, 1997) e os trabalhos de Souza Jr. (1997), de Johann (1997).

Uma matriz de proporção (MP) representa um conjunto de curvas de proporção verticais padrão, onde cada uma delas está relacionada a uma célula de um *grid* 2D.

Como será descrito no próximo capítulo, na modelagem do reservatório empregou-se a simulação estocástica gaussiana truncada. Desta forma, o *grid* da matriz de proporção foi utilizado sobre o *grid* de simulação, com células de menores dimensões, de modo a recobri-lo por completo (Figura 5.1). Durante a simulação de uma célula do *grid* de simulação, os *cut offs* gaussianos foram calculados a partir da curva de proporção (cpV) que estava relacionada à célula da matriz de proporção que recobria a célula do *grid* de simulação.

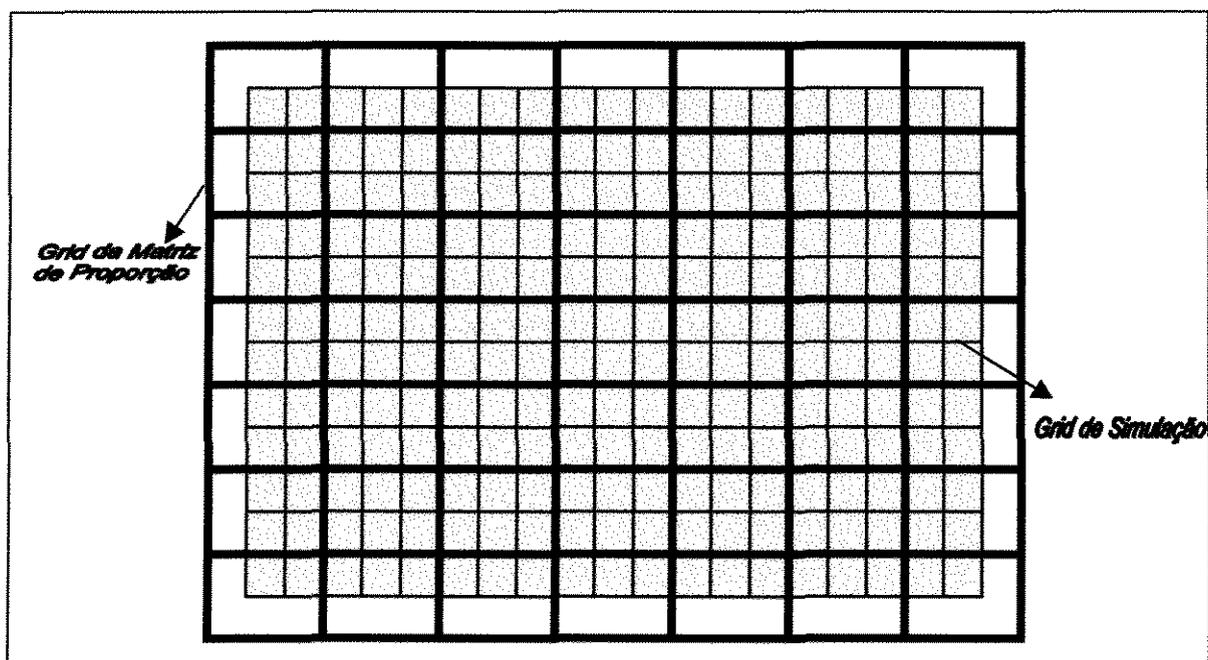


Figura 5.1 - Recobrimento do *grid* de simulação (em cor cinza) pelo *grid* da matriz de proporção (mais espaçado).

## 5.2 - MÉTODOS DE CONSTRUÇÃO DAS MATRIZES DE PROPORÇÃO

A matriz de proporção pode ser construída seguindo-se quatro métodos diferentes:

- associando uma cpV a uma determinada área da região estudada;
- efetuando a krigagem das proporções a partir das cpVs dos poços;
- utilizando o mesmo procedimento anterior, porém levando em conta condicionadores adicionais;
- combinando-se os métodos anteriores.

### 5.2.1 - Método das Áreas

Este método constitui a forma mais simples de preenchimento de uma MP. Consiste na divisão da matriz de proporção em áreas, e na associação de uma determinada cpV a cada uma destas áreas.

As áreas podem ser delimitadas a partir de mapas geológicos, como, por exemplo, mapas de isópacas, de isólitas ou de fácies sísmicas, que propiciam a distinção das regiões onde predominam rochas reservatório daquelas onde há predominância de rochas não-reservatório. Uma vez que a definição destas áreas depende de ferramentas geológicas, pode-se dizer que o conhecimento geológico da região estudada assume papel fundamental na construção deste tipo de matriz de proporção

Este método permite a definição de transições abruptas entre diferentes ambientes deposicionais existentes na região estudada, sendo, portanto, muito eficiente para intervalos estratigráficos onde o reservatório é composto de vários corpos sedimentares bem definidos (Beicip-Franlab - *Petroleum Consultants*, 1997).

### 5.2.2 - Método da Krigagem das Proporções de Fácies dos Poços

O método é caracterizado pela interpolação das proporções dos litotipos dos poços. No centro de cada célula 3D do *grid* da MP, a proporção de cada fácies é interpolada, nível a nível, através da krigagem ordinária, com vizinhança única, dos litotipos disponíveis. Assim, a proporção de um litotipo  $k$  pode ser estimada, dentro de um suporte  $X_o$ , centrado no ponto  $x_o$ , pela seguinte expressão:

$$P_{k,z}^{KO}(X_o) = \sum_{\alpha=1}^{NW} \lambda_{k,z}^{\alpha} P_{k,z}(X_{\alpha}),$$

onde os ponderadores  $\lambda_{k,z}$  são determinados pelo sistema de krigagem:



### 5.2.3 – Método da Krigagem das Proporções das Fácies com um Condicionador

Este método é semelhante ao anterior, porém é enriquecido por condicionadores externos, que de alguma forma mostram aspectos importantes da região estudada, como por exemplo, *trends* gerais da deposição dos sedimentos.

Os condicionadores podem ser obtidos de maneiras diversas, tais como mapas de distribuição dos litotipos, mapas de razão reservatório/não-reservatório e mapas advindos da interpretação sísmica. A integração de dados sísmicos aos dados de poços para se estimar as proporções de litotipos foi descrita por Mouliere et al. (1996), que propuseram alguns métodos para tornar possível levar em conta diferentes informações sísmicas.

Supondo que uma variável condicionadora  $s_k(x)$  represente a proporção acumulada de uma fácies  $k$  dentro do intervalo estratigráfico estudado. Ao se efetuar a krigagem ordinária, pode ser imposta a condição de que a soma das proporções  $p_k$  da fácies  $k$ , sobre todos os níveis  $z$ , seja igual a  $s_k(x)$ . Desta forma, os ponderadores  $\lambda_{k,z}$  do sistema de krigagem serão determinados pela resolução das equações do seguinte sistema:

$$\begin{cases} \sum_{\beta=1}^{NW} \lambda_{k,z}^{\beta} \gamma_{k,z}(x_{\alpha} - x_{\beta}) + \mu_{k,z} + \eta_k P_{k,z}(X_{\alpha}) = \gamma_{k,z}(x_o - x_{\alpha}) \\ \sum_{\alpha=1}^{NW} \lambda_{k,z}^{\alpha} = 1, \forall z \\ \sum_{z=1}^Z \sum_{\alpha=1}^{NW} \lambda_{k,z}^{\alpha} P_{k,z}(X_{\alpha}) = s_k(x_o) \end{cases}$$

onde:  $\gamma_{k,z}$  é o variograma horizontal das proporções da fácies  $k$ , calculado no nível  $z$ ;  $P_{k,z}(X_{\alpha})$  é a proporção do litotipo  $k$  no nível  $z$ , definido num suporte  $X_{\alpha}$  centrado sobre  $x_{\alpha}$ ;  $\lambda_{k,z}^{\alpha}$  são os ponderadores da krigagem;  $\mu_{k,z}$  e  $\eta_k$  são os parâmetros de Lagrange;  $NW$  é o número de poços e  $Z$  é o número de níveis que constituem o intervalo de estudo.

### 5.2.4 - Combinação dos Métodos Anteriores

O quarto método combina todos os anteriores. Assim, por exemplo, para cada uma das áreas da região estudada, podem ser associadas não apenas uma, mas várias cpVs, para em seguida, ser efetuada a krigagem das proporções das curvas que compreendem cada área, resultando no preenchimento da mesma.

### 5.3 - MÉTODOS UTILIZADOS NA ÁREA DE ESTUDO

A construção das matrizes de proporção foi efetuada através do *software* HERESIM 3D 4.0. Utilizou-se também o pacote geostatístico ISATIS v3.1.2 para o estabelecimento dos modelos teóricos dos variogramas das proporções dos litotipos, que foram usados na krigagem das proporções dos poços, e para a geração do condicionador, este último empregado no terceiro método de construção da MP.

Uma vez que a área de estudo foi modelada através de duas abordagens distintas, empregaram-se os métodos acima descritos de diferentes maneiras (Figura 5.3). Para a primeira abordagem, considerando somente a Zona B, foram construídas matrizes de proporção utilizando os três primeiros métodos. Posteriormente, cada uma destas três matrizes foi empregada na simulação da repartição espacial dos litotipos e, por fim, comparados os resultados.

Abordagem	Zona	Método de construção da MP	Modelagem
I	B	Areas	Simulação.
		Krigagem das proporções dos litotipos	Simulação
		Krigagem das prop. + condicionador	Simulação
II	Intervalo Total	Krigagem das proporções dos litotipos	Simulação
	A	Krigagem das proporções dos litotipos	Simulação de cada zona e soma das Simulações
	B	Krigagem das proporções dos litotipos	
	C	Krigagem das proporções dos litotipos	
	Intervalo Total	Curva de proporção vertical global	Simulação

Figura 5.3 – Métodos de construção de matrizes das proporções dos litotipos utilizados segundo duas abordagens de modelagem da repartição espacial dos litotipos.

Na segunda abordagem, considerando o intervalo total (zonas A, B e C), foi utilizado o método da krigagem das proporções dos poços para a construção de quatro MPs, incluindo a MP do intervalo estratigráfico total. Estas matrizes, como será descrito no próximo capítulo, foram empregadas em duas modelagens. Na primeira modelagem, foi feita uma simulação que se baseou na MP construída para o intervalo total. A segunda modelagem constou da soma de três simulações, cada uma delas referente a cada zona (A, B e C). Com isto, pode-se reconstituir o intervalo total.

Ainda na segunda abordagem, foi elaborada uma terceira modelagem, na qual não foi utilizada qualquer matriz de proporção e sim a curva de proporção vertical global de todos os

55 poços, isto é, nesta modelagem, foi assumida a hipótese de estacionariedade horizontal dos litotipos de todo o intervalo estratigráfico estudado.

As duas abordagens tiveram objetivos distintos:

- para a Zona B, procurou-se verificar o impacto do uso de três tipos de MPs, construídas segundo diferentes formas de utilizar as informações disponíveis, na distribuição tridimensional dos litotipos;
- para o intervalo total, procurou-se mostrar, principalmente, a importância do uso da MP em intervalos estratigráficos que apresentam nítida variação lateral nos seus componentes litológicos.

#### 5.4 - ESTABELECIMENTO DO *GRID* DA MATRIZ DE PROPORÇÃO

O primeiro passo para a construção de uma matriz de proporção de litotipos foi a escolha do *grid* no qual ela foi gerada. O *grid* escolhido para este estudo, e que serviu para todas as diversas MPs que foram construídas, apresenta as mesmas dimensões e orientações da área de estudo, isto é, 2 x 3 km de extensão, com o menor segmento paralelo à direção N20W/S20E. O *grid* é composto de células 3D de dimensões de 100m x 100m x 1m, e sua espessura total variou segundo a espessura da zona estudada. Este tamanho de célula do *grid* da matriz de proporção permitiu que uma cpV ficasse associada a quatro células do *grid* de simulação.

#### 5.5 - CONSTRUÇÃO DE MATRIZES DE PROPORÇÃO PARA A ZONA B

##### 5.5.1 – Matriz de Proporção pelo Método das Áreas

Através deste método pretendeu-se dividir a Zona B em dois tipos de áreas: a área de reservatório e área de não-reservatório. Como esta zona constitui caracteristicamente um intervalo com predominância de corpos arenosos, representados principalmente pelos litotipos 1 e 2, sua divisão naqueles dois tipos de áreas não foi uma tarefa óbvia. O meio empregado para se chegar a esta divisão constituiu na elaboração de um mapa de razão  $(ltp1+ltp2)/litotipo$  total para, a partir dele se definir um parâmetro de corte tal que pudesse dividir a zona naqueles dois tipos de áreas. Escolheu-se como *cut off* o valor de 0,65. Assim, a área com valores acima de 0,65 definiu-se como a área de reservatório, enquanto que aquela área com valores abaixo de 0,65 representou a área de não-reservatório (Figura 5.4). A área de reservatório mostra um padrão lobado, com eixo de maior continuidade na direção

N20W/S20E, e distribui-se no centro e a NE da área estudada. A área de não-reservatório distribui-se ao longo de toda a área estudada, sendo predominante nas porções W, SW e SE. Com base nesta configuração, foi possível subdividir tanto a área de reservatório como a de não-reservatório em duas regiões, resultando, assim, na divisão da área estudada em quatro áreas. A cada uma destas áreas foi associada uma curva de proporção vertical, formada pelas proporções dos litotipos dos poços existentes em cada área.

A matriz de proporção resultante reflete com clareza as quatro cpVs associadas (Figura 5.5). Observa-se a predominância dos litotipos mais pelíticos nas regiões W e SE e dos litotipos mais arenosos no centro e a NE da área. Esta compartimentação, entretanto, resulta em mudanças laterais abruptas das proporções dos litotipos, principalmente do ltp1 e do ltp3, e conseqüentemente na perda de suas continuidades. A despeito desta característica a matriz de proporção revela o caráter regressivo dos sedimentos arenosos para o topo do intervalo estratigráfico.

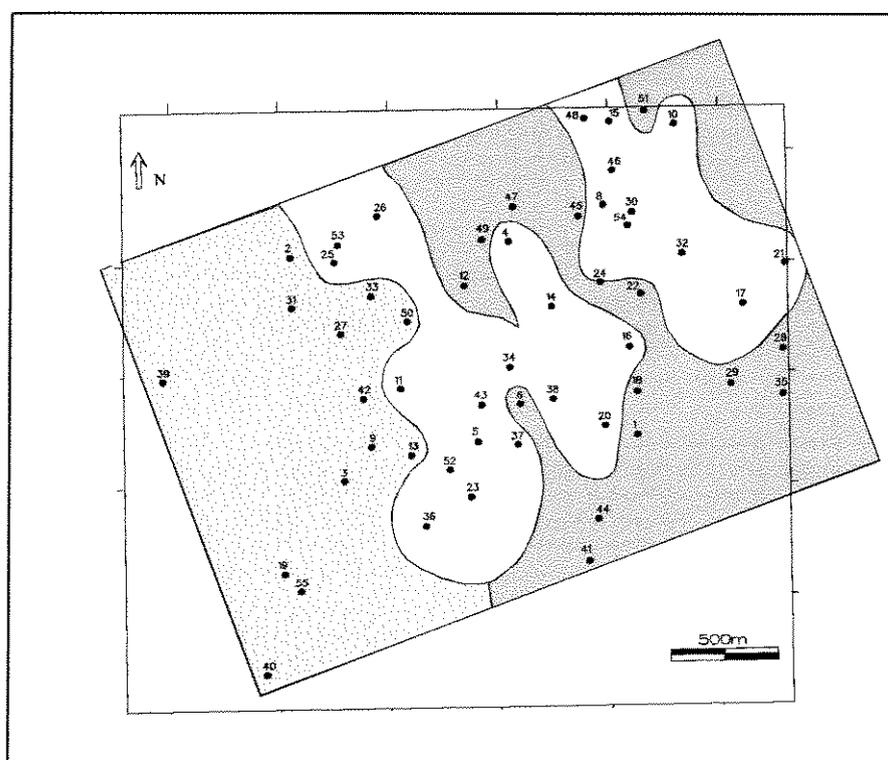


Figura 5.4 - Mapa com o *cut off* de 0,65 da razão  $(ltp1+ltp2)/ltp$  total. Este valor divide a região em dois tipos de áreas: área amarela, de reservatório, e área verde, de não-reservatório.

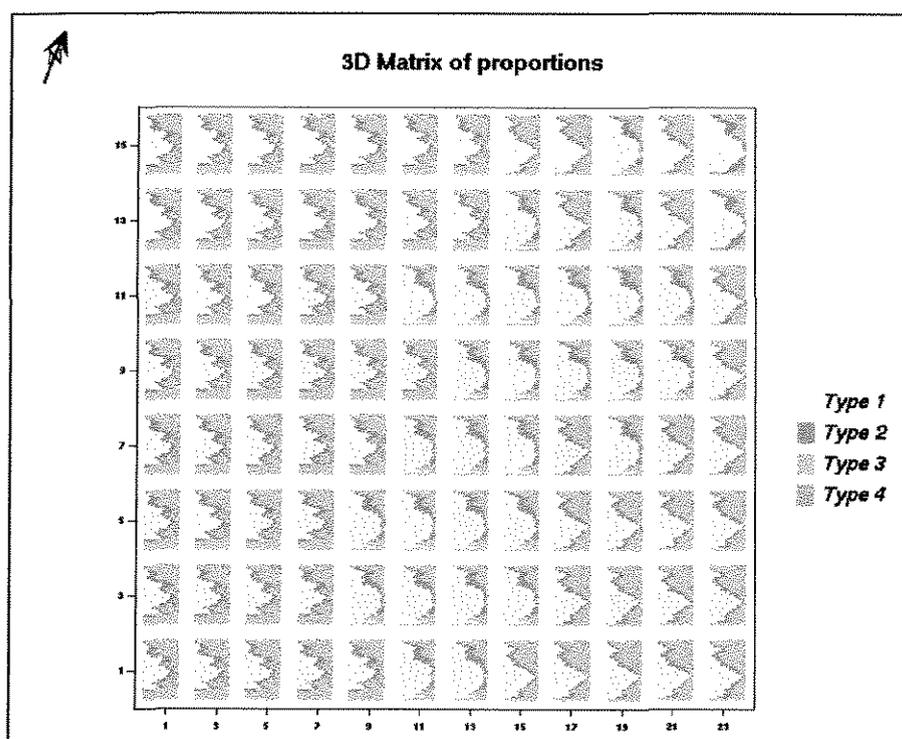


Figura 5.5 - Matriz de proporção da Zona B, obtida a partir da divisão do *grid* em áreas de predominância de rochas reservatório e de rochas não-reservatório.

#### 5.5.2 – Matriz de Proporção pelo Método da Krigagem das Proporções nos Poços

Neste método, a matriz de proporção foi construída através da krigagem das proporções dos litotipos que compõem as cpVs dos 55 poços da área. Para tanto, os variogramas experimentais das proporções de cada litotipo foram ajustados pelo modelo teórico exponencial (Figura 5.6), cujos parâmetros obtidos encontram-se na Tabela 5.1

A matriz de proporção resultante mostra a mesma tendência observada na MP construída pelo método das áreas no que tange à distribuição das proporções dos litotipos pelíticos (ltp3 e ltp4) e arenosos (ltp1 e ltp2) na área estudada. Nota-se, porém, claramente, que os litotipos mostram-se mais contínuos em consequência de suas gradativas mudanças laterais. Desta forma, foi possível rastrear os pacotes arenosos ao longo do intervalo estratigráfico estudado e conhecer seus padrões de distribuição, confirmando o que preconiza o modelo geológico (Figura 5.7).

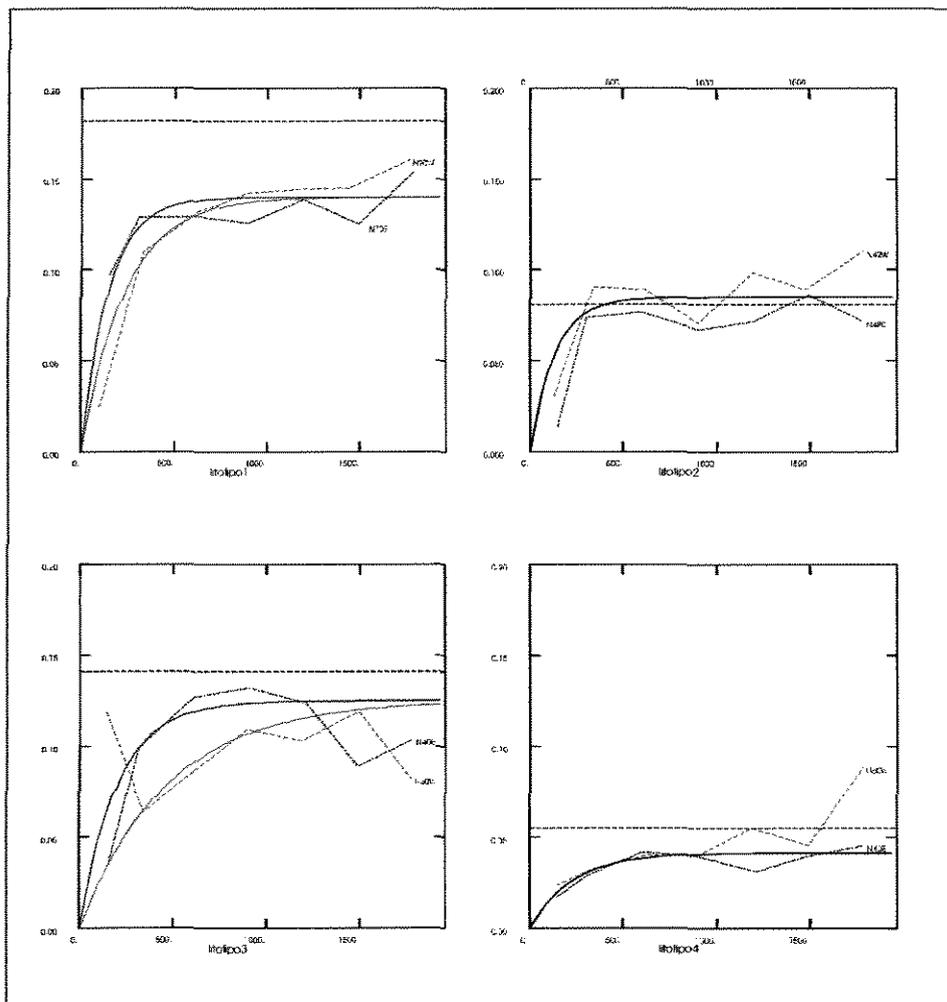


Figura 5.6 – Modelagem dos variogramas das proporções dos litotipos da Zona B.

Tabela 5.1 – Parâmetros da modelagem dos variogramas dos litotipos da Zona B.

Litotipo	Patamar	Direção de maior alcance	Alcance (metros)	Direção de menor alcance	Alcance (metros)
1	0,140	N20W	700	N70E	430
2	0,085	N42W	400	N48E	400
3	0,125	N50W	1400	N40E	600
4	0,041	N50W	700	N40E	700

### 5.5.3 - Matriz de Proporção pelo Uso de Condicionador Adicional

As informações contidas em uma variável contínua por toda a área em análise, como, por exemplo, um atributo sísmico, podem ser adicionadas ao sistema de krigagem de modo a reduzir a incerteza da estimação das proporções dos litotipos. Desta modo, a matriz de proporção resultante reproduzirá mais fielmente as heterogeneidades do reservatório.

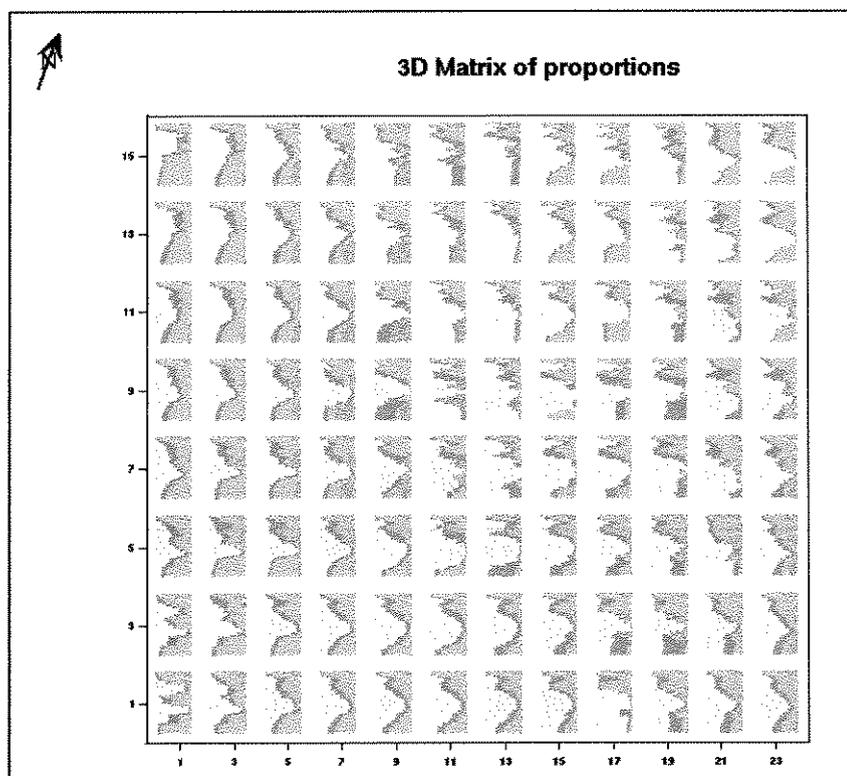


Figura 5.7 - Matriz de proporção da Zona B, obtida a partir da krigagem das proporções dos litotipos dos poços.

Como para a área objeto deste estudo não havia dados sísmicos disponíveis, decidiu-se simular sua existência. Para tanto, foi criado, como variável condicionadora, um mapa da distribuição das proporções médias do litotipo 1, a partir da suavização de mapa krigado (Figura 5.8).

O mapa das proporções do litotipo 1 mostra valores mais elevados no centro e nordeste da área, enquanto os baixos valores ocorrem principalmente na região sudoeste e na porção superior central.

Para a krigagem dos litotipos foram utilizados os mesmos modelos variográficos do método anterior.

A matriz de proporção resultante mostra-se semelhante à MP construída unicamente pela krigagem das proporções (Figura 5.9). Porém, podem ser observadas variações nas proporções do litotipo 1, condicionadas pela introdução da variável “sísmica”. Todas as matrizes aqui mostradas estão representadas por apenas 96 curvas de proporção de um universo de 600. O refinamento destas matrizes permite identificar com precisão as diferenças existentes (Figura 5.10).

Os resultados das três matrizes de proporção mostram como suas construções são fortemente dependentes, não só da quantidade dos dados disponíveis, como também da forma

como são tratados. Não se deve, entretanto, esquecer que a qualidade dos dados também influencia sobremaneira.

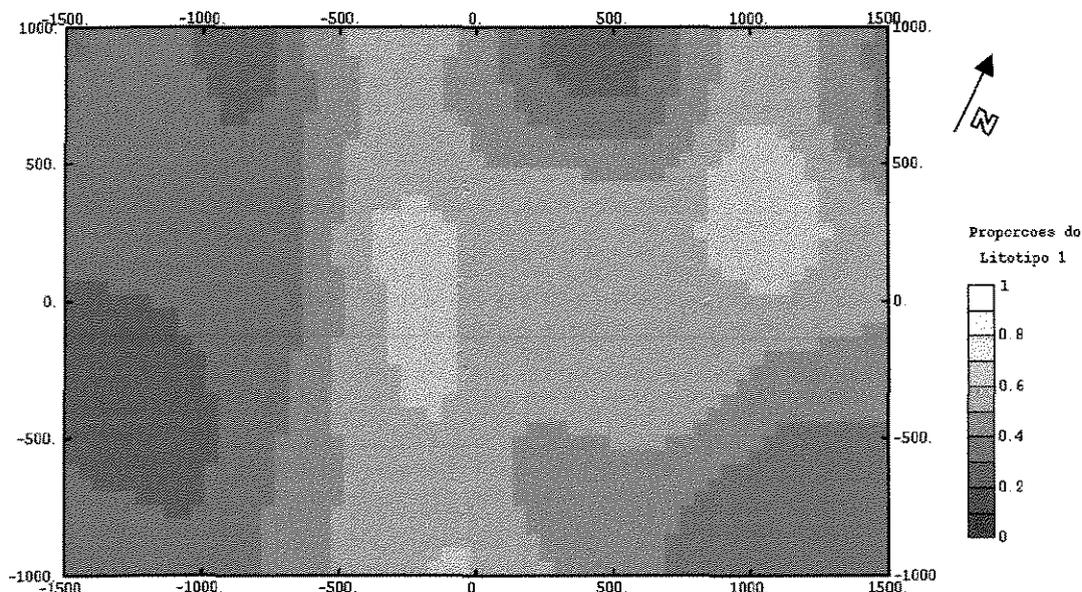


Figura 5.8 - Mapa da razão litotipo 1/litotipo total da Zona B obtido a partir da suavização dos mapas krigados das indicatrizes dos litotipos.

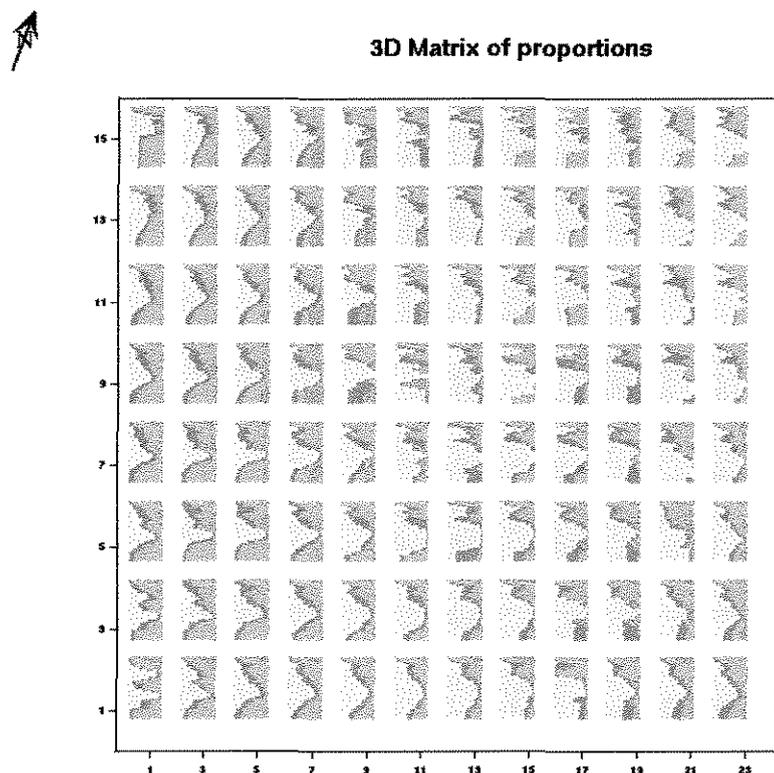


Figura 5.9 - Matriz de proporção da Zona B, obtida a partir das curvas de proporção definidas nos poços e do uso de um condicionador da ocorrência de rocha reservatório.

Observa-se no método por áreas que as mudanças laterais dos litotipos são abruptas, o que contraria o modelo geológico conceitual para a região. O método da krigagem das

proporções dos litotipos mostra que os litotipos mostram maior continuidade, semelhantemente ao método que usa um condicionador adicional. Apesar das diferenças constatadas na comparação entre os resultados dos três métodos de construção de matrizes de proporção, em todas elas foi possível compreender o arranjo espacial dos litotipos no tempo e no espaço, que, em outras palavras, reflete a distribuição das heterogeneidades ao longo da Zona B.

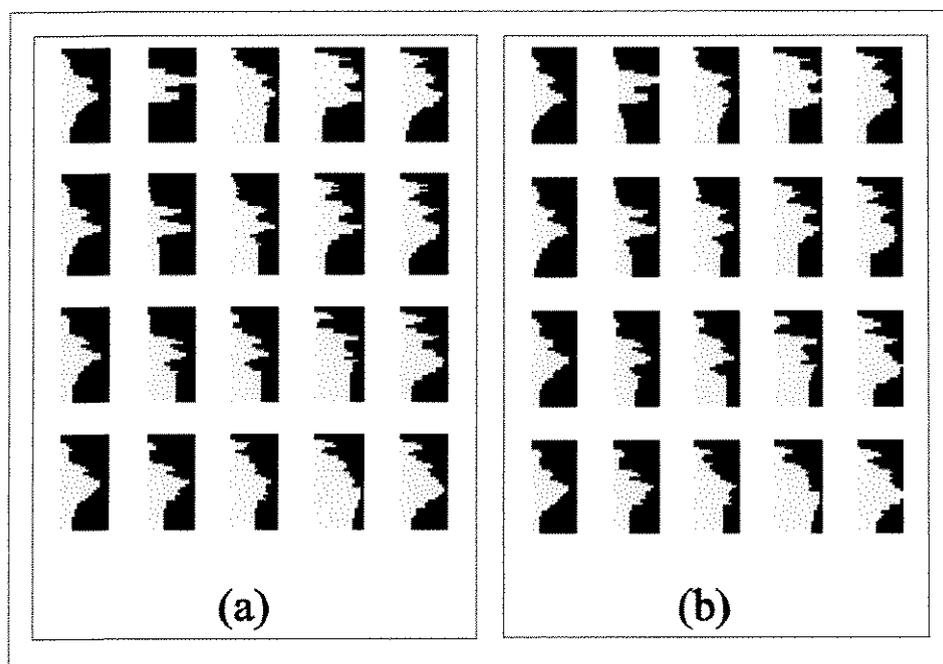


Figura 5.10 – Refinamento das matrizes de proporção construídas pelos métodos: (a) krigagem das proporções e (b) krigagem com condicionador. Nota-se que, para uma mesma coordenada, as cpVs obtidas pelos dois métodos mostram diferentes proporções do litotipo 1.

## 5.6 - CONSTRUÇÃO DE MATRIZES DE PROPORÇÃO PARA AS DEMAIS ZONAS

Conforme citado anteriormente, foram construídas três matrizes de proporção pelo método da krigagem das proporções dos litotipos: uma para a Zona A, uma para a Zona C e outra para o intervalo estratigráfico total. A MP da Zona B já foi construída na etapa anterior. Os variogramas experimentais foram calculados com base nas indicatrizes dos litotipos das respectivas zonas.

### 5.6.1 – Matriz de Proporção da Zona A

Foi utilizado o modelo exponencial para ajustar os variogramas experimentais das indicatrizes dos litotipos desta zona (Tabela 5.2 e Figura 5.11) e, em seguida, calculada a matriz de proporção dos litotipos (Figura 5.12).

A matriz de proporção mostra que o litotipo 1 distribui-se na porção basal do intervalo e concentra-se, predominantemente a NW. A continuidade deste litotipo é quebrada por sua variação lateral para os litotipos 2 e 3. Na porção superior do intervalo estratigráfico verifica-se a alternância dos litotipos 3 e 4. A distribuição dos quatros litotipos ilustra muito bem o caráter regressivo do delta, evidenciado pelo posicionamento mais basal e proximal dos litotipos mais arenosos e pela alternância dos litotipos mais pelíticos na porção superior do intervalo.

Tabela 5.2 - Parâmetros da modelagem dos variogramas dos litotipos da Zona A .

ZONA	Litotipo	Patamar	Direção de maior alcance	Alcance (metros)	Direção de menor alcance	Alcance (metros)
A	1	0,058	N20W	900	N70E	650
	2	0,046	N20W	600	N70E	400
	3	0,126	N10W	500	N80E	400
	4	0,008	N50W	450	N40E	450

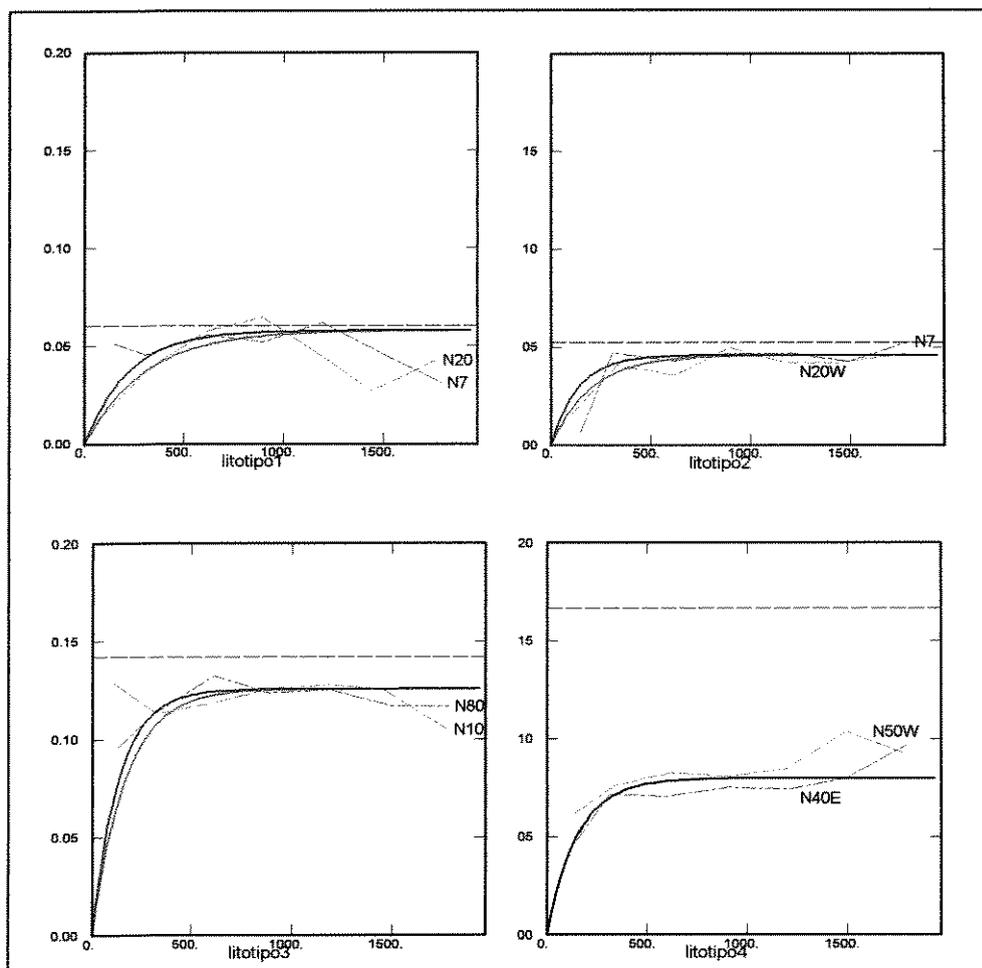


Figura 5.11 – Modelagem dos variogramas das proporções dos litotipos da Zona A.

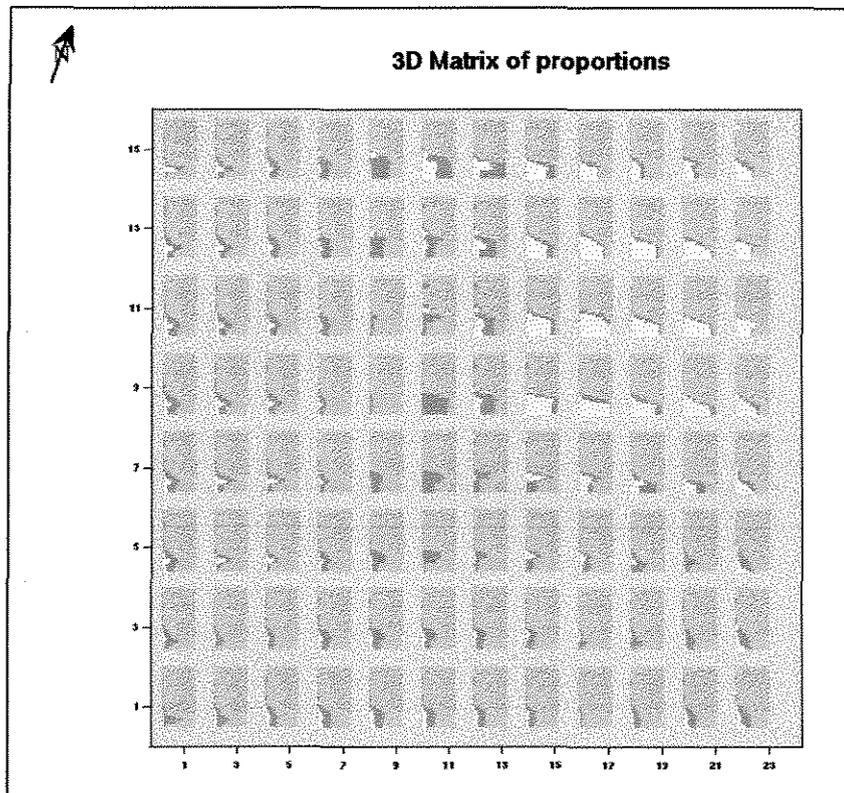


Figura 5.12 - Matriz de proporção da Zona A, obtida a partir das curvas de proporção dos poços.

#### 5.6.2 - Matriz de Proporção da Zona C

Na krigagem das proporções dos litotipos nesta zona, foram utilizados os variogramas experimentais das indicatrizes dos litotipos ajustados pelo modelo exponencial (Tabela 5.3 e Figura 5.13).

A matriz de proporção calculada (Figura 5.14) indica que nesse intervalo estratigáfico predominam os sedimentos lacustres, representados pelo litotipo 4. O litotipo 3 mostra uma distribuição homogênea na porção superior do intervalo enquanto os litotipos 1 e 2 concentram-se também nesta porção, porém restritos às regiões centro-sul da área. Desta forma, pode-se dizer que a história deposicional da zona C começou com a sedimentação eminentemente lacustre e, em seguida, começaram as primeiras incursões do delta sobre o lago. Os lobos deltaicos apresentavam distribuição localizada, enquanto que os depósitos de interlobos mostraram maior espriamento.

Tabela 5.3 - Parâmetros da modelagem dos variogramas dos litotipos da Zona C .

ZONA	Litotipo	Patamar	Direção de maior alcance	Alcance (metros)	Direção de menor alcance	Alcance (metros)
C	1	0,012	N20W	700	N70E	600
	2	0,009	N65W	350	N25E	350
	3	0,048	N50W	470	N40E	400
	4	0,053	N50W	400	N40E	350

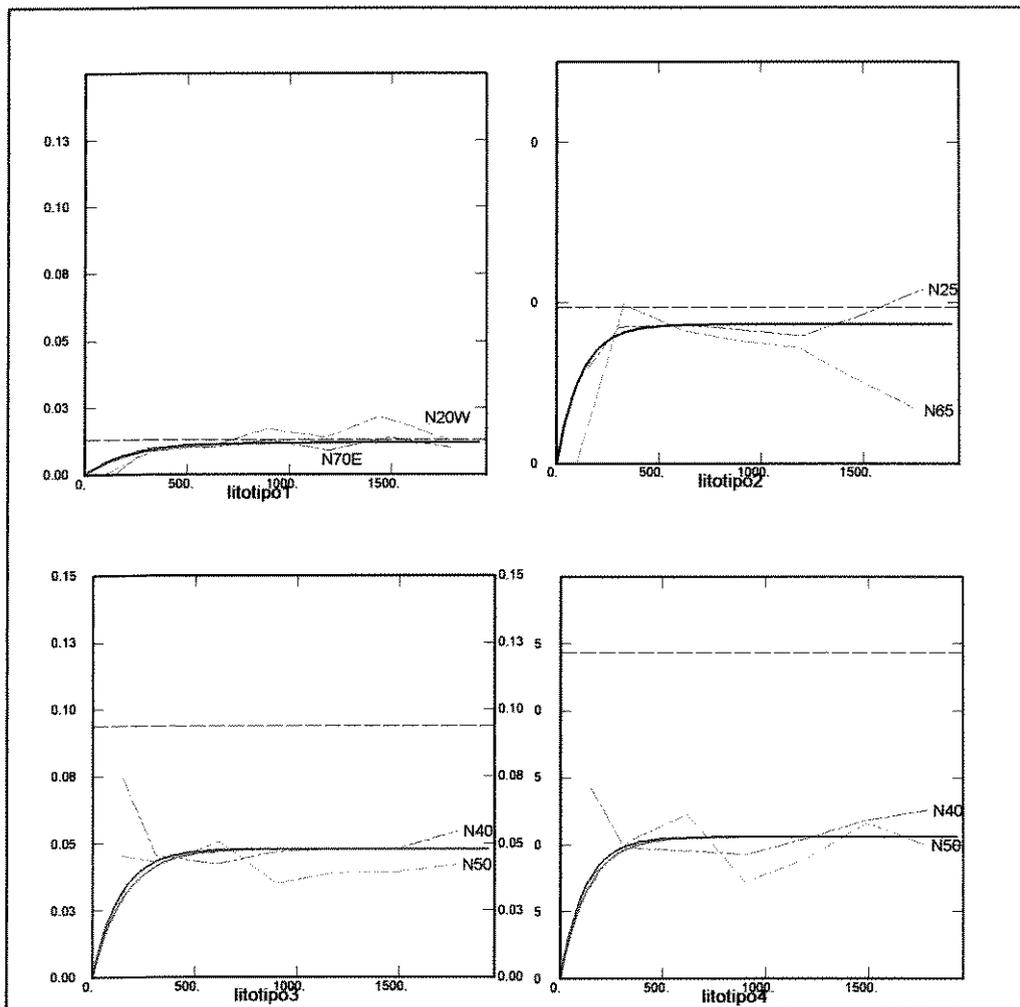


Figura 5.13 – Modelagem dos variogramas das proporções dos litotipos da Zona C.

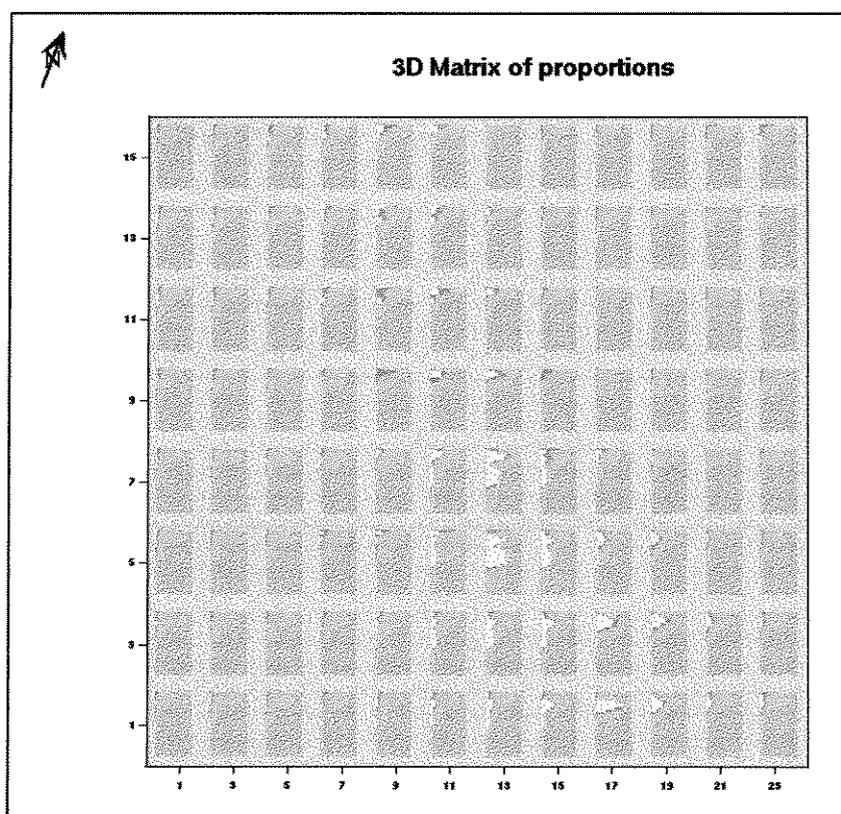


Figura 5.14 - Matriz de proporção da Zona C, obtida a partir das curvas de proporção dos poços.

### 5.6.3 - Matriz de Proporção do Intervalo Total

A construção da matriz de proporção para todo o intervalo estratigráfico estudado sofreu o mesmo processo usado para a construção das matrizes de proporções para as zonas A e C. Os parâmetros obtidos com o ajuste dos variogramas experimentais podem ser observados na Tabela 5.4. Na Figura 5.15 encontram-se os variogramas modelados de cada litotipo.

A matriz de proporção revela a história deposicional descrita anteriormente, com maior refinamento, pelo exame de cada uma das MPs das zonas A, B e C (Figura 5.16). Através de sua análise verifica-se, da base para o topo do intervalo, o crescente incremento das proporções dos litotipos mais arenosos até a porção mediana do intervalo e, em seguida, sua diminuição gradativa ocasionada pelo crescimento dos litotipos mais pelíticos, resultado da transgressão lacustre sobre o delta. Os pacotes de sedimentos mais arenosos (litotipos 1 e 2) mostram continuidade variável ao longo do tempo e espaço, em função da geração de heterogeneidades causadas pela variação lateral dos litotipos.

Tabela 5.4 - Modelos teóricos de variogramas ajustados para os litotipos do intervalo total.

Litotipo	Patamar	Direção de maior alcance	Alcance (metros)	Direção de menor alcance	Alcance (metros)
1	0,058	N20W	900	N70E	650
2	0,046	N20W	600	N70E	400
3	0,126	N10W	500	N80E	400
4	0,008	N50W	450	N40E	450

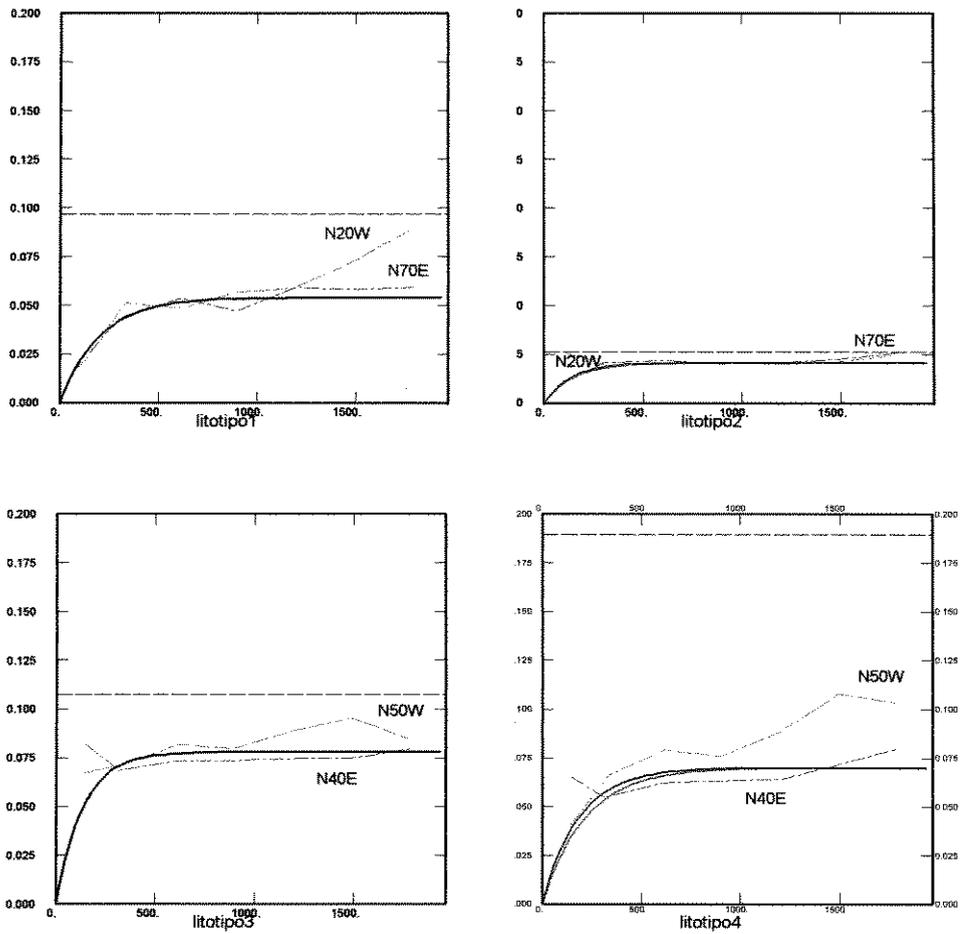


Figura 5.15 – Modelagem dos variogramas das proporções dos litotipos do intervalo total.

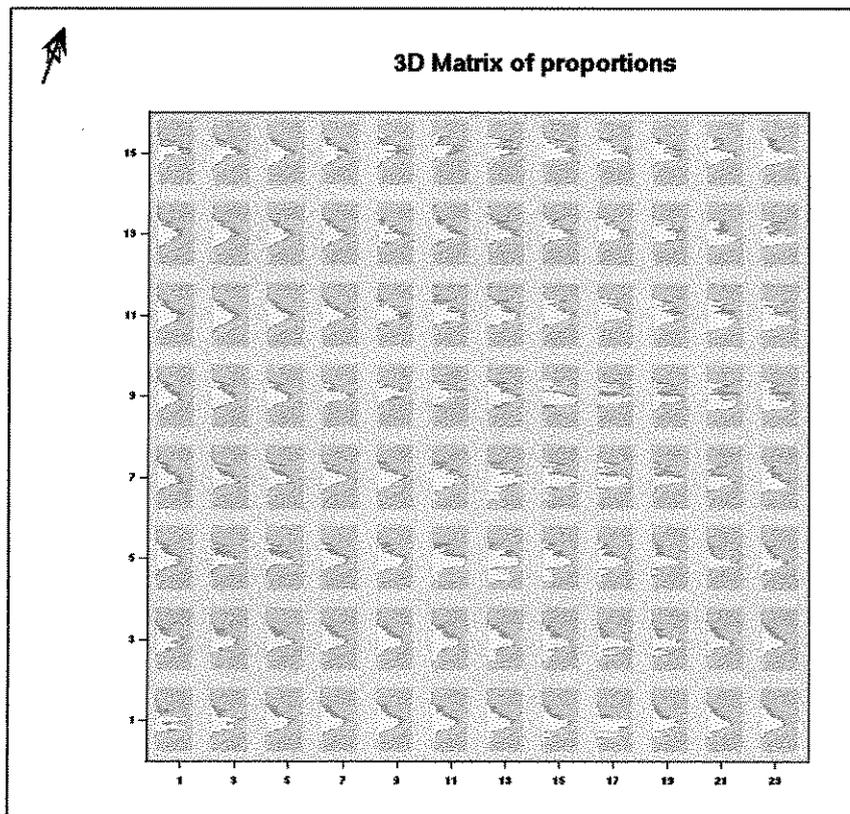


Figura 5.16 - Matriz de proporção do intervalo estratigráfico total, obtido a partir das curvas de proporção dos poços.

## CAPÍTULO 6 - SIMULAÇÃO ESTOCÁSTICA CONDICIONAL DOS LITOTIPOS

### 6.1 - INTRODUÇÃO

Os reservatórios deltaicos caracterizam-se, de modo geral, por apresentarem-se muito heterogêneos. Esta heterogeneidade é devida, em parte, aos distintos arranjos espaciais de suas fácies que, têm grande influência na permeabilidade destes reservatórios. Desta forma, a modelagem destas fácies assume grande importância na caracterização dos reservatórios.

Nos capítulos precedentes, particularmente naquele referente à análise da repartição espacial dos litotipos, ficou evidente a existência de seqüenciamento destes litotipos. Uma vez que se pretendeu utilizar as informações obtidas pela construção das matrizes de proporção dos litotipos na geração de imagens estocásticas, tornou-se necessário escolher um método de simulação condicional específico para simular conjuntos aleatórios desta natureza. Muitos trabalhos têm sido desenvolvidos nesta área, dentre os quais se destacam aqueles realizados pelos pesquisadores do Instituto Francês do Petróleo em conjunto com o Centro de Geoestatística da Escola de Minas de Paris. Nestes, se possibilita a aplicação do modelo estocástico gaussiano truncado adaptado para ambientes flúvio-deltaicos e a outros ambientes deposicionais (Matheron et al., 1987, Ravenne et al., 1987, Beucher et al., 1993, Hu et al., 1995, Mouliere et al., 1996, Souza Jr, 1997 etc.).

Simon (1998) faz uma revisão bibliográfica do modelo gaussiano truncado, comentando suas principais etapas de execução e as vantagens e desvantagens de seu uso.

O método consiste em estabelecer a ligação entre o modelo de distribuição 3D das proporções dos litotipos compreendidos num intervalo estratigráfico e a realização de uma Função Aleatória Gaussiana Estacionária  $Y(x)$ , centrada e normalizada. Os litotipos são modelados por um conjunto aleatório, que, por sua vez, corresponde a uma partição do campo gaussiano, cujos limites são definidos pelas proporções de litotipos (Souza Jr, 1997).

Cada realização de  $Y(x)$ , para cada modelo de distribuição 3D das proporções de litotipos, corresponde a uma realização do conjunto aleatório, interpretado como um modelo da repartição espacial daqueles litotipos. Supondo serem suscetíveis de variar dentro do espaço, estas proporções podem ser representadas por um processo estocástico não-estacionário e as realizações da repartição dos litotipos serão, assim, não-estacionárias, mesmo estejam intrinsecamente ligadas ao processo estacionário modelado por  $Y(x)$ .

A seguir, baseando-se no trabalho de Souza Jr. (1997), cada etapa deste método será descrita com maior detalhe.

## 6.2 - SIMULAÇÃO ESTOCÁSTICA NÃO-ESTACIONÁRIA DOS LITOTIPOS

### 6.2.1 - Preparação e Estrutura 3D dos Dados para a Simulação

Para ser coerente com o formalismo probabilístico, dentro do método de simulação de conjuntos aleatórios, os litotipos devem ser codificados de forma que obedecem à seqüência de sedimentação observada. Foi por esta razão que, após efetuada a correlação rocha-perfil para a definição dos litotipos (capítulo 3), procedeu-se a codificação destes segundo a ordem de empilhamento sedimentar esperada, isto é, desde 1 para o litotipo mais arenoso até 4 para o litotipo mais argiloso.

O *grid* 3D de simulação obedeceu à mesma orientação da área de estudo, com dimensões de 2000 m na direção longitudinal ao eixo de deposição dos sedimentos, 3000 m na direção transversal e espessura vertical que variou conforme o tipo de abordagem feita. Na análise da Zona B, a espessura vertical do *grid* é de 33 m, já na abordagem que considerou o intervalo estratigráfico total, as espessuras dos *grids* de simulação das zonas A, C e total foram respectivamente 38, 32 e 91 m. Cada célula destes *grids* apresenta as dimensões de 50 x 50 x 1 m, perfazendo, assim, um total de 91.200, 79200, 76.800 e 218.400 células, respectivamente para as zona A, B, C e intervalo total.

### 6.2.2 - Análise Variográfica das Indicatrizes

Como os dados de entrada correspondem aos litotipos ao longo dos poços, as funções estruturais estimadas e modeladas para caracterizar a variabilidade espacial do fenômeno são as indicatrizes  $I_k(x)$  dos  $k$  litotipos, que, estando ligados à mesma lei bivariada  $[Y(x), Y(x+h)]$ , implica a interdependência de uma modelagem em relação à outra. Adicionalmente, todas elas apresentam os mesmos alcances, que correspondem àqueles da função gaussiana subjacente  $Y(x)$ . Desta forma, deve-se procurar um alcance que se ajuste o melhor possível a todos os variogramas, simples e cruzados, das indicatrizes e que venha ser utilizado como o alcance de  $Y(x)$ .

A primeira etapa da análise variográfica consiste em definir quatro funções indicatrizes para modelar os quatro litotipos existentes. Sobre cada ponto experimental  $x_\alpha$ , ao longo dos poços, as funções indicatrizes são estabelecidas da seguinte forma:

$$I_1(x_\alpha) = \begin{cases} 1, & \text{se } k=1 \text{ (LT\_1)} \\ 0, & \text{caso contrário} \end{cases} \quad I_2(x_\alpha) = \begin{cases} 1, & \text{se } k=2 \text{ (LT\_2)} \\ 0, & \text{caso contrário} \end{cases}$$

$$I_3(x_\alpha) = \begin{cases} 1, & \text{se } k=3 \text{ (LT\_3)} \\ 0, & \text{caso contrário} \end{cases} \quad I_4(x_\alpha) = \begin{cases} 1, & \text{se } k=4 \text{ (LT\_4)} \\ 0, & \text{caso contrário} \end{cases}$$

Na análise variográfica horizontal os variogramas das indicatrizes dos litotipos são calculados, nível a nível, conforme a expressão:

$$\gamma_z(x; h_{u,v}) = \frac{1}{2} \sum_n [I_k(x) - I_k(x + h_{u,v})]^2$$

e a seguir calculados os variogramas médios de cada indicatriz através de:

$$\bar{\gamma}(x; h_{u,v}) = \frac{1}{Z} \sum_{z=1}^Z \gamma_z(x; h_{u,v}),$$

onde Z será igual ao número de níveis que compõe cada uma das zonas analisadas. Salienta-se que, como consequência desta média, as imagens simuladas não respeitam exatamente as proporções dos litotipos.

Cabe lembrar também que, como o método utilizado supõe o uso de um só modelo variográfico, obriga-se, na prática, a que se escolham os parâmetros de um modelo variográfico em detrimento dos demais. Assim, como este estudo objetivou a caracterização dos arenitos deltaicos, foi dada atenção especial ao litotipo 1.

Os variogramas, simples e cruzados, das indicatrizes foram calculados sobre cada um dos 55 poços e, em seguida, foi obtido o variograma médio, estimado por:

$$\bar{\gamma}(x; h_w) = \frac{1}{Z} \sum_{mw=1}^{NW} \gamma_{mw}(x; h_w),$$

onde  $NW=55$ , isto é, o número de poços.

A proporção de um litotipo é a média espacial de sua indicatriz. Isto implica que os variogramas das proporções poderão ser derivados da regularização dos variogramas das indicatrizes, possibilitando, assim, a utilização do modelo variográfico obtido a partir desses variogramas na estimativa das proporções dos litotipos.

### 6.2.3 - O Modelo Estrutural da Função Gaussiana $Y(x)$

Como a relação entre os variogramas das indicatrizes dos litotipos e o variograma da FA Gaussiana estacionária intervém nas proporções dos litotipos, que variam no espaço, deve-se efetuar o ajuste dos variogramas experimentais das indicatrizes utilizados na matriz de proporção.

No caso de fenômeno modelado por um processo estocástico não-estacionário, a modelagem do variograma constitui uma fase crítica para o sucesso das simulações. Vários autores estudaram o impacto do modelo variográfico sobre diferentes hipóteses de estacionaridade. Dentre estes citam-se Beucher et al. (1993) que mostram a importância da escolha apropriada do modelo variográfico, exemplificando o caso em que o ajuste do variograma experimental não-estacionário por um modelo estacionário leva a uma superestimativa do alcance.

A relação estrutural entre as partições do Campo Gaussiano, que são as variáveis categóricas representadas pelos litotipos, definidos por  $I_k(\mathbf{x})$ , e a FA Gaussiana subjacente  $Y(\mathbf{x})$  é obtida pela decomposição de  $I_k(\mathbf{x})$  em uma série de Polinômios d'Hermite (Souza Jr., 1997). Estes polinômios constituem a melhor aproximação da função indicatriz por um polinômio de grau  $n$ , ponderado pela função de densidade de probabilidade  $g(\mathbf{x})$  de  $Y(\mathbf{x})$ , podendo ser utilizados para definir uma base ortonormalizada de um espaço vetorial, dentro do qual a função será definida. Desta forma, é possível expressar a covariância não-estacionária das indicatrizes  $CI(\mathbf{x}, \mathbf{x}+\mathbf{h})$  como um polinômio de grau  $n$  da covariância estacionária  $\rho_h(\mathbf{h})$  da FA Gaussiana  $Y(\mathbf{x})$ , onde ocorrem as probabilidades locais da presença dos litotipos.

Em termos dos Polinômios d'Hermite  $I_k$  é escrita como:

$$I_k(\mathbf{x}) = \sum_{n=0}^{\infty} \xi_n^t(\mathbf{x}) \eta_n[Y(\mathbf{x})],$$

Sua relação com  $\rho_h(\mathbf{h})$  é dada por:

$$C_k(\mathbf{x}, \mathbf{x} + \mathbf{h}) = \sum_{n=0}^{\infty} \xi_n(\mathbf{x}) \xi_n(\mathbf{x} + \mathbf{h}) \rho_Y^n(\mathbf{h}),$$

onde  $\eta_n[Y(\mathbf{x})]$  são os Polinômios d'Hermite normalizados, de grau  $n$ , e  $\xi_n(\mathbf{x})$  seus coeficientes associados às proporções dos litotipos, dados por:

$$\xi_n = \begin{cases} E\{I_k(\mathbf{x})\} = p_k(\mathbf{x}), & \text{se } n = 0 \\ g[t_k(\mathbf{x})] h_{n-1}[t_k(\mathbf{x})] - g[t_{k-1}(\mathbf{x})] h_{n-1}[t_{k-1}(\mathbf{x})], & \text{se } n \geq 1 \end{cases}$$

onde  $p_k(\mathbf{x})$  é a proporção do litotipo  $k$  no ponto  $\mathbf{x}$ ,  $g(\mathbf{x})$  é a função densidade de  $Y(\mathbf{x})$  e  $t_k(\mathbf{x})$  os *cut offs* de truncamento de  $Y(\mathbf{x})$ . A covariância  $\rho_Y(\mathbf{h})$  de  $Y(\mathbf{x})$  é modelada por uma função exponencial fatorizável segundo os eixos do *grid* de simulação

$$\rho_Y(\mathbf{h}) = \rho_Y(h_u) \rho_Y(h_v) \rho_Y(h_w) = e^{\left(\frac{-|x_u|}{p_u}\right)} e^{\left(\frac{-|x_v|}{p_v}\right)} e^{\left(\frac{-|x_w|}{p_w}\right)},$$

onde  $p_u, p_v$  e  $p_w$  são os alcances do modelo segundo as direções  $x_u, x_v$  e  $x_w$ , respectivamente.

Para a simulação da Zona B, os variogramas das indicatrizes dos litotipos obtidos pela construção das matrizes de proporção, e, conseqüentemente, os variogramas da FA Gaussiana subjacente, foram ajustados por um modelo de alcance de 400 m na direção N20W, 300 m na direção N70E e 4 m na vertical (Figura 6.1).

O modelo exponencial fatorizado anisotrópico e estacionário que define a estrutura da FA Gaussiana  $Y(x)$  desta zona é dado por:

$$\rho_Y(\mathbf{h}) = e^{\left(-\frac{x_u}{400}\right)} e^{\left(-\frac{x_v}{300}\right)} e^{\left(-\frac{x_w}{4}\right)}$$

Para a abordagem que levou em consideração o intervalo estratigráfico total, os variogramas das indicatrizes para as zonas A, C e total foram ajustados com as mesmas direções de anisotropia da Zona B. Os alcances obtidos de cada uma destas zonas podem ser conferidos na Tabela 6.1. Na Figura 6.2, encontram-se os ajustes dos variogramas do litotipo 1 para cada direção e para as zona A, C e o intervalo total. Os modelos exponenciais fatorizados para esta zonas são os seguintes:

$$\rho_Y(\mathbf{h}) = e^{\left(-\frac{x_u}{300}\right)} e^{\left(-\frac{x_v}{250}\right)} e^{\left(-\frac{x_w}{3}\right)}, \text{ para a Zona A;}$$

$$\rho_Y(\mathbf{h}) = e^{\left(-\frac{x_u}{400}\right)} e^{\left(-\frac{x_v}{350}\right)} e^{\left(-\frac{x_w}{6}\right)}, \text{ para a Zona C;}$$

$$\rho_Y(\mathbf{h}) = e^{\left(-\frac{x_u}{300}\right)} e^{\left(-\frac{x_v}{270}\right)} e^{\left(-\frac{x_w}{5}\right)}, \text{ para o intervalo total.}$$

#### 6.2.4 - A Simulação Condicional de $Y(x)$

Matheron et al. (1988), propuseram um algoritmo de simulação condicional que é constituído de duas etapas principais: I) a reconstrução dos poços condicionantes com os valores gaussianos em cada malha; II) a simulação da FA Gaussiana  $Y(x)$ , de covariância  $\rho_Y(\mathbf{h}_w)$  sobre as linhas verticais e sua condicionalização lateral.

Na primeira etapa do processo de simulação, preparam-se os poços com os valores gaussianos correspondentes ao zoneamento de seus litotipos, isto é, atribui-se a cada ponto  $x$ , com o litotipo  $k$ , um valor de  $Y(x)$  compreendido entre seus *cut offs*  $[tk-1, tk]$ , cuja covariância vertical é conhecida a partir da covariância das indicatrizes. Assim, a cada ponto  $i$  da malha vertical são estimados e simulados os valores de  $Y(x_i)$ , de forma que todos os poços passem a ser representados por uma sucessão de valores gaussianos.

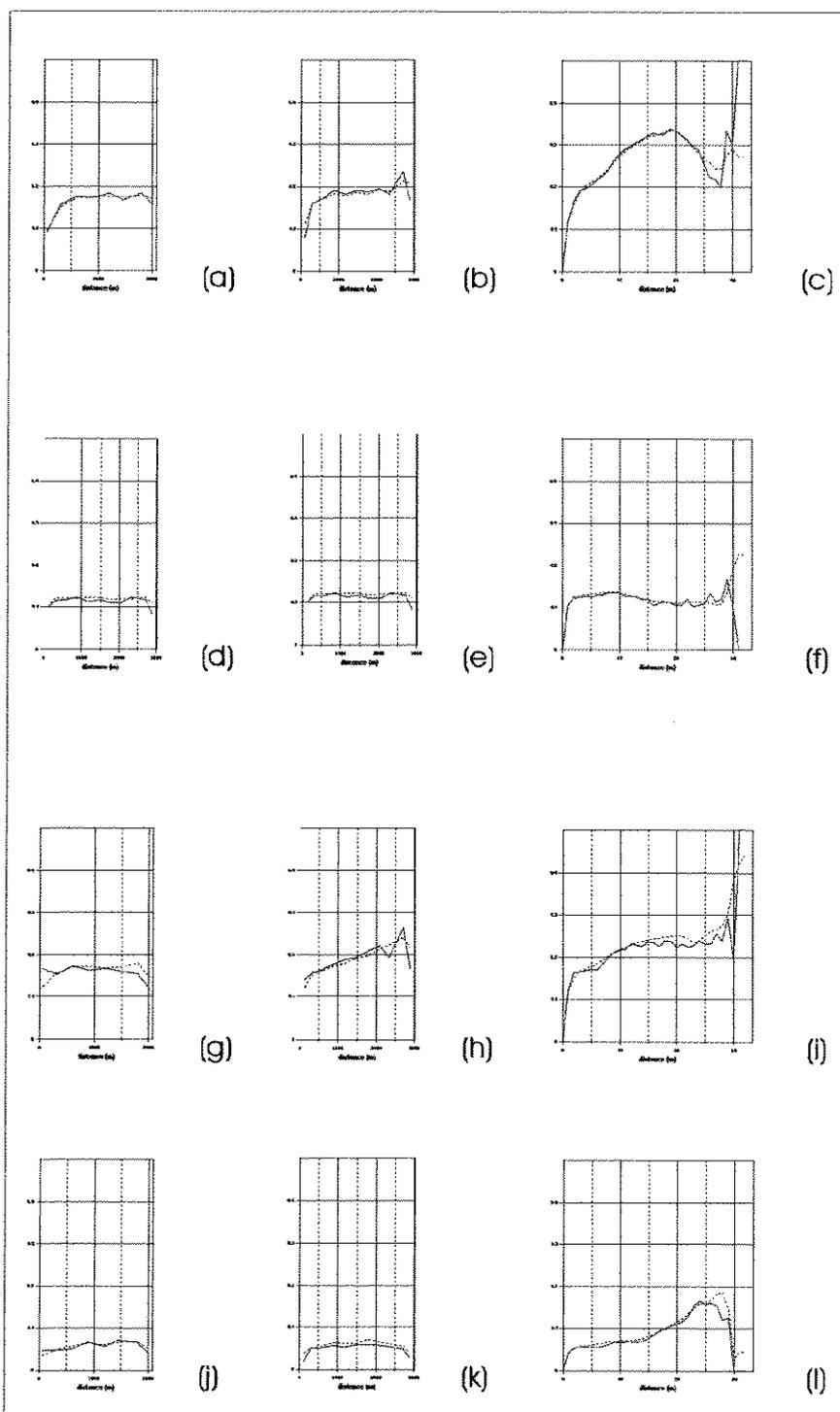


Figura 6.1 – Modelagem dos variogramas das indicatrizes dos litotipos da Zona B, com o modelo exponencial fatorizado, nas direções N20W, N70E e vertical: litotipos 1 (a-c), 2 (d-f), 3 (g-i) e 4 (j-l).

Tabela 6.1 – Alcances dos variogramas das indicatrizes dos litotipos das zonas A, C e total, ajustados com o modelo exponencial fatorizado

Zona	Modelo	Alcance na direção N20W	Alcance na direção N70E	Alcance na direção vertical
A	Exp. Fat.	300	250	3
C	Exp. Fat.	400	350	6
total	Exp. Fat.	300	270	5

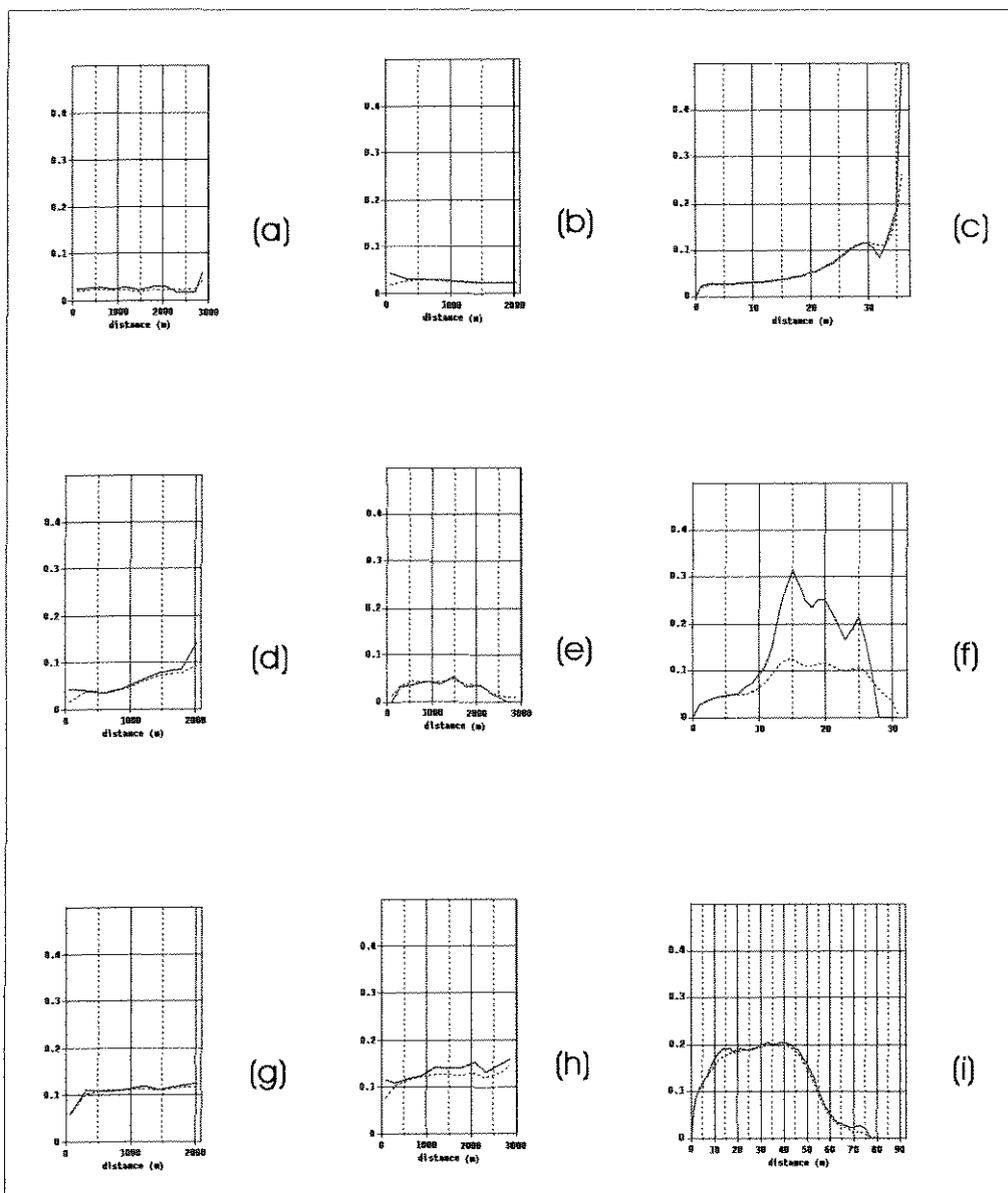


Figura 6.2 – Modelagem dos variogramas das indicatizes do litotipo 1 das zonas A (a-c), C (d-f) e total (g-i) com o modelo exponencial fatorizado, nas direções N20W, N70E e vertical.

Na segunda etapa, são geradas as realizações de  $Y(x)$  dentro do espaço 3D. O processo consiste na reconstrução das linhas verticais, dispostas de acordo com o *grid* de simulação, e na imposição lateral da correlação espacial modelada a partir das indicatizes dos litotipos. O processo de simulação é realizado em dois tempos: uma simulação vertical e, em seguida, utilizando os valores gaussianos já simulados no mesmo nível, uma krigagem sobre os poços ou sobre as demais linhas verticais simuladas anteriormente.

### 6.2.5 – A Anamorfose de $Y(x)$

Para retornar às variáveis reais efetua-se sua anamorfose com um dos modelos de distribuição espacial das proporções dos litotipos.

A cada realização da FA  $Y(x)$  podem-se obter várias realizações do conjunto aleatório correspondente aos diferentes modelos de distribuição espacial das proporções dos litotipos utilizados para controlar a anamorfose de  $Y(x)$ . Os conjuntos aleatórios, por sua vez, representam o modelo de repartição dos litotipos dentro do intervalo estratigráfico estudado. A partir de um modelo de distribuição espacial das proporções de cada litotipo é efetuado o truncamento da FA Gaussiana e obtida uma realização do conjunto aleatório própria para modelar a repartição dos litotipos. A função  $Y(x)$  exibe uma organização espacial correspondente ao modelo estrutural determinado a partir da análise variográfica das indicatrizes dos litotipos.

O retorno aos  $k$  litotipos se faz a partir da função  $Lit_k = Lit_k(x) = \sum_{k=1}^K C_k I_{(t_{k-1}(Y) \leq t_k)}$ , onde  $Lit_k = L_k$  é o litotipo  $k$  no ponto  $x$ ,  $C_k = C_k(x)$  é o código de entrada do litotipo  $k$ ,  $I = I(x)$  é a função indicatriz,  $Y = Y(x)$  é a função FA Gaussiana e  $t_k = t_k(x)$  é o *cut off* gaussiano.

### 6.3 - RESULTADOS

#### 6.3.1 - Zona B

A partir dos três diferentes modelos de distribuição espacial das proporções dos litotipos gerados pela construção das matrizes de proporção, foram obtidos três modelos estocásticos da repartição destes litotipos dentro da Zona B. Para cada modelo de distribuição dos litotipos, utilizando a mesma semente, foi produzida uma realização da FA Gaussiana. As imagens, que serão analisadas a seguir, foram obtidas segundo três planos do *grid* de simulação: um na horizontal (eixo  $xy$ ) e dois na vertical (paralela e transversalmente ao *trend* de deposição dos sedimentos – Figura 6.3).

As imagens horizontais, que correspondem às seções estratigráficas horizontais, foram obtidas em vários níveis. Para efeito de comparação dos três modelos estocásticos, escolheram-se as imagens dos níveis -10, -20 e -30 m (Figuras 6.4 a 6.6). Em todas elas são observados os seguintes aspectos:

- uma feição observada em todas as seções horizontais, independentemente da matriz de proporção utilizada, é a tendência de direcionamento das imagens nas direções  $x$  e  $y$ , isto se justifica pela característica intrínseca do variograma utilizado nas simulações, o exponencial fatorizado, que propicia maior continuidade naquelas direções. Esta feição, entretanto, não prejudicou as análises efetuadas;

- em todas as imagens os litotipos apresentam maior continuidade ao longo da direção *y*, paralela ao eixo de deposição, nota-se entretanto a magnitude desta continuidade varia com o modelo de distribuição espacial das proporções utilizado;

- no modelo construído pela MP por áreas, os litotipos mostram-se menos contínuos (Figuras 6.4a, 6.5a e 6.6a), consequência do tipo de modelo de distribuição empregado. Esta dependência é claramente observada pela comparação das imagens da Figura 6.6, que mostra um predomínio total do litotipo 3 na parte oeste da área, enquanto nas outras duas imagens isto não se verifica;

- as imagens obtidas a partir da MP construída pela krigagem das proporções dos poços mostram maior continuidade dos litotipos (Figuras 6.4b; 6.5b, e 6.6b);

- utilização de um condicionador na construção da MP possibilitou obter imagens onde os litotipos mostram-se tão contínuos quanto os apresentados pelas imagens anteriores, porém condicionados a uma variável que limita a distribuição de suas proporções (Figuras 6.4c, 6.5c; e 6.6c).

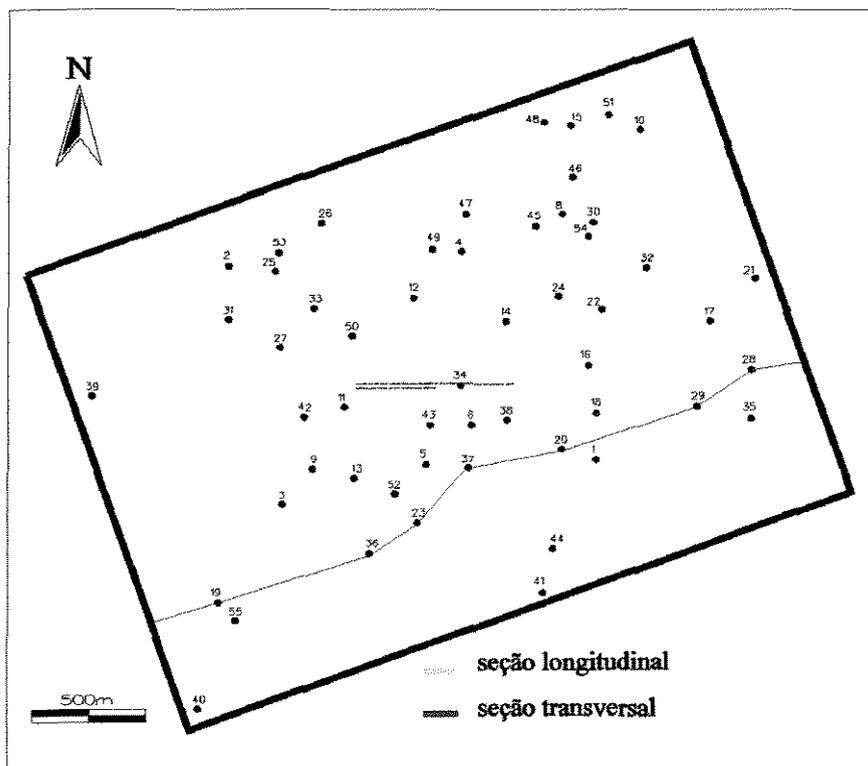


Figura 6.3 – Mapa de localização das seções verticais analisadas na simulação da repartição dos litotipos do intervalo estudado.

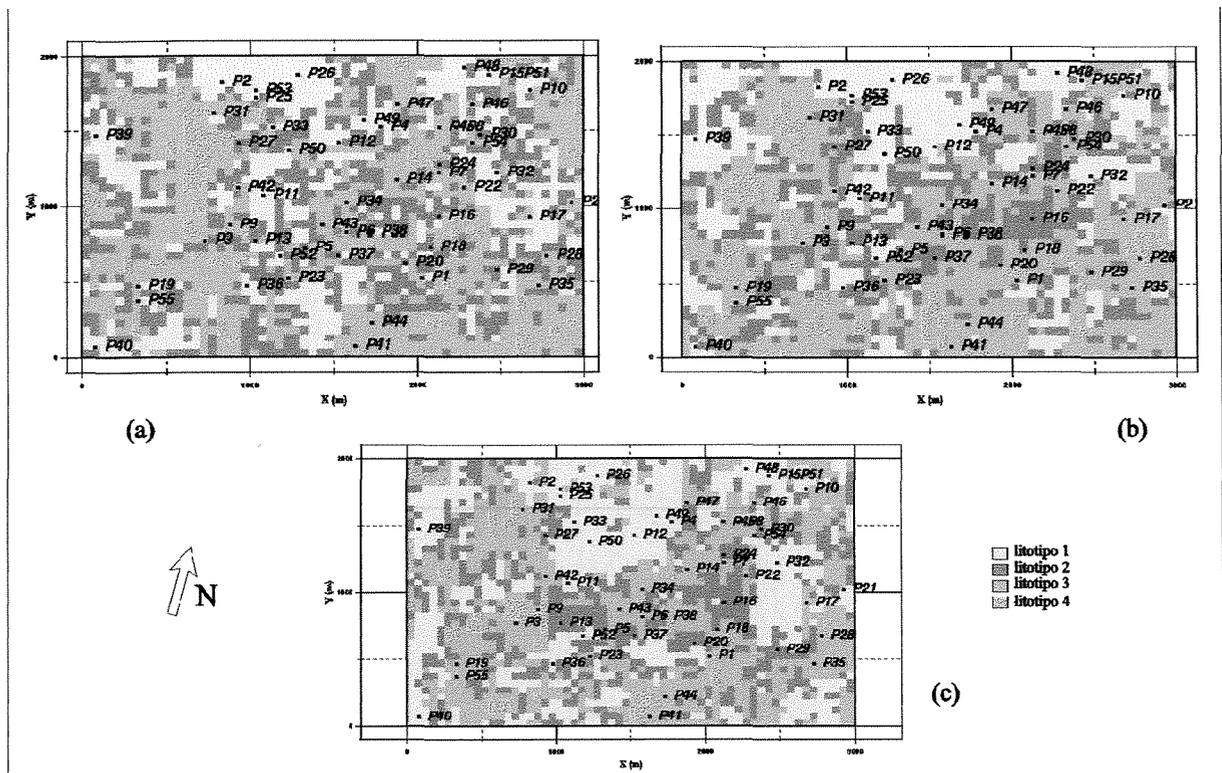


Figura 6.4 - Seções estratigráficas horizontais (nível -10m) da realização da repartição dos litotipos da Zona B obtidas a partir da construção das MPs por: (a) áreas; (b) krigagem das proporções e (c) krigagem das proporções com condicionador adicional.

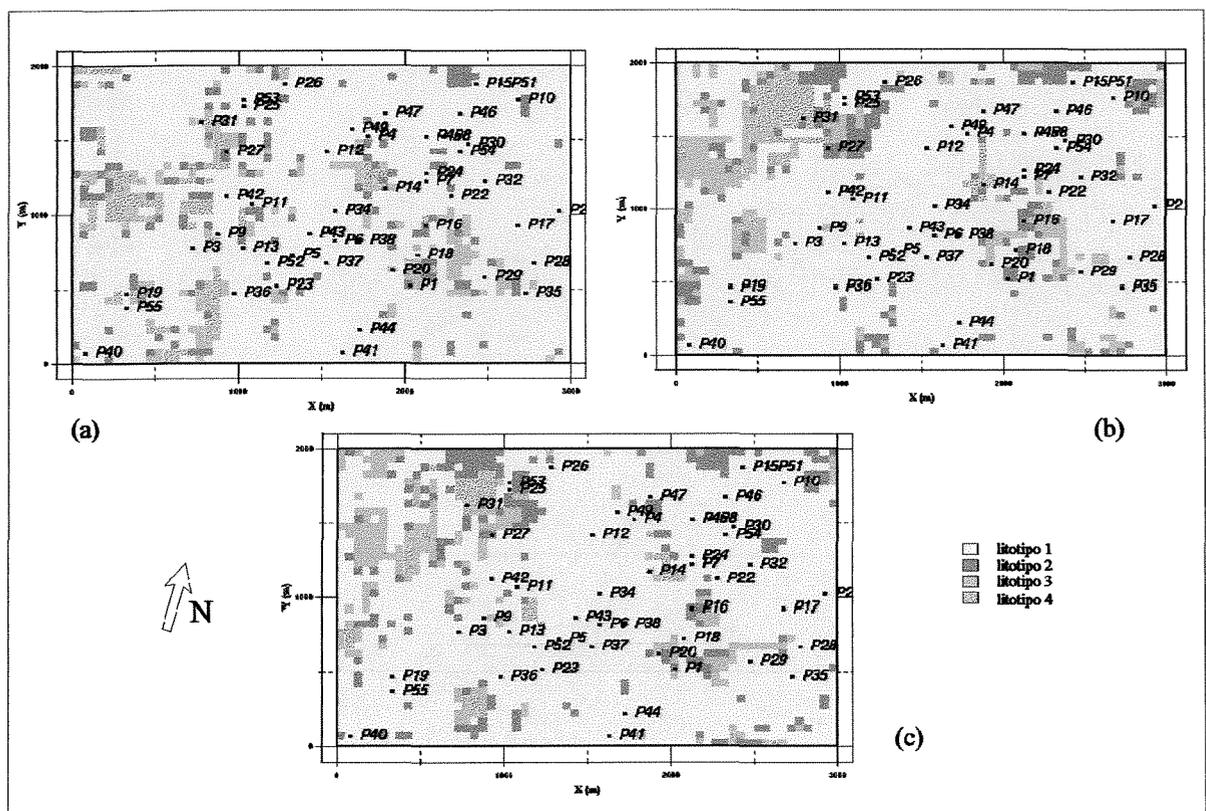


Figura 6.5 - Seções estratigráficas horizontais (nível -20m) da realização da repartição dos litotipos da Zona B obtidas a partir da construção das MPs por: (a) áreas; (b) krigagem das proporções e (c) krigagem das proporções com condicionador adicional.

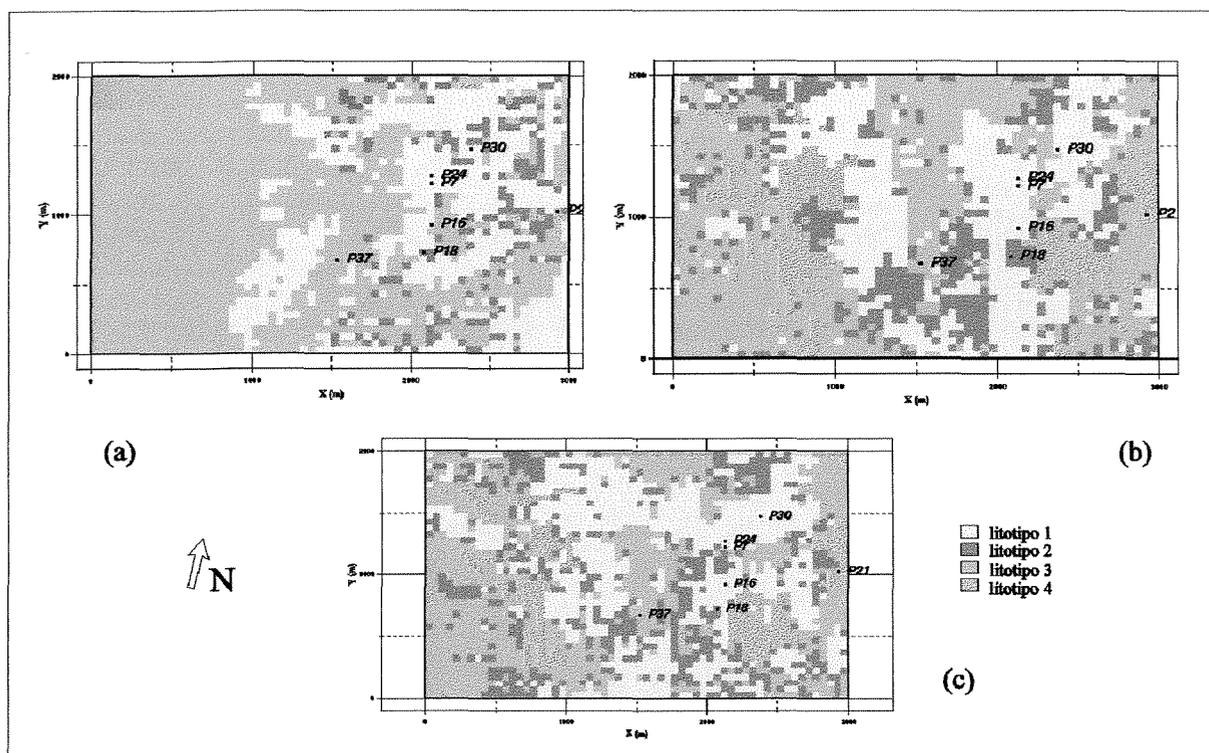


Figura 6.6 – Seções horizontais estratigráficas (nível -30 m) das simulações da Zona B, geradas por diferentes métodos de construção da MP: (a) por áreas; (b) krigagem das proporções e (c) krigagem das proporções com condicionador adicional.

Nas imagens verticais também é observada a variação da continuidade dos litotipos, segundo o modelo de distribuição das proporções utilizado (Figura 6.7). Notam-se também, o caráter regressivo do delta, da base para o topo, nas seções paralelas ao eixo deposicional (Figura 6.7a-c), e o arranjo de lobos-interlobos na porção mediana das seções transversais àquele eixo (Figura 6.7d-f).

### 6.3.2 - Intervalo Total

Nesta abordagem, foram efetuadas quatro simulações, cada uma relacionada ao modelo de distribuição espacial das proporções dos litotipos gerado pela construção das matrizes de proporção de cada uma das zonas analisadas (A, B, C e intervalo total). Após simuladas, as zonas A, B e C foram somadas de modo a reconstituir o intervalo total.

Além destas simulações, foi efetuada uma outra simulação do intervalo total considerando apenas a curva de proporção vertical global de todos os poços da área, isto é, assumiu-se aqui a hipótese de estacionariedade horizontal.

A análise das imagens geradas foi realizada em duas etapas: na primeira, compararam-se as realizações baseadas na MP e na cpV global, através de seções estratigráficas horizontais e verticais e de mapas das isópacas de cada litotipo (Figuras 6.8 a 6.10), na segunda etapa

compararam-se toda as três simulações do intervalo total, através de seções verticais estruturais (Figura 6.11).

Na primeira etapa, foram observados os seguintes aspectos:

- todas as imagens geradas pelo uso da cpV global mostram um padrão fragmento, tipo mosaico, que não reflete a continuidade esperada para os litotipos, segundo o modelo geológico conceitual da área (Figuras 6.8a-c, 6.9a, 6.9b e 6.10a-d);

- as imagens produzidas a partir da MP do intervalo total mostram que os litotipos dispõem-se de maneira mais contínua na direção y, quando vistos nas seções horizontais (Figura 6.8d-f) e nos mapas de isópacas (Figura 6.10e-h). Tal distribuição coincide com a direção geral de deposição estabelecida;

- nas seções verticais produzidas também a partir da MP do intervalo total ratifica-se a maior continuidade dos litotipos e evidencia a mudança do regime de sedimentação, pelo “afogamento” do sistema deltaico pelo lago (Figuras 6.9c e 6.9d).

Na segunda etapa, a comparação das seções verticais estruturais originadas pela simulação dos três modelos de repartição espacial das proporções dos litotipos mostra nas imagens geradas a partir das MPs, os litotipos apresentam-se bem mais contínuos que naquelas produzidas a partir da cpV global (Figuras 6.11a-f). Quanto a comparação entre as imagens formadas pela soma das simulações das zonas A, B e C e as formadas pela simulação da zona total, aparentemente, as primeiras tendem a individualizar melhor o intervalo estudado que as imagens geradas pela simulação da zona total.

A análise geral dos resultados advindos das simulações dos modelos de repartição espacial das proporções dos litotipos indica que a construção de matrizes de proporção possibilita a geração de imagens que traduzem com maior fidelidade o modelo geológico conceitual para área, principalmente quando as proporções das fácies que compõem esta área variam significativamente no tempo e no espaço.

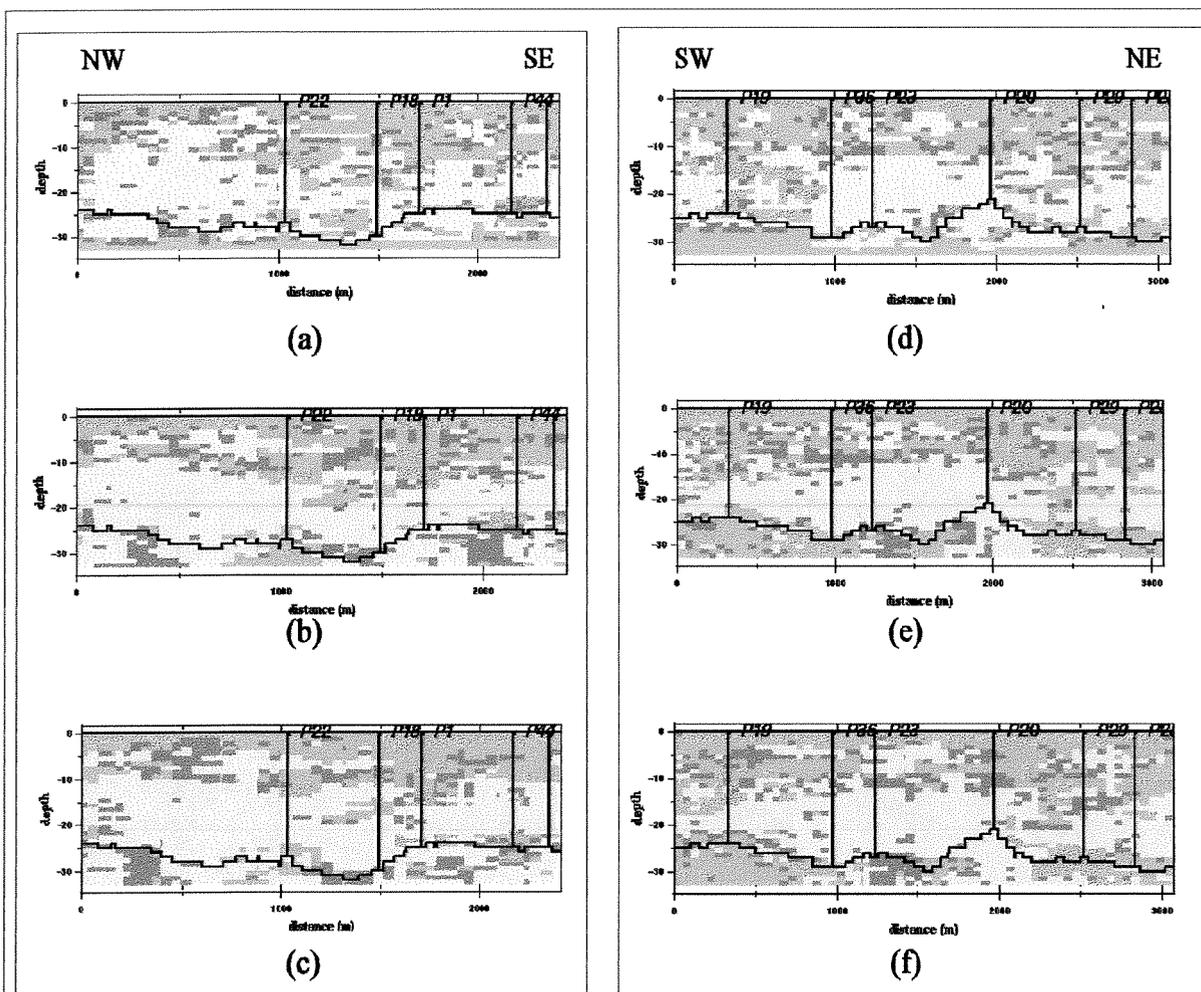


Figura 6.7 - Seções verticais estruturais, longitudinais (NW/SE) e transversais (SW/NE) ao eixo geral de deposição dos sedimentos, das simulações da Zona B geradas por diferentes métodos de construção da MP: (a; d) por áreas; (b; e) krigagem das proporções e (c;f) krigagem das proporções com condicionador adicional.

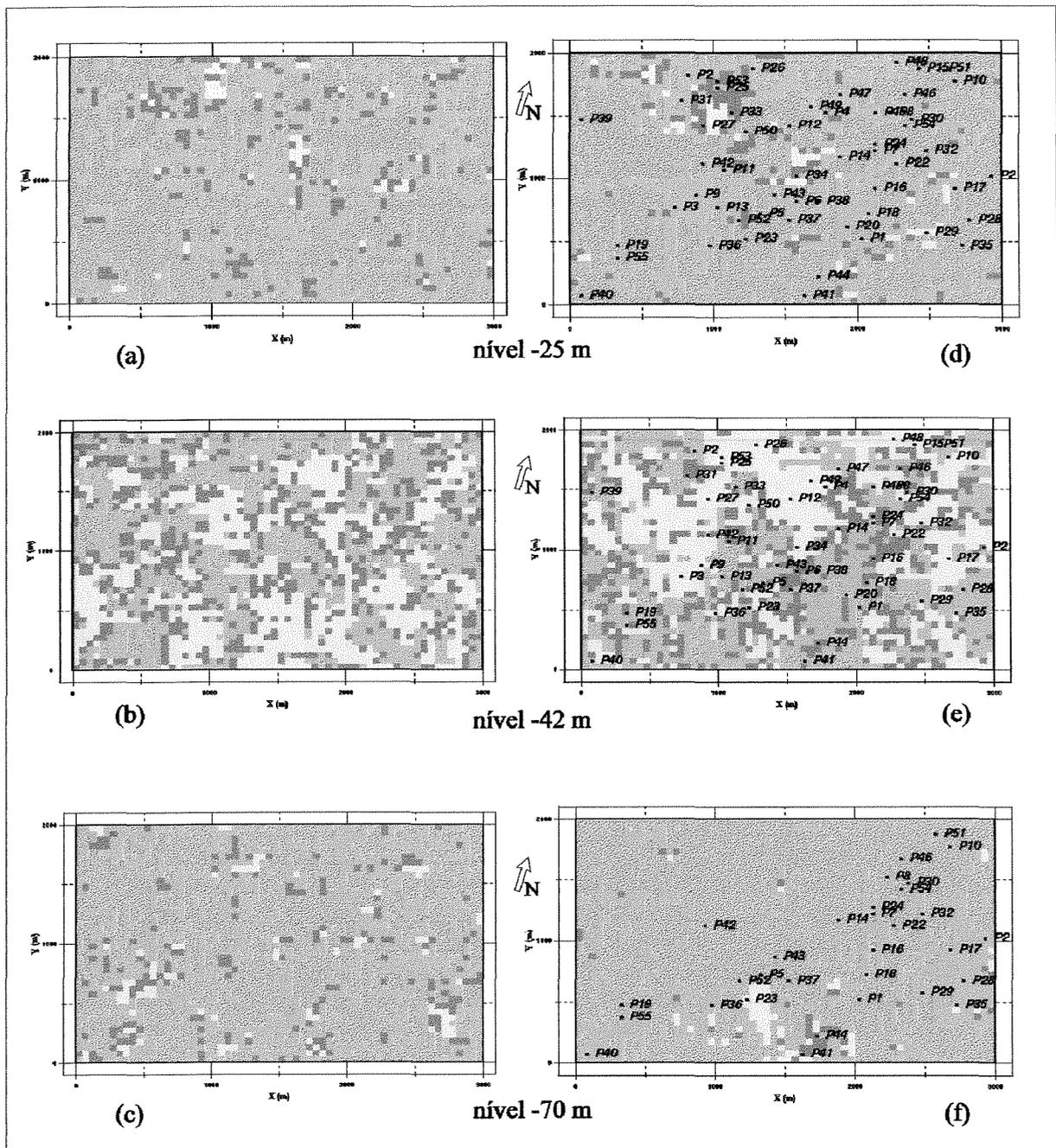


Figura 6.8 – Seções horizontais estratigráficas das simulações do intervalo total: (a-c) com a cpV global e (d-f) com a MP do intervalo total.

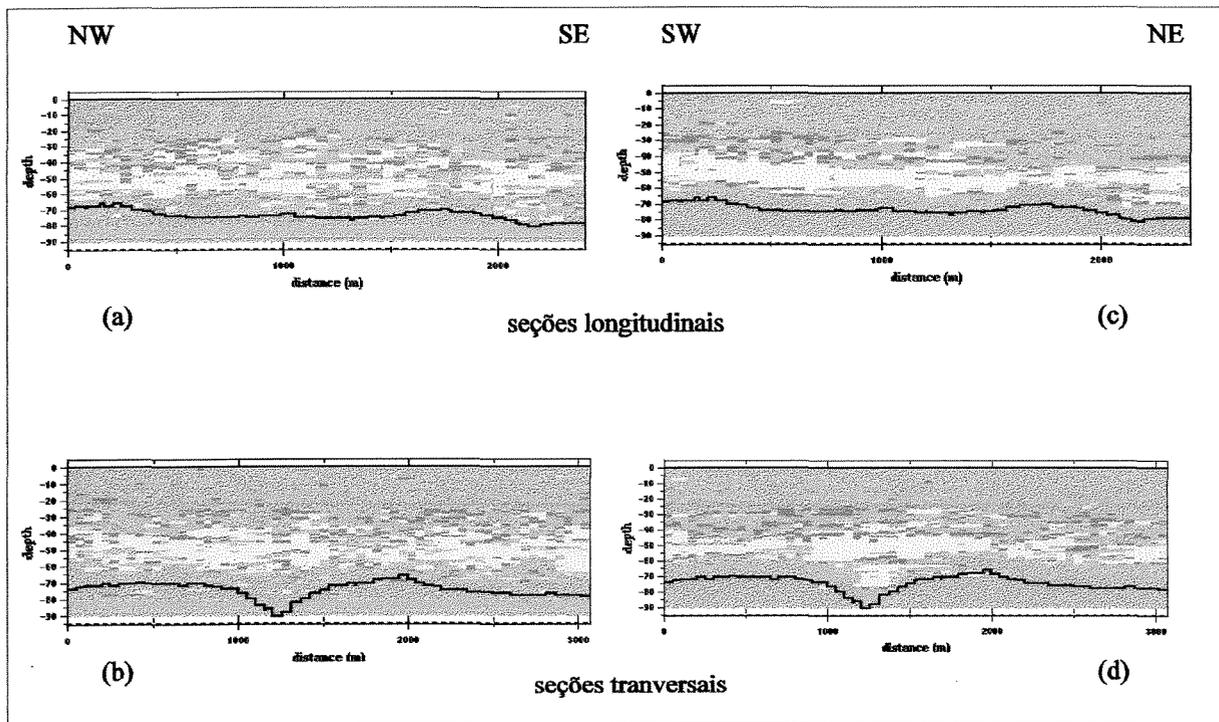


Figura 6.9 – Seções verticais estruturais, longitudinais (NW/SE) e transversais (SW/NE) ao eixo geral de deposição dos sedimentos, das simulações do intervalo total: (a; b) com a cpV global e (c; d) com a MP do intervalo total.

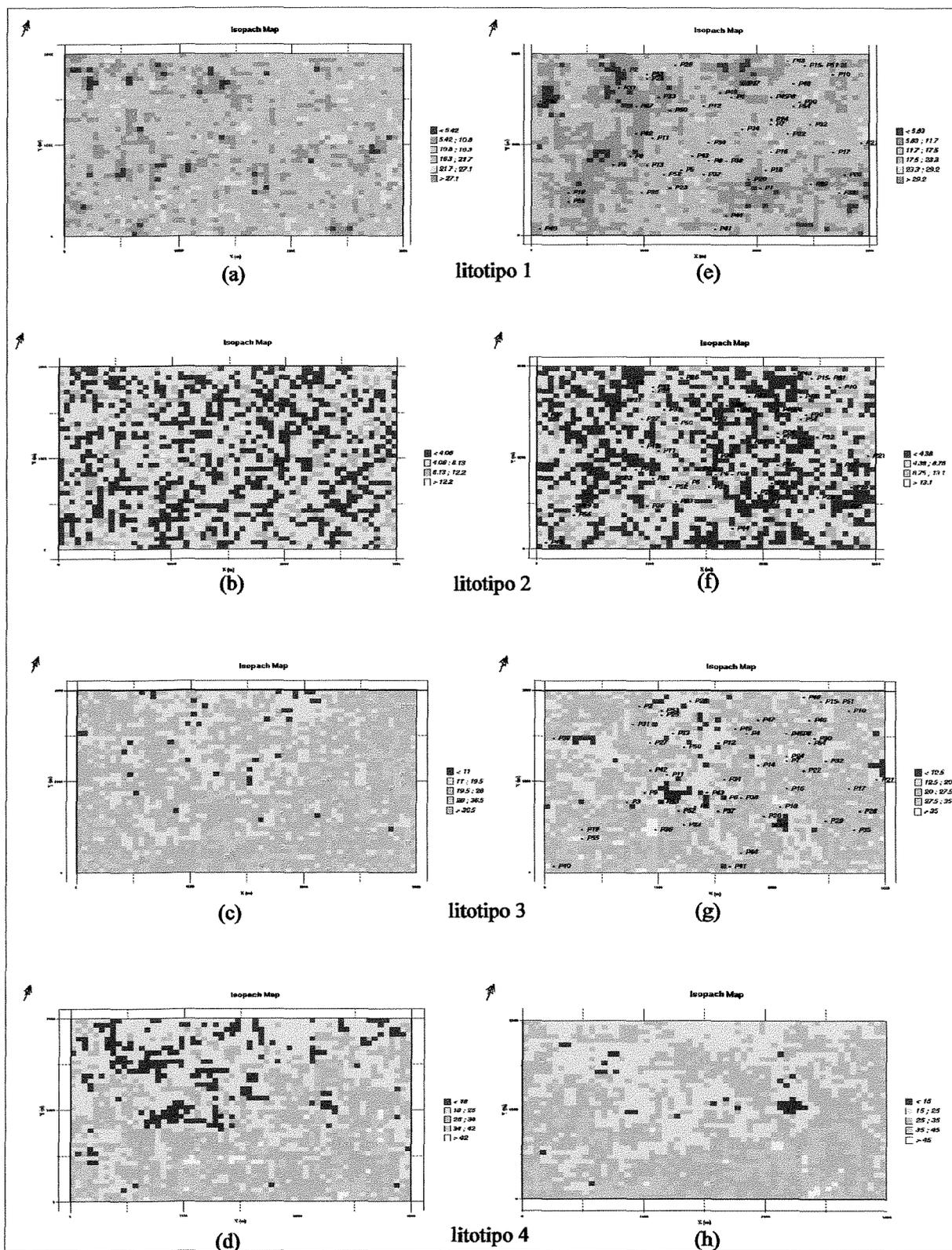


Figura 6.10 – Mapas de isopacas dos litotipos do intervalo total gerados por simulações baseadas na: (a-d) cpV global dos litotipos e (e-h) na MP do intervalo total.

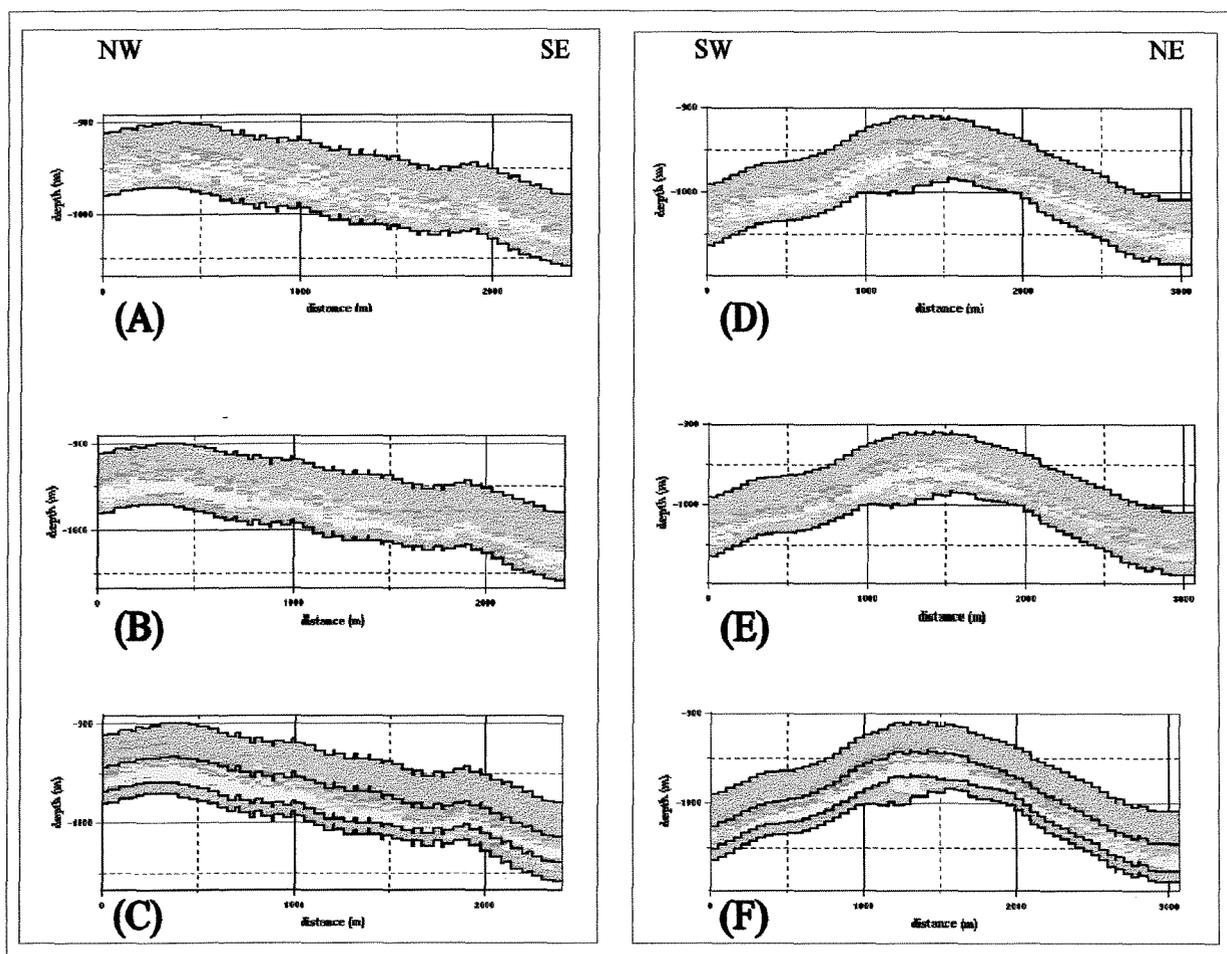


Figura 6.11 – Seções verticais estruturais, longitudinais (NW/SE) e transversais (SW/NE) ao eixo geral de deposição dos sedimentos, das três simulações do intervalo total: (a; d) com a cpV global; (b; e) com a MP do intervalo total e (c; f) com a soma das MPs das zonas A, B e C.

## CAPÍTULO 7 - CONCLUSÕES

O objetivo desta dissertação foi a construção de matrizes de proporção de fácies, a partir das informações dos testemunhos de rocha e dos perfis elétricos e radioativos, de modo a estabelecer modelos da repartição espacial daquelas fácies no intervalo estratigráfico em foco. Em última análise, o que se pretendeu com este estudo foi compreender como estava preenchido todo um volume de sedimentos, composto por rochas reservatório e suas heterogeneidades, cujos únicos pontos de controle eram os poços e o modelo geológico conceitual.

A adoção de técnicas não-paramétricas na correlação rocha-perfil, propiciou, através do emprego da abordagem não-supervisionada dos dados, a definição de quatro fácies permo-porosas, denominadas aqui de litotipos, cada um delas com sua própria identidade dentro do contexto deposicional da área. O litotipo 1 corresponde à melhor fácies permo-porosa e relaciona-se aos lobos arenosos deltaicos. O litotipo 2 é interpretado como a variação lateral dos lobos, posicionando-se, assim, na porção marginal destes. O litotipo 3 representa, principalmente, os sedimentos de interlobos deltaicos, constituindo-se em barreiras de permeabilidade. Finalmente o litotipo 4, caracteristicamente pelítico, representa tanto os sedimentos lacustres como também os sedimentos mais argilosos das áreas de interlobos/interdistributária. Juntamente com o litotipo 3, o litotipo 4 constituem as heterogeneidades do intervalo estudado.

A análise espacial dos litotipos, utilizando-se diversas técnicas, ratificou o preconiza o modelo geológico conceitual, não só em relação às suas distribuições e geometrias como também ao arranjo vertical e lateral dos litotipos. Deste modo, verificou o forte inter-relacionamento entre os litotipos 1, 2 e 3 e também entre os litotipos 3 e 4. Através da análise espacial dos litotipos foi possível, dentre outros aspectos, construir modelos variográficos consistentes com a sua organização, assumir a hipótese de não-estacionariedade vertical e horizontal do intervalo e, também, subdividir o intervalo estratigráfico estudado em zonas com características litológicas distintas.

A Matriz de Proporção é uma ferramenta de fácil construção e é extremamente útil na visualização 3D do reservatório. Através dela geraram-se modelos de repartição espacial das proporções dos litotipos de toda a área estudada.

Embora a quantidade de dados e a forma como eles são utilizados na construção da matriz de proporção influenciem nos resultados, constatou-se que, em linhas gerais, em todas

as matrizes construídas foi possível verificar as mesmas mudanças no padrão de sedimentação da área.

Considerando, agora, a análise mais detalhada da distribuição das heterogeneidades dentro do intervalo estudado, ficou evidente que o uso do método de construção da matriz de proporção que associa uma curva de proporção por área resultou na menor continuidade da distribuição dos litotipos. Já os métodos que utilizam a krigagem das proporções dos litotipos com ou sem uma variável condicionadora adicional mostraram maior continuidade na distribuição daquelas fácies permo-porosas, resultado condizente com o modelo deposicional esperado.

As imagens estocásticas condicionais e não-estacionárias da repartição espacial das proporções dos litotipos, geradas através da Simulação Gaussiana Truncada, mostraram padrões de continuidade coerentes com o tipo de matriz de proporção utilizada. Por outro lado, a assunção da hipótese de estacionariedade horizontal, em um modelo no qual a distribuição dos litotipos mostra não-estacionariedade total, produziu imagens em que estas distribuições apresentam um padrão tipo mosaico, sem qualquer relação com o fenômeno geológico da área.

O conhecimento do modelo geológico conceitual da área estudada foi fundamental na tomada de decisões em todas as etapas deste estudo.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ASMUS, H. E. & PORTO, R., 1980. Classificação das Bacias Sedimentares Brasileiras Segundo a Tectônica de Placas, 23p.
- BEINCIP-FRANLAB, PETROLEUM CONSULTANTS, 1997. Heresim 3D v4.0 User's Guide. Rueil Malmaison.
- BEUCHER, H., GALLI, A., LE LOC'H, G. & RAVEVENNE, C., 1993. Including a Regional Trend in Reservoir Modelling Using the Truncated Gaussian Method. In: Soares, A. (ed.), Geostatistics Troia'92, Kluwer Academic Publishers, v.1, p.555-566.
- BHATTACHARYA, J. P. & WALKER, R. G., 1992. Facies Models: Response to Sea Level Change. Geological Association of Canada, ch 9, p.157-177.
- BOUROCHE, J. M. & SAPORTA, G., 1980. Análise de Dados. Zahar Editores, 116p.
- CAIXETA, J. M.; BUENO, G. V.; MAGNAVITA, L.P. & FEIJÓ, F.J., 1994. Coluna Estratigráfica das Bacias do Recôncavo, Tucano e Jatobá. Boletim de Geociências da Petrobrás, Rio de Janeiro, 8(1), jan./mar., p.163-172.
- CASTRO, J.Q., 1996. A Utilização de Atributos Sísmicos na Caracterização de Reservatórios de Petróleo. Dissertação de Mestrado, UNICAMP, Campinas, SP, 115p.
- CORTEZ, M.M.M., 1996. Análise Geoestatística da Geometria Externa dos Reservatórios Fluvial e Eólico da Formação Água Grande, Área Central da Bacia do Recôncavo. Dissertação de Mestrado, UNICAMP, Campinas, SP, 104p.
- DAVIS, C. J., 1986. Statistics and Data Analysis in Geology. 2<sup>o</sup> ed. New York, John Wiley & Son, 646p.
- DOVETON, J.H., 1994. Geologic Log Analysis Using Computer Methods. In: Computer Applications in Geology n2, AAPG, Tulsa, Okla. p.65-95.
- ELEK, I., 1988. Some Applications of Principal Component Analysis: Well-to-Well Correlation, Zonation. Geobyte, p.46-55.
- GHIGNONE, 1969. A Sedimentação Deltaica na Bacia do Recôncavo. PETROBRÁS/RPBA, Salvador, Bahia, Brasil. 15p.
- HU, L.Y., 1995. Estimations des Fonctions 3D de Proportions Lithologiques avec des Données de Puits et des Données Sísmiques: Etude de L'unité Supérieure du Mesa Verde. Rapport Confidentiel IFP, 27p.

- JOHANN, P.R.S., 1997. Seismic Inversion and Stochastic Modelling of a Turbidite Reservoir. Tese de Doutorado, Université Pierre e Marie Curie.
- JOHNSON,R.& WICHERN,D.W., 1992. Applied Multivariate Statistical Analysis. 3<sup>a</sup> ed. Englewood Cliffs, NJ, Prentice-Hall International, 642p.
- LANDIM, P.M.B., 1997. Análise Estatística de Dados Multivariados, in; VII Simpósio de Quantificação em Geociência, Rio Claro, SP, 29p.
- MATHERON, G., BEUCHER, H., DE FOUQUET, C., GALLI, A. & RAVENNE, C., 1987. Conditional Simulation of the Geometry of the Fluvio-Deltaic Reservoirs. Proc. Annual Technical Conference and Exhibition, Dallas (USA), sept, 27-30, paper 16753, p.591-599.
- MATHERON, G., BEUCHER, H., DE FOUQUET, C., GALLI, A. & RAVENNE, C., 1988. Simulation Conditionnelle à 3 Faciès dans une Falaise de la Formation du Brent. Sciences de la Terre, n.28, Etudes Géostatistiques V, p.213-249.
- MATO, L. F., 1984. Arenitos Reservatório do Membro Santiago Superior, no Campo de Miranga – Bloco Principal e Bloco Norte, Bacia do Recôncavo. Salvador, PETROBRÁS, (Relatório interno), 28p.
- MATO, L.F., 1994. Modelagem Estocástica em Dois Estágios Aplicada à Zona II, Campo de Rio do Bu, Bacia do Recôncavo. Dissertação de Mestrado, UNICAMP, Campinas, SP, 155p.
- MATO, L. F., CAIXETA, J.M. & MAGALHÃES, M.R.C., 1992. Padrões de Sedimentação na Passagem da Formação Marfim para a Formação Pojuca (Andar Rio da Serra/ Andar Aratu) e Significado Estratigráfico do Marco 15, Cretáceo Inferior, Bacia do Recôncavo, Bahia. Boletim de Geociências da PETROBRÁS, Rio de Janeiro, 6(1/2), jan./jun., p.59-72.
- MILANI, E.J., 1987. Aspectos da Evolução Tectônica das Bacias do Recôncavo e Tucano Sul, Bahia Brasil. PETROBRÁS/CENPES, Rio de Janeiro.
- MOULIERE, D., BEUCHER, H., HU, L. Y., FOURNIER, F., TERDICH, P., MELCHIORI, F. & GRIFFI, G., 1996. Integration of Seismic Derived Information in Reservoir Stochastic Modelling Using Truncated Gaussian Approach. Fifth Geostatistical Congress, Melbourne, Austrália).
- PARAIZO, P.L.B., 1993. Modelagem Numérica para Tratamento de Dados Geológicos. Dissertação de Mestrado, UNICAMP, Campinas, SP, 137p.

- PETTIJOHN, F.J., POTTER, P.E. & SIEVER, R., 1973 - Sand and Sandstone, Springer-Verlag, New York, Heidelberg, Berlin.
- PUC-RIO/TECGRAF & PETROBRÁS/CENPES, 1995. AnaSeTe, Manual do Usuário, v2.0, 61p.
- RAVENNE, C., ESCHARD, R., GALLI, A., MATHIEU, Y., MONTADERT, L. & RUDKIEWICS, J.L., 1987. Heterogeneities and Geometry of Sedimentary Bodies in a Fluvio-Deltaic Reservoir. Proc. Annual Technical Conference and Exhibition, Dallas (USA), sept, 27-30, paper 16752, p.115-122.
- RIVOIRARD, J., 1992. Relations Between the Indicators Related to a Regionalised Variable, In: Fourth International Geostatistical Congress, Lisboa, 12p.
- SAS INSTITUTE INC., 1994. SAS/STAT User's Guide, version 6, Carry, NC. 4<sup>a</sup> vol 1 p.519-771 e p.1241-1263.
- SIMON, V.H., 1998, Simulação Plurigaussiana Truncada com Condicionamento. Dissertação de Mestrado, UNICAMP, Campinas, SP, 84p.
- SOARES, C.M., 1997. Análise Estratigráfica e Geoestatística de Reservatórios Deltaicos da Bacia do Recôncavo (BA). Dissertação de Mestrado, UNICAMP, Campinas, SP, 120p.
- SOUZA JR., O. G., 1997. Stratigraphie Séquentielle et Modélisation Probabiliste des Réservoirs d'un Cone Sous-Marin Profond -Champ de Namorado, Brésil- ; Intégration des Données Géologiques et Géophysiques .Tese de Doutorado, Université de Paris 6, França, 215p.
- TINKER, S.W., 1996. Building the 3-D Jigsaw Puzzle: Applications of Sequence Stratigraphy to 3-D Reservoir Characterization, Permian Basin. AAPG Bulletin, V. 80 (4), p. 460-485.
- TRANSVALOR & GEOVARIANCES, 1997. Isatis- The Geovariances Key, User's Guide, v3.1.2.
- WEBER, K.J. & VAN GEUNS, L.C., 1990 - Framework for Constructing Clastic Reservoir Simulation Models. SPE, n° 19582 (october), p. 1248-1297.
- WEBER, K.J., 1986. How Heterogeneity Affects Oil Recovery. In: Lake, L.W. & Carrol Jr., H.B. (eds.). Reservoir Characterization. Academic Press Inc, Orlando, FL, p. 487-544.
- WORONOW, A., 1987. Cluster Analysis. Geobyte, p. 34-37.