UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

**MODELOS E SIMULAÇÕES DE FÁCIES E
SEQÜÊNCIAS SEDIMENTARES FLUVIAIS E
EÓLICAS DE RESERVATÓRIOS PETROLÍFEROS**

Wilson Luiz Lanzarini

Orientador: Prof. Dr. Gilberto Amaral

TESE DE DOUTORAMENTO

Programa de Pós-Graduação em Geologia Sedimentar

São Paulo
1995

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

**MODELOS E SIMULAÇÕES DE FÁCIES E
SEQÜÊNCIAS SEDIMENTARES FLUVIAIS E
EÓLICAS DE RESERVATÓRIOS PETROLÍFEROS**

Wilson Luiz Lanzarini

Orientador: Prof. Dr. Gilberto Amaral

TESE DE DOUTORAMENTO

COMISSÃO JULGADORA

	nome
Presidente:	<u>Gilberto Amaral</u>
Examinadores:	<u>Paulo Milton Barbosa Landim</u>
	<u>Jorge Carlos Della Fávera</u>
	<u>Rodi Ávila Medeiros</u>
	<u>Saul Barisnik Suslick</u>

ass.

Handwritten signatures of the jury members, corresponding to the names listed in the table: Gilberto Amaral, Paulo Milton Barbosa Landim, Jorge Carlos Della Fávera, Rodi Ávila Medeiros, and Saul Barisnik Suslick.

São Paulo
1995

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

DEDALUS - Acervo - IGC

30900005095

**MODELOS E SIMULAÇÕES DE FÁCIES E SEQÜÊNCIAS
SEDIMENTARES FLUVIAIS E EÓLICAS DE
RESERVATÓRIOS PETROLÍFEROS**

Wilson Luiz Lanzarini

Orientador: Prof. Dr. Gilberto Amaral

TESE DE DOUTORAMENTO

Programa de Pós-Graduação em Geologia Sedimentar

São Paulo
1995

À minha esposa

Veríinia,

e aos meus filhos

Juliana,

Cássia,

Cintia,

Natália

e Tomás

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao meu orientador Prof. Dr. Gilberto Amaral pela paciente, contínua e dedicada atenção ao longo destes anos. Aos professores Armando Márcio Coimbra e Jorge Kazuo Yamamoto pela forte contribuição ao aprimoramento do trabalho quando da realização do Exame de Qualificação. Ao professor Paulo Milton Barbosa Landim pelas sugestões fornecidas quando da apresentação de parte deste trabalho durante o V Simpósio de Quantificação em Geociências e pela revisão final da tese.

À Petróleo Brasileiro S.A., particularmente a Guilherme de Oliveira Estrella, Oswaldo Antunes Pedrosa Jr. e Cláudio Bettini, respectivamente Superintendente do CENPES, Chefe da DIGER, e Chefe do SEGER, quando da aprovação de meu programa na USP, pela oportunidade e apoio a esta realização.

Agradecimentos também são devidos ao CCE-USP e LSI-USP, pelo uso de seus recursos na área de computação. Ao Laboratório de Informática do IGc-USP, pelo apoio na elaboração dos mapas com o programa AUTOCAD. Ao Laboratório de Processamento de Imagens do IGc-USP, onde as imagens de ambientes deposicionais recentes foram classificadas.

Ao conjunto de professores do DPE/IGc-USP e colegas da pós-graduação, pelo excelente convívio científico e social, que sem dúvida nenhuma muito contribuiu para meu aprimoramento científico e humano. Particularmente agradeço à Comissão de Coordenação do Programa de Geologia Sedimentar, na pessoa do Prof. Dr. Oscar Rösler, pela dedicação ao aprimoramento do programa e pelo trabalho conjunto ao longo de minha representação discente.

Ao IGc-USP, nas pessoas de seu diretor Prof. Dr. Vicente A. V. Girardi e vice-diretor Georg Robert Sadowski, pela acolhida ao longo destes anos, e pelo apoio ao desenvolvimento do trabalho. A todos os funcionários desta instituição, na qual sempre encontrei a disposição necessária ao bom termo desta pesquisa e a um agradável convívio social. Também gostaria de agradecer a todos as pessoas, não mencionadas, da USP e da PETROBRÁS, particularmente aos colegas do CENPES, que contribuíram para que este trabalho fosse realizado.

Por fim, agradeço aos meus pais, Genuino e Elide Lanza-rini, assim como a Antonia O. dos Santos Correa, pelo imprescindível apoio nas questões de vida corrente, que propiciou as condições favoráveis para o desenvolvimento desta tese.

Première loi:

Que chaque facies d'un terrain quelconque présente des caractères, soit pétrographiques et géognostiques, soit paléontologiques propres, bien distincts, qui sont en opposition directe avec les caractères qu'on suppose généralement au terrain et avec les caractères des autres facies du même niveau géologique.

Une seconde loi est intimément liée à cette première:

Les facies de même nature pétrographique et géognostique affectent, dans les différents terrains, des caractères paléontologiques très-analogues et se succèdent même généralement à travers une série plus ou moins nombreuse de terrains superposés les uns aux autres.

Amand Gressly

RESUMO

Nas bacias sedimentares brasileiras produtoras de hidrocarbonetos (petróleo e gás natural), três unidades estratigráficas de origem fluvial e/ou eólica se destacam como reservatórios: a Formação Sergi, do Jurássico, fase pré-rifte da Bacia do Recôncavo; a Formação Açu, do Cretáceo Superior, fase *drift* da Bacia Potiguar; e a Formação Monte Alegre, base da seqüência clástico-evaporítica de idade carbonífero-permiana da Bacia do Solimões.

A Formação Sergi, principal objeto deste estudo, apresenta fácies de sistema fluvial de canais entrelaçados, associados às fácies eólicas de dunas e interdunas. A Formação Açu foi depositada em um sistema fluvial de carga mista, com características entre entrelaçado e meandrante, e pode ser caracterizada como de um sistema meandrante de granulometria grossa. A Formação Monte Alegre apresenta fácies de dunas, interdunas, lagos de pequeno porte, *sabkhas*, e canais de *wadis*, de sistema desértico.

As fácies sedimentares destes sistemas são caracterizadas através da descrição de testemunhos e de afloramentos, com ênfase nos aspectos da geometria deposicional das unidades. Modelos deposicionais conceituais de uma a três dimensões são construídos para as três unidades estratigráficas, procurando-se incorporar aos mesmos as dimensões das fácies e associações.

Por meio da utilização de *software* disponíveis na literatura, são aplicadas algumas técnicas de modelagem matemática e simulação de fácies e seqüências deposicionais. São utilizados modelos probabilísticos de processos de Markov e da geoestatística (simulação condicional de variáveis categóricas, no caso, fácies sedimentares). Modelos matemáticos determinísticos baseados em parâmetros deposicionais, tais como taxas de migração, sedimentação e subsidência do sistema, são empregados para geração de formas de leito, estruturas sedimentares primárias e seqüências aluviais.

Três imagens de satélite de ambientes sedimentares recentes, equivalentes aos sistemas deposicionais antigos das unidades estratigráficas em estudo, são processadas e classificadas em categorias de fácies sedimentares. Estas imagens são então empregadas no estudo geoestatístico para a determinação da variabilidade em planta das unidades genéticas.

Os resultados obtidos pela modelagem deposicional detalhada e pelas simulações matemáticas mostram a geometria e os padrões da distribuição de fácies sedimentares em uma ou mais dimensões, para cada um dos sistemas deposicionais estudados. Os modelos conceituais e matemáticos empregados apresentam resultados complementares, fornecendo dados possíveis de serem incorporados um ao outro, e ambos contribuindo para a definição de aspectos da geometria deposicional dos reservatórios. A integração entre modelos matemáticos probabilísticos (geoestatística de variáveis categóricas) e determinísticos (simulação de seqüências aluviais) permite a melhor escolha de parâmetros de entrada dos programas, como também uma melhor avaliação dos resultados das simulações.

ABSTRACT

In the Brazilian sedimentary basins that have oil and gas production, three stratigraphic units of fluvial and/or eolian origin are important reservoirs: the Jurassic Sergi formation, pre-rift sequence of Recôncavo basin, the Upper Cretaceous Açu formation, drift sequence of Potiguar basin, and the Monte Alegre formation, the lower stratigraphic unit of the clastic-evaporitic sequence of the Carboniferous-permian age of the Solimões basin.

The Sergi formation is the main object of this work. It shows facies of a braided fluvial system, associated with eolian facies of dunes and interdunes. The Açu formation was deposited in a fluvial system of mixed load with characteristics between braided and meandering systems and can be described as a coarse grained meanderbelt system. The Monte Alegre formation shows facies of dunes, interdunes, small lakes, sabkhas, and channels of wadis, and constitutes a desertic system.

The sedimentary facies of these systems are characterized through cores and outcrops descriptions, with emphasis on the depositional geometry of the units. Conceptual depositional models of one to three dimensions are elaborated for these three stratigraphic units where facies dimensions and associations are incorporated.

With the help of available software in the literature, some technics of mathematical modeling and simulation of depositional facies and sequences are applied. Probabilistic models related to Markov processes and the geostatistic model (conditional simulation of categorical variables - in this case - sedimentary facies) are used. Deterministic models based on depositional parameters such as migration and sedimentation rates and system subsidence are used to generate bed forms, hydrodynamic sedimentary structures and alluvial sequences.

Three satellite images of recent sedimentary environments that are equivalent to the ancient depositional systems of the stratigraphic units under study are processed and classified into categories of sedimentary facies. These images are then used in the geostatistical study for the determination of the horizontal variability of the genetic units.

The results reached by the depositional modeling and mathematical simulation show the geometry and the distribution patterns of sedimentary facies in one to three dimensions, for each studied depositional system . The conceptual and quantitative models show supplementary results, both contributing to define aspects of the depositional reservoir geometry. The integration between probabilistic models (geostatistics of categorical variables) and deterministic models (floodplain simulation model) allows a better definition of the programs entry parameters, as well as a better evaluation of the simulation results.

ÍNDICE

AGRADECIMENTOS.....	ii
RESUMO	iv
ABSTRACT	vi
LISTA DE FIGURAS	ix
LISTA DE ANEXOS.....	xiv
1. Introdução e Objetivos.....	01
1.1. Fácies Sedimentares e Reservatórios de Hidrocarbonetos	01
1.2. Objetivos	03
2. Trabalhos Anteriores e Estado da Arte.....	05
2.1. Fácies, Modelos e Simulações	05
2.2. Modelos Geológicos-Deposicionais.....	06
2.2.1. Sistema Fluvial.....	08
2.2.2. Sistema Eólico-Desértico	11
2.2.3. Sistema Flúvio-Eólico	13
2.3. Modelos Geomatemáticos.....	13
2.3.1. Pequeno Histórico.....	13
2.3.2. Aplicações em Sedimentologia e Estratigrafia	15
3. Metodologias e Fundamentos Teóricos	18
3.1. Modelos Geológicos.....	18
3.1.1. Descrição de Afloramentos	18
3.1.2. Descrição de Testemunhos.....	18
3.1.3. Análise de Perfis Geofísicos de Poços.....	18
3.2. Modelos Geomatemáticos.....	19
3.2.1. Processos Markovianos	19
3.2.2. Geoestatística.....	22
3.2.2.1. Variografia.....	22
3.2.2.2. Simulação Estocástica Condicional.....	24
3.2.2.3. Variáveis Indicativas.....	25
3.2.3. Modelos Determinísticos.....	27

4. Unidades Estratigráficas	30
4.1. A Formação Monte Alegre	30
4.1.1. Testemunhos da Formação Monte Alegre.....	30
4.1.2. Geometria Depositional da Formação Monte Alegre.....	35
4.2. A Formação Açú	39
4.2.1. Afloramentos da Formação Açú	44
4.2.2. Testemunhos da Formação Açú.....	49
4.2.3. Geometria Depositional da Formação Açú.....	51
4.3. A Formação Sergi.....	55
4.3.1. Afloramentos da Formação Sergi	57
4.3.2. Testemunhos da Formação Sergi	88
4.3.3. Geometria Depositional da Formação Sergi	94
5. Análise Quantitativa	97
5.1. Estatística Convencional.....	97
5.2. Processos de Markov	97
5.3. Geoestatística	110
5.3.1. Análise Geoestatística em 1D.....	110
5.3.2. Análise Geoestatística em 2D.....	111
5.3.2.1. Seção Estratigráfica da Formação Monte Alegre.	111
5.3.2.2. Imagens de Satélite	119
5.3.3. Análise Geoestatística em 3D.....	124
5.4. Simulação por Modelos Determinísticos.....	124
5.4.1. Simulação de Formas de Leito e Estruturas Sedimentares Primárias.....	124
5.4.2. Simulação de Sequências Aluviais.....	128
5.5. Geoestatística das Sequências Aluviais Determinísticas.....	133
6. Conclusões e Recomendações.....	138
7. Referências Bibliográficas	143
8. Anexos	154

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Escalas de observação da geometria de reservatórios, exemplificadas a partir de depósitos fluviais. Segundo Dreyer <i>et al.</i> (1990).....	02
Figura 2 - Dados, métodos e resultados almejados por este estudo.....	04
Figura 3 - Classificação dos modelos conceituais, físicos e matemáticos. Segundo Bettini (1989), baseado em Harbaugh & Bonham-Carter (1970).	07
Figura 4 - Características de sistemas deposicionais fluviais. Modificado de Galloway (1977).	09
Figura 5 - Padrões da geometria dos depósitos fluviais: (A) segundo Harris & Hewitt (1977); (B) segundo Cassey (1980).....	12
Figura 6 - Classificação das formas de leito (segundo Ashley, 1990).....	17
Figura 7 - Seqüência vertical de camadas simulada por processos de Markov. Modificada de Carr <i>et al.</i> (1966).	21
Figura 8 - (a) dispersão da variável $Z(x)$ qualquer; (b) função semivariograma mostrando (a) = alcance, (c) = patamar.....	23
Figura 9 - Comparação de uma função real qualquer, com resultados obtidos pela krigagem e simulação condicional (Ferreira, 1988).	26
Figura 10 - Forma de leito e estrutura sedimentar simuladas pelo programa <i>BEDFORMS 2.0</i>	28
Figura 11 - Seqüência deposicional simulada pelo <i>FPSM</i> , representando a seção vertical transversal de um sistema fluvial, com fácies de canal e de planície de inundação.....	29
Figura 12 - Localização das bacias sedimentares do Solimões, Potiguar e Recôncavo.....	31
Figura 13 - Coluna estratigráfica da Bacia do Solimões. Modificada de Esteves (1982).	32
Figura 14 - Bacia do Solimões com curvas de isoespessuras da Formação Monte Alegre e localização das províncias petrolíferas do Juruá e Urucu.	33
Figura 15 - Fotos de detalhe dos testemunhos dos poços da área do Juruá, mostrando as fácies e subfácies	34

Figura 16 - Sequências verticais de fácies de testemunhos da Formação Monte Alegre	36
Figura 17 - Modelo deposicional da Formação Monte Alegre na área do Juruá. Modificada de Lanzarini (1984) e Sneider <i>et al.</i> (1981).....	37
Figura 18 - Seção geológica da Formação Monte Alegre na área do Juruá. Modificada de Lanzarini (1984).	38
Figura 19 - Coluna estratigráfica da Bacia Potiguar. Segundo Souza (1982).	40
Figura 20 - Mapa geológico simplificado da Bacia Potiguar mostrando a faixa de afloramentos da Formação Açu e a localização dos pontos estudados.....	41
Figura 21 - Unidades estratigráficas da parte emersa da Bacia Potiguar, mostrando a compartimentação da Formação Açu em ciclos estratigráficos em escalas de centenas e dezenas de metros de espessura. Modificado de Vasconcelos <i>et al.</i> (1990).	42
Figura 22 - Paleocorrentes da Formação Açu. N (número de medidas) = 30.	43
Figura 23 - Afloramento da Serra do Cuó: (a) fotomontagem mostrando vista longitudinal; (b) vista transversal.....	45
Figura 24 - Fácies de arenito grosso, conglomerático, com estratificação cruzada acanalada. Afloramento da Serra do Cuó: (a) porção longitudinal; (b) porção transversal; (c) arenito com estratificação cruzada acanalada, de canal fluvial, mostrando superfície de corte, sobre lamitos vermelhos; (d) lente de lamito entre arenito de canal fluvial. BR-304, Km 99.	46
Figura 25 - Fotomontagem de forma de leito 3D migrando sentido NW. BR-304, Km 99.	47
Figura 26 - (a) camada de lamito vermelho sobreposta por arenito grosso com estratificação cruzada acanalada; (b) arenito grosso, mostrando a base erosiva do canal fluvial; (c) camada de lamito vermelho sobre arenito fino a médio, maciço. BR-304, Km 98.	48
Figura 27 - Análise sequencial de testemunhos da Formação Açu. Modificada de Ferreira (1984)	50
Figura 28 - Mapas de isólitais de arenito das zonas de produção I e IA do Campo de Alto do Rodrigues. Modificado de Conceição <i>et al.</i> (1984).....	52
Figura 29 - Geometria dos depósitos fluviais da Formação Açu em várias escalas de observação, e superfícies limitantes de 3a. a 7a. ordem.	53

Figura 30- Modelo deposicional da Formação Açu, Unidade Açu-3. Modificado do modelo fluvial meandrante de granulometria grossa de Brown <i>et al.</i> (1973)	54
Figura 31 - Coluna estratigráfica da Bacia do Recôncavo (modificada de Vianna <i>et al.</i> , 1971).....	56
Figura 32 - Faixa de afloramentos do Grupo Brotas, Formações Aliança e Sergi, com a localização das áreas estudadas	58
Figura 33 - Paleocorrentes das Formações Aliança e Sergi, Bacia do Recôncavo.....	59
Figura 34 - Seqüências verticais de fácies do Grupo Brotas, levantadas nos afloramentos da rodovia BR-101.	61
Figura 35 - Empilhamento da seção aflorante do Grupo Brotas, Formações Aliança e Sergi, na rodovia BR-101.....	62
Figura 36 - Fácies da Formação Aliança em afloramentos da BR-101, Kms 148 e 149.	63
Figura 37 - Fácies dos afloramentos da BR-101, Kms 145 a 143,5	65
Figura 38 - Fácies dos afloramentos da BR-101, Kms 143,5 a 140,5	67
Figura 39 - Seqüência vertical de fácies do afloramento do Km 76 da rodovia BR-324	70
Figura 40 - Detalhes de fácies da Formação Sergi no afloramento da BR-324, Km 76.....	71
Figura 41 - Seqüência vertical de fácies da Formação Sergi do Km 75 da BR-324....	74
Figura 42 - Fácies da porção inferior da seqüência da Formação Sergi aflorante na BR-324, Km 75	75
Figura 43 - Fácies da porção superior da seqüência da Formação Sergi aflorante na BR-324, Km 75	77
Figura 44 - Fácies de dunas eólicas da Formação Sergi no afloramento do <i>Canyon</i> do Rio Sergi.	80
Figura 45 - Afloramentos da região de Saubara	82
Figura 46 - Fácies da Formação Sergi nos afloramentos da região da Ponte do Funil.....	85
Figura 47 - Fácies da Formação Sergi na região de São Roque do Paraguaçu	87
Figura 48 - Afloramentos da Formação Sergi na Praia de Gamboa	89

Figura 49 - Análises seqüenciais de testemunhos da Formação Sergi. Poço Sergi-23.....	90
Figura 50 - Análises seqüenciais de testemunhos da Formação Sergi. Poço Sergi-31.....	91
Figura 51 - Detalhes de testemunhos da Formação Sergi	92
Figura 52 - Modelo deposicional da Formação Sergi mostrando a associação de fácies e a geometria deposicional fluvial e eólica.....	96
Figura 53 - Histogramas da variável espessura de fácies - Formação Monte Alegre..	99
Figura 54 - Histogramas da variável espessura de fácies - Formação Açu.....	100
Figura 55 - Histogramas da variável espessura de fácies - Formação Sergi.	101
Figura 56 - Seqüências verticais ideais e quantificadas de fácies das Formações Monte Alegre, Açu e Sergi.	102
Figura 57 - Diagramas de transições entre facies (DTF's) da Formação Monte Alegre	103
Figura 58 - Diagramas de transições entre facies (DTF's) da Formação Açu.....	104
Figura 59 - Diagramas de transições entre facies (DTF's) da Formação Sergi	105
Figura 60 - Gráficos de entropia relativa das fácies e dos sistemas.	106
Figura 61 - Seqüências verticais reais e simuladas de fácies da Formação Monte Alegre	107
Figura 62 - Seqüências verticais reais e simuladas de fácies da Formação Açu.....	108
Figura 63 - Seqüências verticais reais e simuladas de fácies da Formação Sergi	109
Figura 64 - Variogramas verticais das fácies da Formação Monte Alegre	112
Figura 65 - Variogramas verticais das fácies da Formação Açu	113
Figura 66 - Variogramas verticais das fácies da Formação Sergi.....	114
Figura 67 - Seqüências verticais de fácies simuladas pela geoestatística. (A) Formação Açu, (B) Formação Monte Alegre	115
Figura 68 - Seqüência vertical de fácies da Formação Sergi simulada pela geoestatística	116
Figura 69 - Variogramas vertical e horizontal do sistema desértico da Formação Monte Alegre	117

Figura 70 - Seção geológica da área dos campos de Juruá e Jaraqui, simulada pela geoestatística	118
Figura 71 - Arquivos de dados tipo <i>raster</i> de imagens de satélite classificadas em categorias de fácies sedimentares	120
Figura 72 - Variogramas das fácies do sistema deposicional desértico do sudoeste da Península Arábica.	121
Figura 73 - Variogramas das fácies do sistema deposicional aluvial de Bangladesh.	122
Figura 74 - Variogramas das fácies do sistema de canais entrelaçados do Rio Jamuna.	123
Figura 75 - Bloco Sul da Bacia do Recôncavo mostrando o Campo de Dom João com a Área do Projeto Piloto de recuperação de petróleo.	125
Figura 76 - Variogramas das fácies da Formação Sergi da Área do Projeto Piloto do Campo de Dom João	126
Figura 77 - Seções horizontais da área do Projeto Piloto do Campo de Dom João, simuladas pela geoestatística	127
Figura 78 - Forma de leito de crista sinuosa e estratificação cruzada acanalada (a). Padrão de interferência da estrutura com o plano horizontal (b).....	129
Figura 79 - Vetor de migração (V), dispersão do sentido de mergulho dos eixos de estratificação (EX) e orientação dos eixos das superfícies de truncamento (ST), referentes à forma de leito de crista sinuosa da figura anterior.....	130
Figura 80 - Forma de leito de crista barcanóide e estratificação cruzada acanalada (a). Padrão de interferência da estrutura com o plano horizontal (b).	131
Figura 81 - Vetor de migração (V), dispersão do sentido de mergulho dos eixos de estratificação (EX) e orientação dos eixos das superfícies de truncamento (ST), referentes a forma de leito de crista barcanóide da figura anterior.....	132
Figura 82 - Seção geológica simulada pelo programa do <i>FPSM</i> , mostrando a geometria deposicional da Formação Açu.....	134
Figura 83 - Seção geológica simulada pelo programa do <i>FPSM</i> , mostrando a geometria deposicional da Formação Sergi.....	135

- Figura 84 - Gráficos de (A) tempo x profundidade para a sedimentação da seqüência deposicional da Formação Sergi simulada pelo *FPSM*; (B) posicionamento sucessivo dos canais fluviais ao longo do preenchimento sedimentar da mesma seqüência 136
- Figura 85 - (A) Variogramas vertical e horizontal do sistema de canal - planície de inundação da Formação Açu, simulado pelo *FPSM*; (B) Variogramas vertical e horizontal do sistema de canal - planície de inundação da Formação Sergi, simulado pelo *FPSM*..... 137

LISTA DE ANEXOS

Anexo 1 - Metodologia de descrição de afloramentos para levantamento de dados de geometria de fácies.	155
Anexo 2 - Parâmetros estatísticos da variável espessura de fácies das Formações Monte Alegre, Açú e Sergi	156
Anexo 3 - Dados seqüenciais das fácies das Formações Monte Alegre, Açú e Sergi segundo a profundidade dos testemunhos	158
Anexo 4 - Arquivos de saída do programa de Wells (1989) para seqüências de Markov - Formação Sergi	168
Anexo 5 - Arquivos de saída do programa de Lefever (1990) para seqüências de Markov - Formação Sergi	172
Anexo 6 - Arquivos de saída dos programas de Fernandes & Lanzarini (1993) para análise e simulação de seqüências de Markov - Formação Sergi	178
Anexo 7 - Programa para ler uma imagem binária do SITIM, gerando como saída arquivo no formato GEOEAS	187
Anexo 8 - Dados dos poços da área do Projeto Piloto do Campo de Dom João	190
Anexo 9 - Arquivos de saída do programa de Mackey e Bridge (1992) de simulação de seqüências aluviais - Formação Sergi	191
Anexo 10 - Rotina para transformar uma matriz gerada no FPSM em um arquivo de dados no formato GEOEAS	205

1. Introdução e Objetivos

1.1. Fácies Sedimentares e Reservatórios de Hidrocarbonetos

Reservatórios de hidrocarbonetos são constituídos por unidades de rochas (na grande maioria dos casos, fácies sedimentares de sistemas deposicionais siliciclásticos e carbonáticos) com espaço poroso saturado de óleo ou gás natural, e permeabilidade favorável ao fluxo fluido. Com o alto custo envolvido em muitos dos projetos de desenvolvimento de campos, é de crucial importância a compreensão do arcabouço geológico em que o petróleo é trapeado. O conhecimento da arquitetura do reservatório e a caracterização de suas propriedades físicas formam a base para todos os trabalhos e decisões futuras sobre o mesmo.

Os principais reservatórios presentes nas bacias brasileiras são arenitos e conglomerados turbidíticos do Cretáceo e do Terciário da Bacia de Campos, calcarenitos e calcirruditos oolíticos-oncolíticos de barras de plataforma da Formação Macaé, do Albiano, também da Bacia de Campos, e arenitos fluviais, eólicos, flúvio-eólicos e flúvio-transicionais das Bacias do Recôncavo, Potiguar e Sergipe-Alagoas, entre outras. No Brasil, os reservatórios fluviais e eólicos conhecidos contêm, após os reservatórios turbidíticos, o segundo maior volume original de hidrocarbonetos, cerca de 15%. Pesquisas voltadas para a geometria e as heterogeneidades de reservatórios, e projetos decorrentes, têm possibilitado o aumento das reservas atuais, tanto por uma melhor apropriação do volume original, quanto pelo aumento do fator de recuperação.

A geometria tridimensional dos reservatórios é definida pela distribuição lateral e vertical de fácies sedimentares, de fases diagenéticas, e de feições tectônico-estruturais, as quais geram heterogeneidades em suas várias escalas de observação, de giga a microscópica (figura 1). Enfatizam-se, no estudo da geometria de reservatórios, as escalas de mega a macroscópica, que mostram preferencialmente as fácies e suas associações. Deste modo, o estudo de sistemas deposicionais modernos e antigos constitui a base para a definição da geometria de reservatórios.

Nos reservatórios, as variações faciológicas verticais podem ser estudadas continuamente através de perfis geofísicos dos poços perfurados e da amostragem direta de rochas (amostras de calha e testemunhos de sondagem). Contudo, um dos principais problemas para a modelagem de reservatórios consiste na variação lateral das características petrológicas e petrofísicas nas escalas de heterogeneidades de macro a megascópicas, ou seja, nos espaços interpoços das malhas de exploração (Becker *et al.*, 1991). A sísmica de reflexão 3D de alta resolução (Carvalho & Amorim, 1991), embora já tenha demonstrado potencial para a resolução de geometrias externas em escala megascópica, ainda não permite detectar geometrias internas, em escala macroscópica.

Figura 1 - Escalas de observação da geometria de reservatórios, exemplificadas a partir de depósitos fluviais. Segundo Dreyer *et al.* (1990).

A sedimentologia aplicada à geologia de reservatórios deve procurar, além da caracterização faciológica e do ambiente deposicional, descrever e modelar (modelos geológicos-conceituais e geomatemáticos) o arcabouço arquitetônico-estratigráfico dos depósitos sedimentares através do estudo de afloramentos, e de uma detalhada correlação entre poços em subsuperfície. O conhecimento da geometria das unidades genéticas, fácies sedimentares e associações, constitui uma meta a ser alcançada.

1.2. Objetivos

A finalidade deste trabalho é de determinar as fácies sedimentares e estabelecer modelos deposicionais e geomatemáticos de sistemas fluviais e eólicos, que permitam caracterizar qualitativa e quantitativamente as seqüências deposicionais, verticais, no plano, ou em 3D, mostrando as relações espaciais entre as fácies sedimentares. O conhecimento da geometria deposicional de fácies e associações faciológicas, além de ser objeto de estudo da sedimentologia e da estratigrafia, tem importância fundamental para projetos de avaliação e desenvolvimento de campos de petróleo.

Neste estudo, são utilizados dados de afloramentos, testemunhos e perfis geofísicos de poços de três unidades estratigráficas de bacias brasileiras, que constituem reservatórios de petróleo. A Formação Sergi na borda Oeste da Bacia do Recôncavo, de origem flúvio-eólica, é o principal objeto de estudo. Ocorre em subsuperfície em toda a bacia, constituindo o principal reservatório de petróleo do Recôncavo, e aflora predominantemente na borda ocidental, apresentando excelentes exposições para o estudo de geometria fluvial e eólica.

A Formação Monte Alegre na área do Juruá, Bacia do Solimões, de origem desértica, e a Unidade Açu-3 da Formação Açu, Bacia Potiguar, de origem fluvial, são utilizadas de modo complementar, principalmente para comparação com a Formação Sergi, na definição de modelos geológicos e geomatemáticos.

Os resultados obtidos através da descrição e modelagem geológica são tratados quantitativamente. Em princípio, métodos estatísticos básicos são utilizados para a representação da variável espessura de fácies. Seqüências verticais de fácies, em 1D, são analisadas como processos cíclicos (Cadeia de Markov). Os métodos geoestatísticos de variografia e simulação condicional de variáveis categóricas são utilizados para modelar a distribuição de fácies em uma, duas e três dimensões. Modelos determinísticos também são aplicados para a simulação de fácies e seqüências estratigráficas.

O quadro apresentado pela figura 2 resume os dados utilizados, os métodos aplicados e os resultados que se pretende alcançar, em suma, objetivos deste estudo.

		FORMAÇÕES		
		MONTE ALEGRE	AÇU	SERGI
DADOS	TESTEMUNHOS	13 poços (~ 300 metros)	1 poço (~ 70 metros)	2 poços (~ 400 metros)
	PERFIS	RG	RG	RG
	AFLORAMENTOS	-----	03 AFLORAMENTOS	06 ÁREAS (~20 AFLS.) 400m seq.
MÉTODO GEOLÓGICO	ANÁLISE DE FÁCIES E DE AMBIENTES	05 FÁCIES SISTEMA DESÉRTICO	04 FÁCIES SISTEMA FLUVIAL	05 FÁCIES SISTEMA FLÚVIO-EÓLICO
MÉTODOS GEOMATMÁTICOS	PROBAB.	SEQUÊNCIA DE MARKOV	X	X
		ENTROPIA	X	X
		SIMULAÇÃO 1D - MARKOV	X	X
	DET.	GEOESTATÍSTICA	VARIOGRAFIA E SIMULAÇÃO 1D, 2D	VARIOGRAFIA E SIMULAÇÃO 1D, 3D
		FORMAS DE LEITO	X	X
		SEQUÊNCIAS ALUMAIS	-----	X
RESULTADOS	MODELOS DE FÁCIES	1D, 2D, 3D	1D, 2D, 3D	1D, 2D, 3D
	GEOMETRIA DEPOSICIONAL	1D, 2D, 3D	1D, 2D, 3D	1D, 2D, 3D
	COMPARAÇÕES ENTRE AS UNIDADES ESTRATIGRÁFICAS	X	X	X

Figura 2 - Dados, métodos e resultados almejados por este estudo

2. Trabalhos Anteriores e Estado da Arte

2.1. Fácies, Modelos e Simulações

A definição de fácies sedimentares de Gressly (1838) como a soma das características litológicas e paleontológicas de uma unidade deposicional, reflete de modo geral o seu uso moderno. Fácies são definidas com base em combinações distintas dos parâmetros geometria, litologia, cor, estruturas sedimentares, paleocorrente e conteúdo fossilífero.

O método da análise faciológica envolve a descrição e a classificação das unidades de rochas sedimentares em fácies, seguidas da interpretação dos processos e dos ambientes deposicionais. A interpretação do ambiente é baseada no modo como as fácies estão associadas (associação de fácies), nas seqüências verticais e na distribuição lateral, enfim, no registro sedimentar tridimensional. Assim, a visão do contexto deposicional, ou visão sistêmica, é fundamental para a análise faciológica (Della Fávera, 1988).

Aplica-se a Teoria Geral dos Sistemas (Von Bertalanffy, 1968) ao estudo de sistemas deposicionais. Sistema é um conjunto de componentes e/ou processos inter-relacionados dinamicamente. Existe um estado de inter-relação e interdependência essencial de todos os fenômenos de um sistema. Sistema deposicional é um conjunto de fácies, processos e ambientes ou subambientes inter-relacionados dinamicamente.

A utilização de sistemas deposicionais começou a partir do final da década de 60. Sua concepção baseou-se, fundamentalmente, na Lei de Correlação de Fácies de Johannes Walther (Walther, 1894, *apud* Middleton, 1973), sendo sua interpretação feita principalmente com base em seqüências identificadas em perfis geofísicos de poços e em seções sísmicas. Na década de 70, incorporaram-se a esta sistemática os modelos de fácies (*facies models* - Walker, 1979), ou modelos deposicionais, e ainda a estratigrafia de seqüências. Na década de 80, novos conceitos, como o de "sedimentação episódica", além de um refinamento dos modelos (Walker, 1984) permitiram o aperfeiçoamento do método.

Modelos deposicionais, gerais ou específicos, modernos ou antigos, mais amplos ou restritos em nível de escala, podem e devem ser criados ou aperfeiçoados. O conceito de modelo é o de um sistema artificial, desenvolvido para representar as características principais de um sistema real, e utilizado para fins de classificação, comparação e interpretação. A utilidade de qualquer esquema de classificação depende de sua habilidade para englobar e resumir uma vasta quantidade de informação em poucos

termos ou figuras, de sua reprodutibilidade e capacidade de predição, e ainda de ser aceitável pela maioria das pessoas interessadas no assunto.

Os modelos podem ser classificados em conceituais, físicos e matemáticos (figura 3). Geólogos têm trabalhado há décadas mais predominantemente com modelos conceituais, em menor número com modelos físicos, e menos ainda com modelos matemáticos. Contudo, com o desenvolvimento de computadores e de microcomputadores, e, mais recentemente, de *workstations*, é notório o desenvolvimento de modelos matemáticos em pesquisa básica, e sobretudo em pesquisa aplicada, visto que permitem uma maior comunicação e integração ao processo de desenvolvimento tecnológico quando comparados aos modelos puramente conceituais.

Os modelos matemáticos são abstrações dos sistemas reais em que os componentes, os eventos e as interações são representados por uma ou mais expressões matemáticas contendo variáveis, parâmetros e constantes. Incluem modelos estatísticos (probabilísticos) e determinísticos, que diferem entre si pela presença ou ausência de variáveis aleatórias. Portanto, uma expressão matemática envolvendo uma ou mais variáveis aleatórias é um modelo estatístico.

A opção de trabalhar com modelos conceituais, físicos ou matemáticos depende das necessidades e da potencialidade dos modelos. Um dos benefícios da aplicação de modelos matemáticos é que permitem a simulação numérica em computador. A simulação é uma técnica que envolve: (a) a criação de um modelo de um sistema real; (b) a realização de experimentos sobre o modelo. A simulação em computador pressupõe a criação de um modelo matemático, probabilístico ou determinístico. Tais modelos matemáticos podem ainda representar uma ou mais condições do sistema, no tempo ou no espaço; portanto, podem ser ainda classificados em modelos estáticos ou dinâmicos.

Nota-se um crescente interesse na utilização de modelos matemáticos em geologia. Em muitos trabalhos recentes, modelos geológicos e geomatemáticos vêm sendo utilizados de forma a se complementarem, gerando dados com potencialidade de serem incorporados um ao outro, e contribuindo para o melhor entendimento do objeto em estudo.

2.2. Modelos Geológicos-Deposicionais Fluviais e Eólicos

Modelos geológicos de sistemas deposicionais fluviais e eólicos-desérticos têm sido desenvolvidos e aperfeiçoados desde o aparecimento da metodologia de análise faciológica, no final dos anos 60.

Figura 3 - Classificação dos modelos conceituais, físicos e matemáticos. Segundo Bettini (1989), baseado em Harbaugh & Bonham-Carter (1970). A solução exata é uma solução analítica, determinística, dada por uma função geralmente restrita para descrever o fenômeno. A simulação determinística é uma solução numérica baseada em equações diferenciais. A simulação estocástica é realizada a partir de um modelo estatístico.

2.2.1. Sistema Fluvial

Nos sistemas fluviais a distribuição de fácies e sua arquitetura são determinadas primariamente pela geometria e dinâmica dos segmentos do canal. Os canais fluviais (e os sistemas associados) podem ser classificados segundo a morfologia em planta do canal, basicamente a sua sinuosidade, e segundo a sua complexidade, na forma de um canal simples ou de canais compostos (*braiding parameter* de Rust, 1978). Caracterizam-se, assim, os padrões extremos de uma série contínua de elementos, a saber, canais retilíneos, meandantes, entrelaçados e anastomosados.

Schumm (1972, 1981) classifica os canais aluviais segundo a carga sedimentar, em canais com carga de fundo (areia e cascalho), carga mista e carga em suspensão (silte e argila). Esta classificação está baseada nas relações existentes entre a carga sedimentar, a morfologia dos canais e os processos deposicionais e erosionais. Galloway (1977), utilizando estes critérios, mostra as características destes três sistemas - carga de fundo, mista, e em suspensão (Figura 4).

Tyler & Finley (1990) relacionam os modelos extremos de sistemas fluviais de carga de fundo e carga em suspensão respectivamente aos padrões entrelaçado e meandrante, os quais caracterizam, através de um dos primeiros e mais conhecidos conjuntos de modelos gerais para sistemas fluviais, os de Brown *et al.* (1973). O sistema de carga mista ou sistema meandrante de granulometria grossa (*coarse-grained meanderbelt system*) é um tipo intermediário, bem documentado e estudado em sistemas recentes.

Rust & Koster (1984) apresentam dois modelos para rios entrelaçados, um modelo proximal, dominado por cascalho e associado a leques aluviais, e outro distal, dominado por areia e presente nas planícies aluviais. Os modelos fluviais de Walker & Cant (1979, 1984) estão entre os mais detalhados. O modelo meandrante destes autores está baseado em muitos exemplos modernos e antigos. Como modelo de sequência vertical, apresentam um ciclo ideal de fácies, sumariado a partir de Allen (1970). O modelo entrelaçado destes autores está baseado no sistema recente do *South Saskatchewan*, e apresentam, como modelo de sequência vertical, um ciclo ideal do *Arenito Battery Point*.

No início dos anos 80, o termo anastomosado (*anastomosing*), utilizado por Schumm (1977) para um padrão aluvial de canal múltiplo e carga predominantemente em suspensão, passou a ter conotação de um tipo particular de sistema deposicional fluvial. Smith & Smith (1980) apontam as características do sistema anastomosado: é formado por uma rede de canais interconectados, relativamente profundos e estreitos, retilíneos a sinuosos, em ambiente de baixo gradiente. Os depósitos de canal são arenitos grossos e conglomerados. A planície de inundação, os diques marginais aos canais e as barras estáveis (ilhas vegetadas) são formados por sedimentos de granulação fina (silte e argila).

TIPO DE CANAL	COMPOSIÇÃO DO SEDIMENTO	GEOMETRIA DO CANAL			GEOMETRIA INTERNA		RELAÇÕES LATERAIS
		SEÇÃO	MAPA	ISÓLITAS DE AREIA	2D	SEQ. VERT.-1D	
CANAL DE CARGA DE FUNDO	DOMINANTEMENTE AREIA	ALTA RAZÃO LARG./PROF.	ENTRELAÇADO BAIXA SINUOSIDADE	CINTURÃO CONTÍNUO
CANAL DE CARGA MISTA	AREIA, SILTE E ARGILA MISTURADOS	MÉDIA RAZÃO LARG./PROF.	SINUOSO	CINTURÃO ESTREITO
CANAL DE CARGA EM SUSPENSÃO	DOMINANTEMENTE SILTE E ARGILA	BAIXA RAZÃO LARG./PROF.	ALTA SINUOSIDADE OU ANASTOMOSADO	FAIXA DESCONTÍNUA

Figura 4 - Características de sistemas deposicionais fluviais. Modificado de Galloway (1977).

No sistema anastomosado predomina a aggradação por elevação do nível de base e as ilhas inibem a migração lateral dos canais, resultando na acreção vertical das fácies e do sistema como um todo. Segundo estes autores, um grande sistema de drenagem pode apresentar continuidade a jusante, entre os padrões entrelaçado, transicional e anastomosado.

Smith & Smith (1980) estudaram os rios do Oeste do Canadá (Mistaya, em Alexandra, e Saskatchewan Norte, em Alberta). Outros trabalhos estenderam este modelo a sistemas modernos e antigos (Smith & Putnam, 1980; Rust & Legun, 1983; e Smith, 1983). Walker & Cant (1984) consideram prematura a proposição de um modelo generalizado de sistema fluvial anastomosado com base em poucos exemplos modernos e antigos; contudo, consideram importante ter estes padrões em mente, para futuras interpretações.

Um dos maiores aficcionados por depósitos fluviais sem dúvida nenhuma é A.D. Miall. A sucessão de seus trabalhos nas décadas de 70 e 80 (Miall, 1977, 1978, 1982, 1985) apresenta uma proliferação de modelos fluviais, como se os modelos de outros, já existentes, não fossem suficientes. Esta grande variedade de modelos fluviais acabou por se mostrar inviável, pela excessiva compartimentação produzida.

Com base nos trabalhos de Jackson (1975), que classifica as formas de leito e estruturas em microformas, mesoformas e macroformas, e de Allen (1983), que reconhece a hierarquia de contatos em oito tipos de feições deposicionais fluviais, Miall (1985) propõe uma nova metodologia de análise faciológica aplicada a depósitos fluviais, denominada "Análise dos Elementos de Arquitetura" (*Architectural Element Analysis*).

Esta metodologia vem sendo utilizada em vários estudos, como os de Johnon (1987), Miall (1988), Wood (1989), e Becker *et al.* (1992). O método é muito útil para o estudo da geometria de depósitos fluviais, necessitando, contudo, de boas exposições de fácies, ou de um alto controle em subsuperfície através de grande número de poços testemunhados e/ou com perfis geofísicos.

Harris & Hewitt (1977) mostram três tipos principais de geometrias de depósitos de canais (figura 5a), e Cassey (1980) apresenta padrões geométricos de canais baseados na razão entre largura e espessura do canal (figura 5b). É evidente que nem todas as formas e arranjos de canais enquadram-se nestes modelos. Miall (1985) aponta que modelos relacionando a geometria de um canal individual ativo à geometria de um complexo de preenchimento de canal devem levar em conta a migração lateral do canal e a taxa de subsidência do sistema.

No Brasil, são descritos sistemas deposicionais fluviais do Proterozóico ao Recente, em trabalhos que, em linhas gerais, seguem os modelos de classificação da literatura, mas que apresentam as características próprias de cada sistema e apontam as limitações das classificações. Exemplos são a Formação Açu (Castro & Barrocas, 1981) e

a Formação Itaquaquetuba (Coimbra *et al.*, 1983). Um dos mais completos estudos em sistemas fluviais recentes é o de Stevaux (1993), sobre a gênese, sedimentação e evolução quaternária do curso superior do Rio Paraná.

2.2.2. Sistema Eólico-Desértico

As características faciológicas específicas dos depósitos eólicos não eram bem definidas até meados da década de 70, permitindo constantemente que fossem descritos como depósitos de outros ambientes. Atualmente, descrevem-se detalhes das laminações, incluindo bimodalidade, gradação inversa, ondulas transladantes, ondulas de adesão e estruturas de dissipação, as quais indicam processos eólicos bem definidos.

Glennie (1987) apresenta uma revisão sobre ambientes desérticos modernos e antigos e mostra a distribuição dos depósitos no mundo, segundo o tempo geológico. Fryberger *et al.* (1990) apresentam os últimos avanços no conhecimento da sedimentação eólica, com trabalhos sobre processos, fácies e ambientes desérticos do Recente e do passado.

Na década de 70 e início dos anos 80, desenvolveram-se muitos critérios para o reconhecimento de fácies eólica, e para a sua distinção de depósitos fluviais (Glennie, 1970; Lanzarini *et al.* 1986; Moraes & Gabaglia, 1986). Nos últimos anos, fácies eólicas têm sido reconhecidas em muitas unidades estratigráficas de nossas bacias (Caetano-Chang *et al.*, 1991; Fernandes, 1992; Kattah, 1991; Lanzarini, 1984; Lavina, 1991; Lima Filho, 1991; dentre outros).

O processo e transporte de sedimentos sob regime de ventos aparece quantificado, em detalhe, no trabalho de Bagnold (1941). Dentre os inúmeros trabalhos que enfocam aspectos globais de ambientes desérticos modernos e apontam parâmetros para o reconhecimento de análogos antigos, destacam-se os de Bigarella (1972), Glennie (1970) e McKee (1979). Glennie (*op cit*) estudou os sistemas desérticos do sudeste da Península Arábica e do norte da África. Breed *et al.* (1979) apresentam um estudo regional dos mares de areia (*sand seas*), mostrando mapas elaborados com imagens de satélite de várias regiões desérticas da África, Península Arábica e Ásia.

Num sistema desértico ocorrem zonas distintas, ou subambientes, com diferentes tipos de depósitos sedimentares. Os depósitos de areias eólicas, de dunas, interdunas e lençóis de areia são os mais impressionantes e geologicamente importantes. Seguem os depósitos de *wadis*, os depósitos lacustres e as *sabkhas* e, por fim, os depósitos de *hamada*, *serir* e *loess* (Reineck & Singh, 1980).

Aspectos de geometria de depósitos eólicos, tipos e dimensões de estratificações, arranjos entre fácies de duna e interduna são analisados em detalhe por Kocurek (1986), Porter (1986), Fryberger (1986) e Blakey (1988).

Figura 5 - Padrões da geometria dos depósitos fluviais: (A) segundo Harris & Hewitt (1977), (B) segundo Cassey (1980).

2.2.3. Sistema Flúvio-Eólico

Depósitos eólicos estão freqüentemente associados a fluviais, no Recente e no registro sedimentar, principalmente em sistemas fluviais entrelaçados de clima árido e semi-árido. Embora estes sistemas sejam tratados separadamente na literatura, na verdade sistemas mistos, flúvio-eólicos, são freqüentes. Poucos trabalhos existem sobre tais sistemas, mostrando processos e geometrias originados pela interação dos mesmos.

Langford (1989) descreve os tipos de interações em sistemas flúvio-eólicos recentes: (a) fluxos fluviais dirigem-se para o interior de sistemas eólicos até serem absorvidos ou formarem pequenos lagos; (b) fluxos fluviais erodem dunas e interdunas ao longo de seus canais; (c) o lençol freático controlado pelo sistema fluvial aflora nas interdunas formando pequenos lagos; (d) enchentes inundam o sistema eólico, erodem dunas e depositam sedimentos fluviais e eólicos nas interdunas - planície de inundação, e (e) os ventos retrabalham os sedimentos fluviais, depositando-os na forma de dunas e lençóis de areia, sobre as barras fluviais ou sobre o sistema eólico adjacente. Langford & Chan (1989) aplicam o conhecimento dos processos acima em sistemas antigos, e caracterizam o modelo deposicional flúvio-eólico.

2.3. Modelos Geomatemáticos-Geoestatísticos

O termo "Geomatemática", de origem inglesa, é mais amplo que o termo "Geoestatística", de origem francesa (introduzido por G. Matheron). A Geomatemática abrange uma série de técnicas matemáticas e estatísticas aplicadas às geociências e inclui a Geoestatística, um ramo específico da Estatística Aplicada, que faz uso da Teoria das Variáveis Regionalizadas.

2.3.1. Pequeno Histórico

O livro-texto "*An Introduction to Statistical Models in Geology*" (Krumbein & Graybill, 1965), é considerado o marco-zero da área de geomatemática. Dos anos 66 a 70, edita-se a série "*Computers Contributions*", do *Kansas Geological Survey*, num total de 50 edições. O *AGI (American Geological Institute)* publicou uma bibliografia de estatística aplicada à geologia (Howard, 1968), com mais de uma centena de trabalhos dos anos 36 a 66, listados segundo as técnicas.

Em 1968, forma-se a *IAMG (International Association of Mathematical Geology)*, que edita a revista *Mathematical Geology* a partir de 1969. Vistelius (1969) apresenta resumos comentados de 712 trabalhos em que métodos matemáticos são usados

para a resolução de problemas em vários campos da geologia. Krumbein (1969) classifica os métodos computacionais em geologia segundo as técnicas e os vários campos de aplicação, fornecendo uma lista de 40 importantes trabalhos em geologia. Tendências do uso de análise matemática em geologia são apontadas por Griffiths (1970).

Paralelamente ao desenvolvimento das técnicas geomatemáticas, sobretudo pelos norte-americanos, desenvolve-se na França a Teoria das Variáveis Regionalizadas, de Georges Matheron e seus colaboradores do *Centre de Morphologie Mathématique*, da *École de Mines de Paris, Fontainebleau*. Matheron iniciara seus estudos no fim da década de 50, influenciado por trabalhos anteriores de D. J. Krige (Krige, 1951). A aplicação específica desta teoria em problemas de estimativa de depósitos minerais recebe o nome de geoestatística. Sua aplicação em mineração tem sido em maior número, contudo é crescente sua utilização em hidrogeologia, meteorologia, geologia e engenharia do petróleo, e em muitos outros campos de ciência e tecnologia onde as variáveis possuem dependência espacial ou temporal.

Matheron (1962/1963) publica o *Traité de Géostatistique Appliquée*, base de toda a teoria geoestatística atual. Neste trabalho são formalizados a teoria das variáveis regionalizadas, o conceito e as propriedades do variograma, ferramenta básica da geoestatística que condensa as informações relativas aos aspectos de estruturação da variável, e também a técnica da krigagem. Anos depois, Matheron (1971), apresenta uma revisão aprimorada da teoria geoestatística e das técnicas de estimativa de variáveis regionalizadas.

Journal (1974) fornece uma importante contribuição ao desenvolvimento da teoria geoestatística, mais especificamente no que diz respeito à técnica da simulação condicional, com sua tese de doutoramento, em *Fontainebleau*. O livro *Mining Geoestistics* de Journal & Huijbregts (1978) é uma das mais importantes referências sobre o tema. Mais tarde, já na Universidade de Stanford, Journal e sua equipe aprimoram, num trabalho que continua até a atualidade, a teoria geoestatística aplicada à mineração e à pesquisa e produção do petróleo.

Em 1975 surge o periódico *Computers & Geosciences*, também da *LAMG*, e destinado à publicação de programas de computação aplicados às geociências. Nos últimos anos, vários números deste periódico têm consistido em publicações especiais, temáticas, sobre processamento de imagens, fractais, etc. A publicação 14(6) de 1988 apresenta uma bibliografia sobre aplicação de computadores em geociências abrangendo os anos de 1948 a 1970, elaborada por D.F. Merriam, que observa que a partir dos anos 70 torna-se inviável, senão impossível, um levantamento completo de todos os trabalhos existentes. Observa-se, assim, que o crescimento na utilização de modelos matemáticos em geologia é notável nestes últimos anos.

O *Special Review Issue* do *Computers & Geosciences* 17(8), de 1991, apresenta revisões de artigos segundo alguns campos da geologia. Nesta oportunidade, Agterberg & Griffiths (1991) apontam tendências no uso de técnicas quantitativas e suas aplicações e fazem a revisão bibliográfica de trabalhos publicados nos dois anos anteriores, sobre o uso de computadores em lito e bioestratigrafia, listando cerca de duas centenas de trabalhos. Como metodologias, estes autores destacam a geoestatística e os fractais, com modelos e simulações aplicados à sedimentologia e estratigrafia.

Retomando sua tradição nesta área do conhecimento, o *Kansas Geological Survey* realizou uma conferência em Outubro de 1989 intitulada "*Sedimentary Modeling: Computer Simulations of Depositional Sequences*" (Franseen *et al.*, 1991). Neste evento foram apresentados muitos trabalhos enfatizando técnicas de modelagem quantitativa sedimentar e simulação de seqüências estratigráficas, principalmente em sistemas deposicionais de margens continentais siliciclásticas e plataformas carbonáticas.

O Projeto "*Fault Dynamics*", que vem sendo desenvolvido no Departamento de Geologia da Universidade de Londres desde 1990, visa a modelar processos tectônicos e de sedimentação de origem e evolução de bacias (Willacy *et al.*, 1993). Dentre os resultados já alcançados, tem-se o desenvolvimento de alguns programas para simulação bidimensional (Waltham, 1992; Hardy & Waltham, 1992).

2.3.2. Aplicações em Sedimentologia e Estratigrafia

A descrição quantitativa (dimensões) de formas de leito, estruturas sedimentares primárias e corpos deposicionais como barras fluviais é também uma preocupação antiga. Parâmetros quantitativos e seus relacionamentos matemáticos são utilizados para descrever desde pequenas ondulações até dunas, ou mesmo para discriminar formas subaquosas de eólicas. Em 1987, a *SEPM* promoveu um simpósio sobre formas de leito e estratificações que resultou num esquema de classificação (figura 6) baseado principalmente nas dimensões e morfologias das estruturas (Ashley, 1990).

Uma tendência atual é a implementação de técnicas computacionais de aquisição e manipulação de parâmetros faciográficos de campo ou de laboratório, com o objetivo de otimizar esta atividade. Golbery & Winikoff (1986) apresentam um sistema de processamento de dados sedimentológicos de campo. As técnicas de processamento digital de imagens, hoje com sistemas bastante desenvolvidos para escalas megascópicas (imagens de satélite) e microscópicas (seções-delgadas) devem, em breve, estar disponíveis para trabalhos em escala de afloramento e de testemunho de sondagem na caracterização de fácies sedimentares.

A metodologia mais difundida para análise quantitativa de seqüência de fácies é a Cadeia de Markov¹, que constitui um processo matemático probabilístico (estocástico) que permite modelar as seqüências deposicionais por meio da construção da matriz de probabilidades de transição.

Esta metodologia desenvolveu-se e tem sido aplicada em caráter predominantemente unidimensional, em seqüências verticais de fácies (Krumbein, 1967; Krumbein & Dacey, 1969; Selley, 1970). Lin & Harbaugh (1984) estendem para duas e três dimensões o uso de modelos do tipo Markov em geologia. Os resultados obtidos no plano (2D) são satisfatórios, com potencialidade de aplicação em vários casos, como em seções-delgadas, mapas e seções geológicas, entre outros. Em 3D, embora tenham demonstrado a existência de processos do tipo Markov no espaço, as figuras simuladas não mostram resultados satisfatórios, apontando para a necessidade de pesquisas mais acuradas.

Modelos estatísticos de distribuições de fácies sedimentares em 2D e 3D podem ser gerados por simulação estocástica, através de números aleatórios (Haldorsen, 1983; Souza, 1987). Uma metodologia mais adequada para modelagem quantitativa de distribuições espaciais de fácies, por reproduzir a variabilidade espacial dos dados, ou as tendências (*trends*), é a Simulação Condicional (Matheron, *et al.*, 1987; Souza *et al.*, 1988), oferecida pela Geoestatística, a Teoria das Variáveis Regionalizadas.

A simulação da tectônica e da sedimentação de bacias com o uso de computadores e com base em modelos determinísticos alcança na atualidade um nível elevado de sofisticação. Uma das razões para isto é que bacias sedimentares podem ser consideradas como sistemas fechados que produzem condições favoráveis para o gerenciamento de dados, modelagens e simulações. Alguns exemplos de realizações nesta área são: (a) simulações de sedimentação siliciclástica, carbonática e evaporítica; (b) simulação de subsidência térmica, compactação, e maturação da matéria orgânica para a predição da ocorrência de hidrocarbonetos; (c) modelagem de processos diagenéticos (dissolução, transporte e cimentação, com balanceamento de massa); (d) simulação de processos tectônicos e sedimentares desde a origem até o completo preenchimento sedimentar de bacias.

¹Derivado do matemático russo que estabeleceu este conceito no início do século.

Esquema de classificação recomendado pelo
SEPM Bedforms and Bedding Structures Research Symposium

DIMENSÕES (metros)

forma de leito ou estrutura:	pequena	média	grande	muito grande
comprimento (L):	0.6-5	5-10	10-100	> 100
altura (H): ($H=0.0677L^{0.8098}$)	0.075-0.4	0.4-0.75	0.75-5	> 5

FORMA

bidimensional - **2D**

tridimensional - **3D**

Figura 6 - Classificação das formas de leito (segundo Ashley, 1990).

3. Metodologias

3.1. Modelos Geológicos

Geometria e heterogeneidades em escala mega a macroscópica são estudadas, integrando trabalhos de campo em afloramentos, aos dados de subsuperfície, testemunhos e perfis geofísicos de poços.

3.1.1. Afloramentos

Para a descrição de afloramentos que mostram boas exposições de padrões geométricos de fácies e associações faciológicas, emprega-se a "metodologia do zum" (Della Fávera, 1990), ou o "método telescópico" (Castro, 1986), isto é, o encadeamento ordenado dos dados, partindo-se do geral para o detalhe (anexo 1). Neste trabalho enfatiza-se o levantamento das características geométricas dos depósitos.

3.1.2. Testemunhos

A metodologia empregada para a descrição de testemunhos de poços pode ser denominada de Análise Sequencial de Testemunhos, que consiste na descrição detalhada, escalas 1:20, 1:50, 1:200, etc, das fácies sedimentares, representando a seqüência em diagrama (profundidade x granulometria), e fazendo a correlação em profundidade com perfis geofísicos de poços, e também com outros dados de laboratório, parâmetros petrofísicos, seção delgada, etc.

3.1.3. Perfis Geofísicos

Perfis geofísicos de poços são ferramentas indiretas de avaliação de características petrológicas que fornecem parâmetros quantitativos de propriedades como resistividade, radioatividade e densidade (Schlumberger, 1972). São freqüentemente utilizados em estratigrafia e sedimentologia, de modo qualitativo, para correlação rocha-perfil e para a interpretação de sistemas deposicionais (Serra, 1985), como também em estudos de estratigrafia e tectônica de bacias (Serra, 1986). Neste trabalho, os perfis geofísicos são utilizados de modo qualitativo, quando correlacionados com as fácies sedimentares, e para a identificação de fácies em poços não testemunhados.

3.2. Modelos Geomatemáticos

No estudo de fácies sedimentares de reservatórios, a atenção está voltada para as técnicas quantitativas que permitem modelar e simular distribuições em 1D (seqüências verticais), 2D (seções estratigráficas e mapas paleoambientais) e principalmente em 3D (arcabouço estratigráfico tridimensional), nas escalas de mega a macroscópicas.

Dentre os métodos que podem ser empregadas para modelar e simular seqüências em 1D, 2D e 3D destacam-se os seguintes: (1) processos markovianos (Seqüência de Markov); (2) simulação condicional de variável regionalizada (Journel, 1989); (3) processos determinísticos. Todos eles foram aplicados aos dados deste estudo. Centros de Pesquisa e Desenvolvimento das companhias de petróleo, e convênios de P&D com universidades na área de sedimentologia e caracterização de reservatório, têm originado vários projetos e trabalhos de pós-graduação, predominantemente na área de geoestatística aplicada ao estudo de geometria de fácies e propriedades de reservatórios (Ferreira, 1988; Souza, 1988, Baldissera, 1992; Beraldo, 1993). Muitos destes trabalhos tratam da Simulação Condicional, de variáveis discretas e contínuas.

3.2.1. Processos Markovianos

De um modo conceitual, pode-se considerar a existência de um espectro de modelos matemáticos que inclui desde os modelos determinísticos clássicos a modelos puramente aleatórios, que consideram os eventos independentes. Dentro deste espectro o modelo de Markov ocupa uma posição intermediária, de dependência parcial. Contudo, existe um elemento de probabilidade nos modelos markovianos que impede a predição exata de eventos futuros, estando eles, portanto, muito mais próximos aos modelos completamente aleatórios.

Num sistema em que ocorre uma sucessão de estados, o grau de dependência de um dado estado em relação aos estados anteriores é comumente expresso em termos de "memória". Neste sentido, modelos determinísticos têm memória longa, modelos markovianos de primeira ordem têm memória curta, e processos puramente aleatórios não têm memória.

Uma seqüência finita de experimentos, em que cada experimento tem um número finito de resultados, com uma dada atribuição de probabilidade, é chamada de processo estocástico (Lipschutz, 1972). Quando, no processo estocástico, a probabilidade de ocorrência de um evento está associada ao evento imediatamente anterior (primeira ordem), ou a eventos anteriores (demais ordens), tem-se um processo do tipo Markov.

De acordo com Krumbein (1967), modelos de Markov têm sido utilizados por geólogos desde meados da década de 50. Estes modelos baseiam-se no fato de que os eventos naturalmente aleatórios podem exibir uma memória curta, isto é, um evento é influenciado por um ou mais eventos anteriores, ou ainda, a probabilidade de ocorrer um dado evento em um dado tempo ou lugar está associada ao evento ou eventos anteriores. Descrições e aplicações de processos markovianos em geologia são fornecidas em um grande número de artigos (Carr *et al.*, 1966; Krumbein, 1967; Krumbein, 1968; Gingerich, 1969; Dacey & Krumbein, 1970; Seley, 1970; Mail, 1973; Ethier, 1975; Hattori, 1976; Carr, 1982; Powers & Easterling, 1982; Wells, 1989; Lefever, 1990) e livros-texto (Harbaugh & Bonham-Carter, 1970; Agterberg, 1974; Schwarzacher, 1975; Lin & Harbaugh, 1984).

As mudanças de litologias ou fácies numa sequência observada em um afloramento ou testemunho de sondagem, podem ser resumidas numa matriz de transições (M_{ij}), onde o elemento da linha i e coluna j representa o número de transições em direção ao topo da sequência, da fácies i para a fácies j (figura 7).

Existem dois métodos para se determinar a sequência de litologias ou fácies. O primeiro (*non-embedded Markov chains*) é aquele em que as observações são feitas a intervalos regulares de espessura. Este método possui a vantagem de que os elementos da diagonal principal da matriz de transição guardam informação sobre as espessuras das camadas, favorecendo posteriores procedimentos de simulação de sequências. Mas uma desvantagem é que os números de transições observadas dependem do intervalo de amostragem. Se este intervalo for muito pequeno, as frequências da diagonal principal tendem a ser muito grandes. Deve-se, portanto, escolher intervalos de amostragem adequados para registrar todas as transições significativas da sequência, mas que também não produzam um aumento exagerado dos elementos da diagonal principal.

No segundo método (*embedded Markov chains*) não são feitas as observações a intervalos regulares de espessura, registrando-se apenas as transições de uma para outra litologia ou fácies. A matriz de transição resultante deste método possui os elementos da diagonal principal iguais a zero, e assim, não contém informação relacionada à espessura das camadas.

Há na literatura sobre este tema uma grande discussão sobre a necessidade e a validade de se aplicarem métodos de testes de propriedades markovianas. No estudo de sequências sedimentares continentais, fluviais e eólicos, com padrão reconhecidamente cíclico de seus depósitos, onde o mecanismo essencial é autocíclico, induzido pela forte dinâmica do sistema, esta discussão passa a ser irrelevante, pois a sequência certamente possui memória dos estados anteriores, isto é, o processo markoviano está presente.

Figura 7 - Sequência vertical de camadas simulada por processos de Markov. Modificada de Carr *et al.* (1966).

3.2.2. Geoestatística

O tema geoestatística pode ser dividido em três grandes tópicos, a saber: variografia, krigagem e simulação condicional. A variografia compreende o estudo e a interpretação dos variogramas e de suas propriedades. A krigagem e a simulação condicional são técnicas de análise geoestatística que, além de honrarem os dados experimentais, levam em conta a estruturação da variável regionalizada. Quando o objetivo de um certo estudo é a obtenção de uma estimativa com variância mínima, a krigagem é a técnica mais indicada. Por outro lado, quando se pretende obter a variabilidade real do parâmetro estudado, a simulação condicional é a técnica apropriada.

3.2.2.1. Variografia

O variograma é uma função que fornece a variabilidade espacial da variável regionalizada $Z(x)$ (figura 8). Variáveis regionalizadas são aquelas que apresentam duas características aparentemente contraditórias, mas que se complementam - aleatoriedade e estruturação ou dependência espacial.

Além do variograma tradicional, existem outras funções similares de medida da variabilidade e/ou continuidade entre atributos em diferentes pontos, ou entre diferentes atributos, a saber: variograma cruzado, covariância, correlograma, variograma relativo, variograma do logaritmo, dentre outras (Deutsch & Journel, 1992).

Uma variável regionalizada pode ser representada por seu variograma experimental, obtido a partir do conjunto de amostras, ou através de um modelo teórico, que é obtido por ajuste do experimental. Existe uma série de modelos teóricos de variogramas (Deutsch & Journel, *op cit*), sendo os mais comuns os modelos esférico e exponencial:

MODELO ESFÉRICO:

$$\gamma(h) = c \left(3h/2a - h^3/2a^3 \right) \quad \text{para } h \leq a$$

$$\gamma(h) = c \quad \text{para } h \geq a$$

MODELO EXPONENCIAL:

$$\gamma(h) = C [1 - \exp(-h/a)]$$

Figura 8 - (A) dispersão da variável $Z(x)$ qualquer; (B) função semivariograma mostrando: (a) = alcance, (c) = patamar. O variograma tradicional é estimado pela equação acima, onde: $Z(x_i)$ é o valor da variável no ponto x_i ; $Z(x_i + h)$ é o valor da variável no ponto $x_i + h$; h é o comprimento do vetor distância entre os pontos x_i e $x_i + h$; $N(h)$ é o número de pares de pontos distantes de h ; $\gamma(h)$ é a função semivariograma. Modificado de Souza *et al.* (1989).

onde:

a é a distância no variograma em que as amostras tornam-se independentes uma das outras, sendo chamada de alcance ou raio de influência de uma amostra;

C é o valor da função $\gamma(h)$ a partir do qual a curva é nivelada, sendo denominado de patamar.

Uma interessante propriedade que pode ser demonstrada matematicamente e com inúmeras implicações na análise geoestatística é que o valor do patamar (C) é igual ao valor da variância simples de uma amostra (S^2).

Quando a função variograma depende apenas do comprimento do vetor (h), o modelo é isotrópico; se a mesma depende também da direção, o modelo é anisotrópico.

3.2.2.2. Simulação Estocástica Condicional

Simulação estocástica é um método de realizações alternativas e igualmente prováveis, de conjuntos de variáveis aleatórias que obedecem a um modelo de função aleatória em um campo de interesse (Deutsch & Journel, *op cit*). A variável simulada pode ser contínua, como porosidade, permeabilidade e teor de minério numa jazida, ou discreta, categórica, como fácies, unidades estratigráficas e intervalos de variáveis contínuas. Quando os mapas ou as figuras simuladas honram os dados exibidos nas locações das amostras, a técnica é denominada de simulação estocástica condicional. Simulação sequencial é a simulação ponto a ponto da variável aleatória, considerando, além do modelo de variograma e os dados condicionantes, os dados previamente simulados em suas respectivas locações.

A simulação condicional é realizada em duas etapas. Na primeira, procede-se a uma simulação não condicional da variável, com a imposição do modelo do variograma experimental. Na segunda etapa é feita a condicionalização, de modo que os dados experimentais sejam honrados. A simulação é iniciada com a definição de uma semente para a geração de números aleatórios. Para cada semente definida tem-se uma simulação condicional distinta, sendo possível a obtenção de uma infinidade de realizações, todas com o mesmo variograma, condicionadas aos dados amostrais, e com o mesmo histograma. É justamente o fato da técnica de simulação condicional respeitar o histograma de frequência, que representa a medida de dispersão da variável, que a diferencia da técnica da krigagem. Pode ser provado que a média de uma infinidade dessas simulações é igual à estimativa fornecida pela krigagem (Journel, 1974).

De modo esquemático (figura 9) pode-se comparar a distribuição real de uma variável $Z(x)$ com a estimativa fornecida pela Krigagem $Z_k(x)$, e estas com a estimativa fornecida pela simulação condicional $Z_{sc}(x)$. A krigagem e a simulação condicional respeitam a média, o variograma e os dados experimentais; contudo, enquanto a krigagem fornece uma suavização, a simulação condicional reproduz a variabilidade. Por outro lado, os valores simulados não são os melhores estimadores dos reais. Para a obtenção dos melhores estimadores utiliza-se a krigagem, que atende à condição de variância de estimativa mínima.

3.2.2.3. Variáveis Indicativas

Muitas vezes, torna-se conveniente ou necessário trabalhar em geoestatística com uma variável indicativa (*indicator variable* - também denominada de variável índice), ao invés da variável original. A variável indicativa pode ser definida a partir de uma variável contínua, ou mesmo representar uma característica categórica do objeto de estudo, como uma fácies sedimentar. Pode-se aplicar às variáveis indicativas os mesmos conceitos geoestatísticos dispensados às variáveis contínuas, tais como: média, variância, covariância, variograma e krigagem (Journel, 1989; Beraldo, 1993). A geoestatística de variáveis indicativas considera as informações codificadas como binárias, através de uma função indicativa $I(x;Z_k)$ assim definida:

$$I(x,Z_k) = \begin{cases} 1, & \text{se } Z(x) \leq Z_k \\ 0, & \text{se não} \end{cases}$$

$Z(x)$ é a variável categórica ou fácies conhecida na posição (x) ;

(Z_k) é a (k) fácies presente no intervalo estratigráfico em estudo.

Deste modo, na análise geoestatística (variografia e simulação) de variáveis categóricas - no caso deste estudo, fácies sedimentares - a existência ou não de determinada fácies em um ponto (x_i) em uma dada posição estratigráfica, é indicada respectivamente por 1 (um) ou 0 (zero).

Figura 9 - Comparação de uma função real qualquer, com resultados obtidos pela krigagem e simulação condicional (Ferreira, 1988).

3.2.3. Modelos Determinísticos

Modelos matemáticos determinísticos baseados em parâmetros sedimentares, tais como equações de fluxo, taxas de migração e aggradação do sistema, etc, têm grande potencial para a simulação da geometria deposicional. Rubin (1987a, 1987b) realiza modelagem tridimensional em computador de formas de leito e estruturas sedimentares primárias. Com base em parâmetros quantitativos são geradas superfícies matemáticas que reproduzem as formas de leito, e através de deslocamentos, migrações e superposições destas superfícies, formam-se padrões de estratificação. Nesta técnica, as imagens simuladas são comparadas com estruturas encontradas no campo, e assim, mudando-se parâmetros, por tentativa e erro/acerto, as formas de leito e estruturas naturais podem ser matematicamente reconstituídas (figura 10).

O programa *SEDSIM* (Tetzlaff & Harbaugh, 1989) simula a erosão, o transporte e a deposição de sedimentos clásticos, e tem sido utilizado na tentativa de simulação de sedimentação fluvial. Contudo, os modelos de fluxo e transporte de sedimentos neste programa são muito simples, e não podem simular as disposições das fácies de canais e de transbordamento ao longo do tempo.

O mais detalhado modelo matemático baseado em processo de estratigrafia aluvial publicado até o momento é o *Floodplain Simulation Model (FPSM)*, desenvolvido por Bridge & Leeder (1979). O programa para este modelo foi publicado por Bridge (1979) em *FORTRAN IV*. Mackey e Bridge (1992) apresentam uma revisão deste modelo, aperfeiçoando-o, e o programa em *FORTRAN 77*.

Este modelo leva em conta parâmetros como taxa de aggradação do sistema, dimensões dos canais e da planície de inundação, período de avulção dos canais, compactação, e tectônica. Como resultados das simulações aparecem parâmetros quantitativos da arquitetura aluvial, tais como dimensões dos corpos de arenito (canais) ou de lamito (planície de inundação), proporção entre os depósitos de canais e de planície de inundação, número de canais, número de canais conectados, dentre outros, além de resultados gráficos na forma de seções geológicas transversais às seqüências aluviais simuladas (figura 11).

O programa tem duas opções de saídas gráficas para a apresentação das seqüências simuladas. A primeira, mais rudimentar, mostra um arquivo de linhas normal. A segunda opção utiliza as bibliotecas gráficas do *GKS*, e fornece um resultado mais aprimorado, que é mostrado na figura 11.

Figura 10 - Forma de leito e estrutura sedimentar simuladas pelo programa *BEDFORMS* 2.0.

Figura 11 - Seqüência deposicional simulada, representando a seção vertical transversal de um sistema fluvial, com fácies de canal e planície de inundação. O exagero vertical é de 25 vezes. O período médio de avulsão dos canais é de 445 anos nos três casos. A taxa média de aggradação do sistema é de: (a) 0.02 m/a; (b) 0.01 m/a; (c) 0.005 m/a. Segundo Bridge & Leeder (1979).

4. Unidades Estratigráficas

As unidades estratigráficas objetos deste estudo são a Formação Sergi, Jurássico Superior da Bacia do Recôncavo, a Formação Açu, Cretáceo Superior da Bacia Potiguar, e a Formação Monte Alegre, Carbonífero da Bacia do Solimões (figura 12).

4.1. A Formação Monte Alegre

A Formação Monte Alegre constitui a unidade estratigráfica basal da sequência carbonífero-permiana da Bacia do Solimões (figura 13). Assenta sobre sedimentos devonianos, em superfície discordante, relacionada à orogênese eo-herciniana (Esteves, 1982). Não aflora na bacia do Solimões. Ocorre em subsuperfície na área do Juruá com espessuras entre 47 e 86 metros, distribuindo-se portanto na forma de um lençol de areia (figura 14). É a unidade que contém os arenitos-reservatório das províncias petrolíferas do Juruá e Urucu.

4.1.1. Testemunhos da Formação Monte Alegre

Através da descrição de testemunhos de 11 poços e da análise de seções-delgadas e de perfis geofísicos, Lanzarini (1984) caracteriza as fácies e o sistema deposicional da Formação Monte Alegre na área do Juruá:

Fácies A - arenitos grossos a médios, conglomeráticos, pobremente selecionados (figura 15a), depositados por canais de *wadis*;

Fácies B - arenitos eólicos de dunas e interdunas:

- Subfácies B1 - arenitos bimodais (lâminas alternadas de arenito fino e arenito médio a grosso - figura 15b) com estruturas de queda (*grainfall*) e fluxo de grãos (*grainflow*) formadas na face de avalanche das dunas;

- Subfácies B2 - arenitos finos, argilosos. A fração de argila se distribui entre os grãos do arcabouço da rocha (argila de infiltração) ou concentra-se em lâminas irregulares (figura 15c), na forma de ondulas de adesão (*adhesion ripples*) e estruturas de dissipação (*dissipation structures*) desenvolvidas nas interdunas;

- Subfácies B3 - arenitos muito finos a finos, bem selecionados, com ondulas eólicas e estruturas geradas por ascensão transladante destas ondulas - figura 15d (*climbing transladent stratification*; Hunter, 1977). Tais estruturas são geradas tanto sobre as faces das dunas como nas interdunas secas, sendo melhor preservadas nestas últimas;

Figura 12 - Localização das bacias sedimentares do Solimões, Potiguar e Recôncavo.

CRONOESTRATIGRAFIA			LITOESTRATIGRAFIA						
			FM.	MB.	LITOLOGIA	DESCRIÇÃO	ESPESSURA	SEQ.	
MESOZOICA CENOZOICA	QUATERNÁRIO		SOLIMÕES		ARGILA AREIA	400	I		
	TERCIÁRIO		ALTER DO CHÃO		ARGILA	350			
	K	NEO			AREIA				
J									
R									
PALEOZOICA	P	NEO	ANDARA		SILTITO CALCARENITO, ARENITO	300	II		
		EO-MESO	NOVA OLINDA		CALCARENITO ANIDRITA HALITA	350			
		STEPHANIANO	ITAITUBA		FOLHELHO	500			
		WESTPHALIANO			CALCARENITO ANIDRITA / HALITA				
		NAMURIANO			FOLHELHO / ARGILITO ARENITO / FOLHELHO			50	
	D	FAMENNIANO	CURUA	ORIXIMINA	FOLHELHO ARENITO	50	III		
		FRASNIANO		CURIRI	FOLHELHO DIAMICTITO ARENITO	50			
				BARREIRINHA	FOLHELHO	50			
		EIFELIANO	ERERE		ARENITO SILTITO / FOLHELHO	70			
		GIVETIANO			ARENITO	30			
		MAECURU	SILTITO						
	S	LANDOVERIANO	TROMBETAS		FOLHELHO	50	IV		
	O								
	C	EO (P)	PROSPERANÇA		ARENITO	250	V		
	PRECAMBRIANO				GRANITO, DACITO				

Figura 13 - Coluna estratigráfica da Bacia do Solimões. Modificada de Esteves (1982).

Figura 14 - Bacia do Solimões com curvas de isoespessuras da Formação Monte Alegre e localização das províncias petrolíferas do Juruá e Urucu.

Figura 15 - Fotos de detalhe dos testemunhos dos poços da área do Juruá, mostrando as fácies e subfácies: (a) arenito grosso, conglomerático - fácies A - poço Juruá 1, prof. = 2793,30 m; (b) arenito bimodal, fino e médio a grosso - fácies B1 - poço Juruá 11, prof. = 2233,80 m; (c) arenito argiloso com laminação ondular irregular - fácies B2 - poço Juruá 4, prof. = 2745,90 m; (d) arenito fino com ôndulas transladantes gerando laminação de baixo-ângulo - fácies B3 - poço Juruá 11, prof. = 2247,50 m; (e) arenito muito fino com ôndulas ascendentes - fácies C - poço Juruá 12, prof. = 1802,10 m; (f) lamito com nódulos de anidrita - fácies D - poço Juruá 3, prof. = 2759,20 m.

Fácies C - siltitos e arenitos muito finos, castanho-avermelhados, com laminação plano-paralela e microestratificação cruzada (figura 15e) gerada por ôndulas ascendentes (*climbing ripples*), depositados por processo de suspensão nas margens lacustres, constituindo lobos da desembocadura de *wadis*;

Fácies D - lamitos castanho-avermelhados e cinza-esverdeados, maciços ou interlaminaados com siltitos e arenitos muito finos, depositados em lagos rasos do sistema desértico. Apresentam com frequência níveis com nódulos de anidrita (figura 15f), formados em *sabkhas* marginais aos lagos.

A figura 16 apresenta as seqüências verticais de fácies em alguns dos testemunhos estudados. Os depósitos eólicos são os predominantes, seguidos dos lacustres e de lobos deposicionais. Os arenitos de *wadis* são extremamente raros. Os diferentes tipos de arenitos eólicos, subfácies B1, B2 e B3, aparecem intercalados, formando padrões de ciclicidade atribuídos principalmente a um mecanismo autocíclico, de migração de fácies e subfácies sob condição de taxa de subsidência uniforme da bacia.

4.1.2. Geometria Depositional da Formação Monte Alegre

O modelo deposicional da Formação Monte Alegre na área do Juruá (figura 17) mostra a associação dos depósitos de *wadis*, dunas, interdunas, lagos efêmeros, *sabkhas* e lobos da desembocadura de *wadis*, compondo um sistema deposicional desértico. Este ambiente possui um análogo recente, a região desértica do sudeste da península arábica.

A figura 17 mostra também padrões da geometria do registro deposicional deste sistema, com o predomínio das fácies eólicas, estando as fácies lacustres e de *wadis* intercaladas a estas. Na seção geológica da figura 18 observa-se também a geometria dos corpos lenticulares de lamitos lacustres em meio aos arenitos eólicos, mostrando a inexistência de *markers* na Formação Monte Alegre que permitam uma subdivisão da unidade, ou um zoneamento dos reservatórios na forma de estratos com grande extensão lateral.

Figura 16 - Sequências verticais de fácies de testemunhos da Formação Monte Alegre. As linhas tracejadas indicam intervalos não testemunhados. (a) poço Juruá 1 - note a ocorrência de fácies de *wadis* na base, e de anidrita nodular no topo da sequência; (b) poço Juruá 6 - note o padrão "em caixa" do perfil de raios gama; (c) poço Juruá 5 - note as intercalações de fácies de duna e interduna com baixos valores de raios gama, e intercalações de depósitos lacustres e de lobos de suspensão com tais valores elevados.

MODELO DEPOSICIONAL

Figura 17 - Modelo deposicional da Formação Monte Alegre na área do Juruá. Modificada de Lanzarini (1984) e Sneider *et al.* (1981). O bloco diagrama mostra a geometria dos depósitos, assim como o predomínio de fácies eólicas sobre fácies lacustres e de *wadis* intercaladas.

Figura 18 - Seção geológica da Formação Monte Alegre na área do Juruá. Modificada de Lanzarini (1984).

4.2. A Formação Açu

O Cretáceo Superior da Bacia Potiguar, em sua porção emersa e aflorante, compreende as Formações Açu e Jandaira (figura 19). A Formação Açu é constituída predominantemente por arenitos e lamitos, que formam uma seqüência estratigráfica da ordem de centenas de metros de espessura com padrão de granodecrescência ascendente (*fining upward*), relacionada a um evento transgressivo que culmina com os carbonatos de plataforma da Formação Jandaira. Os depósitos da Formação Açu são de leques aluviais na porção basal, de sistemas fluviais entrelaçado e meandrante constituindo a maior parte da formação, e de sistemas transicionais, estuarino, litorâneo, no seu topo (Castro e Barrocas, 1981).

A Formação Açu aflora em uma faixa de em média 15 Km de largura, na borda da bacia (figura 20), onde recobre o embasamento cristalino com espessuras de cerca de 200 m. Contudo, sua espessura atinge 1000 m na área submersa da bacia. Esta unidade litoestratigráfica contém os principais reservatórios de hidrocarbonetos da Bacia Potiguar, e constitui um importante aquífero da região Nordeste.

A Formação Açu é compartimentada em quatro unidades estratigráficas operacionais (unidades Açu 1 a Açu 4, Vasconcelos *et al.*, 1990; figura 21) identificáveis em perfis de poços e rastreáveis por correlação ao longo de toda a porção emersa da bacia. As unidades Açu 2 e Açu 3 correspondem aos grandes ciclos estratigráficos de cerca de 300 e 200 metros de espessura respectivamente, e apresentam padrão de granodecrescência ascendente. Na base da unidade Açu 3 observa-se a reativação para maior energia do sistema fluvial, possivelmente em decorrência de atividade tectônica na borda da bacia.

Para este estudo foram selecionados os dados de um poço testemunhado no campo de Alto do Rodrigues, e dados de três afloramentos. Tanto a seqüência do testemunho, como a dos afloramentos, correspondem à unidade Açu 3 (Becker *et al.*, 1992). Deste modo, o estudo focaliza apenas os depósitos fluviais, não abrangendo os leques aluviais basais e os depósitos transicionais do topo da formação. A figura 22 apresenta os dados de paleocorrentes da Formação Açu, medidas em *forsets* de formas de leito tridimensionais dos três afloramentos estudados.

Figura 20 - Mapa geológico simplificado da Bacia Potiguar mostrando a faixa de afloramentos da Formação Açú e a localização dos pontos estudados: (1) Serra do Cuó; (2) BR-304, Km 99; (3) BR 304, Km 98.

Figura 19 - Coluna estratigráfica da Bacia Potiguar. Segundo Souza (1982).

Figura 21 - Unidades estratigráficas da parte emersa da Bacia Potiguar, mostrando a compartimentação da Formação Açú em ciclos estratigráficos em escalas de centenas e dezenas de metros de espessura. Modificado de Vasconcelos *et al.* (1990).

Figura 22 - Paleocorrentes da Formação Açu. N (número de medidas) = 30.

4.2.1. Afloramentos da Formação Açu

Afloramento 1 - Serra do Cuó (próximo à cidade de Açu, localidade de Luzeiro, sendo o seu acesso feito por uma variante da rodovia Açu-Macau). Trata-se de uma elevação topográfica de aproximadamente 500 metros de comprimento, 50 metros de largura e 30 metros de altura, com orientação NNE-SSW, e praticamente encoberta por vegetação de cerrado (figura 23). O paredão vertical na porção longitudinal da elevação possui 250 metros de extensão e cinco a dez metros de altura, apresentando pequenas áreas descobertas da vegetação, e assim possíveis de serem analisadas. Ocorrem, predominantemente, fácies de arenito muito grosso, conglomerático, dispostas em camadas de um a dois metros de espessura, com estratificação cruzada acanalada de grande e médio porte (figuras 24a e 24b). As camadas apresentam um pequeno mergulho regional (da ordem de 1,5 graus) para o Norte, centro da bacia, e a paleocorrente coincide com a orientação longitudinal do afloramento, sentido NNE.

Afloramento 2 - Rodovia BR-304 (Mossoró-Natal), Km 99. Possui cerca de 350 metros de extensão e cinco a sete metros de altura, ocupando os dois lados da rodovia. Ocorrem fácies de arenito grosso, conglomerático, com estratificação cruzada acanalada de grande porte, e fácies de arenito médio a fino com cruzadas acanaladas de médio porte e laminação plano-paralela. Camadas de lamitos vermelhos ou interlaminações de lamito e arenito muito fino apresentam superfícies erosivas no seu topo (padrão de corte de canal fluvial, figura 24c), ou distribuem-se como pequenas formas lenticulares (figura 24d). A sequência vertical do afloramento possui cerca de 10 metros de espessura, e está em posição estratigráfica superior à do Afloramento 1, ou, em termos de paleoambiente, em posição distal. A paleocorrente é NNW, e em alguns casos coincide com a orientação da rodovia, expondo o corte longitudinal de formas de leito tridimensionais (figura 25).

Afloramento 3 - Rodovia BR-304 (Mossoró-Natal), Km 98. Possui cerca de 250 metros de extensão e três a sete metros de altura. A sequência vertical aflorante é de 20 metros de espessura. É formado por um ciclo arenoso intercalado a duas camadas contínuas de lamito vermelho (figura 26). Ocorrem fácies de arenitos grossos com cruzadas acanaladas de grande porte, e arenitos médios a finos com cruzadas de médio porte ou maciços, fluidizados. A sequência deste afloramento está, em posição estratigráfica, imediatamente acima da anterior.

(a)

(b)

Figura 23 - Afloramento da Serra do Cuó: (a) fotomontagem mostrando vista longitudinal; (b) vista transversal.

(a)

(b)

(c)

(d)

Figura 24 - Fácies de arenito grosso, conglomerático, com estratificação cruzada acanalada. Afloramento da Serra do Cuó: (a) porção longitudinal; (b) porção transversal; (c) arenito com estratificação cruzada acanalada, de canal fluvial, mostrando superfície de corte, sobre lamitos vermelhos; (d) lente de lamito entre arenito de canal fluvial. BR-304, Km 99.

Figura 25 - Fotomontagem de forma de leito 3D migrando sentido NW. BR-304, Km 99.

(a)

(b)

(c)

Figura 26 - (a) camada de lamito vermelho sobreposta por arenito grosso com estratificação cruzada acanalada. (b) arenito grosso, mostrando a base erosiva do canal fluvial; (c) camada de lamito vermelho sobre arenito fino a médio, maciço. BR-304, Km 98.

4.2.2. Testemunhos da Formação Açú

Onze testemunhos de um poço do Campo de Alto do Rodrigues foram descritos, perfazendo um total de 68 metros de rocha, distribuídos de forma descontínua em 104 metros de espessura da formação (figura 27). Seus intervalos foram correlacionados ao perfil de raios gama e classificados em fácies A, B, C e D, que aparecem descritas abaixo.

Fácies A - arenito grosso, conglomerático, pobremente selecionado, com intraclastos de lamito, e estratificação cruzada acanalada de grande e médio porte. Corresponde a fácies de fundo de canal fluvial;

Fácies B - arenito de granulometria predominantemente média, variando num pequeno ciclo, de grossa a fina, moderadamente selecionado, com estratificações dos tipos cruzada acanalada de pequeno porte, cruzada tabular e cruzada de baixo-ângulo, ou com estrutura maciça devido a escapes de fluido que destruíram as estruturas sedimentares primárias. A origem desta fácies está ligada à migração de formas de leito tridimensionais (dunas subaquosas) em correntes unidirecionais, formando barras unitárias (*units bars*) de canal ou lateral;

Fácies C - arenito de granulometria fina a muito fina, moderadamente selecionados com laminação plano-paralela e cruzada (microlaminação cruzada). Muitas vezes intercalado com lâminas de argila e silte. São fácies finas, relacionadas a processos de tração e suspensão de transbordamento de canal fluvial.

Fácies D - Lâmitos arenosos, castanho-avermelhados, bioturbados (perfurações - *burrows*), e muitas vezes com desenvolvimento de paleossolos.

As fácies mostram associações em seqüências cíclicas predominantemente incompletas (AB, ABC, BCD, etc.), com granodecrescência ascendente. O contato entre as seqüências é muitas vezes abrupto, erosional, com seixos e intraclastos na base da seqüência.

Internamente aos grandes ciclos correspondentes às unidades Açú 2 e Açú 3, individualizam-se no perfil de raios gama e nos testemunhos (figuras 21 e 27) ciclos menores, da ordem de dezenas de metros de espessura (variam de 30 a 70 metros). Eles são separados por camadas de lâmitos arenosos, bioturbados, de aproximadamente cinco metros de espessura.

+2092

Figura 27 - Análise sequencial de testemunhos da Formação Açú, correlacionada ao perfil de raios gama, e com a definição de ciclos estratigráficos em escalas de várias dezenas de metros (1, 2, 3 e 4) e ciclos de cerca de 10 metros de espessura. A descrição dos testemunhos é modificada de Ferreira (1984).

Em continuidade, observam-se ciclos ainda menores, de espessuras da ordem de 5 a 14 metros, separados por camadas de 1 a 2 metros de espessura de lamitos ou arenitos finos, ou camadas interlaminaadas. Tais ciclos são formados por uma ou mais seqüências de fácies completas (ABCD) ou incompletas (ABC, ACD, etc).

Os mecanismos que governam a formação dos padrões de ciclicidade de maior escala, centenas e dezenas de metros de espessura, são alocíclicos, relacionados com o nível de base da bacia, fatores tectônicos e/ou de variação do nível do mar. A ciclicidade de menor escala é de origem autocíclica, relacionada com a dinâmica dos canais fluviais.

4.2.3. Geometria Depositional da Formação Açú

Os mapas de isólitais de arenito (mapas da somatória da espessura de camadas de arenito) mostram padrões dos quais pode-se inferir o posicionamento dos eixos de paleocanais principais ou paleocinturões fluviais (*fluvial belts*), assim como suas dimensões (figura 28). São feições relativamente amplas (2 a 5 km de largura) e rasas (poucas dezenas de metros de profundidade - inferidas a partir das espessuras dos ciclos estratigráficos correspondentes a estes intervalos, em torno de 35 metros). A porcentagem relativa de fácies finas, lamitos e arenitos muito finos de transbordamento de canal, aumenta lateralmente, no sentido do eixo do cinturão fluvial, para suas bordas (figura 28 e 29b). A coalescência lateral entre muitos destes cinturões fluviais desenvolve camadas na forma de lençol, que se estendem por toda a planície aluvial, da ordem de dezenas de quilômetros de extensão (figura 29a). Os lamitos que fecham estes ciclos são formados durante fases de afogamento do sistema, por elevação do nível de base, correspondendo a marcos estratigráficos da bacia.

Os ciclos de escala de metros, a pouco mais de dez metros de espessura, anteriormente descritos (figura 27), são também identificáveis nos afloramentos. Constituem macroformas (Miall, 1985) limitadas na base por superfícies erosivas de 5a. ordem, e no topo por superfícies de 4a. ou 5a. ordem (figura 29b e 29c). São formados por corte e preenchimento de canais que se desenvolvem no interior dos cinturões fluviais anteriormente definidos. A migração dos canais gera corpos lateralmente coalescidos e sobrepostos segundo o mecanismo de sedimentação compensatória. Aplicando-se a mesma relação entre largura e profundidade dos cinturões fluviais (aproximadamente igual a 100) aos canais, estima-se a largura destes últimos da ordem de centenas de metros até um quilômetro. Portanto, nos afloramentos estudados aparecem apenas partes das extensões laterais destes canais. Esta geometria indica canais rasos e largos, de carga sedimentar predominantemente trativa, de fundo.

Figura 28 - Mapas de isólitais de arenito das zonas de produção I (A) e IA (B) do Campo de Alto do Rodrigues. Modificado de Conceição *et al.* (1984). Tais intervalos são equivalentes aos dois ciclos estratigráficos (ciclos 3 e 4) mais espessos e superiores da figura 27.

Figura 29 - Geometria dos depósitos fluviais da Formação Açú em várias escalas de observação, e superfícies limitantes de 3ª a 7ª ordem.

Figura 30 - Modelo deposicional da Formação Açú, Unidade Açú-3. Modificado do modelo fluvial meandrante de granulometria grossa de Brown *et al.* (1973).

No interior destas formas de preenchimento de canal (macroformas), as seqüências verticais e laterais de fácies constituem mesoformas (Miall, 1985) lenticulares e amalgamadas, dispostas também de forma compensatória, e separadas por superfícies de 3a. ordem. Possuem espessuras de poucos decímetros a 2 metros, e extensão lateral de dezenas a poucas centenas de metros (figuras 27 e 29c). Tais lentes são originadas pela migração de formas de leito 3D, que preenchem os canais fluviais. Nos afloramentos observam-se tanto padrões de acreção frontal como lateral nestas mesoformas, indicando a formação de barras em canal e barras laterais. A Figura 28 mostra a geometria deposicional destas formas e as superfícies limitantes, em várias escalas de observação. Como modelo de sistema deposicional adota-se, para a Formação Açu no intervalo estratigráfico estudado, o modelo meandrante de granulometria grossa de Brown *et al.* (1973), que aparece na figura 30, muito embora nem todos os elementos deste modelo tenham sido identificados nos afloramentos estudados, como a presença de diques marginais e de canais abandonados preenchidos por fácies de lamitos. Contudo, a geometria em subsuperfície com intercalações entre os depósitos de canal e de transbordamento, e mesmo a porcentagem relativa entre os mesmos e o perfil vertical ideal de fácies são correspondentes a este modelo.

4.3. A Formação Sergi

A Formação Sergi é a unidade superior da seqüência pré-rifte da Bacia do Recôncavo (figura 31), e constitui o principal reservatório de hidrocarbonetos da bacia. Possui depósitos de um grande sistema fluvial entrelaçado (*braided*), de clima árido a semi-árido (Medeiros & Ponte, 1981).

É formada essencialmente de arenitos, com intercalações de siltitos e lamitos subordinados. Possui extensa e contínua distribuição lateral, com geometria externa, em megaescala, de um corpo tabular suavemente acunhado para leste, com espessura média de 250 metros, estando presente nas bacias do Recôncavo, Tucano, Jatobá, Camamu e Almada. A Formação como um todo constitui uma seqüência estratigráfica com granocrescência ascendente, resultado da implantação de seu sistema aluvial sobre o Lago Aliança, regressivo.

Figura 31 - Coluna estratigráfica da Bacia do Recôncavo (modificada de Vianna *et al.*, 1971).

4.3.1. Afloramentos da Formação Sergi

A Formação Sergi aflora predominantemente na porção sudoeste da Bacia do Recôncavo (figura 32). Desde o término do mapeamento geológico da bacia, no início dos anos 60, não têm sido feitos estudos sistemáticos dos afloramentos das Formações Aliança e Sergi. Contudo, seus afloramentos têm sido continuamente estudados, durante seminários de campo e excursões, com o objetivo de treinamento em sedimentação continental. Inúmeros estudos detalhados de petrologia e diagênese da Formação Sergi vêm sendo realizados a partir de seus testemunhos e seções-delgadas, em projetos de desenvolvimento de campos de petróleo. Uma revisão destes trabalhos aparece em Brunh & De Ros (1987).

O trabalho de campo foi desenvolvido em toda a porção aflorante na região sudoeste da bacia. Os principais afloramentos encontram-se em 6 áreas distintas (figura 32): (1) rodovia BR-101, Km 150 a 140; (2) rodovia BR-324, Km 175 e Km 176; (3) *Canyon* do Rio Sergi, nas proximidades de Santo Amaro da Purificação; (4) margem oeste da Baía de Todos os Santos, na região de Saubara; (5) São Roque do Paraguaçu-Nazaré-Ponte do Funil, na porção sul da Bacia do Recôncavo; e (6) Praia de Gamboa, já dentro da porção norte da Bacia do Camamu.

Toda a área de afloramentos das Formações Aliança e Sergi, nesta borda de bacia, é intensamente cortada por falhas normais de direção geral NNE. Os blocos estruturais mergulham de 10 a 30 graus para SE. No *Canyon* do Sergi e na porção sul da bacia, as camadas são sub-horizontais. A distribuição dos vetores de paleocorrentes indica, em linhas gerais, sentido oeste para as paleocorrentes eólicas, com medidas ocupando todo o semicírculo Oeste, e sentido NE a E para paleocorrentes fluviais (figura 33). A paleocorrente fluvial foi obtida a partir das feições acanaladas muito evidentes e com elevado ângulo de mergulho dos *forsets*. A paleocorrente eólica aparece em alguns dos afloramentos estudados, modificada pelo mergulho estrutural, devido ao baixo ângulo da estratificação dos *forsets* das dunas. Inicialmente foram medidos vetores a SE, os quais, posteriormente corrigidos através do diagrama de Smith-Lambert, resultaram a SW, coincidindo com as medidas em afloramentos sem mergulho estrutural.

(1) BR-101 (entre a BR-324 e a cidade de Alagoinhas)

Sentido NW, da BR-324 em direção a Alagoinhas, ocorrem afloramentos do Grupo Brotas, formações Aliança e Sergi, entre os quilômetros 150 e 130 da BR-101, da borda para o centro da bacia. Esta faixa é constituída por uma série de blocos estruturais escalonados por falhas normais de direção geral NNE-SSW e mergulhos para SE ou NW, que dificultam o estabelecimento da seqüência vertical original. A atitude geral das camadas é NNE-SSW/10-20SE.

Figura 32 - Faixa de afloramentos do Grupo Brotas, Formações Aliança e Sergi com a localização das áreas estudadas: (1) rodovia BR-101, (2) rodovia BR-324, (3) *Canyon* do Sergi; (4) Saubara; (5) Nazaré-S.R. do Paraguaçu-Ponte do Funil; (6) Praia de Gamboa.

Figura 33 - Paleocorrentes das Formações Aliança e Sergi, Bacia do Recôncavo. (A) região ao Norte do Rio Paraguaçu: (::::) - paleocorrentes eólicas, (###) - paleocorrentes fluviais; (B) região ao Sul do Rio Paraguaçu, onde afloram somente fácies eólicas.

A figura 34 mostra as seqüências verticais de fácies dos afloramentos entre os quilômetros 150 e 140. A faixa aflorante restante repete as mesmas fácies. As Formações Aliança e Sergi na BR-101 apresentam, em linhas gerais, associações de fácies lacustres, eólicas e fluviais. Na figura 35 aparece o empilhamento desta seção aflorante, com a correlação entre os intervalos estratigráficos, as associações de fácies e o sistema deposicional correspondente.

Os afloramentos dos kms 150, 149 e principalmente 148 apresentam fácies da Formação Aliança. Ocorrem camadas espessas de lamitos vermelhos maciços e camadas decimétricas destes lamitos intercaladas com arenitos muito finos (figura 36a), constituindo depósitos lacustres, e também camadas decimétricas de arenitos finos, argilosos, associados a espessas camadas de arenitos finos, bem selecionados, localmente bimodais (fino e grosso), com estratificação cruzada acanalada de grande porte, constituindo, respectivamente, fácies de interduna e duna, com estruturas de fluxo e queda de grãos (figuras 36b a 36e).

No Km 145 ocorre a transição Aliança-Sergi, representada pelas fácies de lamitos vermelhos intercalada com arenitos finos, micáceos, com padrão de sigmóide, depositados em frentes deltaicas de pequeno porte (figura 37a). Entre um destes níveis de lamito vermelho e um corpo de arenito com laminação tangencial ocorrem ôndulas truncantes de pequeno porte - tempestitos lacustres (figuras 37a e 37b), resultado do retrabalhamento dos sedimentos por ondas, nas margens do lago Aliança. Tais ondas lacustres podem ter sido induzidas por abalos sísmicos pré-riftes.

Entre os quilômetros 144 e 143 ocorrem três afloramentos com 100 a 200 metros de extensão e cerca de 30 metros de altura, de fácies da Formação Sergi. Também ocorrem camadas de lamitos vermelhos maciços (figura 37c), porém com pouca freqüência, e em geral com espessuras da ordem de decímetros. A associação de fácies predominante é marcada pela intercalação de arenito fino bem selecionado, ou fino e médio a grosso, bimodal, maciços, com feições de deformação (figura 37d), ou com estratificação cruzada acanalada de grande porte (figura 37e), com fácies de arenito fino a muito fino com laminações plano-paralela e de baixo ângulo, ou ainda argiloso, com laminação ondular irregular (figura 37f), caracterizando, respectivamente, depósitos de duna e interduna. Ocorrem ainda camadas métricas de arenitos grossos, conglomeráticos, com seixos de até 2 cm, normalmente formando ciclos grosso a médio, grosso a fino, esverdeados, pobremente selecionados e feldspáticos, com estratificação cruzada acanalada de porte médio, e por vezes também com feições de deformação, constituindo depósitos de barras do sistema fluvial entrelaçado, associado aos depósitos de dunas e interdunas (figuras 38a e 38b).

Figura 34 - Sequências verticais de fácies do Grupo Brotas, levantadas nos afloramentos da rodovia BR-101.

Figura 35 - Empilhamento da seção aflorante do Grupo Brotas, Formações Aliança e Sergi, na rodovia BR-101, mostrando a associação de fácies segundo cada intervalo estratigráfico, e aspectos da geometria deposicional.

Figura 36 - Fácies da Formação Aliança em afloramentos da BR-101, Kms 148 e 149:

- (a) lamitos vermelhos com camadas intercaladas de arenitos finos, lacustres;
- (b) lamitos vermelhos e verdes sobrepostos a arenitos de dunas eólicas com estratificação cruzada acanalada de grande porte;
- (c) fina camada de arenito cinza, argiloso, de interduna, intercalado a fácies de duna eólica;
- (d) detalhe da fácies de interduna da foto anterior, mostrando laminação plano-paralela originada por ondulas eólicas transladantes, e laminação ondular irregular;
- (e) detalhe da fácies de duna eólica mostrando alternância de arenito fino e grosso, bimodal.

(a)

(b)

(c)

(d)

(e)

Figura 37 - Fácies dos afloramentos da BR-101, Kms 145 a 143,5: (a) zona de transição entre as Formações Aliança e Sergi, mostrando da base para o topo, lamitos vermelhos maciços, um intervalo com ôndulas truncantes, e a laminação tangencial na base da camada de arenito fino com geometria de sigmóide - BR-101, Km 145; (b) detalhe da foto anterior mostrando as ôndulas truncantes (foto de Mario S. de Melo); (c) vista geral de um afloramento da base da Formação Sergi, com arenitos fluviais sobre camada de lamito - BR-101, Km 143,8; (d) e (e) arenitos bimodais, eólicos, com feições de deformação originadas por abalos sísmicos - sismitos - BR-101, Km 143,5; (f) fácies de arenito argiloso, de interduna, com lâmina de argila rompida e curvada por processo de ressecamento - BR-101, Km 143,5.

(a)

(b)

(c)

(d)

(e)

(f)

Figura 38 - Fácies dos afloramentos da BR-101, Kms 143,5 a 140,5: (a) e (b) fácies de arenito grosso, conglomerático, de canal fluvial, com estratificação cruzada acanalada de porte médio - BR-101, Km 143,5; (c) acanalamentos da fácies fluvial, vistos em planta - BR-101, Km 141; (d) vista geral de um afloramento de arenito branco, com estratificação cruzada acanalada de grande porte, de dunas eólicas - BR-101, Km 140,5; (e) detalhe da porção superior do mesmo afloramento da foto anterior; (f) maior detalhe do mesmo afloramento mostrando a laminação eólica, bimodal.

(a)

(b)

(c)

(d)

(e)

(f)

A seqüência desta faixa aflorante da BR-101 termina com dois afloramentos, kms 141 (na entrada para Teodoro Sampaio) e 140,5. O primeiro mostra essencialmente camadas métricas de arenitos grossos, conglomeráticos (figura 38c), de canais fluviais. O segundo apresenta estes mesmos arenitos sobrepostos por uma única camada de 30 metros de espessura de arenitos bimodais (fino e grosso), com estrutura de fluxo e queda de grãos, e cruzadas acanaladas de grande porte, de uma grande duna ou de um sistema de dunas (figuras 38d a 38f).

(2) BR-324 - Amélia Rodrigues

Esta é a Rodovia que liga Salvador a Feira de Santana, num percurso de sentido NW. Ocorrem afloramentos do Grupo Brotas entre os quilômetros 75 e 78, nas proximidades de Amélia Rodrigues. Sentido Salvador, ou da borda para o centro da bacia, a rodovia expõe a seqüência Aliança/Sergi (Medeiros & Ponte, 1981), em blocos falhados, com direção variando ao redor do N, e mergulhos estruturais entre 10 e 30 graus para E.

Nos quilômetros 78 e 77 desta rodovia ocorre fácies de arenito fino a grosso, conglomerático, por vezes argiloso, pobremente selecionado, com estratificação cruzada acanalada de porte médio, correspondendo às barras fluviais do Membro Boipeba da Formação Aliança. A paleocorrente fluvial é N65E.

No afloramento do Km 76 ocorre a transição entre a Formação Aliança-Membro Capianga e a Formação Sergi, seguida ao topo de fácies fluviais e eólicas da Formação Sergi (Medeiros & Ponte, 1980). Esta seqüência, como um todo, perfaz cerca de 115 metros de espessura, contudo aparece seccionada em dois pontos, correspondentes a vales topográficos desenvolvidos sobre zonas de falhas normais (figura 39).

A seqüência inicia com lamitos vermelhos maciços ou com laminação plano-paralela do Membro Capianga, e intercalações destes lamitos com lentes decimétricas até 1,5 metros de espessura, de arenitos muito finos com laminação plano-paralela e ôndulas ascendentes, constituindo lobos de suspensão, muitas vezes com estrutura de sigmoides (figuras 40a e 40b).

Sentido ao topo a seqüência torna-se arenosa, com fácies de arenitos muito finos, argilosos, com laminação ondular irregular (figuras 40c e 40d), fácies de arenitos finos, maciços ou com estratificação cruzada tangencial, ou ainda com estruturas de deformação, fácies de arenitos bimodais, finos e médios a grossos, com estratificações cruzadas de baixo ângulo e acanalada de grande porte, e lâminas lenticulares de arenito grosso geradas por fluxo de grãos (figuras 40e e 40f). Intercalados a estes arenitos, esporadicamente aparecem camadas de decímetros a poucos metros de espessura, de lamitos e siltitos vermelhos, ou arenitos grossos, conglomeráticos, pobremente selecionados e com estratificação cruzada acanalada de porte médio.

Figura 40 - Detalhes de fácies da Formação Sergi no afloramento da BR-324, Km 76: (a) lamitos vermelhos intercalados com lentes de arenitos finos; (b) detalhe da camada de arenito fino mostrando laminação plano-paralela e estratificação cruzada de pequeno porte; (c) e (d) fácies de arenitos argilosos com laminação ondular irregular, de interduna; (e) e (f) arenitos bimodais com estruturas de fluxo e queda de grãos, de dunas eólicas.

(a)

(c)

(d)

(e)

(f)

A seqüência deposicional neste afloramento é assim constituída, na base, por depósitos lacustres e de lobos de suspensão da Formação Aliança, seguidos por depósitos flúvio-eólicos da Formação Sergi na porção mediana, e por depósitos francamente eólicos, também do Sergi, na porção superior da seqüência (figura 39). Embora apresente uma grande seqüência vertical e feições da geometria bidimensional e em macroescala, este afloramento não é o ideal para o estudo de geometria tridimensional e/ou de megaescala, uma vez que o mergulho estrutural e o corte unicamente bidimensional prejudicam a visualização da extensão lateral e em 3D das fácies.

O afloramento do Km 75 apresenta cerca de 250 metros de extensão por até 30 metros de altura. Ocorre no sentido Salvador-Feira de Santana, do lado esquerdo da BR-324. A atitude das camadas é N10E/15SE, e aparecem falhas normais, de pequeno rejeito, com atitude N50E/60SE. A seqüência vertical possui cerca de 90 metros de espessura, de fácies predominantemente arenosa, eólica e fluvial, da Formação Sergi (figura 41). Nas porções inferior e mediana da seqüência ocorrem arenitos muito finos a finos, castanho-avermelhados ou amarelados, com lâminas de arenito médio a grosso, bem arredondados, com estratificação cruzada acanalada de grande porte, constituindo camadas com dezenas de metros de espessura (figuras 42a e 42b). Localmente ocorrem arenitos grossos a médios, com cruzadas acanaladas de pequeno porte (figura 42c), ou arenitos muito finos, argilosos, variegados, maciços ou com laminação ondular irregular (figura 42d), ou ainda camadas decimétricas de lamitos vermelhos (figura 42e).

Na parte superior da seqüência aparecem arenitos muito grossos a finos, conglomeráticos, verde-acinzentados, com estratificação cruzada acanalada de porte médio, formando camadas métricas com granodecrescência ascendente (figuras 43a a 43d). Subordinadamente ocorrem camadas decimétricas de lamitos variegados, maciços e com nódulos centimétricos de sílex (caliche silicificado - figura 43e).

Os arenitos da porção inferior e mediana são eólicos, depositados em dunas subaéreas, com uma camada de interduna, outra de retrabalhamento por corrente fluvial e duas camadas de lamitos originadas em pequenos lagos associados ao sistema. Na porção superior da seqüência, os arenitos formam ciclos fluviais, depositados por barras de canal, em um sistema fluvial entrelaçado. Os lamitos correspondem a depósitos do topo das barras ou de transbordamento de canal.

Figura 42 - Fácies da porção inferior da seqüência da Formação Sergi aflorante na BR-324, Km 75: (a) arenitos com estratificação cruzada acanalada de grande porte; (b) detalhe da foto anterior mostrando laminação bimodal, eólica; (c) arenito grosso com estratificação cruzada acanalada de pequeno porte, fluvial; (d) arenito argiloso com laminação ondular irregular, de interduna; (e) arenito fino, argiloso e lamitos vermelhos, maciços.

(a)

(b)

(c)

(d)

(e)

Figura 43 - Fácies da porção superior da seqüência da Formação Sergi aflorante na BR-324, Km 75: (a) vista geral do afloramento mostrando intercalações entre camadas de arenitos grossos e lamitos cinza-esverdeados; (b) detalhe da base de uma camada de arenito grosso, conglomerático, sobre lamito com nódulos de calcita silicificados; (c) estratificação cruzada de porte médio em camada de arenito com granodecrescência ascendente, de grosso a fino; (d) feições de acanalamento vistas em planta, e sentido da paleocorrente fluvial.

(a)

(b)

(c)

(d)

(e)

(3) *Canyon* do Sergi

Ocupa uma extensão de aproximadamente 10 quilômetros do vale deste rio, estando ladeado, em cerca de 3 Km desta extensão, por paredões de até 50 metros de altura (figura 44a), que mostram arenitos com estratificação cruzada acanalada de grande porte, formando estratos da ordem de alguns metros de espessura (figura 44b). O Rio Sergi corre no sentido NW-SE; em sua margem NE está a estrada de ferro, parte do trajeto entre as estações Sergi e Santo Amaro. De NW para SE, ou da borda oeste para o interior da Bacia, ocorre no *canyon* a seqüência estratigráfica normal - Formação Aliança (lamitos e arenitos muito finos, vermelhos, lacustres) - Formação Sergi (arenitos grossos a finos, de sistema flúvio-eólico) - Formação Candeias (folhelhos verdes, da seqüência lacustre da fase rifte da bacia).

Esta região está toda compartimentada por falhas normais orientadas NE-SW, que individualizam blocos estruturais com camadas apresentando mergulhos inferiores a 10 graus, para SE. A seqüência aflorante da Formação Sergi no *canyon* foi levantada por geólogos da Petrobrás em 1964 (Silva, 1966) e correlacionada com poços perfurados em áreas adjacentes. A espessura da seqüência é estimada em 153 metros, sendo que nas escarpas aparece apenas parte dos intervalos médio e superior da formação, constituída predominantemente por fácies de arenitos finos e grossos, bimodais, com estratificação cruzada de grande porte, tangenciais no plano, mas que em três dimensões evidenciam o padrão de acanalamento (figura 44c), originado por dunas eólicas, contudo muito truncadas por superfícies de segunda ordem (figura 44d).

Nas escarpas, dos dois lados do Rio, identifica-se uma camada de arenito com os estratos deformados chegando até mesmo a formar convoluções (figuras 44e e 44f). Tais camadas podem estar evidenciando a ocorrência de eventos sísmicos durante a deposição da parte superior do Sergi, possivelmente primeiras manifestações de eventos tectônicos que culminaram com a abertura do rifte no Cretáceo Inferior.

(4) Região de Saubara

Ao lado oeste da Baía de Todos os Santos ocorrem serras alongadas (figura 45a), com controle estrutural NE, que alcançam até 200 metros de altitude, constituídas por rochas da Formação Sergi. O acesso a esta região é feito pela Rodovia BA-001 (Santo Amaro-Cachoeira) e em seguida pela Rodovia BA-084, que parte da anterior e dirige-se sentido Sul, até Saubara.

No Km 86 da BA-001, onde a rodovia corta transversalmente a serra, aparece um afloramento da base da Formação Sergi. Ocorrem lamitos vermelhos, maciços e com nódulos de calcita, sobrepostos por arenito fino a médio, com laminação plano-paralela ou de baixo ângulo (figura 45b). O sentido de migração das formas de leito do arenito, ou sua paleocorrente, é N35E.

Figura 44 - Fácies de dunas eólicas da Formação Sergi no afloramento do *Canyon* do Rio Sergi: (a) vista geral das escarpas dos *canyon*; (b) porção de uma das escarpas do *canyon* mostrando a dimensão dos afloramentos e o grande porte das estratificações cruzadas; (c) e (d) fácies de dunas eólicas e superfícies de truncamento das camadas; (e) e (f) camada deformada e com convoluções, estruturas originadas por abalos sísmicos.

(a)

(b)

(c)

(d)

(e)

(f)

Figura 45 - Afloramentos da região de Saubara: (a) vista geral de parte da serra alongada segundo NE, a oeste da Baía de Todos os Santos; (b) arenitos finos com laminação tangencial sobre lamitos vermelhos lacustres - BA-001, Km 86; (c) vista geral de fácies de arenito grosso, fluvial - BA-084 a 6,5 Kms ao sul do entroncamento com a BA-001; (d) detalhe da foto anterior mostrando a superposição de formas de leito trativas, de fundo de canal fluvial; (e) vista em planta das feições de acanalamento e sentido da paleocorrente fluvial, em arenito grosso, conglomerático.

(a)

(b)

(c)

(d)

(e)

Na BA-084, a 3 e 5 Km a partir da BA-001, aparecem dois paredões longitudinais da serra, mostrando exposições do Sergi, quase paralelamente à direção deposicional dos paleocanais fluviais. Mais adiante, a 6,5 km da BR-001, aparece o afloramento mais importante. Ocorre fácies de arenito grosso, conglomerático, com seixos de até 2 cm de diâmetro, com estratificação cruzada acanalada de médio porte. O afloramento como um todo é uma grande exposição tridimensional, de formas de leito 3D, com poucas dezenas de metros de comprimento (30 metros), e 1 a 2 metros de espessura, sobrepostas e amalgamadas, constituindo formas maiores, de preenchimento de canais, da ordem de centenas de metros (100 metros) de largura e 4 a 5 metros de espessura. O afloramento pode ser dividido em duas porções, inferior e superior, cada uma das quais constituindo uma destas macroformas de canal (figuras 45c a 45e).

(5) São Roque do Paraguaçu-Nazaré-Ponte do Funil

Ao Sul da Bacia, partindo-se de Salvador, cruzando-se a baía por balsa, atravessando-se a Ilha de Itaparica, e chegando novamente no continente através da Ponte do Funil, existe uma área aplainada, onde afloram os arenitos da Formação Sergi. Foram vistas exposições numa área triangular cujos vértices são as cidades de Nazaré e São Roque do Paraguaçu, e a Ponte do Funil (figura 32).

No afloramento das proximidades da Ponte do Funil, fácies eólicas aparecem associadas a fácies lacustres (lamitos vermelhos e verdes), interdunas (arenitos argilosos) e lençóis de areia (arenito fino a médio com ôndulas eólicas ascendentes e gradação inversa no interior da laminação - figura 46).

Nas regiões de São Roque e Nazaré ocorrem arenitos castanho-avermelhados, castanho-amarelados e, raramente, brancos, em afloramentos da ordem de 3 a 8 metros de altura. São arenitos com estratificação cruzada acanalada de grande porte, bimodais - frações granulométricas fina e média a grosseira, formando laminação por queda de grãos e fluxo de grãos (figura 47). Em alguns dos afloramentos, seções horizontais mostram o padrão de acanalamento em planta, muito úteis para as medidas de paleocorrente. As paleocorrentes variam de NW a SW, indicando sentido geral para oeste.

(6) Praia de Gamboa

A partir da cidade de Valença, localizada na porção sul do estado e já dentro da Bacia do Camamu, chega-se, com cerca de duas horas de barco, às vilas de Gamboa e Morro de São Paulo, na ilha de Tinharé. Nas proximidades da vila de Gamboa, na praia, numa falésia, e numa pequena estrada de terra, ocorrem afloramentos de arenitos da Formação Sergi.

Figura 46 - Fácies da Formação Sergi nos afloramentos da região da Ponte do Funil: (a) afloramento da Formação Sergi nas proximidades da Ponte do Funil; (b) arenito castanho-amarelado, parcialmente alterado pelo intemperismo, com estratificação cruzada acanalada de grande porte, vista de planta; (c) detalhe em corte vertical mostrando finas camadas argilosas de interdunas, intercaladas aos arenitos de dunas; (d) estruturas de ondulas eólicas transladante, com ângulo subcrítico, de fácies de interduna seca ou lençóis de areia; (e) lamitos vermelhos maciços com nível de nódulos e crosta de calcita.

(a)

(b)

(c)

(d)

(e)

(a)

(b)

(c)

(d)

Figura 47 - Fácies da Formação Sergi na região de São Roque do Paraguaçu: (a) estratificação cruzada acanalada de grande porte em arenitos bimodais, eólicos; (b) fácies de duna eólica sobreposta por lamito maciço, lacustre; (c) detalhe da foto anterior evidenciando a laminação da face de avalanche da duna; (d) maior detalhe da face de avalanche mostrando laminação por queda de grãos e finas lentes originadas por fluxos de grãos.

Na praia, a exposição fornece uma visão em planta, na horizontal, de um campo de feições acanaladas, de grande porte, que à primeira vista evidenciam as paleodunas eólicas da Formação Sergi (figura 48a). No detalhe observam-se os planos de laminação e lâminas de poucos centímetros e milímetros, bimodais, lâminas de arenito grosso e muito grosso e arenito fino (figura 48b). A paleocorrente eólica indica sentido geral para oeste. O padrão acanalado destas formas de leito indica tratar-se de dunas barcanas, com comprimento das linhas de cristas da ordem de dezenas de metros, variando de 20 a 80 metros.

Na falésia desta mesma praia afloram os mesmos arenitos, numa exposição vertical de cerca de cinco metros de altura e 300 metros de extensão. Ocorrem camadas métricas, com estratificação cruzada acanalada de grande porte (figura 48c). Nas partes mais lavadas pela maré alta, os afloramentos exibem com perfeição as lâminas lenticulares de arenitos muito grossos, originados por fluxo de grãos (figura 48d), e também bimodalidade formada por lâminas alternadas de arenitos grossos e finos, originada por queda de grãos.

4.3.2. Testemunhos da Formação Sergi

Neste trabalho são apresentadas as análises sequenciais de testemunhos (figuras 49 e 50) de dois poços do Campo de Fazenda Boa Esperança, localizada no bloco estrutural central da bacia. Nestes testemunhos são reconhecidas cinco fácies sedimentares, designadas informalmente por fácies A, B, C, D, e E.

Fácies A - é formada por arenitos muito grossos, conglomeráticos, com seixos de quartzo, feldspato, e intraclastos lamasos e carbonáticos (figura 51a). Apresenta estratificação cruzada acanalada e granodecrescência ascendente. Apresenta-se predominantemente com coloração esverdeada, devido ao alto conteúdo de argila de infiltração.

Fácies B - é constituída por arenitos grossos a finos, pobre a moderadamente selecionados, com estratificação cruzada tabular e secundariamente acanalada, e granodecrescência ascendente (figura 51b). Variam desde muito argilosos e/ou muito cimentados por sílica e calcita, a pouco argilosos e/ou cimentados, porosos, estando assim muitas vezes impregnados por óleo.

Fácies C - é composta de arenitos finos a muito finos, com ôndulas ascendentes (*climbing ripples*) e laminação plano-paralela (figura 51c a 51e). São arenitos micáceos, síltico-argilosos, muito cimentados por calcita, e conseqüentemente pouco porosos.

(a)

(b)

(c)

(d)

Figura 48 - Afloramentos da Formação Sergi na Praia de Gamboa: (a) foto obtida durante maré baixa mostrando as linhas de cristas das paleodunas da Formação Sergi; (b) detalhe da foto anterior mostrando a laminação da face de avalanche das dunas; (c) estratificação cruzada acanalada de grande porte em corte vertical na falésia da praia; (d) lâminas irregulares de arenito grosso, originadas por fluxos de grãos, vistas na seção vertical na falésia da praia.

Figura 49 - Análises seqüenciais de testemunhos da Formação Sergi, Campo de Fazenda Boa Esperança. Poço Sergi-23.

Figura 50 - Análises seqüenciais de testemunhos da Formação Sergi, Campo de Fazenda Boa Esperança. Poço Sergi-31.

Figura 51 - Detalhes de testemunhos da Formação Sergi: (a) fácies A - arenito grosso, conglomerático, com argila de infiltração; (b) fácies B - arenito grosso, com estratificação cruzada acanalada, cimentado por calcita (zonas em tons claros); (c) fácies C - arenito fino com nódulos de calcita - caliche; (d) fácies C - arenito fino com ondulas cavalgantes e cimentando por calcita; (e) fácies C - arenito muito fino com ondulas cavalgantes; (f) fácies D - lamitos com nódulos de calcita; (g) fácies E - arenito bimodal, fino e grosso.

(a)

(b)

(c)

(d)

(e)

(f)

(g)

Fácies D - compreende lamitos arenosos, castanho-avermelhados ou cinza-esverdeados, predominantemente maciços (figura 51f). Os níveis mais sílticos apresentam ondulas ascendentes e laminação plano-paralela. Estruturas secundárias comumente presentes nestes lamitos são gretas de ressecamento preenchidas por areia, assim como nódulos e crostas carbonáticas. Estruturas de fluidização, tardi-deposicionais, também são freqüentes.

Fácies E - comporta arenitos bimodais, com frações granulométricas fina e média a grossa, dispostas em lâminas alternadas (figura 51g), bem selecionadas e de grãos arredondados. Apresentam estratificação cruzada tabular, predominantemente com baixo ângulo de inclinação das lâminas. Apresenta-se pouco argilosa, pouco cimentada, e muito porosa.

Estas fácies desenvolvem seqüências verticais contínuas ou descontínuas. A seqüência ideal é representada inicialmente pela sucessão das fácies fluviais A, B, C e D, isto é, arenitos grossos, conglomeráticos basais (fácies A), arenitos de grossos a finos, estratificados (fácies B), arenitos finos com ondulas ascendentes (fácies C) e lamitos (fácies D), formando granodecrescência ascendente, seguidos por arenitos eólicos (fácies E).

4.3.3. Geometria Depositional

As estruturas, texturas e seqüências deposicionais presentes nos afloramentos e testemunhos da Formação Sergi indicam a associação de processos fluviais e eólicos, ora com predomínio alternado de um ou outro sistema, e sob condições climáticas semi-áridas a áridas.

O sistema aluvial é formado por canais entrelaçados de baixa sinuosidade e de rápida migração lateral, entremeados por barras longitudinais (figura 52). Predominam sedimentos grossos, de carga trativa, isto é, depósitos de fundo de canal (fácies A) e depósitos de barra longitudinal (fácies B). Subordinadamente, ocorrem depósitos finos, de carga em suspensão, das fácies C e D, sobre o topo das barras ou sobre o sistema adjacente de canais abandonados, durante eventos de transbordamento de canal, formando inunditos e lobos de suspensão.

As características observadas nos afloramentos de Saubara, BR-324/Km 76 e na BR-101/Km 141 a 144, permitem modelar a geometria dos canais fluviais. São canais de cerca de 1 a 2 quilômetros de largura e 5 a 10 metros de profundidade (figuras 35 e 52a), preenchidos por carga de fundo, na forma de formas de leito tridimensionais, dunas subaquosas, ou barras longitudinais e laterais, com dimensões de dezenas a poucas centenas de metros de comprimento, e decímetros a poucos metros de espessura.

O sistema eólico, com fácies de duna (fácies E) e interduna-lençol de areia, ora apresenta apenas alguns decímetros de espessura, resultado do retrabalhamento proximal dos depósitos fluviais sobre barras temporariamente ativas, ora constitui camadas métricas a decamétricas, com maior representatividade e individualidade, construídas num campo de dunas eólicas sobre o sistema de canais fluviais abandonados, durante fases de intensa desertificação (figura 52b).

A composição mental no espaço tridimensional dos vários planos verticais das escarpas do *Canyon* somados à exposição horizontal das dunas da praia de Gamboa permite modelar a geometria destes depósitos. As dunas, que constituem formas de leito de grande porte, barcanóides, aparecem empilhadas, formando estratos limitados por superfícies de truncamento originadas pela migração segundo ângulo subcrítico. As dimensões em planta podem ser estimadas como da ordem de 500 a 1000 metros de comprimento e dezenas de metros de altura; contudo, no contexto deposicional podem constituir um complexo de dunas de menor porte numa menor escala (100 a 200 metros de comprimento e 5 a 10 metros de altura), e também podem ser associados a outras formas de igual porte, constituindo *draas*, num grande mar de areia do Jurássico. A figura 35 também apresenta alguns parâmetros da geometria destas dunas.

Figura 52 - Modelo deposicional da Formação Sergi na borda Oeste da Bacia do Recôncavo mostrando a associação de fácies e a geometria deposicional fluvial e eólica: (a) sistema de canais entrelaçados ativos; (b) sistema de canais fluviais abandonados com retrabalhamento eólico e formação de campo de dunas.

5. Análise Quantitativa

Para a análise quantitativa dos dados das Formações em estudo são empregados métodos estatísticos convencionais, processos de Markov, análise de variogramas e simulação geoestatística, além de modelos determinísticos para simulação de fácies e associações faciológicas.

5.1. Estatística Convencional

Métodos estatísticos básicos podem ser empregados para a análise quantitativa da variável espessura das fácies das três unidades estratigráficas em estudo. Os valores de espessura são obtidos a partir das seqüências verticais dos testemunhos das formações. A variável espessura de fácies possui, de modo geral, distribuição log-normal, com grande número de elementos apresentando baixos valores, diminuindo este número à medida do aumento da espessura da fácies (figuras 53 a 55). O anexo 2 apresenta os parâmetros estatísticos básicos da variável espessura de fácies das formações Monte Alegre, Açu e Sergi.

As porcentagens relativas das fácies em cada unidade estratigráfica podem ser utilizadas para a modelagem quantitativa, unidimensional, da seqüência de fácies ideal de cada um dos sistemas deposicionais em estudo (figura 56). As três seqüências verticais ideais, que representam modelos de fácies (*facies models* - Walker, 1979, 1984), definidas anteriormente, são raras. Predominam, portanto, seqüências incompletas, truncadas, originadas pela forte dinâmica autocíclica dos sistemas deposicionais continentais em estudo.

5.2. Processos de Markov

Para a modelagem quantitativa das seqüências verticais encontradas são utilizados a seguir alguns programas para seqüências, ou cadeias de Markov. Krumbein (1967) publica o primeiro programa de computador, em *FORTRAN IV*, para a aplicação de cadeias de Markov em sedimentologia e estratigrafia.

Na década de 70 e início dos anos 80 vários trabalhos aplicam e discutem esta técnica de análise de seqüências verticais de fácies e/ou estratos. Com isto, foi gerado tanto um banco de dados de fácies sedimentares de vários sistemas deposicionais e respectivos resultados da aplicação deste método, como também muitas sugestões para o aprimoramento da técnica (Selley, 1970; Miall, 1973; Hattori, 1976; Powers &

Easterling, 1982; Harper, 1984a e b). Contudo, nenhum destes trabalhos apresenta listagens de programas de computador.

Somente no final da década de 80 é que aparecem na literatura dois programas, em *BASIC*, para seqüências de Markov, com técnicas mais aprimoradas. O primeiro (Wells, 1989) apresenta um programa para análise de Markov seguindo métodos propostos por Powers & Easterling (1982) e Harper (1984a), que utilizam níveis de significância do qui-quadrado e probabilidades binomiais. Neste caso as fácies aparecem de modo não repetitivo, isto é, de forma que uma fácies não pode ser sucedida por ela mesma (*embedded sequence*).

O segundo programa (Lefever, 1990) também trabalha com seqüências *embedded*. Além do cálculo das probabilidades de transições, este programa faz a análise de eventos que ocorrem em um mesmo contexto e que podem ser agrupados ou substituídos mutuamente (*substitutability analysis* - Davis & Cocke, 1972; Davis, 1986). Outro recurso implementado neste programa é a análise da entropia das fácies e do sistema (Hattori, 1976) ou do grau de desordem da seqüência, no sentido da menor freqüência de padrões de ciclicidade.

Nenhum dos dois programas mencionados permite o tratamento de seqüências *non-embedded*, isto é, seqüências com repetições de uma mesma fácies, e também a realização de simulações que reproduzam a variabilidade natural das seqüências de fácies sedimentares. Uma das aplicações da simulação vertical de fácies é na elaboração do arcabouço estratigráfico ou da geometria de fácies em intervalos ou áreas não amostradas.

Fernandes & Lanzarini (1993) desenvolvem um programa para processos de Markov, em linguagem C de programação, modular, e com máxima portabilidade entre sistemas operacionais distintos. Este pacote faz o processamento numérico e simula seqüências verticais de fácies, tanto a partir de dados *embedded* como *non-embedded*.

Os dados das seqüências verticais de fácies das três unidades em estudo (anexo 3) foram tratados por estes três programas. Os arquivos de saída destes programas, para a Formação Sergi, são apresentados nos anexos 4 a 6. As figuras 57 a 59 apresentam os diagramas de transições entre as fácies; a figura 60 apresenta os dados de entropia relativa das fácies e de cada sistema; e as figuras 61 a 63 apresentam seqüências verticais reais e simuladas para as três unidades. Observa-se que as seqüências simuladas reproduziram os padrões de sucessão de fácies e as espessuras originais, contudo não puderam reproduzir a posição real dos intervalos na seqüência, o que constitui uma limitação dos processos de Markov. Deste modo, as seqüências real e simulada não apresentam correlação lateral.

Figura 53 - Histogramas da variável espessura de fácies - Formação Monte Alegre.

Figura 54 - Histogramas da variável espessura de fácies - Formação Açú.

Figura 55 - Histogramas da variável espessura de fácies - Formação Sergi.

Figura 56 - Sequências verticais ideais e quantificadas de fácies das Formações Monte Alegre, Açú e Sergi. As setas indicam padrões de variação na granulometria.

Figura 57 - Diagramas de transições entre fácies (DTF's) da Formação Monte Alegre, mostrando, da figura superior para a inferior, transições mais significativas. Figura superior - transições observadas - linhas mais espessas indicam maior número de transições. Figura intermediária - transições que ocorrem mais comumente que aleatoriamente, baseada na matriz de diferença (observado-aleatório). Figura inferior - transições significativamente maiores que aquelas presumidas por uma sequência aleatória a 0.1 de nível de significância.

Figura 58 - Diagramas de transições entre fácies (DTF's) da Formação Açu, mostrando, da figura superior para a inferior, transições mais significativas. Figura superior - transições observadas - linhas mais espessas indicam maior número de transições. Figura intermediária - transições que ocorrem mais comumente que aleatoriamente, baseada na matriz de diferença (observado-aleatório). Figura inferior - transições significativamente maiores que aquelas presumidas por uma seqüência aleatória a 0.1 de nível de significância.

Figura 59 - Diagramas de transições entre fácies (DTF's) da Formação Sergi, mostrando, da figura superior para a inferior, transições mais significativas. Figura superior - transições observadas - linhas mais espessas indicam maior número de transições. Figura intermediária - transições que ocorrem mais comumente que aleatoriamente, baseada na matriz de diferença (observado-aleatório). Figura inferior - transições significativamente maiores que aquelas presumidas por uma sequência aleatória a 0.1 de nível de significância.

FORMAÇÃO
MONTE ALEGRE

FORMAÇÃO AÇÚ

FORMAÇÃO SERGI

Figura 60 - Gráficos de entropia relativa (E_r) das fácies e dos sistemas deposicionais (seqüências verticais de fácies) em estudo. Formação Monte Alegre - entropia relativa do sistema, $E_{rs} = 0.65$; Formação Açú - $E_{rs} = 0.76$; Formação Sergi - $E_{rs} = 0.82$. R_{pre} = entropia relativa da fácies no sentido da base para o topo da seqüência; R_{post} = entropia da fácies do topo para a base. Observa-se que, em casos extremos de repetições de seqüências ideais (ABCD, ABCD, ...), os valores de entropia das fácies e do sistema são nulos, isto é, o grau de ordenação do sistema é máximo.

(1)	(2)	(3)	(4)
B2	D	B2	B3
D	B2	B2	B3
B2	D	B2	D
B1	B2	B2	B2
D	B3	B2	B2
B1	D	B2	B2
D	B2	B2	B2
B2	B1	B2	B2
C	B2	B2	B2
B2	B1	B2	B2
C	C	D	B2
B2	B3	D	B2
B3	D	C	B2
B2	C	C	B2
B1	B3	C	B2
B3	B1	C	B2
C	D	B3	B2
D	B2	B3	D
C	D	B3	D
B1	B1	B1	C
D	C	B1	D
B1	D	B1	B2
B3	B1	B1	B2
D	B2	D	B2
B2	D	D	B2
D	B1	D	C
C	D	C	C
D	B1	C	C
C	C	D	C
D	B3	C	C
B1	B1	C	C
D	B2	B1	D
B1	B1	C	D
B2	B1	C	B2
C	D	D	B2
B2	C	B2	B2
C	B2	B3	B2
B3	C	B1	B1
B1	D	B1	B1
		B1	B1
		B1	B1

Figura 61 - Sequências verticais de fácies da Formação Monte Alegre: (1) sequência *embedded* real; (2) sequência *embedded* simulada; (3) sequência não *embedded* real; (4) sequência não *embedded* simulada. Em (3) e (4) o passo vertical é de 1/2 em 1/2 metro.

Figura 62 - Sequências verticais de fácies da Formação Açú: (1) sequência *embedded* real; (2) sequência *embedded* simulada; (3) sequência não *embedded* real; (4) sequência não *embedded* simulada. Em (3) e (4) o passo vertical é de 1 em 1 metro.

Figura 63 - Sequências verticais de fácies da Formação Sergi. (1) sequência *embedded* real; (2) sequência *embedded* simulada; (3) sequência não *embedded* real; (4) sequência não *embedded* simulada. Em (3) e (4) o passo vertical é de 1 em 1 metro.

5.3. Geoestatística

O principal pressuposto de todo estudo geoestatístico é a compreensão do sistema ao qual se quer aplicar a técnica - seus componentes, a relação entre eles, os processos atuantes, e principalmente as características estruturais do sistema (distribuição espacial, orientação, etc). A análise geoestatística requer a escolha de uma série de parâmetros para os quais o conhecimento do sistema é fundamental; caso contrário, as escolhas tornam-se subjetivas, e os resultados, difíceis de serem avaliados.

Na literatura encontram-se vários modelos para o estudo geoestatístico de variáveis categóricas, incluindo-se fácies sedimentares (Journel & Isaaks, 1984; Matheron *et al.*, 1987; Journel & Gomes-Hernandez, 1989; Alabert & Massomat, 1990). Para a análise variográfica e simulação geoestatística das seqüências de fácies deste estudo foram utilizados programas do pacote geoestatístico GSLIB - *Geostatistical Software Library and User's Guide* (Deutsch & Journel, 1992). Particularmente para a simulação empregam-se as subrotinas *sisim* (*sequential indicator simulation*), para variáveis categóricas, do mesmo pacote geoestatístico.

São feitas análises em uma dimensão - de seqüências verticais de fácies identificadas nos testemunhos dos poços das três formações em estudo, em 2D - de uma seção geológica da Formação Monte Alegre na área do Juruá-Jaraqui e de imagens de satélite de ambientes sedimentares recentes equivalentes aos ambientes antigos das unidades em estudo² e, por fim, em 3D - em um intervalo estratigráfico da Formação Sergi no Campo de Dom João. As variáveis analisadas são sempre fácies sedimentares, tratadas como variáveis discretas, e a finalidade é sempre o estudo de variogramas e a simulação condicional em uma ou mais dimensões.

Os modelos teóricos resultantes do ajuste sobre os variogramas experimentais resultaram nos modelos esférico e exponencial. De tais ajustes resultam os principais parâmetros de entrada (modelo de variograma: **a** = alcance, **c** = patamar, **p** = efeito pepita, e anisotropias) do algoritmo de simulação.

5.3.1. Análise Geoestatística em 1D.

Os estudos variográficos e as simulações nos poços foram feitos a intervalos (regularizações) de um metro nas formações Açu e Sergi, e de meio metro na Formação Monte Alegre. Estes intervalos foram escolhidos empiricamente, de modo a não subamostrar os níveis mais finos e também não superamostrar os níveis mais espessos.

²Como fundamento a este pressuposto estão o princípio do atualismo e a lei de Walther. Desta forma, dá-se uma conotação também quantitativa a estes princípios básicos da sedimentologia.

Os variogramas obtidos para cada uma das fácies em cada formação (figuras 64 a 66) apresentam, na grande maioria, efeitos pepita e "buracos", sendo estes últimos relacionados aos padrões de ciclicidade das seqüências verticais. As fácies com menor frequência (fácies C e D) em geral apresentam variogramas pouco definidos. As seqüências verticais simuladas pelo programa *sisim* aparecem nas figuras 67 e 68.

5.3.2. Análise Geoestatística em 2D

Uma seção geológica da Formação Monte Alegre na Bacia do Solimões e três imagens de satélite de ambientes sedimentares recentes são estudadas pelo método geoestatístico de variáveis categóricas.

Sabe-se que nos campos petrolíferos o espaçamento da amostragem horizontal é sempre da ordem de centenas a mil vezes em relação à amostragem vertical. Na análise geoestatística de fácies sedimentares isto pode ser superado com a utilização de dados de afloramentos análogos aos reservatórios, ou também de dados de ambientes sedimentares recentes equivalentes aos ambientes antigos. Através destas duas fontes de dados, pode-se extrair a variabilidade horizontal das fácies.

5.3.2.1. Seção Estratigráfica da Formação Monte Alegre.

A Área do Juruá-Jaraqui (Jr-Ji) compreende duas estruturas dômicas mapeadas pela sísmica e com poços produtores de gás a partir dos reservatórios da Formação Monte Alegre, Bacia do Solimões. Como existem relativamente poucos poços perfurados, somente é possível trabalhar-se em 2D, isto é, na forma de seção geológica (figura 18).

Para viabilizar o tratamento geoestatístico desta seção, as fácies anteriormente descritas (B1, B2, B3, C, D) são agrupadas em apenas duas: fácies 1- eólica (B1+B2+B3), e fácies 2 - lacustre (C+D). Os variogramas obtidos são mostrados na figura 69. O variograma vertical mostra-se com a curva bem desenvolvida, o que possibilita um bom ajuste do variograma teórico. Contudo, o variograma horizontal possui poucos pontos e mostra-se pouco desenvolvido, com efeito pepita elevado e um incipiente ajuste do variograma teórico. A seção geológica simulada pelo *sisim* aparece na figura 70. Comparando-se esta seção simulada com a seção geológica da área (figura 18) observa-se, em primeira análise, uma grande semelhança, com exceção de alguns corpos de lamitos das regiões entre poços, simulados pela geoestatística. Procedeu-se a uma análise quantitativa entre as duas seções. Duas matrizes com 400 dados foram construídas para representar as seções, estas foram comparadas, e o índice de coincidência (número de pontos nos quais aparece a mesma fácies nas duas seções, em relação ao número de pontos totais) foi de 86 %.

Figura 64 - Variogramas das fácies da Formação Monte Alegre. Direção vertical.
Passo = 1/2 m

Figura 65 - Variogramas das fácies da Formação Açu. Direção vertical. Passo = 1m

Figura 66 - Variogramas das fácies da Formação Sergi. Direção vertical. Passo = 1 m

Figura 67 - Seqüências verticais de fácies simuladas pela geoestatística. (A) Formação Açu - o menor intervalo corresponde a 1 metro, (B) Formação Monte Alegre - menor intervalo igual a 1/2 metro. A, B ...etc, são as fácies.

Figura 68 - Seqüência vertical de fácies da Formação Sergi simulada pela geoestatística - menor intervalo igual a 1 metro.

Figura 69 - Variogramas vertical e horizontal do sistema desértico da Formação Monte Alegre.

Figura 70 - Seção geológica da área dos campos de Juruá e Jaraqui, simulada pela geoestatística, mostrando a distribuição das fácies eólica (branco) e lacustre (preto). A simulação obedece à proporção entre as fácies, aos variogramas das fácies, e também aos dados originais. As dimensões das células são de 1000m x 5m. A posição dos poços é indicada por traços verticais.

5.3.2.2. Imagens de Satélite.

Ambientes sedimentares recentes, equivalentes aos antigos das formações em estudo, foram procurados em uma série de publicações que apresentam imagens de satélite. Tal equivalência muitas vezes é difícil de se estabelecer. Além do ambiente recente mostrar o mesmo conjunto de fácies do antigo, as proporções relativas de fácies devem ser semelhantes. Após uma exaustiva procura e comparação de imagens, adotou-se um conjunto de ambientes recentes, que nos termos anteriores, representam os ambientes antigos.

As imagens de satélite (*SPOT* ou *LANDSAT*) utilizadas para o tratamento geoestatístico de fácies de sistemas deposicionais atuais foram varridas por um *scanner* de mesa, e posteriormente processadas e classificadas pelos programas *SITIM* e *ERDAS*. A primeira imagem abrange parte do sistema deposicional desértico da Península Arábica, composto por fácies de dunas, lençóis de areia, interdunas e lagos. A segunda imagem constitui uma parte da planície aluvial do Ganges, em Bangladesh, com canais fluviais de um sistema misto, com características entre entrelaçado e meandrante, barras fluviais longitudinais e laterais ao canal, e zonas de transbordamento de canal - planície de inundação. A terceira imagem constitui parte do sistema fluvial de canais entrelaçados do Rio Jamuna, afluente do Ganges.

As fácies recentes ou as associações de fácies reconhecidas nas imagens foram classificadas em categorias. Os arquivos das imagens classificadas no *SITIM* (arquivos de caracteres binários) foram transformados em arquivos de dados *raster* (figura 71), tipo *bitmap* (arquivos bidimensionais onde cada *pixel* ou conjunto de *pixels* aparece com um código numérico 1,2,3..., isto é, de caracteres inteiros, representando as fácies), e em seguida transformados em arquivos com formato *GEOEAS*, para o tratamento geoestatístico pelo programa *GSLIB*. Para estas transformações nos formatos dos arquivos foi criada uma rotina em *FORTRAN 77* (Ribeiro & Lanzarini, 1994 - anexo 7). As figuras 72 a 74 apresentam os variogramas das fácies de cada imagem.

Os variogramas da imagem do deserto mostram elevado efeito pepita e pequena anisotropia (figura 72a), indicando, de modo geral, a distribuição aleatória das fácies de duna e lacustre. Uma segunda análise foi realizada, restringindo-se a área ao quadrante inferior direito da figura 71a. Nesta área os variogramas mostram-se melhor desenvolvidos que os anteriores, mas ainda com pequena anisotropia (figura 72b). Os variogramas das duas outras áreas mostram a anisotropia resultante da elevada estruturação dos sistemas, dada pela orientação preferencial das fácies fluviais ao longo dos canais (figuras 73 e 74).

Figura 71 - Arquivos de dados tipo *raster* de imagens de satélite já classificadas em categorias:

(a) área desértica do sudeste da Península Arábica - imagem *LANDSAT* (McKee & Breed, 1976) - 84 x 81 células de 1200 metros - fácies de duna (cinza), fácies lacustre e interduna úmida (preto), direções analisadas 20° e 110°;

(b) planície aluvial de Bangladesh - imagem *SPOT* (*SPOT IMAGE*, 1993) - 84 x 74 células de 330 metros, direções analisadas 45° e 135°;

(c) sistema de canais entrelaçados do Rio Jamuna, Bangladesh - imagem *SPOT* (*SPOT IMAGE*, 1990) - 60 x 38 células de 450 metros, direções analisadas 0° e 90°. Para (b) e (c) - canal fluvial (branco), barras arenosas (cinza), transbordamento de canal / planície de inundação (preto).

Figura 72 - Variogramas horizontais das fácies do sistema deposicional desértico do sudeste da Península Arábica - direção 1 = 20°, direção 2 = 110°. (A) variograma de toda a área abrangida pela imagem, mostrando efeito pepita muito acentuado e o elevado grau de aleatoriedade do sistema de dunas e interdunas/lagos; (B) variograma que abrange somente a quarta parte (quadrante inferior direito) da imagem, mostrando um melhor desenvolvimento da curva e refletindo um maior grau de estruturação do sistema, como pode ser observado na imagem, figura 71a.

Figura 73 - Variogramas horizontais das fácies do sistema deposicional aluvial de Bangladesh. Direção 1 = 45°, direção 2 = 135°. Nota-se a presença de anisotropia no sistema.

Figura 74 - Variogramas horizontais das fácies do sistema de canais entrelaçados do Rio Jamuna. Direção 1 = 0° , direção 2 = 90° . Nota-se a forte anisotropia própria de sistemas fluviais entrelaçados.

5.3.3. Análise Geoestatística em 3D

Para a aplicação do tratamento geoestatístico em 3D foi escolhida uma área do Campo de Dom João, produtora de óleo a partir da Formação Sergi. Trata-se de uma área de Projeto-Piloto de recuperação de petróleo (figura 75), onde a malha de perfuração é mais densa que no restante do campo, resultando em menor espaçamento entre poços, e assim, viabilizando a aplicação da geoestatística. O anexo 8 apresenta os dados dos poços utilizados.

A figura 76 mostra os variogramas resultantes. No plano, o sistema mostra-se praticamente isotrópico; contudo, aparece uma forte anisotropia geométrica vertical, o que é próprio de sistemas deposicionais. Verifica-se, em geral, um bom desenvolvimento dos variogramas, o que valida a utilização da técnica para esta porção do Campo de Dom João. Duas seções horizontais do bloco diagrama mostrado na figura 75, simuladas pelo *sisim*, são mostradas na figura 77.

5.4. Simulação por Modelos Determinísticos

São utilizados neste estudo dois modelos determinísticos para a simulação de geometria deposicional. O primeiro diz respeito a formas de leito e estrutura, em escala pequena, de fácies sedimentar. O segundo refere-se à simulação de seqüências deposicionais aluviais, em escala de formação ou de seqüência de fácies.

5.4.1. Simulação de Formas de Leito e Estruturas Sedimentares Primárias

O programa *BEDFORMS 2.0* (Rubin, 1987a e 1987b) reproduz formas de leito, estruturas tridimensionais e as atitudes dos eixos dos planos de estratificação. As formas de leito e as estruturas das fácies fluviais e/ou eólicas das Formações em estudo podem ser, assim, reconstituídas. Os principais parâmetros de entrada deste simulador estão relacionados ao comprimento de onda, amplitude, sinuosidade da linha de crista e taxas de migração e ascensão da forma de leito.

A figura 78a mostra uma forma de leito 3D, com a crista curvada e fora de fase, e direção de migração perpendicular à orientação média da linha de crista. Além da forma de leito vista em planta, também é possível simular e observar, nos perfis transversal e longitudinal, a direção de migração e o tipo de estratificação cruzada. Também é possível de ser analisado o padrão de interferência da estrutura com o plano horizontal (figura 78b).

Figura 75 - Bloco Sul da Bacia do Recôncavo (1), mostrando o Campo de Dom João com a Área do Projeto Piloto de recuperação de petróleo e a localização dos poços (2). As direções dos variogramas são 40° , 130° e vertical, buscando-se a anisotropia do sistema cuja paleocorrente é NE.

Figura 76 - Variogramas horizontais - direção 1 = 40°, direção 2 = 130° - e verticais das fácies da Formação Sergi na Área do Projeto Piloto do Campo de Dom João.

Figura 77 - Seções horizontais da área do Projeto Piloto do Campo de Dom João, simuladas pela geoestatística, mostrando a distribuição de fácies da Formação Sergi. Fácies eólica (1), fácies fluvial (2), fácies de transbordamento/interduna (3). (A) base da sequência com menor porcentagem de fácies eólicas que em (B), porção intermediária da sequência. Dimensões das células 100 x 100 x 2 metros.

Pode-se também, através deste simulador, reproduzir as atitudes dos eixos dos planos de estratificação e das superfícies limitantes dos estratos, ou superfícies de segunda ordem (*bounding surfaces* - figura 79), onde se observa que a dispersão do sentido dos eixos de estratificação é menor que 90 graus, e que os eixos dos planos de segunda ordem estão a 180 graus, contrários ao sentido de migração das formas de leito. Estes padrões são muito similares aos encontrados nos depósitos fluviais das Formações Açu (figura 22) e Sergi (figura 33a).

Uma outra forma de leito simulada é representada na figura 80, muito similar à primeira, contudo com a crista barcanóide para representar as estruturas e os padrões de migração das dunas eólicas das Formações Sergi (figura 33b) e Monte Alegre. Neste caso, as atitudes dos eixos dos planos de estratificação (figura 81) mostram uma dispersão maior que a da forma de leito anterior, compatível com o padrão de paleocorrentes de dunas barcanas da Formação Sergi. Estes mesmos padrões foram utilizados por Rubin (1987a) para comparação com as estruturas do Arenito Navajo, do Jurássico dos EUA, clássico exemplo de depósito formado por dunas eólicas.

5.4.2. Simulação de Sequências Aluviais

Para a simulação determinística das sequências aluviais das formações Açu e Sergi empregou-se o *Floodplain Simulation Model (FPSM)*, anteriormente descrito. As características particulares a cada unidade estratigráfica são levadas em conta na definição dos parâmetros de entrada do programa de simulação, dentre os quais podem-se destacar: as dimensões (largura e profundidade) da seção a ser simulada e dos canais, a taxa de acreção vertical (*aggradation rate* ou também *accumulation rate*³), o período de avulsão, e a profundidade de soterramento para efeito da quantificação da compactação dos sedimentos.

As simulações devem ser coerentes com as proporções relativas de cada fácies dentro do sistema; assim, são realizadas várias simulações, analisam-se os resultados, mudam-se os parâmetros de entrada de modo coerente com as características do sistema, até obterem-se resultados em termos de proporções entre depósitos de canal e de planície de inundação, compatíveis com os dados de testemunho e afloramento e visualmente mais próximos dos modelos geológicos definidos.

³Enos (1991) aponta valores entre 0.01 e 0.02 m/ano para taxas de acreção vertical mais frequentes em sistemas fluviais.

Figura 78 - Forma de leito de crista sinuosa e estratificação cruzada acanalada (a).
Padrão de interferência da estrutura com o plano horizontal (b).

Figura 79 - Vetor de migração (V), dispersão do sentido de mergulho dos eixos de estratificação (EX) e orientação dos eixos das superfícies de truncamento (ST), referente à forma de leito de crista sinuosa da figura anterior. Nota-se que o padrão em EX coincide com a distribuição de paleocorrentes fluviais das Formações Açú e Sergi, figuras 22 e 33a respectivamente.

Figura 80 - Forma de leito de crista barcanóide e estratificação cruzada acanalada (a). Padrão de interferência da estrutura com o plano horizontal (b).

Figura 81 - Vetor de migração (V), dispersão do sentido de mergulho dos eixos de estratificação (EX) e orientação dos eixos das superfícies de truncamento (ST), referente à forma de leito de crista barcanóide da figura anterior. O padrão de EX coincide com a distribuição de paleocorrentes eólicas da Formação Sergi, figura 33b

Para representar a Formação Açu foi simulada uma seção de uma planície aluvial de 10.000 m x 130 m, com canais fluviais de 1000 m x 10 m, taxa de acreção vertical de 0.01 m/ano, período de avulsão de 1000 anos, e profundidade de soterramento dos sedimentos de 500 m (figura 82). No caso da Formação Sergi, uma seção de 10.000 m x 180 m foi simulada, com canais de 2000 m x 130 m, acreção de 0.02 m/ano, avulsão de 600 anos, e profundidade de soterramento de 1500 m (figura 83).

O conteúdo do arquivo de saída do programa para a Formação Sergi aparece no anexo 9. Além da sequência simulada que aparece no final do arquivo, são fornecidos vários parâmetros quantitativos, como proporções entre fácies, número de canais simulados, proporções de canais conectados, número e dimensões de corpos de arenito ou lamito, distribuições estatísticas das fácies, que ajudam a avaliar os resultados obtidos. A figura 84 mostra dois gráficos construídos a partir de alguns destes dados quantitativos que aparecem como tabelas no arquivo de saída do programa.

5.5. Geoestatística das Sequências Aluviais Determinísticas

Como procedimento de integração entre modelagem determinística (*Floodplain Simulation Model*) e probabilística (geoestatística de variáveis categóricas) determinaram-se os variogramas dos sistemas das Formações Açu e Sergi, compostos de fácies de canal e de planície de inundação, anteriormente simulados e mostrados nas figuras 82 e 83. Para tanto, acrescentou-se uma rotina (anexo 10) ao programa do *FPSM*, que transforma a matriz de dados simulada, no formato apropriado para o tratamento geoestatístico.

As figura 85 mostra os variogramas obtidos. Os variogramas verticais em ambos os casos mostram efeito pepita acentuado. Já os variogramas horizontais mostram-se bem desenvolvidos, e com padrões de ciclicidade bem definidos pela sucessão lateral de fácies de canal e de planície de inundação. Tais padrões bem desenvolvidos de variogramas e ciclicidades raramente estão presentes nos sistemas deposicionais naturais, o que mostra que os resultados alcançados pelo *FPSM* possui algum grau de idealização dos sistemas.

Figura 82 - Seção geológica simulada pelo programa do FPSM, mostrando a geometria deposicional da Formação Açú.
 Dimensões: 10Km x 130m.
 Exagero vertical $\cong 30$

----- planície de inundação
 0000000 canal fluvial

Figura 83 - Seção geológica simulada pelo programa do FPSM, mostrando a geometria deposicional da Formação Sergi.
 Exagero vertical $\cong 40$
 Dimensões: 20 Km x 180 m
 ----- planície de inundação
 OOOOOOO canal fluvial

Figura 84 - Gráficos de (A) tempo x profundidade para a sedimentação da seqüência deposicional da Formação Sergi simulada pelo *FPSM* que aparece na figura 83; (B) posicionamento sucessivo dos canais fluviais ao longo do preenchimento sedimentar da mesma seqüência.

(A)

(B)

Figura 85 - (A) Variogramas vertical e horizontal do sistema de canal - planície de inundação da Formação Açu, simulado pelo *FPSM* e representado na figura 82; (B) Variogramas vertical e horizontal do sistema de canal - planície de inundação da Formação Sergi, simulado pelo *FPSM* e representado na figura 83

6. Conclusões e Recomendações

A partir da análise dos resultados alcançados nos dois últimos capítulos, pode-se tirar as seguintes conclusões e recomendações sobre a sedimentologia, a modelagem matemática e a caracterização dos reservatórios de petróleo formados por rochas depositadas nos sistemas fluviais e/ou eólicos estudados:

- A Formação Monte Alegre constitui um sistema deposicional desértico, com intercalações de depósitos eólicos e lacustres. A seqüência ideal de fácies é representada pela sucessão de fácies D-C-B2-B3-B1, ou seja, lamitos lacustres - lobos de suspensão - interdunas - ôndulas eólicas - dunas, respectivamente da base para o topo, formando padrão de granocrescência ascendente.
- Fazendo-se a analogia com o sistema desértico atual do sudeste da Península Arábica, podemos inferir para a Formação Monte Alegre dunas barcanas, de dezenas de metros de altura e dezenas de quilômetros de extensão, que ocorrem normalmente associadas, formando *ergs*.
- Em seção geológica, esta formação mostra na base o predomínio de fácies eólicas com raras lentes da ordem de centenas de metros de comprimento e poucos metros de espessura, de depósitos lacustres. Em direção ao topo da seqüência, os depósitos lacustres tornam-se mais abundantes e passíveis de correlação entre os poços.
- A Formação Açú apresenta fácies fluviais de preenchimento de canal e de transbordamento/planície de inundação. A seqüência ideal possui padrão de granodecrescência ascendente, sendo formada pela sucessão A-B-C-D, ou seja, depósitos de fundo de canal - barras - arenitos finos de transbordamento - lamitos da planície de inundação.
- O sistema deposicional da Formação Açú apresenta características mistas, entre entrelaçado e meandrante. É predominantemente formado por arenito grosso, apresentando, contudo, alta porcentagem de fácies finas na seqüência. Pode, assim, ser definido como um sistema meandrante de granulometria grossa.
- Os afloramentos desta formação exibem apenas frações relativamente pequenas das feições de preenchimento de canais, basicamente séries de formas de leito tridimensionais amalgamadas e dispostas de forma compensatória. Deste modo, a integração entre dados de mapas, testemunhos e afloramentos torna-se fundamental para o estudo de sua geometria deposicional.

- Os mapas de isoespessura de arenito da Formação Açu, somados aos ciclos e seqüências definidos nos testemunhos e perfis geofísicos do poço estudado e aos dados levantados em afloramentos, permitiram definir a geometria deposicional desta unidade nas várias escalas de observação. Os paleocinturões fluviais possuem de 2 a 5 Km de largura por 30 a 50 metros de espessura. Os canais discretos possuem cerca de centenas de metros de largura e espessura da ordem de dez metros. As formas de leito apresentam dimensões da ordem de metros a poucas dezenas de metros de comprimento e espessuras de inferiores a um metro ao máximo de dois metros.
- A Formação Sergi na borda oeste da Bacia do Recôncavo forma um sistema flúvio-eólico, com depósitos fluviais de canal e de transbordamento, e fácies eólicas de dunas e interdunas. A seqüência ideal é representada pela sucessão de fácies A-B-C-D-E, ou seja, canal - barra - transbordamento - planície de inundação/interduna - duna. A associação flúvio-eólica apresenta como fácies intimamente relacionadas a planície de inundação/interduna. O sistema fluvial é de canais entrelaçados, e o sistema eólico é formado por dunas barcanas.
- A geometria eólica e fluvial da Formação Sergi foi obtida principalmente dos dados de afloramentos. A composição da exposição em planta das dunas observadas na Praia de Gamboa, mais a visão dos cortes do *Canyon* do Sergi e da seqüência levantada na BR-101, permitem definir a geometria das mesmas. São dunas barcanas, de cerca de 1 a 3 Km de comprimento, com linhas de crista da ordem de centenas de metros de extensão e de dezenas de metros de altura. Encontram-se seccionadas por superfícies de truncamento dos estratos, originados pela migração e superposição das formas de leito em ângulo de ascensão subcrítico, chegando a formar camadas contínuas de depósitos de dunas de até 50 metros de espessura. Dunas de dimensões menores também estão presentes, normalmente associadas às fácies de interdunas.
- O sistema de canais entrelaçados da Formação Sergi, predominantemente arenoso e apresentando forte dinâmica de migração lateral, estendia-se por áreas muito amplas, de cerca de dezenas de kms. Os canais discretos, com razão L/P (largura/profundidade) maior que a da Formação Açu, possuem cerca de 2 km de largura e espessura máxima de 10 metros, preenchidos por formas de leito 3D, muitas vezes amalgamadas e chegando a constituir barras predominantemente longitudinais ao canal. Tais formas de leito possuem comprimento de onda (λ) da ordem de dezenas a uma centena de metros e amplitude (h) de poucos metros, sendo a razão λ/h maior que as formas de leito fluviais da Formação Açu.

- A associação de fácies do topo da Formação Aliança e da Formação Sergi na borda Oeste da bacia permite definir um sistema flúvio-eólico-lacustre/lobos de suspensão para a seqüência, com predomínio ora flúvio-eólico, ora eólico-lacustre, ou ainda, intervalos essencialmente eólicos ou fluviais.
- A variável espessura de fácies possui distribuição estatística lognormal. Ocorre uma semelhança muito grande entre as distribuições de espessura das fácies de barra fluvial (fácies B) e de duna eólica (fácies E) da Formação Sergi. Isto decorre de que, nos dois casos, a origem é por migração, truncamento e superposição de formas de leito 3D, formas originadas por processos distintos (fluvial e eólico), mas que resultam em geometrias externas muito similares.
- A análise e a síntese das seqüências verticais de fácies por processos de Markov permitiram a criação de modelos matemáticos probabilísticos para as formações, representados pelas matrizes de probabilidades de transições e pelos diagramas de transições entre as fácies.
- A seleção de transições mais significativas nos diagramas de transições permite identificar associações de fácies de canal e de planície de inundação para a Formação Açu; de canal com retrabalhamento eólico e de transbordamento de canal para a Formação Sergi; e associações eólicas e lacustres para a Formação Monte Alegre. Por este método foi possível agrupar as fácies em associações que representam subambientes dos sistemas deposicionais.
- A análise de entropia revelou sistemas muito desordenados, resultantes da forte dinâmica deposicional dos sistemas continentais estudados. A Formação Monte Alegre apresentou o menor valor de entropia relativa do sistema, revelando-se o sistema mais ordenado dentre os três, o que é explicado pelo fato de seu sistema desértico ter melhor preservado a ciclicidade de suas fácies que os sistemas fluviais, com maior dinâmica interna, das outras formações estudadas.
- O resultado das simulações por processos de Markov revelou seqüências muito próximas das reais, tanto no aspecto visual-geológico dos padrões de intercalações entre as fácies, como nas matrizes de transições. Contudo, as seqüências simuladas não respeitam a posição espacial das amostras, e, portanto, não se prestam à correlação lateral entre si ou com poços testemunhados.

- A análise geoestatística das fácies produziu variogramas estabilizados, com alcance dentro do campo de investigação, e efeito pepita muito variado, de pequeno a grande. Os padrões de ciclicidade podem ser vistos em praticamente todos os variogramas, pela presença de efeito buraco. Os variogramas das fácies de canal, barras, e das fácies eólicas são bem definidos, enquanto aqueles das fácies C e D, de transbordamento de canal, ou lacustres, são erráticos. Contudo, eles apresentam melhor definição quando as fácies são agrupadas - fácies CD.
- As simulações geoestatísticas em várias dimensões complementam os modelos geológicos, pois respeitam as proporções entre as fácies, os variogramas ou a variabilidade espacial da fácies, e também o ponto amostrado.
- A comparação entre as seções geológica e geoestatística da Formação Monte Alegre revela grande similaridade. As fácies lacustres dos intervalos entre os poços são melhor representadas pelo modelo geoestatístico do que uma mera representação subjetiva de sua presença.
- As fácies sedimentares classificadas nas imagens sedimentares de ambientes recentes, equivalentes aos antigos estudados, apresentaram variogramas bem definidos, mostrando variabilidade areal adequada para a aplicação em subsuperfície dos variogramas horizontais. Como recomendação para futuras pesquisas fica a utilização destes variogramas horizontais em simulações de depósitos antigos.
- A simulação por modelos determinísticos de formas de leito permitiu reproduzir a geometria e as paleocorrentes fluviais da Formação Açu, e as eólicas e fluviais da Formação Sergi. As diferenças básicas entre estas formas de leito são o porte, de dimensões maiores no caso das formas eólicas; e a sinuosidade da linha de crista, com maior sinuosidade para as formas eólicas, o que é refletido também pela maior dispersão dos dados de paleocorrentes destas mesmas formas.
- As simulações determinísticas de seqüências aluviais reproduziram os padrões bidimensionais, transversais aos canais, das Formações Açu e Sergi. Apesar do modelo simular apenas duas fácies (canal e transbordamento / planície de inundação), os resultados mostram importantes parâmetros geométricos das seqüências, como as porcentagens relativas entre as fácies, o número e as dimensões dos corpos de arenito e lamito, dentre outros.

- A aplicação da análise geoestatística às seqüências geradas pelo *FPSM* constitui um importante meio de integração entre modelos probabilísticos e determinísticos. Gerando-se diferentes seções com parâmetros sedimentológicos conhecidos pode-se melhor interpretar os variogramas. No caso das formações Açu e Sergi, os variogramas resultantes das seções simuladas pelo *FPSM* mostram padrões ideais de ciclicidade lateral, o que raramente ocorre nos sistemas reais. Já na direção vertical mostram a existência de elevada aleatoriedade da seqüência, o que é devido ao modelo de avulsão de canal adotado no *FPSM*, baseado em números aleatórios.
- A geometria dos reservatórios das formações deste estudo ficam assim caracterizadas através da modelagem geológica e geomatemática de seus depósitos fluviais e/ou eólicos. Contudo, o ideal em termos de modelagem ainda não foi alcançado. Resta um maior detalhamento dos modelos geológicos, em nível da caracterização de cada elemento da arquitetura deposicional. No que se refere aos modelos geomatemáticos, os resultados gráficos precisam ser aprimorados, e a simulação determinística 3D é uma importante meta a ser alcançada.
- Todos estes objetivos apontam para a necessidade de uma maior compreensão dos processos e produtos sedimentares, como também de uma forte capacitação em modelagem matemática/computacional, temas que devem ser conduzidos conjuntamente por equipes de trabalho integradas, seja em pesquisa básica em universidades, seja em instituições de pesquisa e desenvolvimento de companhias de petróleo.

7. Referências Bibliográficas

- AGTERBERG, F.P. 1974. *Geomathematics - mathematical background and geoscience applications. Developments in Geomathematics 1*. Amsterdam, Elsevier. 596 p.
- AGTERBERG, F.P. & GRIFFITHS, M. 1991. Computer applications in stratigraphy 1989/1990: a review. *Computers & Geosciences*, 17(8):1105-1118.
- ALABERT, F. G. & MASSONNAT, G. J. 1990. Heterogeneity in a complex turbiditic reservoir: stochastic modeling of facies and petrophysical variability. In: ANNUAL TECHNICAL CONFERENCE AND EXHIBITION OF THE SOCIETY OF PETROLEUM ENGINEERS, 65. New Orleans, 1990. *Proceedings...* New Orleans, SPE. p. 775-790. (SPE 20604).
- ALLEN, J.R.L. 1970. Studies in fluvial sedimentation: a comparison of fining-upwards cyclothems. *J. Sediment. Petrology*, 40:298-323.
- ALLEN, J.R.L. 1983. Studies in fluvial sedimentation: bars, bar-complexes and sandstone sheets (low sinuosity braided streams) in the Brownstones (Lower Devonian), Welsh Borders. *Sediment. Geol.*, 33:237-293.
- ASHLEY, G.M. 1990. Classification of large-scale subaqueous bedforms: a new look at an old problem (SEPM Bedforms and Bedding Structures Symposium). *J. Sediment. Petrology*, 60(1): 160-172.
- BAGNOLD, R.A. 1941. *The physics of blown sand and desert dunes*. London, Methuen. 165 p.
- BALDISSERA, P.R. 1992. *Modelagem estocástica de fácies para caracterização da distribuição espacial das heterogeneidades de reservatório*. Campinas. 100 p. (Dissertação de mestrado, IG/UNICAMP).
- BECKER, M.R.; CARRASCO, B.N.; BONET, L.; SOUZA, M.S.; ASSIS, O.C.; FARIAS, P.R.C. 1991. Estudos de afloramentos para análise quantitativa de reservatórios. *Bol. Geociênc. PETROBRÁS*, 5(1-4):115-117.
- BECKER, M.R.; CARRASCO, B.N.; SOCORRO, M.; & FARIA, P.R.C. 1992. Estudos de afloramentos para modelagem geológica e geoestatística do reservatório fluvial da Formação Açú, Bacia Potiguar. In: SEMINÁRIO DE GEOLOGIA DE DESENVOLVIMENTO E RESERVATÓRIO, 5, Rio de Janeiro, 1992. *Atas...* Rio de Janeiro, PETROBRÁS/DEPEX-CENPES.
- BERALDO, V.T. 1993. *Estudo de comportamento de poço de óleo com aquífero de fundo, utilizando modelagem estocástica com base em afloramentos*. Campinas. 116 p. (Dissertação de Mestrado, IG/UNICAMP).

- BETTINI, C. 1989. *Simulação de sistemas geológicos em computador*. Rio de Janeiro, PETROBRÁS/CENPES, Rio de Janeiro, 14p. (Notas para o nivelamento preparatório para o Curso de Modelagem Matemática de Bacias).
- BIGARELLA, J.J. 1972. Eolian environments; their characteristics, recognition and importance. In: RIGBY, J.K. & HAMBLIN, W.K. eds. *Recognition of ancient sedimentary environments*. p. 12-62 (SEPM - Special Publication, 16).
- BLAKEY, R.C. 1988. Superscoops: their significance as elements of eolian architecture. *Geology*, 16(6): 483-487.
- BREED, C.S., FRYBERGER, S.C., ANDREWS, S., McCAULEY, C., LENNARTZ, F., GEBEL, D. & HORSTMAN, K. 1979. Regional studies of sand seas using landsat (ERTS) imagery. In: *A study of global sand seas*. U.S. Geol. Surv., 92 p. (Prof. Paper. 1052).
- BRIDGE, J.S. 1979. A FORTRAN program to simulate alluvial stratigraphy. *Computers & Geosciences*, 5(3):335-348.
- BRIDGE, J.S., LEEDER, M.R. 1979. A simulation model of alluvial stratigraphy. *Sedimentology*, 26(5):617-644.
- BROWN, L.F., Jr.; CLEAVES, A.W., II; ERXLEBEN, A.W. 1973. Pennsylvanian depositional systems in North-Central Texas. *Bur. Econ. Geol. Guidebook*, 14:1-122.
- BRUHN, C.H. & DE ROS, L.F. 1987. Formação Sergi: evolução de conceitos e tendências na geologia de reservatório. *Bol. Geociênc. PETROBRÁS*, 1(1):25-40.
- CAETANO-CHANG, M.R.; WU, F.T.; BRIGHETTI, J.M.P. 1991. Caracterização eólica de arenitos da Formação Pirambóia, proximidades de São Pedro (SP). In: SIMPÓSIO DE GEOLOGIA DO SUDESTE, 2., São Paulo, 1991. *Boletim de Resumos*. São Paulo, SBG/SP-RJ. p. 6.
- CARVALHO, R.D. & AMORIM, W.N. 1991. Sísmica de alta resolução. *Bol. Geociênc. PETROBRÁS*, 5(1-4):83-107.
- CARR, T.R. 1982. Log-linear models, Markov chains and cyclic sedimentation. *J. Sediment. Petrology*, 52(3):905-912.
- CARR, D.D., HOROWITZ, A., HRABAR, S.V., RIDGE, K.F., ROONEY, R., STRAW, W.T., WEBB, W. and POTTER, P.E. 1966. Stratigraphic Sections, Bedding Sequences, and Random Processes. *Science*, 154:1162-1164.
- CASEY, J.M. 1980. Depositional systems and basin evolution of the Late Paleozoic Taos Trough, northern New Mexico. Texas, 236 p. (PhD Dissertation, Univ. of Texas).

- CASTRO, J.C. 1986. *Interpretação de ambientes a partir de testemunhos*. Rio de Janeiro, PETROBRÁS/CENPES, 53 p. (Notas do curso).
- CASTRO, J.C. & BARROCAS, S.L.S. 1981. *Roteiro de campo: fácies da Formação Açu, Bacia Potiguar*. Rio de Janeiro, PETROBRÁS/CENPES. 30 p. (Relatório interno 673-2256).
- COIMBRA, A.M.; RICCOMINI, C.; MELO, M.S. de. 1983. A Formação Itaquaquecetuba: evidência de tectonismo no Quaternário paulista. In: SIMPÓSIO REGIONAL DE GEOLOGIA, 4º, São Paulo. Atas..., SBG, p.253-266.
- DACEY, M.F. & KRUMBEIN, W.C. 1970. Markovian models in stratigraphic analysis. *J.Int. Assoc. Math. Geol.*, 2:175-191.
- DAVIS, J.C. 1986. *Statistics and data analysis in geology*. 2 ed. New York, John Wiley & Sons. 646 p.
- DAVIS, J.C. & COCKE, J.M. 1972. Interpretation of complex lithologic successions by substitutability analysis. In: MERRIAM, D.F. ed., *Mathematical models of sedimentary processes*. New York, Plenum Press. p. 27-52.
- DELLA FAVERA, J.C. 1988. *As aquisições teóricas em estratigrafia e sedimentologia nos últimos vinte e cinco anos - sua incidência no ensino de graduação*. In: CICLO DE PALESTRAS SOBRE TEORIA GEOCIENTÍFICA DOS ÚLTIMOS 20 ANOS E SUA INCIDÊNCIA NO ENSINO DE GRADUAÇÃO, 1988. Palestra... CIGO, UFRGS.
- DELLA FÁVERA, J.C. 1990. *Tempestitos da Bacia do Parnaíba*. Rio Grande do Sul. 2 vol. (Tese de Doutorado, UFRGS).
- DEUTSCH, C.V. & JOURNAL, A.G. 1992. GSLIB. Geostatistical software library and user's guide. New York, Oxford University Press. 340 p.
- ENOS, P. 1991. Sedimentary parameters for computer modeling. In: FRANSEEN *et al.* eds. *Sedimentary modeling: computer simulations and methods for improved parameter definition*. *Kans. Geol. Surv. Bull.*, 233: 63-99.
- ESTEVES, F.R. 1982. Exploração na área do Juruá. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE PETRÓLEO, 2, Rio de Janeiro, 1982. *Anais...* Rio de Janeiro, v. 23.
- ETHIER, V.G. 1975. Application of Markov analysis to the Banff Formation (Mississippian). *Mathematical Geology*, 7:47-61.
- FERNANDES, L.A. 1992. *Estratigrafia, ambientes deposicionais e evolução geológica da cobertura Cretácea suprabasáltica no Paraná e pontal do Paranapanema (SP): os Grupos Caiuá e Bauru*. São Paulo. 129 p. (Dissertação de mestrado, IG/USP).

- FERNANDES, H.G. & LANZARINI, W.L. 1993. *TMK 1.0: um programa em C para análise e síntese de seqüências verticais de fácies por processos de Markov*. Software de domínio público desenvolvido no Centro de Computação Eletrônica da Universidade de São Paulo - CCE/USP (e-mail: wlanzari@fox.cce.usp.br).
- FERREIRA, J.V. 1984. *Petrologia e diagênese dos arenitos oleíferos da Formação Açú no Campo de Alto do Rodrigues*. Ouro Preto. 189 p. (Dissertação de mestrado, Departamento de Geologia/UFOP).
- FERREIRA, A. A. 1988. *Caracterização de reservatórios de petróleo através de análise geoestatística*. Ouro Preto. 152 p. (Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia/UFOP).
- FRANSEEN E.K; WATNEY, W.L.; KENDALL, C.G.St.C.; ROSS, W. 1991. Sedimentary modeling: computer simulations and methods for improved parameter definition. *Kans. Geol. Surv. Bull.*, **233**:1-524.
- FRYBERGER, S.G. 1986. Stratigraphic traps for petroleum in wind-laid rocks. *Amer. Ass. Petrol. Geol. Bull.*, **70**(12):1765-1776.
- FRYBERGER, S.G.; KRYSTINIK, L.F.; SCHENK, C.J. 1990. *Modern and ancient eolian deposits: petroleum exploration and production*. Denver, SEPM. 233p.
- GALLOWAY, W.E. 1977. Catahoula Formation of the Texas Coastal Plain: Depositional systems, composition, structural development, ground-water flow history, and uranium distribution. *Bur. Econ. Geol. Rep. Invest.*, **87**:1-59.
- GINGERICH, P.D. 1969. Markov analysis of cyclic alluvial sediments. *J. Sediment. Petrography*, **39**(1):330-332.
- GLENNIE, K.W. 1970. *Desert sedimentary environments*. Amsterdam, Elsevier. 222 p. (Developments in Sedimentology, 14).
- GLENNIE, K.W. 1987. Desert sedimentary environments, present and past - a summary. *Sediment. Geol.*, **50**:135-165.
- GOLBERY, R. & WINIKOFF, K. 1986. SEDCOD: a FORTRAN 77 /program for decoding sedimentological field data. *Computers & Geosciences*, **12**(1):47-79.
- GRESSLY, A. 1838. Observations géologiques sur le Jura Soleurois. *Nouv. Mem. Soc. Helvet. Sci. Nat.*, **2**(6): 1-112.
- GRIFFITHS, J.C. 1970. Current trends in geomathematics. *Earth-Sci. Rev.*, **6**:121-140.
- HALDORSEN, H.H. 1983. *Reservoir characterization procedures for numerical Simulation*. Austin. (Ph.D. thesis, Univ. of Texas).

- HARBAUGH, J.W. & BONHAM-CARTER, G. 1970. *Computer simulation in geology: modelling dynamic systems*. Wiley. 575 p.
- HARDY, S. & WALTHAM, D. 1992. Computer Modeling of Tectonics, Eustasy and Sedimentation using The Macintosh. *Geobyte*, 7(6):42-52.
- HARPER, C.W. 1984a. Improved methods of facies sequence analysis. In: WALKER, R.G. ed. *Facies models*. 2 ed. p.11-13. (Geoscience Canada Reprint Series, 1).
- HARPER, C.W. 1984b. Facies models revised: an examination of qualitative methods. *Geoscience Canada*, 11(4):203-207.
- HARRIS, D.G. & HEWITT, C.H. 1977. Synergism in reservoir management: the geologic perspective. *J. Petrol. Technol.*, 29:761-770.
- HATTORI, I. 1976. Entropy in Markov chains and discrimination of cyclic patterns in lithologic successions. *Mathematical Geology*, 8(4):477-497.
- HOWARD, J.C. 1968. *Bibliography of statistical applications in geology: council on education in geological sciences programs*. Pub. 2. Washington, Am. Geol. Inst. 24 p.
- HUNTER, R.E. 1977. Basic types of stratification in small eolian dunes. *Sedimentology*, 24:361-87.
- JACKSON, R.G. II 1975. Hierarchical attributes and a unifying model of bed forms composed of cohesionless material and produced by shearing flow. *Geol. Soc. Amer. Bull.*, 86:1523-1533.
- JOHNSON, S.Y. 1987. Sedimentology and paleogeographic significance of six fluvial sandstone bodies in the Maroon Formation, Eagle Basin, Northwest Colorado. *U.S. Geol. Surv.Bull.*, 1787:1-18.
- JOURNAL, A.G. 1974. *Simulation conditionnelle de gisements miniers - théorie et pratique*. Fontainebleau. 110 p. (Thèse de Docteur-Ingénieur, Centre de Géostatistique).
- JOURNAL, A.G. 1989. Fundamentals of geostatistics in five lessons. *Amer. Geophys. Union*, 8:1-40. (Short Course in Geology).
- JOURNAL, A.G. & HUIJBREGTS, C.J. 1978. *Mining geostatistics*. New York, Academic Press. 600 p.
- JOURNAL, A. G. & ISSAACS, E. H. 1984. Conditional indicator simulation: application to a Saskatchewan uranium deposit. *Mathematical Geology*, 16(7):685-718.

- JOURNAL A. G. & GOMEZ-HERNANDEZ, J.J. 1989. *Stochastic imaging of the Wilmington clastic sequence*. Stanford Center of Reservoir Forecasting. 42 p.
- KATTAH, S.S. 1991. *Análise faciológica e estratigráfica do Jurássico Superior/Cretáceo Inferior na porção meridional da Bacia do São Francisco, oeste do Estado de Minas Gerais*. Ouro Preto. 227 p. (Dissertação de Mestrado, Departamento de Geologia da Escola de Minas/UFOP).
- KOCUREK, G. 1986. Origins of low-angle stratification in aeolian deposits. In: NICKLING, W.G. ed., *Aeolian Geomorphology*. In: ANNUAL BINGHAMTON SYMPOSIUM, 17th, Massachusetts, 1986. *Proceedings...* Massachusetts, p. 177-193.
- KRIGE, D. G. 1951. *A statistical approach to some mine valuations and allied problems at the Witwatersrand*. (MSc. Thesis, University of Witwatersrand).
- KRUMBEIN, W.C. & GRAYBILL, F.A. 1965. *An introduction to statistical models in geology*. New York, MacGraw-Hill. 475 p.
- KRUMBEIN, W.C. 1967. FORTRAN IV computer programs for Markov chain experiments in geology. *Kans. Geol. Surv. Comp. Contr.*, 13:1-38.
- KRUMBEIN, W.C. 1968. Computer simulation of transgressive and regressive deposits with a discrete-state, continuous-time markov model. *Kans. Geol. Surv. Comp. Contr.*, 22:11-18.
- KRUMBEIN, W.C. 1969. The computer in geological perspective. In: MERRIAM, D.F. ed. *Computer Applications in the Earth Sciences*. New York, Plenum. p. 251-275.
- KRUMBEIN, W.C. & DACEY, M.F. 1969. Markov chains and embedded Markov chains in geology. *Jour. Math. Geol.*, 1(1):79-96.
- LANGFORD, R.P. 1989. Fluvial-aeolian interactions: part I, modern systems. *Sedimentology*, 36:1023-1035.
- LANGFORD, R.P. & CHAN, M.A. 1989. Fluvial-aeolian interactions: part II, ancient systems. *Sedimentology*, 36:1037-1051.
- LANZARINI, W.L. 1984. *Fácies sedimentares e ambiente deposicional da Formação Monte Alegre na área do Juruá, Bacia do Alto Amazonas, Brasil - diagênese e permoporosidade dos arenitos-reservatório*. Ouro Preto. 215 p. (Dissertação de Mestrado, Departamento de Geologia da Escola de Minas/UFOP).
- LANZARINI, W.L.; COSTA, M.F. da; SOUZA CRUZ, C.E. 1986. Reconhecimento da fácies sedimentar eólica em subsuperfície: critérios e exemplos de aplicação. In: CONGR. BRAS. GEOL., 34, Goiânia, 1986. *Anais...* Goiânia, v. 1, p. 233-245.

- LAVINA, E.L. 1991. *Geologia sedimentar e paleogeografia do Neopermiano e Eotriássico (intervalo Kazaniano-Scythiano) da Bacia do Paraná*. Porto Alegre. 333 p. (Tese de doutorado, UFRGS).
- LEFEVER, R.D. 1990. Markov: a basic program for numerical analysis of sequential data on the microcomputer. *Computers & Geosciences*, 16(2):p.141-152.
- LIMA FILHO, F.P. 1991. *Fácies e ambientes deposicionais da Formação Piauí (Pensilvaniano), Bacia do Parnaíba*. São Paulo. 137 p. (Dissertação de Mestrado, IG/USP).
- LIN, C. & HARBAUGH, J.W. 1984. *Graphic Display of two- and three-dimensional Markov computer models in geology*. New York, Van Nostrand Reinhold Comp. 180 p. (Computer Methods in the Geosciences, series).
- LIPSCHUTZ, S. 1972. *Probabilidade*. 3 ed. rev. São Paulo, McGraw-Hill do Brasil. 228 p. (Coleção Schaum).
- MACKEY, S.D. & BRIDGE, J.S. 1992. A revised fortran program to simulate alluvial stratigraphy. *Computers & Geosciences*, 18(2/3):119-181.
- MATHERON, G. 1962/1963. *Traité de Géostatistique Appliquée*. v.1-2. Paris, Technip.
- MATHERON, G. 1963. Principles of geostatistics. *Econ. Geol.*, 58:1246-1266.
- MATHERON, G. 1971 *The theory of regionalised variables and its applications*. Paris, Centre de Morphologie Mathématique de Fontainebleau. 211 p. (Cahier 5).
- MATHERON, G; BEUCHER, H.; FOUQUET, C. DE; GALLI, A.; GUERILLOT D.; RAVENE C. 1987. Conditional simulation of the geometry of fluvio-deltaic reservoir. In: ANNUAL TECHNICAL CONFERENCE AND EXHIBITION OF THE SOCIETY OF PETROLEUM ENGINEERS, 62, Dallas, 1987. *Proceedings...* Dallas, SPE, p. 123-131. (SPE 16753).
- McKEE, E.D. 1979. Ancient sandstone considered to be eolian. In: *A study of global sand seas*. US Geol. Surv. p. 187-238. (Prof. Paper 1052).
- McKEE, E.D. & BREED, C.S. 1976. Sand seas of the world. In: *ERTS-1 - A New Window on Our Planet*. US Geol. Surv. p. 81-88. (Prof. Paper 922).
- MEDEIROS, R.A. & PONTE, F.C. 1981. *Roteiro geológico da Bacia do Recôncavo (Bahia)*. PETROBRÁS/SEN-BA. 63p. (Setor de Ensino da Bahia).
- MIALL, A.D. 1973. Markov chain analysis applied to an ancient alluvial plain succession. *Sedimentology*, 20(3):347-364.

- MIALL, A.D. 1977. A review of the braided river depositional environment. *Earth-Sci. Rev.*, **13**:1-62.
- MIALL, A.D. 1978. Lithofacies types and vertical profile models in braided rivers: a summary. In: MIALL, A.D. (ed.) *Fluvial Sedimentology*. Calgary, Canadian Society of Petroleum Geologists. p. 597-604. (Can. Soc. Petrol. Geol. Mem. 5).
- MIALL, A.D. 1982. *Analysis of fluvial depositional systems*. AAPG Education Course Note Series 20, 75p. (originally presented at the AAPG Fall Education Conference, Calgary, Canada, 1981).
- MIALL, A.D. 1985. Architectural-element analysis: a new method of facies analysis applied to fluvial deposits. *Earth-Sci. Rev.*, **22**: 261-308.
- MIALL, A.D. 1988. Reservoir heterogeneities in fluvial sandstones: lessons from outcrop studies. *Bull. Amer. Assoc. Petrol. Geol.*, **72**(6):682-697.
- MIDDLETON, G.V. 1973. Johannes Walther's Law of the correlation of facies. *Bull. Geol. Soc. Amer.*, **84**:979-988.
- MORAES, M.A.S. & GABAGLIA, G.P.R. 1986. Arenitos eólicos intercalados com seqüências fluviais: critérios para o reconhecimento. In: CONGR. BRAS. GEOL., 34, Goiânia, 1986. *Anais...* Goiânia, SBG, v. 1, p. 246-261.
- POWERS, D.W. & EASTERLING, R.G. 1982. Improved methodology for using embedded Markov chains to describe cyclical sediments. *J. Sediment. Petrology*, **52**(3):913-924.
- PORTER, M.L. 1986. Sedimentary record of erg migration. *Geology*, **14**:497-500
- REINECK, H.E. & SINGH, I.B. 1980. *Depositional sedimentary environments*. New York, Springer-Verlag. 549 p.
- RIBEIRO, C.A.F. & LANZARINI. 1994. Programa para converter arquivos do SITIM para o GSLIB. Laboratório de Sistemas Integrados da Poli, USP (e-mail lanzari@lsi.usp.br). Software de domínio público.
- RICCOMINI, C.; COIMBRA, A.M.; SANCHES, C.P.; MENEZES, G.M.N. 1991. Vertebrado fóssil da Formação Sergi (Mesozóico, Recôncavo, Bahia). In: Congr. Bras. Paleont., 12.. São Paulo, 1991. *Boletim de Resumos*. São Paulo, SBP, p. 48.
- RUBIN, D.M. & MCCULLOCH, D. S. 1980. Single and superimposed bedforms: a synthesis of San Francisco Bay and flume observations. *Sediment. Geol.*, **26**:207-231.
- RUBIN, D.M. 1987a. *Cross-bedding, bedforms and paleocurrents*. Denver, SEPM. 187p. (Concepts in Sedimentology and Paleontology, 1).

- RUBIN, D.M. 1987b. *Bedforms Z.O.: Computer programs for simulation and animation of bedforms and cross-bedding (companion diskette)*. Denver, SEPM. 20p. (Special Publication).
- RUST, B.R. 1978. A classification of alluvial channel systems. In: Miall, A.D. (ed.) *Fluvial Sedimentology*. Calgary, Canadian Society of Petroleum Geologists. p. 187-198. (Can. Soc. Petrol. Geol. Mem., 5).
- RUST, B.R. AND LEGUN, A.S. 1983. Modern anastomosing fluvial deposits in arid central Australia, and a Carboniferous analogue in New Brunswick, Canada. In: Collinson, J.D. & Lewin, J. (eds.) *Modern and Ancient Fluvial Systems*. Oxford, Blackwell. p. 385-392. (Spec. Publ. Int. Assoc. Sed., 6).
- SCHLUMBERGER. 1972. *Log Interpretation*. New York, Schlumberger Limited. 112 p. (Vol. 1).
- SCHUMM, S.A. 1972. Fluvial paleochannels. In: RIGBY, J.K. & HAMBLIN, W.K. (eds.) *Recognition of ancient sedimentary environments*. Tulsa, SEPM. p. 98-107. (Society Economic Paleontologists and Mineralogists, Sp. Publ. n 19).
- SCHUMM, S.A. 1977. *The fluvial system*. New York, Wiley & Sons. 338 p.
- SCHUMM, S.A. 1981. Evolution and response of the fluvial system, sedimentological implications. In: ETHRIDGE, F.G. & FLORES, R.M. (eds.) *Recent and Ancient Nonmarine Depositional Environments: Models for Exploration*. Tulsa, SEPM. p. 19-30. (Society Economic Paleontologists and Mineralogists, Sp. Publ. n 31).
- SCHWARZACHER, W. 1975. *Sedimentation Models and Quantitative Stratigraphy*. New York, Elsevier. 387 p. (Developments in Sedimentology, 19).
- SELLEY, R.C. 1970. Studies of sequence in sediments using a simple mathematical device. *Quart. J. Geol. Soc. London*, 125:557-581.
- SERRA, O. 1985. *Sedimentary environments from wireline logs*. Schlumberger Comp. 211 p.
- SERRA, O. 1986. *Stratigraphy, tectonics and multi-well studies using wireline logs*. Schlumberger Comp. 127 p.
- SILVA, N.M. 1966. Paleocorrentes deposicionais na Formação Sergi. *Bol. Téc. Petrobrás*, 9(2):181-209.
- SMITH, D.G. 1983. Anastomosed fluvial deposits: modern examples from western Canada. In: COLLINSON, J.D. & LEWIN, J. (eds.) *Modern and Ancient Fluvial Systems*. Oxford, Blackwell. p. 155-168. (Spec. Publ. Int. Assoc. Sed., 6).

- SMITH, D.G. & PUTNAM, P.E. 1980. Anastomosed fluvial deposits: modern and ancient examples from Alberta, Canada. *Can. J. Earth Sci.*, 17:1396-1406.
- SMITH, D.G. & SMITH, N.D. 1980. Sedimentation in anastomosed river systems: examples from alluvial valleys near Banff, Alberta. *J. Sediment. Petrology*, 50:157-164.
- SNEIDER, R.M.; TINKER, C.N.; RICHARDSON, J.G. 1981. Reservoir geology of sandstones. In: ANNUAL TECHNICAL CONFERENCE, 56, Texas, 1981. SPE, Texas. (Short Course).
- SOUZA, M.J. de. 1987. Proposta de um Sistema Estatístico de descrição de heterogeneidades internas de reservatórios. *Bol. Geociênc. PETROBRÁS*, 1(1):97-102.
- SOUZA, M.J. de; BETTINI, C.; LOPEZ, I.F.; BRAGA, L.P.V.; BONET, L.; BRUHN, C.H.L.; SOUZA, O.A.; MORAES, M.A.S. 1988. *Projeto Lagoa Parda. Relatório de Progresso*. PETROBRÁS, 53 p. (Relatório Interno).
- SOUZA Jr., O.G. 1988. *Simulação condicional de unidades de fluxo na área II do projeto piloto de injeção de vapor na Formação Açú (KSup), Campo de Estreito, Bacia Potiguar, Brasil*. Ouro Preto. 168 p. (Dissertação de Mestrado, UFOP).
- SPOT IMAGE. 1990. *Carte d'evolution de la Riviere Jamuna*. SPOT OUTIL DE DEVELOPPEMENTE, COLLOQUE INTERNATIONAL, UNESCO, Paris.
- SPOT IMAGE. 1993. *SPOTView Demo Product*. Toulouse, France. 20 p.
- STEVAUX, J.C. 1993. *O Rio Paraná: geomorfogênese, sedimentação e evolução quaternária de seu curso superior (região de Porto Rico, PR)*. São Paulo. 242 p. (Tese de Doutorado, IGc-USP).
- TETZLAFF, D.M. & HARBAUGH, J.W. 1989. *Simulating clastic sedimentation*. New York, Van Nostrand Reinhold. 202 p. (Computer methods. in the Geosciences Series).
- TYLER, N. & FINLEY, R.J. 1990. *Geological characterization of heterogeneous reservoirs: an overview of reserve growth and reservoir diversity with selected examples*. Convênio PETROBRÁS/UFOP. (Apostila para curso).
- VASCONCELOS, E.P.; LIMA NETO, F.F.; ROOS, S. 1990. Unidades de Correlação da Formação Açú - Bacia Potiguar. In: CONGR. BRAS. GEOL., 36, Natal, 1990. *Anais...* SBG, Natal. v. 1, p. 227-240.

- VIANNA, C.F.; GAMA JR., E.G.; SIMÕES, I.A.; MOURA, J.A.; FONSECA, J.R.; ALVES, R.J. 1971. Revisão estratigráfica da Bacia Recôncavo/Tucano. *Bol. Téc. PETROBRÁS*, 14(3/4):157-192.
- VISTELIUS, A.B. 1969. *Mathematical Geology*. Leningrado, Systematic Index of Reference. Lab. Math. Geology. 246 p.
- VON BERTALANFFY, L. 1968. *General System Theory - Foundations, Developments, Applications*. The Penguin Press. 211 p.
- WALKER, R.G. 1979. *Facies Models*. Toronto, G.A.C. 211 p. (Geoscience Canada, reprint series, 1).
- WALKER, R.G. 1984. *Facies Models*. 2. ed. Toronto, G.A.C. 317 p. (Geoscience Canada, reprint series, 1).
- WALKER, R.G., & CANT, D.J. 1979. Facies models 3: sandy fluvial systems. In: WALKER, R.G. (ed.) *Facies Models*. Toronto, G.A.C. p. 23-32. (Geoscience Canada, reprint series, 1).
- WALKER, R.G. & CANT, D. J. 1984. Sandy fluvial systems. In: R.G. Walker (ed.), *Facies Models*, 2 ed. Geoscience Canada Reprint Series, 1: 71-89.
- WALTHAM, D. 1992. Mathematical Modeling of Sedimentary Basin Processes. *Marine and Petroleum Geology*, 9:265-273
- WELLS, N.A. 1989. A program in basic for facies-by-facies Markov chain analysis. *Computers & Geosciences*, 15(1):143-155.
- WILLACY, C.; HARDY, S.; WALTHAM, D.; DART, C. 1993. *Faulting and sedimentation: numerical models and analysis*. London University, Department of Geology. 20 p. (Fault Dynamics Project, Report N 4).
- WOOD, J.M. 1989. Alluvial architecture of the Upper Cretaceous Judith River Formation, Dinosaur Provincial Park, Alberta, Canada. *Can. Petrol. Geol. Bull.*, 37(2):169-181.

ANEXOS

ANEXO 1

METODOLOGIA DE DESCRIÇÃO DE AFLORAMENTOS PARA LEVANTAMENTO DE DADOS DE GEOMETRIA DE FÁCIES

- 1 - Olhe o afloramento como um todo, a uma certa distância (p.ex., do outro lado da rodovia). Analise-o no contexto tectono-estratigráfico e paleoambiental; faça um desenho esquemático indicando as grandes variações faciológicas. Oriente o desenho, estime dimensões e coloque o sentido predominante das paleocorrentes;
- 2 - aproximando-se, descreva as fácies com maior detalhe (litologia, cor, textura, estrutura sedimentar - paleocorrente - atitudes dos planos de estratificação, conteúdo fossilífero, e principalmente geometria). Desenhe e fotografe detalhes representativos destes parâmetros. Quando necessário, retire amostras para seções-delgadas, petrofísica, paleontologia, etc;
- 3 - levante o perfil estratigráfico do afloramento e seqüências verticais mais detalhadas em porções que mostram feições geometricamente importantes. Construa diagramas (profundidade x granulometria), e utilize a simbologia convencional para os parâmetros faciológicos;
- 4 - faça o levantamento fotográfico do afloramento, definindo escala e distanciamento adequado das fotos, com recobrimento entre imagens de 40 a 60% para reduzir as deformações nas bordas;
- 5 - monte painéis com as fotos (fotomontagem), recubra-os com papel transparente e faça o traçado das feições deposicionais, em laboratório;
- 6 - acrescentando ao trabalho de campo o resultado da fotomontagem, defina de modo qualitativo e quantitativo padrões geométricos e heterogeneidades, principalmente em escala macro e megascópica.

ANEXO 2

PARÂMETROS ESTATÍSTICOS DA VARIÁVEL ESPESSURA DE FÁCIES DAS FORMAÇÕES MONTE ALEGRE, AÇU E SERGI

DADOS ESTATÍSTICOS DA VARIÁVEL ESPESSURA DE FÁCIES (m)

FORMAÇÃO MONTE ALEGRE

	FÁCIES				
	B1	B2	B3	C	D
NÚMERO DE MEDIDAS	38	42	19	38	58
MÉDIA	2.5	1.8	2.5	0.9	1.3
MEDIANA	2.2	1.4	1.6	0.8	0.8
MODA	1.0	1.0	0.8	0.6	0.4
MÉDIA GEOMÉTRICA	2.01	1.39	1.91	0.77	0.82
VARIÂNCIA	2.83	3.12	4.11	0.42	2.55
DESVIO PADRÃO	1.68	1.77	2.03	0.64	1.60

FORMAÇÃO AÇU

	FÁCIES			
	A	B	C	D
NÚMERO DE MEDIDAS	24	21	10	10
MÉDIA	1.4	1.1	0.7	1.6
MEDIANA	1.4	0.6	0.6	1.2
MODA	0.5	0.5	0.5	0.8
MÉDIA GEOMÉTRICA	1.01	0.81	0.63	1.31
VARIÂNCIA	1.36	1.23	0.04	1.14
DESVIO PADRÃO	1.17	1.11	0.21	1.07

FORMAÇÃO SERGI

	FÁCIES				
	A	B	C	D	E
NÚMERO DE MEDIDAS	30	66	38	38	30
MÉDIA	3.4	2.9	0.9	0.8	2.8
MEDIANA	2.3	2.2	0.8	0.6	1.9
MODA	1.0	0.8	0.8	0.5	0.8
MÉDIA GEOMÉTRICA	2.09	2.23	0.78	0.67	1.97
VARIÂNCIA	11.33	5.66	0.25	0.21	7.18
DESVIO PADRÃO	3.37	2.38	0.50	0.46	2.68

ANEXO 3

**DADOS SEQUENCIAIS DAS FÁCIES DAS FORMAÇÕES MONTE ALEGRE, AÇU E
SERGI SEGUNDO A PROFUNDIDADE DOS TESTEMUNHOS**

Formação Monte Alegre

Poço Juruá-01 (prof. do topo = 2749 m)

0.0 D	24.0 B2	48.0 B1	72.0 B1
0.5 D	24.5 B2	48.5 B1	
1.0 D	25.0 B3	49.0 B1	
1.5 D	25.5 B1	49.5 A	
2.0 B2	26.0 B1	50.0 A	
2.5 B2	26.5 B1	50.5 A	
3.0 D	27.0 B1	51.0 A	
3.5 B2	27.5 B1	51.5 B3	
4.0 B2	28.0 B1	52.0 B3	
4.5 B2	28.5 B1	52.5 B3	
5.0 B2	29.0 B1	53.0 B3	
5.5 B2	29.5 B1	53.5 B3	
6.0 B2	30.0 B1	54.0 B3	
6.5 B2	30.5 B1	54.5 B3	
7.0 B2	31.0 B1	55.0 B3	
7.5 B2	31.5 B1	55.5 B3	
8.0 B2	32.0 B1	56.0 B3	
8.5 B2	32.5 B2	56.5 B3	
9.0 B2	33.0 B2	57.0 B3	
9.5 B2	33.5 B2	57.5 D	
10.0 D	34.0 D	58.0 B2	
10.5 D	34.5 D	58.5 B2	
11.0 D	35.0 D	59.0 B2	
11.5 C	35.5 D	59.5 B2	
12.0 C	36.0 D	60.0 B2	
12.5 C	36.5 D	60.5 B2	
13.0 C	37.0 D	61.0 B2	
13.5 B3	37.5 D	61.5 B2	
14.0 B3	38.0 D	62.0 B2	
14.5 B3	38.5 D	62.5 B2	
15.0 B1	39.0 D	63.0 B3	
15.5 B1	39.5 D	63.5 B3	
16.0 B1	40.0 D	64.0 B3	
16.5 B1	40.5 D	64.5 B3	
17.0 D	41.0 D	65.0 D	
17.5 D	41.5 D	65.5 D	
18.0 D	42.0 B2	66.0 B3	
18.5 C	42.5 B2	66.5 B3	
19.0 C	43.0 B2	67.0 B3	
19.5 D	43.5 B1	67.5 B3	
20.0 C	44.0 B1	68.0 B3	
20.5 C	44.5 B1	68.5 B3	
21.0 B1	45.0 B1	69.0 B3	
21.5 B1	45.5 B1	69.5 B3	
22.0 C	46.0 B1	70.0 B1	
22.5 C	46.5 B1	70.5 B1	
23.0 D	47.0 B1	71.0 B1	
23.5 B2	47.5 B1	71.5 B1	

Poço Juruá-02 (prof. do topo = 2672 m)

0.0 B1
 0.5 B1
 1.0 B1
 1.5 B2
 2.0 B2
 2.5 B2
 3.0 B2
 3.5 C
 4.0 D
 4.5 C
 5.0 C
 5.5 C
 6.0 D
 6.5 D
 7.0 D
 7.5 B1
 8.0 B1
 8.5 B1
 9.0 B1

Poço Juruá-03 (prof. do topo = 2716 m)

0.0 B1	12.5 B2	25.0 B1	37.5 B2
0.5 B1	13.0 B2	25.5 B1	38.0 B3
1.0 B1	13.5 B2	26.0 B1	38.5 B3
1.5 B1	14.0 B2	26.5 B1	39.0 B3
2.0 B1	14.5 B2	27.0 B1	39.5 B3
2.5 B1	15.0 B2	27.5 B1	40.0 D
3.0 B1	15.5 B2	28.0 B1	40.5 C
3.5 D	16.0 B2	28.5 B3	41.0 C
4.0 D	16.5 B2	29.0 D	41.5 C
4.5 D	17.0 B2	29.5 B3	
5.0 D	17.5 B2	30.0 B3	
5.5 D	18.0 B2	30.5 D	
6.0 D	18.5 D	31.0 D	
6.5 D	19.0 C	31.5 D	
7.0 D	19.5 C	32.0 D	
7.5 D	20.0 C	32.5 D	
8.0 D	20.5 D	33.0 D	
8.5 B2	21.0 D	33.5 D	
9.0 B2	21.5 D	34.0 D	
9.5 B2	22.0 D	34.5 D	
10.0 B2	22.5 D	35.0 D	
10.5 B2	23.0 D	35.5 D	
11.0 B2	23.5 D	36.0 B2	
11.5 B2	24.0 B2	36.5 B2	
12.0 B2	24.5 B2	37.0 B2	

Poço Juruá-04 (prof. do topo = 2701 m)

0.0 B2	17.0 D	34.0 B1
0.5 B2	17.5 D	34.5 B1
1.0 B2	18.0 D	35.0 B1
1.5 B2	18.5 D	35.5 B2
2.0 B2	19.0 C	36.0 B1
2.5 B2	19.5 C	36.5 B1
3.0 C	20.0 D	37.0 B1
3.5 C	20.5 D	37.5 B1
4.0 D	21.0 B3	38.0 B1
4.5 D	21.5 B3	38.5 B1
5.0 D	22.0 B3	39.0 B1
5.5 D	22.5 B3	39.5 C
6.0 D	23.0 B3	40.0 B3
6.5 D	23.5 B3	40.5 B3
7.0 D	24.0 B3	41.0 B3
7.5 B1	24.5 B3	41.5 B2
8.0 B1	25.0 B3	42.0 B2
8.5 B1	25.5 C	42.5 B3
9.0 B1	26.0 C	43.0 B3
9.5 B1	26.5 B3	43.5 B3
10.0 B1	27.0 B3	44.0 B2
10.5 B1	27.5 B3	44.5 B2
11.0 B1	28.0 B3	45.0 B2
11.5 B1	28.5 B3	45.5 B3
12.0 B2	29.0 B3	46.0 B3
12.5 B2	29.5 B3	46.5 B3
13.0 B2	30.0 B3	47.0 B3
13.5 B2	30.5 B3	47.5 B2
14.0 C	31.0 D	48.0 B2
14.5 C	31.5 D	48.5 B2
15.0 D	32.0 C	49.0 B2
15.5 D	32.5 D	49.5 B2
16.0 D	33.0 B2	50.0 B1
16.5 D	33.5 B2	50.5 B1

Poço Juruá-05 (prof. do topo = 2638 m)

0.0 D	6.5 B2	13.0 B1
0.5 D	7.0 B2	13.5 B1
1.0 D	7.5 B1	14.0 B1
1.5 D	8.0 B1	
2.0 C	8.5 B1	
2.5 C	9.0 B1	
3.0 D	9.5 B2	
3.5 D	10.0 B2	
4.0 C	10.5 B1	
4.5 C	11.0 B1	
5.0 D	11.5 B1	
5.5 D	12.0 B1	
6.0 B2	12.5 B1	

Poço Juruá-06 (prof. do topo = 2612 m)

0.0 C	15.5 B1	31.0 B2
0.5 C	16.0 B1	31.5 B2
1.0 C	16.5 B1	32.0 B2
1.5 C	17.0 B1	32.5 B1
2.0 C	17.5 B1	33.0 B1
2.5 D	18.0 D	33.5 B1
3.0 D	18.5 D	34.0 B1
3.5 D	19.0 B1	34.5 B1
4.0 C	19.5 B1	35.0 B1
4.5 C	20.0 B1	35.5 B2
5.0 C	20.5 D	36.0 B2
5.5 C	21.0 B1	36.5 B2
6.0 C	21.5 B1	37.0 B2
6.5 C	22.0 B1	37.5 B2
7.0 C	22.5 B1	38.0 B3
7.5 D	23.0 B1	38.5 B3
8.0 C	23.5 B1	39.0 B3
8.5 C	24.0 B1	39.5 B3
9.0 D	24.5 D	40.0 B3
9.5 C	25.0 D	40.5 B1
10.0 B3	25.5 B2	41.0 B1
10.5 B3	26.0 B2	41.5 B1
11.0 B3	26.5 B2	42.0 B1
11.5 B2	27.0 B2	42.5 B1
12.0 B2	27.5 B2	43.0 B1
12.5 B1	28.0 B2	43.5 B1
13.0 B1	28.5 B2	44.0 D
13.5 B1	29.0 B2	44.5 D
14.0 B2	29.5 B2	45.0 D
14.5 B2	30.0 B2	
15.0 B2	30.5 B2	

Poço Juruá-07 (prof. do topo = 2715 m)

0.0 B1	8.0 D	16.0 B2
0.5 B1	8.5 B2	16.5 B2
1.0 B1	9.0 C	17.0 B2
1.5 B2	9.5 B2	17.5 B2
2.0 B2	10.0 C	18.0 B1
2.5 B1	10.5 C	
3.0 B1	11.0 D	
3.5 B1	11.5 B1	
4.0 B1	12.0 B1	
4.5 B2	12.5 B1	
5.0 B2	13.0 B1	
5.5 B2	13.5 B1	
6.0 B2	14.0 B1	
6.5 C	14.5 B1	
7.0 D	15.0 B1	
7.5 C	15.5 B1	

Poço Juruá-08 (prof. do topo = 2825 m)

0.0 B1	6.5 B1	13.0 D
0.5 B1	7.0 B1	13.5 B3
1.0 B1	7.5 B3	14.0 B3
1.5 B1	8.0 B3	14.5 B3
2.0 B1	8.5 B3	15.0 D
2.5 B1	9.0 B2	15.5 D
3.0 B1	9.5 B2	16.0 B1
3.5 B1	10.0 C	16.5 B1
4.0 B2	10.5 D	17.0 B1
4.5 B2	11.0 D	17.5 D
5.0 B2	11.5 C	18.0 D
5.5 B1	12.0 C	
6.0 B1	12.5 C	

Poço Juruá-09 (prof. do topo = 2565 m)

0.0 B1	5.0 B2
0.5 B1	5.5 D
1.0 B1	6.0 C
1.5 B1	6.5 C
2.0 B1	7.0 C
2.5 B1	7.5 D
3.0 D	8.0 D
3.5 D	8.5 D
4.0 B2	9.0 D
4.5 B2	

Poço Juruá-10 (prof. do topo = 2406 m)

0.0 B2	6.0 B2
0.5 B2	6.5 B1
1.0 B2	7.0 B1
1.5 B2	7.5 B1
2.0 B2	8.0 B1
2.5 D	8.5 B1
3.0 B3	9.0 B1
3.5 B1	9.5 B1
4.0 B2	10.0 B1
4.5 D	10.5 B1
5.0 B2	11.0 B1
5.5 B2	

Poço Juruá-11 (prof. do topo = 2231 m)

0.0 D	9.5 B3	19.0 B2	28.5 C
0.5 B1	10.0 B3	19.5 B2	29.0 D
1.0 B1	10.5 B3	20.0 B2	29.5 C
1.5 D	11.0 B3	20.5 B2	30.0 C
2.0 D	11.5 B3	21.0 B2	30.5 C
2.5 D	12.0 B3	21.5 B1	31.0 C
3.0 D	12.5 B3	22.0 B1	31.5 C
3.5 D	13.0 B3	22.5 B1	32.0 C
4.0 D	13.5 B3	23.0 B1	32.5 B1
4.5 D	14.0 B3	23.5 B1	33.0 B1
5.0 D	14.5 B3	24.0 B1	33.5 B1
5.5 D	15.0 B3	24.5 B1	34.0 B1
6.0 B2	15.5 B3	25.0 B1	34.5 B1
6.5 B2	16.0 B3	25.5 B3	35.0 B1
7.0 B2	16.5 B3	26.0 B3	35.5 B1
7.5 C	17.0 B3	26.5 B3	36.0 B1
8.0 B2	17.5 B3	27.0 C	36.5 B1
8.5 C	18.0 B3	27.5 C	37.0 B1
9.0 B2	18.5 B2	28.0 C	37.5 B1

Poço Juruá-12 (prof. do topo = 1790 m)

0.0 D	7.0 C	14.0 B2
0.5 D	7.5 C	14.5 C
1.0 B1	8.0 C	15.0 D
1.5 B1	8.5 D	15.5 B1
2.0 B3	9.0 D	16.0 B1
2.5 B3	9.5 D	16.5 B1
3.0 D	10.0 B1	17.0 B1
3.5 B2	10.5 B1	17.5 B1
4.0 D	11.0 B1	18.0 B1
4.5 D	11.5 D	18.5 B1
5.0 C	12.0 D	19.0 B1
5.5 C	12.5 B1	19.5 B1
6.0 D	13.0 B1	20.0 B1
6.5 D	13.5 B2	

Poço Juruá-13 (prof. do topo = 2133 m)

0.0 B1	6.5 D	13.0 B1
0.5 B1	7.0 D	13.5 B1
1.0 B1	7.5 D	14.0 B1
1.5 B1	8.0 D	
2.0 B1	8.5 D	
2.5 B1	9.0 D	
3.0 B1	9.5 D	
3.5 B1	10.0 B2	
4.0 C	10.5 B2	
4.5 D	11.0 C	
5.0 D	11.5 B2	
5.5 D	12.0 C	
6.0 D	12.5 B3	

Formação Açu - Poço ARG-128

238.0 D	279.0 A
239.0 D	280.0 A
240.0 A	281.0 A
241.0 D	282.0 B
242.0 D	283.0 B
243.0 D	284.0 B
244.0 A	285.0 B
245.0 C	286.0 A
246.0 A	287.0 A
247.0 A	288.0 A
248.0 A	intervalo s/rec. de testemunho
249.0 D	313.0 D
250.0 D	314.0 D
251.0 C	315.0 C
252.0 B	316.0 B
253.0 A	317.0 A
254.0 B	318.0 C
255.0 A	319.0 D
256.0 B	320.0 C
257.0 A	321.0 A
258.0 B	322.0 A
259.0 A	323.0 A
260.0 A	324.0 A
261.0 A	325.0 B
262.0 A	326.0 B
263.0 B	327.0 D
264.0 C	328.0 D
265.0 B	329.0 B
266.0 B	330.0 B
267.0 B	331.0 B
268.0 B	332.0 D
269.0 A	333.0 A
270.0 A	334.0 A
271.0 C	335.0 B
272.0 D	336.0 A
273.0 D	337.0 B
274.0 D	338.0 A
275.0 C	339.0 A
276.0 B	340.0 B
277.0 B	341.0 A
278.0 B	342.0 A

Formação Sergi

Poço Sergi-23

2398.0 E	2444.0 A	2490.0 B	2536.0 D	2582.0 B
2399.0 E	2445.0 B	2491.0 B	2537.0 D	2583.0 C
2400.0 E	2446.0 A	2492.0 B	2538.0 B	2584.0 C
2401.0 E	2447.0 D	2493.0 B	2539.0 B	2585.0 A
2402.0 A	2448.0 B	2494.0 A	2540.0 E	2586.0 C
2403.0 E	2449.0 B	2495.0 A	2541.0 E	2587.0 B
2404.0 E	2450.0 A	2496.0 D	2542.0 B	2588.0 B
2405.0 E	2451.0 A	2497.0 A	2543.0 B	2589.0 B
2406.0 E	2452.0 A	2498.0 B	2544.0 B	2590.0 D
2407.0 E	2453.0 A	2499.0 A	2545.0 B	2591.0 B
2408.0 E	2454.0 A	2500.0 C	2546.0 E	2592.0 B
2409.0 E	2455.0 A	2501.0 B	2547.0 E	2593.0 B
2410.0 E	2456.0 A	2502.0 B	2548.0 C	2594.0 A
2411.0 E	2457.0 A	2503.0 E	2549.0 B	2595.0 B
2412.0 E	2458.0 A	2504.0 B	2550.0 B	2596.0 B
2413.0 E	2459.0 A	2505.0 B	2551.0 C	2597.0 B
2414.0 E	2460.0 A	2506.0 E	2552.0 B	2598.0 B
2415.0 E	2461.0 B	2507.0 E	2553.0 E	2599.0 B
2416.0 E	2462.0 B	2508.0 B	2554.0 B	2600.0 B
2417.0 A	2463.0 A	2509.0 E	2555.0 B	
2418.0 A	2464.0 A	2510.0 B	2556.0 B	
2419.0 A	2465.0 A	2511.0 C	2557.0 B	
2420.0 A	2466.0 A	2512.0 B	2558.0 B	
2421.0 A	2467.0 B	2513.0 E	2559.0 B	
2422.0 A	2468.0 B	2514.0 B	2560.0 B	
2423.0 A	2469.0 A	2515.0 D	2561.0 B	
2424.0 A	2470.0 A	2516.0 B	2562.0 B	
2425.0 A	2471.0 A	2517.0 B	2563.0 E	
2426.0 B	2472.0 A	2518.0 B	2564.0 E	
2427.0 B	2473.0 C	2519.0 E	2565.0 E	
2428.0 B	2474.0 C	2520.0 A	2566.0 B	
2429.0 B	2475.0 B	2521.0 E	2567.0 B	
2430.0 B	2476.0 B	2522.0 B	2568.0 E	
2431.0 A	2477.0 B	2523.0 E	2569.0 B	
2432.0 A	2478.0 B	2524.0 B	2570.0 C	
2433.0 B	2479.0 B	2525.0 B	2571.0 D	
2434.0 A	2480.0 B	2526.0 E	2572.0 C	
2435.0 A	2481.0 D	2527.0 E	2573.0 B	
2436.0 A	2482.0 E	2528.0 B	2574.0 B	
2437.0 A	2483.0 B	2529.0 E	2575.0 E	
2438.0 B	2484.0 B	2530.0 E	2576.0 E	
2439.0 A	2485.0 B	2531.0 E	2577.0 E	
2440.0 A	2486.0 B	2532.0 E	2578.0 E	
2441.0 B	2487.0 B	2533.0 E	2579.0 E	
2442.0 A	2488.0 B	2534.0 E	2580.0 D	
2443.0 A	2489.0 B	2535.0 D	2581.0 B	

Poço Sergi-31

2417.0 A	2457.0 A	2497.0 D	2537.0 B	2577.0 B	2617.0 E
2418.0 E	2458.0 A	2498.0 B	2538.0 B	2578.0 B	2618.0 B
2419.0 E	2459.0 A	2499.0 D	2539.0 E	2579.0 B	2619.0 B
2420.0 E	2460.0 D	2500.0 C	2540.0 E	2580.0 D	2620.0 B
2421.0 E	2461.0 A	2501.0 D	2541.0 E	2581.0 B	2621.0 B
2422.0 E	2462.0 A	2502.0 B	2542.0 B	2582.0 B	2622.0 B
2423.0 E	2463.0 A	2503.0 B	2543.0 B	2583.0 B	2623.0 B
2424.0 E	2464.0 A	2504.0 B	2544.0 B	2584.0 B	2624.0 B
2425.0 E	2465.0 A	2505.0 B	2545.0 B	2585.0 B	2625.0 B
2426.0 E	2466.0 A	2506.0 C	2546.0 C	2586.0 B	2626.0 B
2427.0 E	2467.0 A	2507.0 C	2547.0 D	2587.0 B	2627.0 B
2428.0 E	2468.0 A	2508.0 D	2548.0 B	2588.0 C	2628.0 B
2429.0 E	2469.0 B	2509.0 C	2549.0 B	2589.0 D	2629.0 B
2430.0 E	2470.0 B	2510.0 C	2550.0 B	2590.0 B	2630.0 B
2431.0 C	2471.0 A	2511.0 D	2551.0 E	2591.0 B	2631.0 E
2432.0 E	2472.0 A	2512.0 A	2552.0 B	2592.0 B	2632.0 E
2433.0 E	2473.0 A	2513.0 B	2553.0 B	2593.0 B	2633.0 B
2434.0 E	2474.0 A	2514.0 B	2554.0 D	2594.0 D	2634.0 B
2435.0 E	2475.0 A	2515.0 D	2555.0 C	2595.0 B	2635.0 B
2436.0 A	2476.0 A	2516.0 B	2556.0 E	2596.0 B	2636.0 B
2437.0 A	2477.0 A	2517.0 B	2557.0 E	2597.0 D	2637.0 C
2438.0 A	2478.0 A	2518.0 B	2558.0 C	2598.0 C	2638.0 B
2439.0 A	2479.0 B	2519.0 B	2559.0 C	2599.0 B	2639.0 D
2440.0 B	2480.0 B	2520.0 A	2560.0 B	2600.0 B	2640.0 C
2441.0 A	2481.0 C	2521.0 B	2561.0 B	2601.0 E	2641.0 D
2442.0 A	2482.0 B	2522.0 A	2562.0 A	2602.0 E	2642.0 C
2443.0 A	2483.0 B	2523.0 C	2563.0 A	2603.0 E	2643.0 D
2444.0 D	2484.0 B	2524.0 E	2564.0 A	2604.0 A	2644.0 C
2445.0 A	2485.0 B	2525.0 E	2565.0 E	2605.0 D	2645.0 D
2446.0 A	2486.0 B	2526.0 B	2566.0 B	2606.0 D	2646.0 C
2447.0 A	2487.0 B	2527.0 B	2567.0 B	2607.0 B	2647.0 D
2448.0 D	2488.0 A	2528.0 C	2568.0 B	2608.0 B	2648.0 C
2449.0 A	2489.0 A	2529.0 B	2569.0 B	2609.0 D	2649.0 D
2450.0 A	2490.0 A	2530.0 B	2570.0 B	2610.0 B	2650.0 B
2451.0 A	2491.0 A	2531.0 B	2571.0 C	2611.0 C	2651.0 B
2452.0 A	2492.0 C	2532.0 B	2572.0 B	2612.0 D	2652.0 D
2453.0 B	2493.0 B	2533.0 C	2573.0 B	2613.0 C	2653.0 D
2454.0 A	2494.0 B	2534.0 B	2574.0 C	2614.0 B	
2455.0 A	2495.0 B	2535.0 B	2575.0 B	2615.0 B	
2456.0 A	2496.0 C	2536.0 D	2576.0 C	2616.0 E	

ANEXO 4

**ARQUIVOS DE SAÍDA DO PROGRAMA DE WELLS (1989)
PARA SEQUÊNCIAS DE MARKOV
- FORMAÇÃO SERGI -**

FORMAÇÃO SERGI

Number of facies 5

FACIES:

- 1 FACIES A
- 2 FACIES B
- 3 FACIES C
- 4 FACIES D
- 5 FACIES E

RAW-DATA MATRIX

#	# 1	# 2	# 3	# 4	# 5	
1	0	19	1	5	6	31
2	15	0	18	16	18	67
3	5	16	0	11	3	35
4	6	13	13	0	2	34
5	5	19	3	1	0	28
	31	67	35	33	29	195

EXPECTED VALUES

#	1	2	3	4	5
1	-	16.10	5.45	5.10	4.34
2	16.11	-	18.63	17.44	14.83
3	5.45	18.63	-	5.90	5.02
4	5.24	17.89	6.06	-	4.82
5	4.21	14.37	4.87	4.56	-

DIFFERENCE MATRIX

#	1	2	3	4	5
1	-	2.90	-4.45	-0.10	1.66
2	-1.11	-	-0.63	-1.44	3.17
3	-0.45	-2.63	-	5.10	-2.02
4	0.76	-4.89	6.94	-	-2.82
5	0.79	4.63	-1.87	-3.56	-

SEQUENCE CHI-SQUARE MATRIX

#	1	2	3	4	5
1	-	0.08	0.04	0.11	0.15
2	0.52	-	0.37	1.34	1.49
3	3.64	0.02	-	7.96	0.72
4	0.00	0.12	4.40	-	2.77
5	0.64	0.68	0.81	1.65	-

ASYMMETRY CHI-SQUARE MATRIX

#	1	2	3	4	5
1	-	-	-	-	-
2	0.47	-	-	-	-
3	2.67	0.12	-	-	-
4	0.09	0.31	0.17	-	-
5	0.09	0.03	0.00	0.33	-

sequence chi-square sum = 27.49805

11 degrees of freedom

asymmetry chi-square = 4.274092

7 degrees of freedom

PRINCIPAL SUCCESSION FOR EACH FACIES

binomial probabilities listed at right give probability
(confidence level = 1 - level of significance)
of the observed frequency occurring by chance

FACIES A to FACIES B

(conf. < .95; BP= 0.1949)

FACIES B to FACIES E

(conf. < .95; BP= 0.2124)

FACIES C to FACIES D

(conf. .95-.99; BP= 0.0252)

FACIES D to FACIES C

(conf. > .99; BP= 0.0040)

FACIES E to FACIES B

(conf. < .95; BP= 0.0582)

Other significant Favored Transitions Significantly Disfavored
Transitions(conf. > ca. 0.95 & <20% probability of selection by
chance)

(NB: binomial probabilities between .1 and .2 don't mean much)

FACIES A to FACIES C

BP= 0.0189

FACIES E to FACIES D

BP= 0.0446

BINOMIAL PROBABILITY FOR CELL	1 , 2	=	.1949027
BINOMIAL PROBABILITY FOR CELL	1 , 3	=	1.894231E-02
BINOMIAL PROBABILITY FOR CELL	1 , 4	=	.5964175
BINOMIAL PROBABILITY FOR CELL	1 , 5	=	.260808
BINOMIAL PROBABILITY FOR CELL	2 , 1	=	.4407208
BINOMIAL PROBABILITY FOR CELL	2 , 3	=	.4939922
BINOMIAL PROBABILITY FOR CELL	2 , 4	=	.404954
BINOMIAL PROBABILITY FOR CELL	2 , 5	=	.2124075
BINOMIAL PROBABILITY FOR CELL	3 , 1	=	.5306393
BINOMIAL PROBABILITY FOR CELL	3 , 2	=	.2353637
BINOMIAL PROBABILITY FOR CELL	3 , 4	=	2.515164E-02
BINOMIAL PROBABILITY FOR CELL	3 , 5	=	.2408335
BINOMIAL PROBABILITY FOR CELL	4 , 1	=	.4285604
BINOMIAL PROBABILITY FOR CELL	4 , 2	=	6.577717E-02
BINOMIAL PROBABILITY FOR CELL	4 , 3	=	3.973145E-03
BINOMIAL PROBABILITY FOR CELL	4 , 5	=	.1212446
BINOMIAL PROBABILITY FOR CELL	5 , 1	=	.4144596
BINOMIAL PROBABILITY FOR CELL	5 , 2	=	5.820449E-02
BINOMIAL PROBABILITY FOR CELL	5 , 3	=	.2581422
BINOMIAL PROBABILITY FOR CELL	5 , 4	=	4.464676E-02

$$BP = \sum C(N, n) p^n q^{N-n}$$

ANEXO 5

**ARQUIVOS DE SAÍDA DO PROGRAMA DE LEFEVER (1990)
PARA SEQUÊNCIAS DE MARKOV
- FORMAÇÃO SERGI -**

FORMAÇÃ SERGI

MARKOV ANALYSIS OF DATA FROM FILE: SEQSERGI.DAT

TALLY MATRIX

		To				
		1	2	3	4	5
From	1	0	19	1	5	6
	2	15	0	18	16	18
	3	5	16	0	11	3
	4	6	13	13	0	2
	5	5	19	3	1	0
Σ		31	67	35	33	29
						195

UPWARD TRANSITION PROBABILITIES (VO)

		To				
		1	2	3	4	5
From	1	0.00	0.61	0.03	0.16	0.19
	2	0.22	0.00	0.27	0.24	0.27
	3	0.14	0.46	0.00	0.31	0.09
	4	0.18	0.38	0.38	0.00	0.06
	5	0.18	0.68	0.11	0.04	0.00

EXPECTED VALUE MATRIX (VE)

		To				
		1	2	3	4	5
From	1	0.00	16.11	5.46	5.11	4.34
	2	16.09	0.00	18.61	17.42	14.81
	3	5.46	18.63	0.00	5.91	5.02
	4	5.24	17.89	6.06	0.00	4.82
	5	4.21	14.37	4.87	4.56	0.00

Z MATRIX (Z)

		To				
		1	2	3	4	5
From	1	0.00	0.72	-1.91	-0.05	0.80
	2	-0.27	0.00	-0.14	-0.34	0.83
	3	-0.20	-0.61	0.00	2.09	-0.90
	4	0.33	-1.16	2.82	0.00	-1.29
	5	0.38	1.22	-0.85	-1.67	0.00

CHI-SQUARED = 27.48 DF = 11

SUBSTITUTABILITY ANALYSIS OF DATA FROM FILE: SEQSERGI.DAT

TALLY MATRIX

		To				
		1	2	3	4	5
From	1	0	19	1	5	6
	2	15	0	18	16	18
	3	5	16	0	11	3
	4	6	13	13	0	2
	5	5	19	3	1	0
Σ		31	67	35	33	29
						195

UPWARD TRANSITION PROBABILITIES

		To				
		1	2	3	4	5
From	1	0.00	0.61	0.03	0.16	0.19
	2	0.22	0.00	0.27	0.24	0.27
	3	0.14	0.46	0.00	0.31	0.09
	4	0.18	0.38	0.38	0.00	0.06
	5	0.18	0.68	0.11	0.04	0.00

DOWNWARD TRANSITION PROBABILITIES

To	From				
	1	2	3	4	5
	0.00	0.28	0.03	0.15	0.21
	0.48	0.00	0.51	0.48	0.62
	0.16	0.24	0.00	0.33	0.10
	0.19	0.19	0.37	0.00	0.07
	0.16	0.28	0.09	0.03	0.00

LEFT SUBSTITUTABILITY MATRIX

	1	2	3	4	5
1	1.00				
2	0.30	1.00			
3	0.90	0.45	1.00		
4	0.68	0.55	0.62	1.00	
5	0.90	0.22	0.84	0.82	1.00

RIGHT SUBSTITUTABILITY MATRIX

	1	2	3	4	5
1	1.00				
2	0.42	1.00			
3	0.92	0.32	1.00		
4	0.85	0.43	0.66	1.00	
5	0.87	0.29	0.82	0.91	1.00

MUTUAL SUBSTITUTABILITY MATRIX						
	1	2	3	4	5	
1	1.00					
2	0.13	1.00				
3	0.83	0.14	1.00			
4	0.58	0.24	0.41	1.00		
5	0.79	0.06	0.69	0.74	1.00	

ENTROPY CALCULATION OF DATA FROM FILE: SEQSERGI.DAT

TALLY MATRIX (T_{ij})						
		To				
		1	2	3	4	5
From	1	0	19	1	5	6
	2	15	0	18	16	18
	3	5	16	0	11	3
	4	6	13	13	0	2
	5	5	19	3	1	0
		(C_j)	31	67	35	33
			29	195		

UPWARD TRANSITION PROBABILITIES ($P_{ij} = T_{ij}/R_i$)						
		To				
		1	2	3	4	5
From	1	0.00	0.61	0.03	0.16	0.19
	2	0.22	0.00	0.27	0.24	0.27
	3	0.14	0.46	0.00	0.31	0.09
	4	0.18	0.38	0.38	0.00	0.06
	5	0.18	0.68	0.11	0.04	0.00

DOWNWARD TRANSITION PROBABILITIES ($D_{ij} = T_{ij}/C_j$)						
		From				
		1	2	3	4	5
To	1	0.00	0.28	0.03	0.15	0.21
	2	0.48	0.00	0.51	0.48	0.62
	3	0.16	0.24	0.00	0.33	0.10
	4	0.19	0.19	0.37	0.00	0.07
	5	0.16	0.28	0.09	0.03	0.00

RELATIVE ENTROPY VALUES (E)			
STATE	PRE	POST	
1	0.91	0.74	
2	0.99	1.00	
3	0.74	0.87	
4	0.80	0.87	
5	0.75	0.67	
MAXIMUM ENTROPY =		2.000	RELATIVE SYSTEM ENTROPY = 0.823

_____ fim do arquivo _____

PRINCIPAIS EQUAÇÕES RELACIONADAS AOS ELEMENTOS DO ARQUIVO ANTERIOR

$$Z = \frac{(VO - VE)^2}{VE}$$

$$E_j^{(pre)} = - \sum_i D_{ij} \cdot \log_2 D_{ij} \quad E_i^{(post)} = - \sum_j P_{ij} \cdot \log_2 P_{ij}$$

$$E^{(system)} = - \sum_i \sum_j F_{ij} \cdot \log_2 F_{ij}$$

$$F_{ij} = \frac{T_{ij}}{\sum_i \sum_j T_{ij}}$$

ENTROPIA DE SISTEMAS DEPOSICIONAIS DE SEQUÊNCIAS IDEAIS

SEJA A SEQUÊNCIA IDEAL

D	
C	N
B	
A	

•
•
•
•
•
•

D	
C	3
B	
A	

D	
C	2
B	
A	

D	
C	1
B	
A	

A MATRIZ DE TRANSIÇÕES
(M_{ij})
DE ELEMENTOS (P_{ij})

	A	B	C	D
A	0	N	0	0
B	0	0	N	0
C	0	0	0	N
D	N	0	0	0

ENTROPIAS

$$E_{(pre)}, E_{(post)}, E_{(system)} = 0$$

ANEXO 6

ARQUIVOS DE SAÍDA DOS PROGRAMAS DE FERNANDES & LANZARINI (1993) PARA ANÁLISE E SIMULAÇÃO DE SEQUÊNCIAS DE MARKOV .

FORMAÇÃO SERGI

Arquivo sergi.cdn

Arquivo sergi.ltn

Arquivo sergi.prn

Arquivo sergi.tmn

Arquivo sergi.lte

Arquivo sergi.pre

Arquivo sergi.tme

FORMAÇÃO SERGI

Arquivo sergi.cdn

0 E	1 A	2 B	0 E	0 E	1 A
0 E	1 A	2 B	0 E	0 E	2 B
0 E	2 B	2 B	3 D	3 D	1 A
0 E	1 A	2 B	3 D	2 B	1 A
1 A	3 D	2 B	2 B	4 C	1 A
0 E	2 B	2 B	2 B	4 C	3 D
0 E	2 B	1 A	2 B	1 A	1 A
0 E	1 A	1 A	0 E	4 C	1 A
0 E	1 A	3 D	0 E	4 C	1 A
0 E	1 A	1 A	2 B	2 B	3 D
0 E	1 A	2 B	2 B	2 B	1 A
0 E	1 A	1 A	2 B	2 B	1 A
0 E	1 A	1 A	2 B	3 D	1 A
0 E	1 A	4 C	2 B	2 B	1 A
0 E	1 A	2 B	0 E	2 B	1 A
0 E	1 A	2 B	0 E	2 B	2 B
0 E	1 A	0 E	4 C	2 B	1 A
0 E	1 A	2 B	2 B	1 A	1 A
0 E	1 A	2 B	2 B	2 B	1 A
0 E	1 A	2 B	2 B	2 B	1 A
0 E	2 B	0 E	4 C	2 B	1 A
1 A	2 B	0 E	2 B	2 B	1 A
1 A	1 A	2 B	0 E	2 B	1 A
1 A	1 A	0 E	2 B	2 B	3 D
1 A	1 A	2 B	2 B	2 B	1 A
1 A	1 A	4 C	2 B	1 A	1 A
1 A	2 B	2 B	2 B	0 E	1 A
1 A	2 B	0 E	2 B	0 E	1 A
1 A	1 A	2 B	2 B	0 E	1 A
1 A	1 A	3 D	2 B	0 E	1 A
1 A	1 A	2 B	2 B	0 E	1 A
2 B	1 A	2 B	2 B	0 E	1 A
2 B	1 A	2 B	2 B	0 E	1 A
2 B	4 C	2 B	0 E	0 E	2 B
2 B	4 C	0 E	0 E	0 E	2 B
2 B	2 B	1 A	0 E	0 E	1 A
1 A	2 B	0 E	2 B	0 E	1 A
1 A	2 B	2 B	2 B	0 E	1 A
2 B	2 B	0 E	0 E	0 E	1 A
1 A	2 B	2 B	2 B	0 E	1 A
1 A	2 B	2 B	4 C	0 E	1 A
1 A	3 D	0 E	3 D	4 C	1 A
1 A	0 E	0 E	4 C	0 E	1 A
2 B	2 B	2 B	2 B	0 E	2 B
1 A	2 B	0 E	2 B	0 E	2 B
1 A	2 B	0 E	0 E	1 A	4 C
2 B	2 B	0 E	0 E	1 A	2 B
1 A	2 B	0 E	0 E	1 A	2 B

2 B	2 B	2 B	4 C
2 B	3 D	2 B	2 B
2 B	2 B	4 C	3 D
2 B	2 B	3 D	4 C
1 A	0 E	2 B	3 D
1 A	0 E	2 B	4 C
1 A	0 E	2 B	3 D
1 A	2 B	2 B	4 C
4 C	2 B	3 D	3 D
2 B	2 B	2 B	4 C
2 B	2 B	2 B	3 D
2 B	4 C	3 D	4 C
4 C	3 D	4 C	3 D
3 D	2 B	2 B	2 B
2 B	2 B	0 E	2 B
3 D	2 B	0 E	3 D
4 C	0 E	0 E	
3 D	2 B	0 E	
2 B	2 B	1 A	
2 B	3 D	3 D	
2 B	4 C	3 D	
2 B	0 E	2 B	
4 C	0 E	2 B	
4 C	4 C	3 D	
3 D	4 C	2 B	
4 C	2 B	4 C	
4 C	2 B	3 D	
3 D	1 A	4 C	
1 A	1 A	2 B	
2 B	1 A	2 B	
2 B	0 E	0 E	
3 D	2 B	0 E	
2 B	2 B	2 B	
2 B	2 B	2 B	
2 B	2 B	2 B	
2 B	2 B	2 B	
1 A	4 C	2 B	
2 B	2 B	2 B	
1 A	2 B	2 B	
4 C	4 C	2 B	
0 E	2 B	2 B	
0 E	4 C	2 B	
2 B	2 B	2 B	
2 B	2 B	2 B	
4 C	2 B	2 B	
2 B	3 D	0 E	
2 B	2 B	0 E	
2 B	2 B	2 B	
2 B	2 B	2 B	
4 C	2 B	2 B	
2 B	2 B	2 B	

Arquivo sergi.ltn

Número de litologias lido: 5

Nome	Código
------	--------

A	1
---	---

B	2
---	---

C	4
---	---

D	3
---	---

E	0
---	---

Número de litologias: 5

Total de Ocorrências da Litologia A (1): 96

Total de Transições da Linha A (1): 96

Para	Freq	Perc
------	------	------

A	66	0.687500
---	----	----------

B	19	0.197917
---	----	----------

C	1	0.010417
---	---	----------

D	5	0.052083
---	---	----------

E	5	0.052083
---	---	----------

Total de Ocorrências da Litologia B (2): 184

Total de Transições da Linha B (2): 184

Para	Freq	Perc
------	------	------

A	15	0.081522
---	----	----------

B	117	0.635870
---	-----	----------

C	18	0.097826
---	----	----------

D	16	0.086957
---	----	----------

E	18	0.097826
---	----	----------

Total de Ocorrências da Litologia C (4): 40

Total de Transições da Linha C (4): 40

Para	Freq	Perc
------	------	------

A	5	0.125000
---	---	----------

B	16	0.400000
---	----	----------

C	5	0.125000
---	---	----------

D	11	0.275000
---	----	----------

E	3	0.075000
---	---	----------

Total de Ocorrências da Litologia D (3): 38

Total de Transições da Linha D (3): 38

Para	Freq	Perc
------	------	------

A	6	0.157895
---	---	----------

B	13	0.342105
---	----	----------

C	13	0.342105
---	----	----------

D	4	0.105263
---	---	----------

E	2	0.052632
---	---	----------

Total de Ocorrências da Litologia E (0): 82

Total de Transições da Linha E (0): 81

Para	Freq	Perc
A	4	0.049383
B	19	0.234568
C	3	0.037037
D	1	0.012346
E	54	0.666667

Matriz de Probabilidades de Transições

Matriz de Transições

	A	B	C	D	E
A	0.68750	0.19792	0.01042	0.05208	0.05208
B	0.08152	0.63587	0.09783	0.08696	0.09783
C	0.12500	0.40000	0.12500	0.27500	0.07500
D	0.15789	0.34211	0.34211	0.10526	0.05263
E	0.04938	0.23457	0.03704	0.01235	0.66667

Máximo de iterações: 1000

Erro máximo: 1.000000e-06

Número de iterações: 31

Erro conseguido: 9.685332e-07

Vetor de Probabilidades

A	B	C	D	E
0.21754	0.41841	0.09013	0.08365	0.19027

Soma de Probabilidades: 1.000000

Diferença de 1.0: -6.661338e-16

Matriz potenciada

0.217537	0.418409	0.090129	0.083654	0.190271
0.217537	0.418409	0.090129	0.083654	0.190272
0.217537	0.418409	0.090129	0.083654	0.190272
0.217537	0.418409	0.090129	0.083654	0.190272
0.217536	0.418409	0.090129	0.083654	0.190272

Arquivo sergi.prn

440

5

A	1
B	2
C	4
D	3
E	0

0.217536508001

0.418409410191

0.090128896996

0.083653571517

0.190271613294

0.687500000000 0.197916666667 0.010416666667 0.052083333333 0.052083333333

0.081521739130 0.635869565217 0.097826086957 0.086956521739 0.097826086957

0.125000000000 0.400000000000 0.125000000000 0.275000000000 0.075000000000

0.157894736842 0.342105263158 0.342105263158 0.105263157895 0.052631578947

0.049382716049 0.234567901235 0.037037037037 0.012345679012 0.666666666667

Arquivo sergi.tmn

4 E	1 B
4 E	2 C
0 A	3 D
1 B	2 C
1 B	1 B
1 B	1 B
1 B	1 B
1 B	1 B
1 B	4 E
1 B	4 E
0 A	4 E
0 A	4 E
0 A	3 D
0 A	3 D
2 C	1 B
2 C	0 A
1 B	0 A
1 B	1 B
1 B	1 B
1 B	2 C
1 B	2 C
1 B	2 C
4 E	1 B
4 E	1 B
4 E	0 A
4 E	0 A
4 E	1 B
4 E	1 B
4 E	1 B
2 C	0 A
1 B	1 B
1 B	0 A
0 A	0 A
0 A	1 B
0 A	4 E
3 D	4 E
3 D	4 E
2 C	4 E
4 E	4 E
4 E	1 B
0 A	1 B
0 A	2 C
0 A	1 B
0 A	4 E
0 A	4 E
0 A	4 E
0 A	4 E
2 C	4 E
2 C	4 E

Arquivo sergi.lte

Número de litologias lido: 5

Nome	Código
A	1
B	2
C	4
D	3
E	0

Número de litologias: 5

Total de Ocorrências da Litologia A (1): 96

Total de Transições da Linha A (1): 96

Para	Freq	Perc
A	66	0.687500
B	19	0.197917
C	1	0.010417
D	5	0.052083
E	5	0.052083

Total de Ocorrências da Litologia B (2): 184

Total de Transições da Linha B (2): 184

Para	Freq	Perc
A	15	0.081522
B	117	0.635870
C	18	0.097826
D	16	0.086957
E	18	0.097826

Total de Ocorrências da Litologia C (4): 40

Total de Transições da Linha C (4): 40

Para	Freq	Perc
A	5	0.125000
B	16	0.400000
C	5	0.125000
D	11	0.275000
E	3	0.075000

Total de Ocorrências da Litologia D (3): 38

Total de Transições da Linha D (3): 38

Para	Freq	Perc
A	6	0.157895
B	13	0.342105
C	13	0.342105
D	4	0.105263
E	2	0.052632

Total de Ocorrências da Litologia E (0): 82

Total de Transições da Linha E (0): 81

Para	Freq	Perc
A	4	0.049383
B	19	0.234568
C	3	0.037037

D 1 0.012346
E 54 0.666667

Matriz de Probabilidades de Transições Matriz de Transições

	A	B	C	D
E				
A	0.00000	0.63333	0.03333	0.16667
B	0.22388	0.00000	0.26866	0.23881
C	0.14286	0.45714	0.00000	0.31429
D	0.17647	0.38235	0.38235	0.00000
E	0.14815	0.70370	0.11111	0.03704

Máximo de iterações: 1000
Erro máximo: 1.000000e-06
Número de iterações: 26
Erro conseguido: 5.933792e-07

Vetor de Probabilidades

A	B	C	D	E
0.15539	0.34827	0.18027	0.17109	0.14498

Soma de Probabilidades: 1.000000
Diferença de 1.0: -8.881784e-16

Matriz potenciada

0.155394 0.348265 0.180270 0.171093 0.144979
0.155394 0.348265 0.180270 0.171093 0.144979
0.155394 0.348265 0.180270 0.171093 0.144979
0.155394 0.348265 0.180270 0.171093 0.144979
0.155394 0.348265 0.180270 0.171093 0.144979

Arquivo sergi.pre

440

5

A 1
B 2
C 4
D 3
E 0

0.155393751176

0.348265025102

0.180269998073

0.171092574346

0.144978651302

0.000000000000	0.633333333333	0.033333333333	0.166666666667	0.166666666667
0.223880597015	0.000000000000	0.268656716418	0.238805970149	0.268656716418
0.142857142857	0.457142857143	0.000000000000	0.314285714286	0.085714285714
0.176470588235	0.382352941176	0.382352941176	0.000000000000	0.058823529412
0.148148148148	0.703703703704	0.111111111111	0.037037037037	0.000000000000

Arquivo: sergi.tme

1 B
4 E
0 A
1 B
0 A
1 B
3 D
2 C
1 B
3 D
0 A
3 D
1 B
0 A
2 C
3 D
2 C
1 B
3 D
2 C
1 B
2 C
1 B
2 C
3 D
1 B
2 C
4 E
1 B
3 D
4 E
1 B
4 E
0 A
1 B
0 A
2 C
3 D
2 C
1 B
4 E
1 B
0 A
2 C
1 B
2 C
1 B
0 A
1 B
4 E

1 B
4 E
1 B
4 E
1 B
0 A
3 D
1 B
4 E
3 D
4 E
1 B
4 E
3 D
2 C
3 D
1 B
0 A
2 C
1 B
3 D
1 B
4 E
1 B
3 D
1 B
0 A
3 D
0 A
1 B
4 E
2 C
3 D
1 B
4 E
2 C
1 B
3 D
0 A
1 B
4 E
1 B
3 D
1 B
4 E

ANEXO 7

```

c      programa para ler uma imagem binária gerada pelo SITIM (Sistema de
c      Tratamento de Imagens do INPE), gerando como saída arquivo no formato
c      GEOEAS, para entrada no GSLIB (Ribeiro & Lanzarini, 1994)
c
c      para outros tipos de imagem, alterar os parâmetros
c      ncols, nlins, ncat e tampxl.
c      tampxl é o tamanho em metros do lado do pixel
c      ncat = número de categorias classificadas (1,2,3,...)
c-----

```

```

      integer ncols, nlins, ncas, ncat, a, b
      real tampxl
      real x, y
      parameter (ncols=100,nlins=100,ncat=3)
      character *1 lidos(ncols)
      character *64 arquivi, arquivg
      integer *1 vdado(ncols)
      character *40 format

      tampxl = 100.00
      write (format, '(a, i5, a)') '(', ncols, 'a)'
      arquivi = '3cat.i'
      arquivg = '3cat.s'

c      arquivo de entrada (imagem)
      open (unit=1, file=arquivi, access='direct',recl=ncols,
&          status='old',form='formatted')

c      arquivo de saída (gslib)
      open (unit=2, file=arquivg, access='sequential',
&          status='unknown',form='formatted')

      a = 1
      b = 0
      ncas = 3 + ncat

      write (2,*) ' Arq. de dados de imag.sat. p/ gslib'
      write (2,*) ncas
      write (2,*) ' X'
      write (2,*) ' Y'

      do k=1,ncat
        write (2,*) ' facies', k
      enddo

      write (2,*) ' facies'

      n = 0

      do j=1,nlins

        read (1, format, rec=j, err=11) lidos

c        converte o valor lido de character para integer
        call movstr (lidos, 0, vdado, 0, ncols)

```

```

c      calcula posição da linha em metros, invertendo a origem
c      porque a origem da imagem gravada no SITIM é no superior
c      direito enquanto na GSLIB deve ser no canto inferior esquerdo.
c
      y = (float(nlins-j+1) - 0.5) * tampxl

      do i=1,ncols

          x = (float(i) - 0.5) * tampxl
          vdado(i) = vdado(i) + 1

          if (vdado(i).eq.1) write (2, '(1x, 2f8.0, i2, i2, i2, i2,)' )
&              x, y, a, b, b, vdado(i)

          if (vdado(i).eq.2) write (2, '(1x, 2f8.0, i2, i2, i2, i2,)' )
&              x, y, b, a, b, vdado(i)

          if (vdado(i).eq.3) write (2, '(1x, 2f8.0, i2, i2, i2, i2,)' )
&              x, y, b, b, a, vdado(i)

          n = n+1

      enddo

      go to 12

c      -----
c      trapa para saltar registros com problema. so chega aqui por
c      clausula de ERRO na leitura
c      -----
11      continue
          n = n + ncols

          write (*,*) ' erro de leitura na linha:', j, 'prossigue...'
c          pause ' tecla ENTER para prosseguir (ignorando essa linha).'
c          fim da trapa
c

12      continue
      enddo

      close (unit=2)
      close (unit=1)
      write (*, '(' fim normal de arquivo:'))

      stop
      end

```

```

C      SUBROUTINE MOVSTR (ENTR, POSE, SAIDA, POSS, NBYTES)
C      ROTINA PARA COPIAR UMA SEQUENCIA DE BYTES (CHARACTER OU NAO) DE UMA
C      VARIAVEL PARA OUTRA.
C
C      PARAMETROS:
C
C      ENTR = UM ARRAY OU UM STRING CUJO ENDERECO INICIAL CORRESPONDE A
C              "ENTR"
C
C      POSE = POSICAO DO PRIMEIRO ELEMENTO A SER MOVIDO EM RELACAO AO
C              ENDERECO INICIAL DE "ENTR"    ( INTEIRO *4 )
C
C      SAIDA = UM ARRAY OU STRING CUJO ENDERECO INICIAL E "SAIDA"
C
C      POSS = POSICAO DO PRIMEIRO ELEMENTO A SER MOVIDO EM RELACAO AO
C              ENDERECO INICIAL DE "SAIDA"    ( INTEIRO *4 )
C
C      NBYTES = NUMERO DE BYTES A SEREM COPIADOS
C
C      !!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!
C      ATENCAO !!!  OS ENDERECOS COMECAM POR 0 E NAO POR 1
C      !!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!
C
C      CHARACTER *1 ENTR(*), SAIDA(*)
C      INTEGER    *4 POSE, POSS, NBYTES, INIC, IFIM, I, IPS
C      INIC = POSE + 1
C      IFIM = POSE + NBYTES - 1
C      IPS  = POSS + 1
C
C      DO I=INIC,IFIM
C          SAIDA(IPS) = ENTR(I)
C          IPS = IPS + 1
C      END DO
C
C      RETURN
C      END

```

ANEXO 8

DADOS DOS POÇOS DA ÁREA DO PROJETO PILOTO DO CAMPO DE DOM JOÃO, APRESENTANDO AS FÁCIES DENTRO DO INTERVALO ESTRATIGRÁFICO MÉDIO DA FORMAÇÃO SERGI

(1 - ARENITOS EÓLICOS, 2 - ARENITOS FLUVIAIS, 3 - LAMITOS E ARENITOS ARGILOSOS)

		Número do Poço																																			
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32				
Cota (m)																																					
67		2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2			
65		2	3	3	2	2	3	3	2	1	3	2	2	3	3	3	2	2	2	2	2	3	3	2	2	3	2	3	2	2	2	2	2	2	2		
63		2	2	3	3	3	2	2	3	2	3	2	3	3	2	3	2	3	3	2	3	3	2	2	2	3	2	2	3	3	3	3	3	3	3		
61		2	2	2	3	2	2	3	3	2	2	2	3	3	3	3	2	3	2	3	3	2	2	3	3	2	3	2	3	2	3	2	3	2	3		
59		2	2	2	2	3	2	2	3	3	3	3	3	3	3	3	2	3	2	3	2	2	3	3	3	3	2	3	3	2	2	2	2	3	3		
57		2	2	2	2	2	2	2	3	3	3	3	2	2	2	2	3	2	2	3	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2		
55		1	2	2	1	2	1	2	2	2	2	3	2	2	2	2	2	2	1	2	2	2	2	2	2	2	1	2	2	2	2	2	1	2	2		
53		1	1	2	1	2	1	2	2	2	1	2	3	1	1	1	2	1	1	2	2	1	2	2	2	2	1	2	2	2	2	2	3	1	1		
51		1	3	1	1	1	1	2	2	2	2	2	2	3	1	1	2	3	1	1	1	1	1	2	2	2	1	2	3	1	1	1	3	1	1		
49		1	1	1	3	1	1	2	1	2	2	2	2	3	1	1	2	1	3	1	1	3	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1		
47		3	1	1	3	1	1	1	1	1	2	1	1	1	3	1	1	1	1	1	1	3	1	1	1	1	1	1	1	1	1	3	1	1	3		
45		1	1	1	1	1	3	1	1	3	1	3	3	1	1	3	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	3		
43		1	1	3	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	3	1	1	1	1	1		
41		1	3	1	1	1	1	1	3	1	3	3	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	3	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1		
39		1	1	3	1	3	1	1	3	1	1	1	1	3	1	1	1	3	1	3	1	3	1	3	1	1	1	3	1	1	1	1	3	3	1	1	
37		1	3	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	3	3	3	1	3	3	1	1	1	3	1	1	1	1	1	1	3	1	1	1	1	3	3	
35		3	1	1	3	1	1	1	1	1	3	1	1	1	3	3	1	1	1	3	3	1	3	1	3	1	3	1	3	3	3	3	1	3	3		
33		1	1	1	1	1	3	3	3	3	1	1	1	1	1	3	1	1	1	1	3	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	3	1	
31		1	1	1	1	3	1	3	1	1			3	1	1	1	3	1	1	1	1	1	3	1	3	1	3	3	1	1	1	1	1	1	1	1	
29		3	1	3	1	2	1	1	1	1			3	1	1	1	2	3	1	2	3	1	1	1	1	3	1	1	3	1	1	3	3	1	3	1	
27		2	3	2	1	2	1	1	1	3			3		3	1	1	2	2	1	2	2	3	1	1	2	1	1	3	2					2	1	
25		2	2	2	3	2	1	3	3	3			2		1	1	2	2	2	2	2	2	2	3	2	2	3	3	2	2					2	2	
23		3	2	2	2	2	1	2	2	1			2		1	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	3	3	2	1				2	2	
21		2	3	3	2	2	3	2	2	3			2		1	2	2	2	2		2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	1			2	3	
19		2	2	3	3	2	2	2	3	3			2		3	1	2	2	2		2	2	3	2	2	2	2	2	2	2	2				2	2	
17		3	3	3	2	2	2	2	3	3			2			2	3	2	2		3	2	2	2	2	3	2	2	2	2					2	1	
15		2	2	2	2	2	2	2	3	1			3			1	3	3	2		2	2	2	1	3	2	2	2	2	2					2	3	
13		2	2	2	2	2	2	2	2	2			3			2	3	3	2		3	2	2	2	2	2	2	2	3	3					3	3	
11		3	3	3	2	2	3	2	3	3			3			3	2	2			3	3	2	2	2	2	2	2	2	3					2	2	
9		2	3		3	2	3	3	3	3			3			2	2	3			3	3	2	3					3	2	3				2	3	
7		3	3		3		3	3	3	3			3			2	2	3										3	3		3					3	
5		3			3		3	3	3	3						3		3										3	3								
3					3		3	3	3	3						3											3	3	2		3	3					
1					3		3																				3	3									

ANEXO 9

**ARQUIVOS DE SAÍDA DO PROGRAMA DE SIMULAÇÃO DE SEQUÊNCIAS
ALUVIAIS DE MACKEY E BRIDGE (1992)
- FORMAÇÃO SERGI -**

FORMAÇÃO SERGI

1

RUN NO.: 1 OUT OF: 1 RUNS =====

INITIAL FLOODPLAIN GEOMETRY

WIDTH OF FLOODPLAIN	10000.0 M	201 COLS
MEAN CHANNEL WIDTH	2000.0 M	
CHANNEL-BELT WIDTH	2000.0 M	FIXED (SUBJECT TO WVAR)
WIDTH VARIATION	0.00000 M/YR	
BEST-FIT REGRESSION CONSTANT	1.00	
BEST-FIT REGRESSION EXPONENT	1.00	

BANKFULL DEPTH OF CHANNEL	10.0 M	FIXED
---------------------------	--------	-------

DISTANCE OF CHANNEL-BELT CENTER FROM LHS OF FLOODPLAIN	5000.0 M	101 COLS
MAX. ELEVATION OF FLOODPLAIN ABOVE SECTION - BASE	200.0 M	
DISTANCE BETWEEN REFERENCE COLUMNS ACROSS FLOODPLAIN	50.0 M	

CROSS-SECTION PLOTTING INFORMATION

FLOODPLAIN WIDTH	20.0 cm
MAX. ELEVATION OF FLOODPLAIN FROM SECTION-BASE	2.0 cm
HORIZONTAL SCALE	1CM= 500.0 M
VERTICAL SCALE	1CM= 100.0 M
VERTIC EXAGGERATION	5.0

AVULSION PARAMETERS

EXPECTED PERIOD BETWEEN AVULSIONS (POISSON PROCESS)	600.0 YRS
OR FIRST PARAMETER OF WEIBULL DISTRIBUTION	
EXPONENT IN AVULSION MODEL	0.500

AGGRADATION PARAMETERS

MEAN CHANNEL-BELT AGGRADATION RATE	0.02000 M/YR
EXPONENT IN AGGRADATION-RATE MODEL	5.00000
INCREMENTAL AGGRADATION INTERVAL	0.0 YRS
TYPE OF AGGRADATION-RATE MODEL	POWER FUNCTION

SHALE COMPACTION ALGORITHM	ORIGINAL - HIGH POROSITY
----------------------------	--------------------------

SHALE DIMENSIONS ARE CALCULATED

TECTONICS OPTION NOT SELECETED

1

SUMMARY FOR EACH AVULSION INCREMENT

AVULSION INCREMENT	TIME (YRS)	ELAPSED TIME (YRS)	NET CR AGGRADATION (M)	MEAN FP ELEVATION (M)	C B WIDTH (M)	CHAN WIDTH (M)	B F DEPTH (M)	LOC CB CENTER (COL)	NO. TECT EVENTS	TECTONIC MOVEMENT (M)
INITIAL SURFACE:				10.00	2000.00	2000.00	10.00	101		
2	173	173	3.46	11.80	2000.00	2000.00	10.00	201	0	0.00
3	877	1050	17.54	18.38	2000.00	2000.00	10.00	21	0	0.00
4	352	1402	7.04	20.70	2000.00	2000.00	10.00	66	0	0.00
5	979	2381	19.58	29.91	2000.00	2000.00	10.00	131	0	0.00
6	326	2707	6.52	31.26	2000.00	2000.00	10.00	21	0	0.00
7	723	3430	14.46	36.16	2000.00	2000.00	10.00	152	0	0.00
8	126	3556	2.52	36.64	2000.00	2000.00	10.00	201	0	0.00
9	320	3876	6.40	38.68	2000.00	2000.00	10.00	110	0	0.00
10	364	4240	7.28	40.68	2000.00	2000.00	10.00	89	0	0.00
11	448	4688	8.96	44.51	2000.00	2000.00	10.00	201	0	0.00
12	835	5523	16.70	50.21	2000.00	2000.00	10.00	42	0	0.00
13	182	5705	3.64	50.39	2000.00	2000.00	10.00	21	0	0.00
14	1380	7085	27.60	60.48	2000.00	2000.00	10.00	131	0	0.00
15	717	7802	14.34	65.38	2000.00	2000.00	10.00	201	0	0.00
16	251	8053	5.02	66.62	2000.00	2000.00	10.00	87	0	0.00
17	575	8628	11.50	70.70	2000.00	2000.00	10.00	152	0	0.00
18	576	9204	11.52	74.68	2000.00	2000.00	10.00	66	0	0.00
19	226	9430	4.52	75.29	2000.00	2000.00	10.00	201	0	0.00
20	448	9878	8.96	77.66	2000.00	2000.00	10.00	45	0	0.00
21	714	10592	14.28	83.35	2000.00	2000.00	10.00	110	0	0.00
22	230	10822	4.60	84.08	2000.00	2000.00	10.00	131	0	0.00
23	321	11143	6.42	86.58	2000.00	2000.00	10.00	21	0	0.00
24	1512	12655	30.24	97.57	2000.00	2000.00	10.00	201	0	0.00
25	222	12877	4.44	98.10	2000.00	2000.00	10.00	160	0	0.00
26	451	13328	9.02	101.21	2000.00	2000.00	10.00	89	0	0.00
27	286	13614	5.72	102.18	2000.00	2000.00	10.00	201	0	0.00
28	906	14520	18.12	107.84	2000.00	2000.00	10.00	110	0	0.00
29	492	15012	9.84	110.22	2000.00	2000.00	10.00	66	0	0.00
30	1037	16049	20.74	117.62	2000.00	2000.00	10.00	131	0	0.00
31	468	16537	9.76	119.97	2000.00	2000.00	10.00	201	0	0.00
32	1176	17713	23.52	127.85	2000.00	2000.00	10.00	45	0	0.00
33	445	18158	8.90	130.35	2000.00	2000.00	10.00	110	0	0.00
34	143	18301	2.86	130.22	2000.00	2000.00	10.00	89	0	0.00
35	639	18940	12.78	135.41	2000.00	2000.00	10.00	21	0	0.00
36	208	19148	4.16	136.09	2000.00	2000.00	10.00	152	0	0.00
37	238	19386	4.76	136.56	2000.00	2000.00	10.00	42	0	0.00
38	646	20032	12.92	141.56	2000.00	2000.00	10.00	131	0	0.00
39	341	20373	6.82	143.50	2000.00	2000.00	10.00	201	0	0.00
40	584	20957	11.68	147.35	2000.00	2000.00	10.00	21	0	0.00
41	491	21448	9.82	150.82	2000.00	2000.00	10.00	110	0	0.00
42	582	22030	11.64	154.84	2000.00	2000.00	10.00	66	0	0.00
43	218	22248	4.36	154.95	2000.00	2000.00	10.00	160	0	0.00
44	525	22773	10.50	158.80	2000.00	2000.00	10.00	66	0	0.00
45	170	22943	3.40	159.51	2000.00	2000.00	10.00	87	0	0.00
46	570	23513	11.40	164.30	2000.00	2000.00	10.00	21	0	0.00
47	587	24100	11.74	168.16	2000.00	2000.00	10.00	201	0	0.00
48	754	24854	15.08	172.34	2000.00	2000.00	10.00	131	0	0.00
49	226	25080	4.52	172.60	2000.00	2000.00	10.00	45	0	0.00
50	623	25703	12.46	176.99	2000.00	2000.00	10.00	131	0	0.00
FINAL SURFACE:				180.21						

SUMMARY OF RESULTS FOR BURIAL DEPTH OF: 1500.0 METERS

1

ARCHITECTURAL PARAMETERS

SIMULATED THEORETICAL

TOTAL ELAPSED TIME (YRS): 26137
 MEAN AGGRADATION RATE (M/YR): 0.00516 0.00775
 MEAN DEPOSIT THICKNESS (M): 134.88 202.56
 MEAN CHANNEL-BELT WIDTH (M): 2000.0
 MEAN BANKFULL CHANNEL DEPTH (M): 10.00
 CHANNEL DEPOSIT PROPORTION: 0.8886 0.9019 P VALUE: 0.8244
 CONNECTEDNESS RATIO: 0.6460

NCOL	VCDF	NOCB	NCOL	VCDF	NOCB	NCOL	VCDF	NOCB	NCOL	VCDF	NOCB	NCOL	VCDF	NOCB
1	0.945	7	41	0.999	12	81	0.911	11	121	0.968	13	161	0.982	15
2	0.945	7	42	0.630	5	82	0.911	11	122	0.953	12	162	0.962	15
3	0.944	7	43	0.630	5	83	0.911	11	123	0.953	12	163	0.982	15
4	0.944	7	44	0.630	5	84	0.912	11	124	0.953	12	164	0.983	15
5	0.943	7	45	0.630	5	85	0.911	11	125	0.953	12	165	0.983	15
6	0.942	7	46	0.919	10	86	0.911	11	126	0.953	12	166	0.984	15
7	0.941	7	47	0.920	10	87	0.687	6	127	0.953	12	167	0.984	15
8	0.941	7	48	0.920	10	88	0.687	6	128	0.953	12	168	0.985	15
9	0.940	7	49	0.920	10	89	0.687	6	129	0.953	12	169	0.985	15
10	0.939	7	50	0.920	10	90	0.889	11	130	0.953	12	170	0.985	15
11	0.938	7	51	0.920	10	91	0.889	11	131	0.735	7	171	0.986	15
12	0.938	7	52	0.920	10	92	0.889	11	132	0.822	10	172	0.986	15
13	0.937	7	53	0.920	10	93	0.889	11	133	0.822	10	173	0.987	12
14	0.936	7	54	0.920	10	94	0.889	11	134	0.822	10	174	0.987	12
15	0.935	7	55	0.920	10	95	0.890	11	135	0.822	10	175	0.987	12
16	0.935	7	56	0.920	10	96	0.890	11	136	0.822	10	176	0.988	12
17	0.935	7	57	0.921	10	97	0.890	11	137	0.821	10	177	0.988	12
18	0.935	7	58	0.920	10	98	0.890	11	138	0.821	10	178	0.988	12
19	0.935	7	59	0.920	10	99	0.890	11	139	0.821	10	179	0.989	12
20	0.935	7	60	0.920	10	100	0.890	11	140	0.929	12	180	0.989	12
21	0.935	7	61	0.920	10	101	0.890	11	141	0.929	12	181	0.989	10
22	0.945	9	62	0.920	10	102	0.890	11	142	0.929	12	182	0.990	10
23	0.945	9	63	0.814	8	103	0.891	11	143	0.928	12	183	0.990	10
24	0.945	9	64	0.814	8	104	0.891	11	144	0.928	12	184	0.990	10
25	0.999	12	65	0.814	8	105	0.891	11	145	0.928	12	185	0.990	10
26	0.999	12	66	0.607	5	106	0.891	11	146	0.928	12	186	0.991	10
27	0.999	12	67	0.718	7	107	0.891	11	147	0.928	12	187	0.991	10
28	0.999	12	68	0.718	7	108	0.757	9	148	0.928	12	188	0.991	10
29	0.999	12	69	0.907	10	109	0.757	9	149	0.927	12	189	0.991	10
30	0.999	12	70	0.907	10	110	0.616	6	150	0.927	12	190	0.992	10
31	0.999	12	71	0.907	10	111	0.968	13	151	0.927	12	191	0.992	10
32	0.999	12	72	0.907	10	112	0.968	13	152	0.581	5	192	0.992	10
33	0.999	12	73	0.907	10	113	0.968	13	153	0.582	5	193	0.992	10
34	0.999	12	74	0.907	10	114	0.968	13	154	0.583	5	194	0.992	10
35	0.999	12	75	0.907	10	115	0.968	13	155	0.583	5	195	0.993	10
36	0.999	12	76	0.907	10	116	0.968	13	156	0.584	5	196	0.993	10
37	0.999	12	77	0.907	10	117	0.968	13	157	0.584	5	197	0.993	10
38	0.999	12	78	0.907	10	118	0.968	13	158	0.585	5	198	0.993	10
39	0.999	12	79	0.907	10	119	0.968	13	159	0.585	5	199	0.993	10
40	0.999	12	80	0.908	10	120	0.968	13	160	0.586	5	200	0.993	10
												201	0.994	10

1

INCREMENTAL DEPOSITION RATE (M/YR)

TIME														
INC	(YR)	NCOL:	1	19	37	55	73	91	109	127	145	163	181	199

2	173		0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.058	0.058	0.005	0.003	0.000	0.000	0.000
3	877		0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.001	0.002	0.001	0.001	0.016	0.018	0.018
4	352		0.036	0.036	0.036	0.000	0.000	0.002	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
5	979		0.000	0.000	0.000	0.020	0.017	0.003	0.003	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
6	326		0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.021	0.014	0.000	0.000
7	723		0.019	0.019	0.016	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
8	126		0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.074	0.010	0.000	0.000
9	320		0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.004	0.020	0.020	0.020
10	364		0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.014	0.014	0.036	0.003	0.000	0.000	0.000
11	448		0.000	0.000	0.000	0.000	0.032	0.032	0.032	0.000	0.002	0.000	0.000	0.000
12	835		0.000	0.000	0.000	0.000	0.001	0.001	0.002	0.000	0.000	0.019	0.019	0.019
13	182		0.000	0.000	0.014	0.056	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
14	1380		0.020	0.020	0.015	0.005	0.001	0.001	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
15	717		0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.005	0.025	0.017	0.000	0.000	0.000
16	251		0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.001	0.002	0.000	0.013	0.033	0.033
17	575		0.000	0.000	0.000	0.000	0.013	0.024	0.006	0.003	0.000	0.000	0.000	0.000
18	576		0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.001	0.000	0.022	0.009	0.000	0.000
19	226		0.001	0.001	0.000	0.013	0.048	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
20	448		0.000	0.000	0.000	0.000	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000	0.021	0.021	0.021
21	714		0.002	0.002	0.015	0.026	0.004	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
22	230		0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.047	0.048	0.012	0.000	0.000	0.000	0.000
23	321		0.000	0.000	0.000	0.001	0.000	0.000	0.002	0.038	0.015	0.000	0.000	0.000
24	1512		0.020	0.020	0.017	0.002	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
25	222		0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.012	0.033	0.033
26	451		0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.032	0.010	0.000	0.000
27	286		0.000	0.000	0.000	0.000	0.029	0.018	0.021	0.000	0.001	0.000	0.000	0.000
28	906		0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.002	0.018	0.018	0.018
29	492		0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.030	0.030	0.019	0.000	0.000	0.000	0.000
30	1037		0.002	0.002	0.000	0.014	0.018	0.003	0.003	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
31	488		0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.022	0.031	0.000	0.000	0.000
32	1176		0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.002	0.012	0.017	0.017
33	445		0.000	0.000	0.018	0.025	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
34	143		0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.010	0.012	0.068	0.000	0.000	0.000	0.000
35	639		0.000	0.000	0.000	0.000	0.027	0.024	0.025	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
36	208		0.051	0.051	0.013	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
37	238		0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.015	0.026	0.000	0.000
38	646		0.002	0.002	0.015	0.021	0.002	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
39	341		0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.018	0.037	0.000	0.000	0.000
40	584		0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.016	0.026	0.026
41	491		0.024	0.024	0.023	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
42	582		0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.017	0.028	0.028	0.000	0.000	0.000	0.000
43	218		0.000	0.000	0.000	0.016	0.017	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
44	525		0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.003	0.002	0.024	0.011	0.000	0.000
45	170		0.000	0.000	0.000	0.060	0.010	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
46	570		0.000	0.000	0.000	0.001	0.028	0.028	0.006	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
47	587		0.028	0.028	0.011	0.000	0.003	0.002	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
48	754		0.000	0.000	0.000	0.000	0.001	0.001	0.002	0.000	0.000	0.025	0.025	0.025
49	226		0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.003	0.019	0.018	0.000	0.000	0.000
50	623		0.003	0.005	0.027	0.027	0.005	0.003	0.002	0.000	0.000	0.001	0.000	0.000
51	434		0.000	0.001	0.000	0.001	0.001	0.004	0.007	0.033	0.033	0.005	0.003	0.002

1

SAND BODY ASSIGNMENTS AND NCON ARRAY LISTING

INC CUT BY CHANNEL-BELTS SAND BODY NO.

1 *	4	0	0	0	0	*	1
2 *	7	8	0	0	0	*	1
3 *	6	0	0	0	0	*	1
4 *	12	10	0	0	0	*	1
5 *	9	7	0	0	0	*	1
6 *	13	12	0	0	0	*	1
7 *	8	0	0	0	0	*	1
8 *	11	0	0	0	0	*	1
9 *	10	14	0	0	0	*	1
10 *	0	0	0	0	0	*	1
11 *	15	0	0	0	0	*	1
12 *	13	0	0	0	0	*	1
13 *	20	0	0	0	0	*	1
14 *	17	0	0	0	0	*	1
15 *	17	19	0	0	0	*	1
16 *	18	21	0	0	0	*	1
17 *	22	19	0	0	0	*	1
18 *	20	0	0	0	0	*	1
19 *	24	0	0	0	0	*	1
20 *	23	0	0	0	0	*	1
21 *	26	22	0	0	0	*	1
22 *	25	0	0	0	0	*	1
23 *	32	0	0	0	0	*	1
24 *	25	27	0	0	0	*	1
25 *	27	0	0	0	0	*	1
26 *	29	28	0	0	0	*	1
27 *	31	0	0	0	0	*	1
28 *	30	0	0	0	0	*	1
29 *	32	34	0	0	0	*	1
30 *	33	0	0	0	0	*	1
31 *	36	39	0	0	0	*	1
32 *	35	37	0	0	0	*	1
33 *	34	0	0	0	0	*	1
34 *	41	0	0	0	0	*	1
35 *	37	0	0	0	0	*	1
36 *	38	39	0	0	0	*	1
37 *	40	42	0	0	0	*	1
38 *	41	0	0	0	0	*	1
39 *	43	47	0	0	0	*	1
40 *	46	0	0	0	0	*	1
41 *	45	0	0	0	0	*	1
42 *	44	0	0	0	0	*	1
43 *	48	47	0	0	0	*	1
44 *	45	0	0	0	0	*	1
45 *	0	0	0	0	0	*	1
46 *	49	0	0	0	0	*	1
47 *	0	0	0	0	0	*	1
48 *	50	0	0	0	0	*	1
49 *	0	0	0	0	0	*	1
50 *	0	0	0	0	0	*	1

1

SANDBODY DIMENSIONS AND STATISTICS

SAND BODY	ELEVATION		WIDTH (M)	WIDTH FPW	AV TOT THK	S D TOT THK	WIDTH/ TOT THK	AV SST THK	SD SST THK	WIDTH/ SST THK	NOCB	SST PROP
	MIN	MAX										
1	0.0	140.0	10000.0	1.000	128.0	8.6	78.1	119.5	18.0	83.7	50	0.934

	MEAN :		10000.0		128.0		78.1	128.0		83.7	50.0	0.934
	STD DEV :		0.0		0.0		0.0	0.0		0.0	0.0	0.000
	COEF VAR :		0.0		0.0		0.0	0.0		0.0	0.0	0.000
	STD ERR :		0.0		0.0		0.0	0.0		0.0	0.0	0.000

TOT. NUMBER OF CHANNEL-BELTS: 50
 TOT. NUMBER OF SAND BODIES: 1
 PROP. OF CONNECTED CHANNEL-BELTS: 1.000

1

INDIVIDUAL SAND BODY THICKNESS DISTRIBUTIONS - ACTUAL DATA

TOTAL THICKNESS

CLASS SANDY BODY NUMBER
MIDPOINT 1

1.250	0.000
3.750	0.000
6.250	0.000
8.750	0.000
11.250	0.000
13.750	0.000
16.250	0.000
18.750	0.000
21.250	0.000
23.750	0.000
26.250	0.000
28.750	0.000
31.250	0.000
33.750	0.000
36.250	0.000
38.750	0.000
41.250	0.000
43.750	0.000
46.250	0.000
48.750	1.000

INDIVIDUAL SAND BODY THICKNESS DISTRIBUTIONS - ACTUAL DATA

SANDSTONE THICKNESS

CLASS SANDY BODY NUMBER
MIDPOINT 1

1.250	0.000
3.750	0.000
6.250	0.000
8.750	0.000
11.250	0.000
13.750	0.000
16.250	0.000
18.750	0.000
21.250	0.000
23.750	0.000
26.250	0.000
28.750	0.000
31.250	0.000
33.750	0.000
36.250	0.000
38.750	0.000
41.250	0.000
43.750	0.000
46.250	0.000
48.750	1.000

THERE IS ONLY ONE SAND BODY.

FREQUENCY DISTRIBUTION HAS ALREADY BEEN CALCULATED AND PRINTED (ABOVE).

[illegible]

OVERBANK DEPOSITS: 2222222222
CHANNEL-BELT DEPOSITS: 1111111111

INC OVERBANK DEPOSITS: 2222222222
CHANNEL-BELT DEPOSITS: 1111111111

1 =====

SHALE BODY DIMENSIONS AND STATISTICS

SHALE BODY	ELEVATION		WIDTH (M)	WIDTH/ FW	AV TOT THK	SD TOT THK	WIDTH/ TOT THK	AV SHL THK	SD SHL THK	WIDTH/ SHL THK	SHL PROP
	MIN	MAX									
1	10.0	21.4	250.0	0.025	11.355	0.015	22.0	11.355	0.015	22.0	1.000
2	10.0	17.4	3750.0	0.375	2.742	1.825	1367.4	2.742	1.825	1367.4	1.000
3	27.2	52.0	4550.0	0.455	4.166	3.397	1092.1	4.166	3.397	1092.1	1.000
4	23.8	36.1	2000.0	0.200	4.827	4.291	414.4	4.827	4.291	414.4	1.000
5	56.2	58.0	1200.0	0.120	1.725	0.030	695.8	1.725	0.030	695.8	1.000
6	50.4	74.1	2450.0	0.245	4.500	3.314	544.4	4.500	3.314	544.4	1.000
7	52.2	54.4	500.0	0.050	2.156	0.027	231.9	2.156	0.027	231.9	1.000
8	53.5	97.8	2700.0	0.270	23.313	7.730	115.8	5.637	5.388	479.0	0.242
9	88.3	90.1	1200.0	0.120	1.794	0.011	668.9	1.794	0.011	668.9	1.000
10	67.7	83.5	1250.0	0.125	4.048	2.616	308.8	4.048	2.616	308.8	1.000
11	85.2	106.8	1400.0	0.140	3.717	3.629	376.6	3.717	3.629	376.6	1.000
12	100.8	102.1	1050.0	0.105	1.179	0.033	890.7	1.179	0.033	890.7	1.000
13	95.2	139.5	8000.0	0.800	6.065	6.324	1319.1	3.509	2.874	2280.1	0.579
14	115.5	136.5	2500.0	0.250	2.788	2.729	896.6	2.788	2.729	896.6	1.000

MEAN :			2342.9		5.313		638.9	3.867		733.5	
STD DEV :			2024.5		5.769		428.7	2.516		571.6	
COEF VAR:			86.4		108.601		67.1	65.047		77.9	
STD ERR :			541.1		1.542		114.6	0.672		152.8	

TOTAL NUMBER OF SHALE BODIES: 14

SHALE BODY NUMBERS PAGE 1

[illegible]

[illegible]

203

[illegible]

ANEXO 10

```

c  ROTINA PARA TRANSFORMAR UMA MATRIZ DE DADOS DE CARACTERES INTEIROS
c  GERADOS PELO FPSM EM UM ARQUIVO DE DADOS TIPO X, Y, Z (VARIÁVEL=1 ou =2)
c  NO FORMATO GEOEAS, PARA TRATAMENTO GEOESTATÍSTICO
c  NSPRNT(NCOL,INC) é a matriz de entrada
c
c  INTEGER a, b, NCOL, INC
c  DIMENSION NSPRNT(201,202)
c  COMMON /GEN /NCOLS,NINC
c  CHARACTER NSPRNT
c
c  PRINT LINHAS DE INICIO DO ARQUIVO
c  WRITE (2,*) 'INICIO'
c  WRITE (2,*) 'Arquivo de dados: de BRIDGE.OUT para GSLIB.DAT'
c  WRITE (2,*) ' 5'
c  WRITE (2,*) ' x'
c  WRITE (2,*) ' y'
c  WRITE (2,*) 'facies 1 - canal - (1 0)'
c  WRITE (2,*) 'facies 2 - pl. inund. - (0 1)'
c  WRITE (2,*) 'facies'
c
c  PRINT COLUNAS
c  a = 1
c  b = 0
c  DO NCOL=1,NCOLS
c    DO INC=1,NINC
c      IF (NSPRNT(NCOL,INC).EQ.1) WRITE (2, '(1x, 2f8.0, i2, i2, i2,)' )
c      & NCOL, INC, a, b, NSPRNT(NCOL,INC)
c      IF (NSPRNT(NCOL,INC).EQ.2) WRITE (2, '(1x, 2f8.0, i2, i2, i2,)' )
c      & NCOL, INC, b, a, NSPRNT(NCOL,INC)
c    ENDDO
c  ENDDO
c  WRITE (2,*) 'F'

```