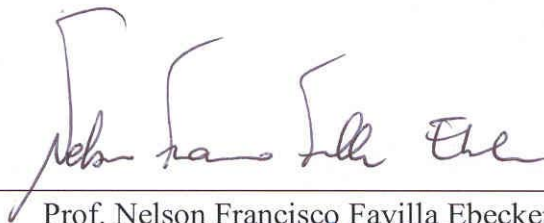


MODELAGEM E VISUALIZAÇÃO DE DISTRIBUIÇÕES LITOFACIOLÓGICAS
TRIDIMENSIONAIS

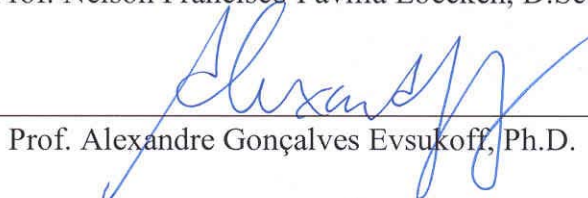
Luiz Eduardo Seabra Varela

TESE SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DA COORDENAÇÃO DOS
PROGRAMAS DE PÓS-GRADUAÇÃO DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE
FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS REQUISITOS
NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE DOUTOR EM CIÊNCIAS
EM ENGENHARIA CIVIL.

Aprovada por:



Prof. Nelson Francisco Favilla Ebecken, D.Sc.



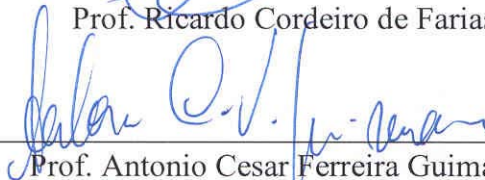
Prof. Alexandre Gonçalves Evsukoff, Ph.D.



Profa. Beatriz de Souza Leite Pires de Lima, D.Sc.



Prof. Ricardo Cordeiro de Farias, Ph. D.



Prof. Antonio Cesar Ferreira Guimarães, D.Sc.



Dr. Sebastião César Assis Pereira, D.Sc.

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL

MARÇO DE 2007

Livros Grátis

<http://www.livrosgratis.com.br>

Milhares de livros grátis para download.

VARELLA, LUIZ EDUARDO SEABRA

Modelagem e Visualização de Distribuições
Litofaciológicas Tridimensionais [Rio de
Janeiro] 2007

IX, 126 p., 29,7 cm (COPPE/UFRJ, D.Sc.,
Engenharia Civil, 2007)

Tese - Universidade Federal do Rio de
Janeiro, COPPE

1. Sedimentologia
2. Análise Faciológica
3. Modelagem e Visualização Volumétrica
4. Redes Neurais
5. Sistemas de Informações Geográficos

I. COPPE/UFRJ II. Título (série)

Dedico este trabalho aos meus pais, Luiz Carlos
Lenine Seabra Varella e Maria Rozete Andrade
Varella.

AGRADECIMENTOS

À Petrobras pelo apoio permanente, sem o que não teria sido possível a realização deste Doutorado.

Ao Prof. Nelson Francisco Favilla Ebecken pelos ensinamentos, orientação, paciência e incentivo durante todo o decorrer do curso.

Ao Geólogo Saulo Ferreira Santos pela proposição inicial da metodologia, ensinamentos, testes do sistema e sugestões.

Ao Prof. Alexandre Gonçalves Evsukoff pelos ensinamentos e apoio desde os primeiros dias de realização do curso.

Ao Geofísico André Luiz Romanelli Rosa pela iniciativa, apoio e sugestões no desenvolvimento do sistema.

Ao Geólogo Edison José Milani pela iniciativa, apoio e sugestões no desenvolvimento do sistema.

À Profa. Beatriz de Souza Leite Pires de Lima pela sua participação na Banca Examinadora e sugestões.

Ao Prof. Ricardo Cordeiro de Farias pela sua participação na Banca Examinadora e sugestões.

Ao Prof. Antonio César Ferreira Guimarães pela sua participação na Banca Examinadora e sugestões.

Ao Analista de Sistemas Sebastião César Assis Pereira pela sua participação na Banca Examinadora e sugestões.

Aos meus gerentes imediatos Alcides Ayres Branquinho, Marco Antonio Santiago Toledo, Marcos do Amaral de Almeida e Álvaro Henrique Arouca de Castro pela confiança, apoio e incentivo em fazer deste trabalho uma ferramenta de suporte as atividades de exploração de petróleo da Petrobras.

Aos amigos Rubens Francisco e Lilian Montañó do Nascimento pelo estímulo, carinho e, principalmente, pelas constantes revisões do texto.

Aos amigos João Baptista e Adília Gomes da Silva, in memoriam, pelos ensinamentos e exemplo de vida.

À minha esposa Maria Inês e meu filho João Luiz S. Seabra Varella pelo carinho, compreensão e estímulo dado em todos os momentos.

A todos os colegas da UFRJ e Petrobras que contribuíram com idéias e incentivos à realização deste trabalho.

Resumo da Tese apresentada à COPPE/UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Doutor em Ciências (D.Sc.)

MODELAGEM E VISUALIZAÇÃO DE DISTRIBUIÇÕES LITOFACIOLÓGICAS TRIDIMENSIONAIS

Luiz Eduardo Seabra Varela

Março/2007

Orientador: Nelson Francisco Favilla Ebecken

Programa: Engenharia Civil

O presente trabalho propõe uma metodologia e implementa um sistema computacional dedicado à modelagem e visualização de distribuições de litofácies tridimensionais. A metodologia consiste dos seguintes processos: preparação dos dados, geração de superfícies, classificação litofaciológica, edição de malhas, geração de volumes e exportação de dados. Na preparação dos dados, as informações de poços de petróleo que definem uma região, o intervalo estratigráfico e atributos de litologias são analisadas, validadas e complementadas. A geração de superfícies estima superfícies em formato *grid* para as variáveis do modelo de classificação. A classificação litofaciológica produz um mapa bidimensional de litofácies, definindo graficamente as distribuições espaciais das diferentes composições de rochas sedimentares, e armazena o resultado em uma nova estrutura de *grid*. A edição de *grids* permite que o intérprete manipule interativamente o mapa de litofácies, inserindo seu conhecimento sobre a área em estudo. Na geração de volumes são feitas a modelagem e visualização tridimensional das distribuições de composições de rochas através do fatiamento da unidade estratigráfica. Finalizando, a exportação de dados gera a representação litofaciológica em diversos formatos, com o objetivo de alimentar sistemas de modelagem de bacias sedimentares, modelagem geométrica, visualização volumétrica etc. Além da apresentação da metodologia e do sistema computacional, são discutidos os principais modelos de classificação de litofácies propostos na literatura e avaliados os respectivos resultados.

Abstract of Thesis presented to COPPE/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Doctor of Science (D.Sc.)

MODELING AND VISUALIZATION OF THREE-DIMENSION LITHOFACIES DISTRIBUTIONS

Luiz Eduardo Seabra Varela

March/2007

Advisor: Nelson Francisco Favilla Ebecken

Department: Civil Engineering

This work proposes a methodology and develops an automated system for modeling and visualization of three-dimension lithofacies distributions. The methodology consists on the following steps: data preparation, surface generation, lithofacies classification, edition of grids, volume generation and data exchange. First of all, in data preparation, informations about wells which define the map region, the stratigraphic unit and lithologies attributes are analyzed, validated and complemented. Surface generation estimates surfaces in grid format for each one of the three classification variables. Lithofacies classification produces a lithofacies map that shows qualitatively the spatial variation of either lithologic composition of the stratigraphic interval and saves it as new surface in grid format. In edition of grids, the lithofacies map is interactively manipulated with the aim to insert available knowledge in the map. Volume generation provides a three-dimension modeling and visualization of rocks distributions. The volumetric model is built from slices sequences of the stratigraphic unit. Finally, data exchange saves the lithofacies distributions in several formats to be used as input information by systems of sedimentary basis modeling, geometric modeling, volumetric visualization and so on. Besides the methodology and system description, this work discusses important lithofacies classification models and presents the results for each one.

SUMÁRIO

| | |
|---|------------|
| 1. INTRODUÇÃO | 1 |
| 1.1 Análise do Problema | 3 |
| 1.2 Principais Objetivos do Trabalho..... | 5 |
| 1.3 Organização do Texto..... | 6 |
| 2. MODELOS DE CLASSIFICAÇÃO DE LITOFÁCIES | 7 |
| 2.1 Diagramas Triangulares ou Ternários..... | 9 |
| 2.2 Modelo Razão Clástica e Razão Areia-Folhelho | 12 |
| 2.3 Modelos de Mapeamento de Multicomponentes | 17 |
| 2.3.1 Modelo Função Quantidade de Mistura..... | 17 |
| 2.3.2 Modelo Função Entropia..... | 20 |
| 2.3.3 Modelo Razão-Entropia | 22 |
| 2.4 Modelos Areia-Silte-Argila | 24 |
| 2.5 Modelo Arenitos-Pelitos-Carbonatos..... | 26 |
| 2.6 Modelos de Relações Granulométricas..... | 27 |
| 3. CONCEITOS GERAIS..... | 29 |
| 3.1 O Processo de KDD | 29 |
| 3.2 Conceitos de Redes Neurais..... | 31 |
| 3.3 Estimação de Litologias Via Redes Neurais | 33 |
| 3.4 Definição de Dados Espaciais..... | 37 |
| 3.5 Fundamentos de Modelagem Digital de Terreno..... | 38 |
| 3.6 Classificação Geométrica do Diagrama Triangular..... | 41 |
| 3.7 Coordenadas Baricêntricas..... | 46 |
| 4. SISTEMA DE MODELAGEM E VISUALIZAÇÃO DE LITOFÁCIES | 48 |
| 4.1 Descrição Geral do Sistema | 49 |
| 4.2 Preparação dos Dados | 50 |
| 4.3 Geração de Superfícies | 57 |
| 4.4 Classificação Litofaciológica..... | 65 |
| 4.5 Edição de Malhas..... | 68 |
| 4.6 Geração de Volumes | 71 |
| 4.7 Exportação de Dados | 82 |
| 4.8 Estrutura de Dados LFC..... | 83 |
| 4.9 Interface com Usuário..... | 85 |
| 5. ANÁLISE DE RESULTADOS..... | 88 |
| 5.1 Modelos de Classificação | 88 |
| 5.2 Estimação de Colunas Litológicas | 96 |
| 5.3 Características dos Processos e Dados..... | 100 |
| 6. CONCLUSÕES..... | 102 |
| 7. APÊNDICES | 104 |
| 7.1 Apêndice A – Conteúdo da Estrutura de Dados LFC | 104 |
| 8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS | 122 |

LISTA DE FIGURAS

| | |
|--|----|
| Figura 1.1 – Exemplo de mapa de litofácies. | 4 |
| Figura 2.1 – Exemplo de mapa litofaciológico (Krumbein, 1948)..... | 8 |
| Figura 2.2 – Diagrama ternário. | 10 |
| Figura 2.3 – Tetraedro de classificação de quatro variáveis. | 11 |
| Figura 2.4 – Projeção do ponto interior P sobre uma face do tetraedro. | 11 |
| Figura 2.5 – Diagrama ternário percentual com a plotagem das amostras..... | 13 |
| Figura 2.6 – Relação das razões clásticas e areia-folhelho com o diagrama de percentuais. | 14 |
| Figura 2.7 – Esquema de classificação razão clástica e razão areia-folhelho. | 16 |
| Figura 2.8 – Comportamento da função D para um sistema de classificação de três componentes. | 18 |
| Figura 2.9 – Esquema de classificação de litofácies com base na função quantidade de mistura. | 19 |
| Figura 2.10 – Comportamento da função 100Hr..... | 21 |
| Figura 2.11 – Esquema de classificação de litofácies com base no cálculo das entropias. | 22 |
| Figura 2.12 – Diagrama com a superposição das razões e entropias. | 23 |
| Figura 2.13 – Esquema de classificação de litofácies razão-entropia. | 23 |
| Figura 2.14 – Esquema areia-silte-argila (Shepard, 1967). | 24 |
| Figura 2.15 – Esquema areia-silte-argila (Folk, 1954). | 25 |
| Figura 2.16 – Esquema areia-silte-argila (Gorsline, 1960). | 25 |
| Figura 2.17 – Esquema arenitos-pelitos-carbonatos. | 26 |
| Figura 2.18 – Esquema arenitos-pelitos. | 27 |
| Figura 2.19 – Esquema granulometria de arenitos. | 28 |
| Figura 3.1 – Etapas do processo de KDD. | 30 |
| Figura 3.2 – Arquitetura de uma rede neural..... | 32 |
| Figura 3.3 – Rede para estimação de litologias..... | 36 |
| Figura 3.4 – Métodos de definição da região de vizinhança. | 40 |
| Figura 3.5 – Representação do diagrama triangular em R^3 | 42 |
| Figura 3.6 – Modelo de classificação de Krumbein [1948] em R^3 | 45 |
| Figura 3.7 – Coordenadas baricêntricas. | 46 |
| Figura 4.1 – Visão geral do sistema, processos e dados..... | 49 |
| Figura 4.2 – Arquivo XYZ..... | 51 |
| Figura 4.3 – Distribuição espacial dos poços. | 51 |
| Figura 4.4 – Indicação dos poços descartados, em vermelho. | 52 |
| Figura 4.5 – Visualização unidimensional. Curva de proporção vertical..... | 54 |
| Figura 4.6 – Curvas de proporção vertical. Janelas de 30 e 60m. | 55 |
| Figura 4.7 – Geração de colunas litológicas. Treinamento e reconhecimento. | 56 |
| Figura 4.8 – Variáveis do modelo de classificação <i>default</i> | 57 |
| Figura 4.9 – Mapa de percentual não normalizado dos arenitos. | 58 |
| Figura 4.10 – Mapa de percentual não normalizado dos pelitos. | 59 |
| Figura 4.11 – Mapa de percentual não normalizado dos carbonatos. | 59 |
| Figura 4.12 – Mapa de percentual normalizado dos arenitos. | 60 |
| Figura 4.13 – Mapa de percentual normalizado dos pelitos. | 61 |
| Figura 4.14 – Mapa de percentual normalizado dos carbonatos. | 61 |
| Figura 4.15 – Mapa de erro. | 62 |
| Figura 4.16 – Mapa de isólita dos arenitos..... | 63 |
| Figura 4.17 – Mapa de isólita dos pelitos..... | 64 |
| Figura 4.18 – Mapa de isólita dos carbonatos. | 64 |
| Figura 4.19 – Modelo de classes arenitos-pelitos-carbonatos. | 65 |
| Figura 4.20 – Visualização bidimensional da distribuição litofaciológica..... | 66 |
| Figura 4.21 – Inserção de poços..... | 69 |

| | |
|--|----|
| Figura 4.22 – Inserção de litofácies. | 69 |
| Figura 4.23 – Alteração de classes. | 70 |
| Figura 4.24 – Decomposição do intervalo estratigráfico. | 71 |
| Figura 4.25 – Fatia 1. Figura 4.26 – Fatia 2. | 72 |
| Figura 4.27 – Fatia 3. Figura 4.28 – Fatia 4. | 72 |
| Figura 4.29 – Fatia 5. | 72 |
| Figura 4.30 – Direção da seção <i>dip</i> 1. | 73 |
| Figura 4.31 – Seção <i>dip</i> 1. | 73 |
| Figura 4.32 – Direção da seção <i>dip</i> 2. | 73 |
| Figura 4.33 – Seção <i>dip</i> 2. | 74 |
| Figura 4.34 – Direção da seção <i>strike</i> 3. | 74 |
| Figura 4.35 – Seção <i>strike</i> 3. | 74 |
| Figura 4.36 – Superfícies envolvidas na geração de seções e volumes. | 75 |
| Figura 4.37 – Esquema da visualização de seções. | 76 |
| Figura 4.38 – Volumes litofaciológicos. | 78 |
| Figura 4.39 – Visualização das faces do volume. | 79 |
| Figura 4.40 – Visualização dos arenitos. | 79 |
| Figura 4.41 – Visualização dos pelitos. | 79 |
| Figura 4.42 – Visualização dos carbonatos. | 80 |
| Figura 4.43 – Visualização dos sistemas mistos. | 80 |
| Figura 4.44 – Geração de <i>voxels</i> do volume litofaciológico. | 81 |
| Figura 4.45 – Superfície do topo da unidade estratigráfica em formato VRML. | 82 |
| Figura 4.46 – Esquema da estrutura de dados LFC. | 84 |
| Figura 4.47 – Tela principal do sistema. | 85 |
| Figura 5.1 – Resultado da classificação Arenitos-Pelitos-Carbonatos. | 90 |
| Figura 5.2 – Resultado da classificação ‘mapa de <i>end members</i> ’. | 90 |
| Figura 5.3 – Resultado da classificação de Krumbein (1948). | 91 |
| Figura 5.4 – Resultado da classificação de Pelto (1953). | 92 |
| Figura 5.5 – Resultado da classificação Arenitos-Pelitos. | 93 |
| Figura 5.6 – Resultado da classificação do modelo 1 de granulometria de arenitos. | 94 |
| Figura 5.7 – Resultado da classificação do modelo 2 de granulometria de arenitos. | 95 |
| Figura 5.8 – Estimação de colunas litológicas, poços A, B e C. | 96 |
| Figura 5.9 – Poço A, coluna litológica estimada. | 97 |
| Figura 5.10 – Poço B, coluna litológica estimada. | 97 |
| Figura 5.11 – Poço C, coluna litológica estimada. | 97 |
| Figura 5.12 – Curvas de proporção vertical do intervalo estratigráfico, poços A, B e C. | 98 |
| Figura 5.13 – Resultados das distribuições litofaciológicas bidimensionais sem e com estimacão de colunas litológicas dos poços A, B e C. | 99 |

1. INTRODUÇÃO

Nos dias de hoje as empresas de petróleo vêm organizando grandes quantidades de informações em bancos de dados especialmente projetados para apoiar as atividades de exploração e produção de petróleo. Informações tipicamente geológicas encontram-se armazenadas sob a forma de perfis elétricos, amostras de testemunhos, descrições de calha, colunas litológicas etc. Tais conjuntos de dados dizem respeito à estrutura, densidade e distribuição espacial de rochas sedimentares.

O uso rotineiro de informações desta natureza impõe ao intérprete de geologia a tarefa de correlacionar e avaliar sistematicamente grandes volumes de dados. Importantes relacionamentos entre propriedades diversas são extraídos e representados graficamente em mapas ou em volumes digitais, fazendo dos procedimentos automatizados de modelagem e visualização importantes ferramentas de suporte à exploração e produção de petróleo.

Mapas de fácies se constituem em um meio efetivo de comunicação e materialização de uma interpretação. O objetivo principal desta representação é estabelecer relacionamentos entre composições de atributos de uma determinada unidade estratigráfica. Tais mapas mostram distribuições espaciais de propriedades e, quando elaborados em um contexto regional, definem importantes feições que dão suporte à análise paleogeográfica e paleotectônica.

Uma característica importante é o caráter quantitativo que se tem dado ao mapeamento de atributos litológicos. Mapas de contorno (isovalores) e temáticos (*grid*), baseados em dados numéricos, fornecem um eficiente método gráfico para expressar propriedades. Esses mapas mostram relações entre propriedades de uma determinada unidade estratigráfica e comparam as variações espaciais das propriedades mapeadas. Além disso, os dados de unidades estratigráficas disponíveis nos bancos de dados podem ser estatisticamente avaliados, e as saídas geradas neste contexto podem ser tratadas como superfícies matemáticas em análise numérica posterior. Mapas quantitativos de uma mesma unidade estratigráfica expressam similaridades ou diferenças entre as propriedades medidas.

Para Forgotson (1960), a representação de variáveis de unidades estratigráficas tem produzido grande número de tipos de mapas. Esses conjuntos de informações gráficas podem ser classificados em:

1. Mapas que representam a geometria de um plano de referência. Exemplo: mapas estruturais e topográficos.
2. Mapas que ilustram a geometria tridimensional de uma feição geológica. Exemplo: mapas de isópacas.
3. Mapas que descrevem a composição de unidades estratigráficas. Exemplo: mapas de fácies. Os mapas de fácies mostram a distribuição espacial de composições litológicas, o conteúdo da fauna, atributos geoquímicos, ou qualquer outra variável possível de representação. Este tipo de mapa pode ser classificado em duas categorias: univariado ou multivariado. Os univariados são os mapas de percentuais e os mapas de isólitas. Os multivariados são os mapas de razões que descrevem a relação entre duas variáveis. Também são considerados multivariados os mapas de razões combinadas, mapas de entropia e mapas de resultados de processos de classificação, que tratam de relações entre duas ou mais variáveis.
4. Mapas de distribuição vertical de litologias de uma dada unidade estratigráfica. Exemplo: mapas de variabilidade vertical. Este tipo é um caso particular do mapa de fácies, uma vez que nele se descreve a composição unidimensional de uma unidade estratigráfica em termos do posicionamento e organização dos diversos tipos de rocha.
5. Mapas de resultados de análises estatísticas. Exemplo: mapas de geometria tridimensional de um corpo, mapas de variância, mapas de componentes locais e regionais etc.

Grande parte das informações utilizadas em estudos regionais de subsuperfícies baseia-se em perfis elétricos, amostras de calha e litologias. O processo de mapeamento geológico regional de distribuições litofaciológicas tem início com a correlação de perfis elétricos. Os intervalos das unidades estratigráficas a serem mapeados são identificados e suas profundidades levantadas. Em etapa posterior, são computadas as espessuras de cada tipo de litologia dos intervalos em estudo, a fim de se confeccionar os mapas de litofácies.

Informações relacionadas às isópacas também podem ser combinadas em um mapa de litofácies, de maneira a expressar uma representação tridimensional das distribuições espaciais das rochas. Apesar do elevado volume de dados envolvidos no

processo, os mapas produzidos não são vistos como produto final de um estudo geológico, mas sim como ponto de partida de processos posteriores, tais como análise numérica e estatística dos dados.

1.1 Análise do Problema

O termo ‘fácies’ foi introduzido na geologia por Nicholaus Steno, no ano de 1669, para expressar o aspecto global de parte da superfície da terra em determinada idade geológica. Deriva do latim *facia* ou *facies*, que significa aparência externa. Mais tarde, Gressly, em 1838, utilizou o termo como sendo o somatório de aspectos litológicos e paleontológicos de uma determinada unidade estratigráfica. A partir desta data, a palavra ‘fácies’ tem sido utilizada para diversos fins.

Duarte (2003) define fácies como: a) conjunto de caracteres, de natureza genética, que serve como elemento de diferenciação de uma rocha; b) fração mapeável de um corpo de rocha; c) tipo de rocha formada em um determinado ambiente; d) ambiente no qual uma rocha foi formada. O mesmo autor define litofácies como sendo uma feição estratigráfica descrita em função dos atributos litológicos, tais como cor, textura, granulação, composição mineralógica e ambiente de sedimentação.

Krumbein (1956), em clássica publicação, define ‘litofácies’ como sendo o somatório de características litológicas de rochas sedimentares, e ‘mapa de litofácies’ como a representação gráfica espacial de características de rochas sedimentares para um mesmo intervalo estratigráfico. Esses mapas em geral apresentam variações de cores ou padrões de hachuras que ilustram eventos geológicos (fácies de natureza marinha ou continental, acumulações de areias, folhelhos, calcários etc.) ocorridos em um intervalo estratigráfico. Para Krumbein, um mapa de litofácies baseado em dados numéricos deve mostrar, essencialmente, variações quantitativas de características litológicas.

O presente trabalho tem como objetivo principal propor uma metodologia e implementar um sistema computacional dedicado à modelagem e visualização de distribuições de litofácies, uni, bi e tridimensionais. O problema da modelagem destas distribuições pode ser formulado da seguinte maneira: dado um conjunto de pontos, irregularmente espaçados sobre uma área, e uma unidade estratigráfica específica, definida em cada um dos pontos pelo topo e base da unidade, deseja-se produzir um mapa que mostre a distribuição espacial de fácies litológicas.

A Figura 1.1 ilustra uma distribuição espacial típica de pontos que definem localizações de poços de petróleo. Esse conjunto de poços, combinado com um banco de dados que armazena informações de litologias, deve ser suficiente para produzir uma saída como a apresentada abaixo, correspondendo a um mapa do tipo 3, segundo Forgotson (1960).

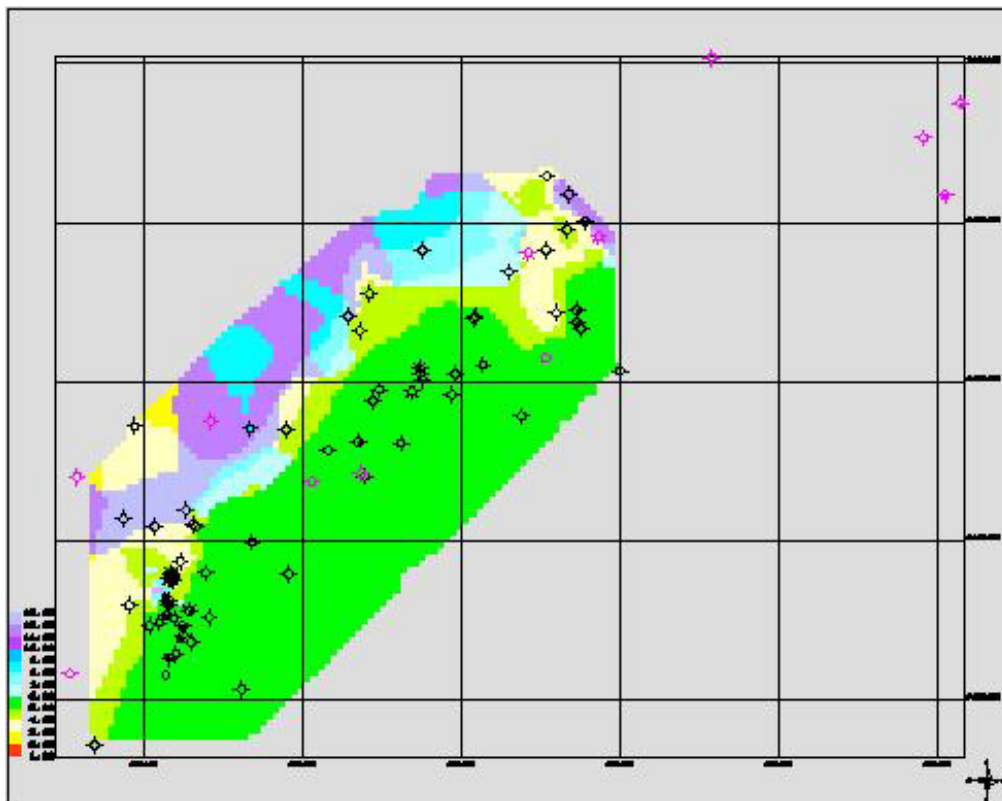


Figura 1.1 – Exemplo de mapa de litofácies.

Esta figura mostra as fácies em diferentes cores, indicando combinações de percentuais de rochas sedimentares que ocorrem no intervalo estratigráfico em estudo. Em uma possível representação tridimensional ou volumétrica, o interior da unidade estratigráfica – definida pelas superfícies de topo e base – é preenchido com paralelepípedos (*voxels*), nas cores das composições litológicas.

A metodologia e o sistema implementado nesta tese baseou-se no trabalho desenvolvido pelo geólogo Saulo Ferreira Santos, da Petrobras, cujo objetivo principal é a obtenção de inferências paleogeográficas a partir de diagramas litofaciológicos. Em seu trabalho, Santos (2003) sugere um modelo de classificação de litofácies – que considera as variáveis areias, pelitos e carbonatos –, e utiliza um fluxo de processos automatizados em diferentes *softwares*.

O presente estudo implementou em um único sistema computacional o modelo de classificação e os processos sugeridos por Santos (2003) e avançou em novos paradigmas de classificação, em procedimentos de modelagem e visualização gráfica uni, bi e tridimensionais, em estruturas de comunicação de dados entre sistemas, e em ferramentas de interpretação do ambiente litofaciológico.

1.2 Principais Objetivos do Trabalho

O trabalho aqui apresentado pretende apoiar determinadas atividades de exploração e produção de petróleo. Dentre as contribuições para o segmento de E&P, destacam-se as seguintes:

- 1) Resgatar a prática de elaboração de mapas litofaciológicos, relativamente esquecida nas últimas décadas por questões de limitações tecnológicas;
- 2) Apoiar a modelagem geológica de sistemas petrolíferos através da geração de dados para sistemas de modelagem de bacias sedimentares;
- 3) Permitir análises estratigráficas regionais, com o auxílio da geração de mapas litofaciológicos (Arenitos-Pelitos-Carbonatos, Razão ARN/FLH + granulometria de arenitos) em fatias interpoladas ou isópacas entre horizontes estratigráficos, facilitando a percepção da evolução paleogeográfica (padrão de distribuição dos sedimentos), bem como a identificação dos principais pontos de aporte sedimentar;
- 4) Apoiar os processos de modelagem estratigráfica mediante o balizamento faciológico/paleogeográfico dos resultados obtidos em programas de modelagem estratigráfica;
- 5) Indicar e correlacionar espacialmente feições litológicas de ambientes deposicionais ou unidades estratigráficas;
- 6) Indicar espacialmente agentes de transporte ou de deposição de materiais (vento, rio, corrente turbidítica etc.);
- 7) Indicar espacialmente processos de deposições finais (suspensão, tração, compressão etc.);

- 8) Indicar espacialmente ambientes de deposição, tais como canais, fluxos, praias, dunas etc.

1.3 Organização do Texto

O texto foi estruturado em seis capítulos.

No primeiro, a modelagem e visualização de litofácies são introduzidas como uma técnica de mapeamento qualitativo e quantitativo que tem como objetivo indicar distribuições espaciais e relacionamentos entre rochas sedimentares de unidades estratigráficas.

O capítulo 2 trata a classificação litofaciológica, levando em conta três variáveis. São apresentados e discutidos os principais modelos de classificação de fácies abordados na literatura.

O capítulo 3 apresenta conceitos gerais, das áreas de Computação Gráfica, Sistemas de Informações Geográficas e Redes Neurais, utilizados na implementação do sistema.

O capítulo 4 descreve o sistema de modelagem e visualização de distribuições litofaciológicas desenvolvido. São descritos os processos, dados, interface com usuário e as principais saídas.

Os capítulos 5 e 6 encerram a tese, com uma análise detalhada dos resultados, as principais conclusões, e sugestões para futuras pesquisas.

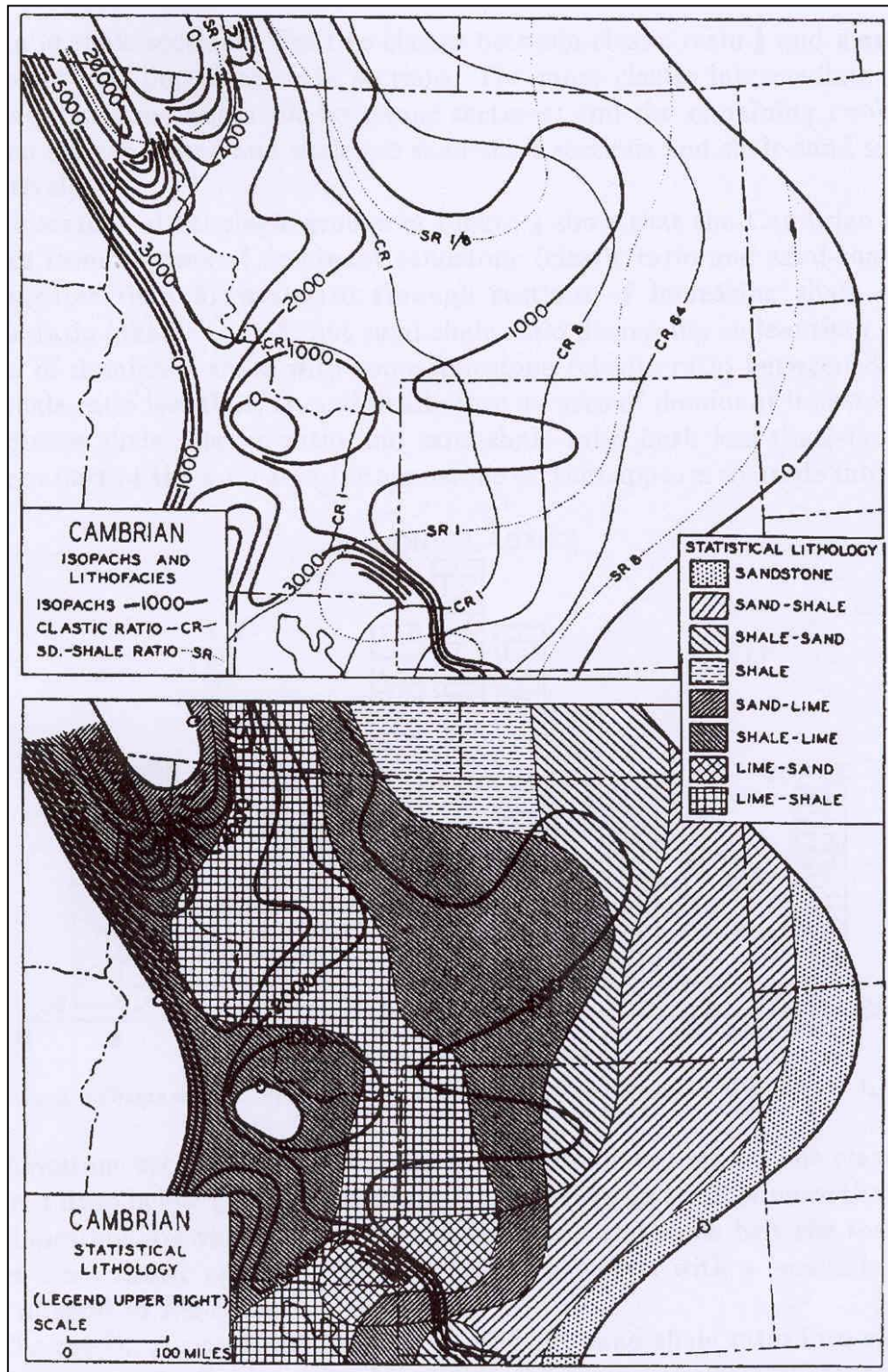
2. MODELOS DE CLASSIFICAÇÃO DE LITOFÁCIES

A literatura existente sobre mapeamento de litofácies é muito vasta e se caracteriza pela antiguidade. A maioria dos artigos remonta aos anos 1940, 50 e 60. Os textos são de grande conteúdo científico, muito bem fundamentados, ilustrados com estudos de caso e, em sua totalidade, exemplificados com técnicas de mapeamento manual (Figura 2.1).

O assunto ‘mapeamento de litofácies’ é tratado pela comunidade científica como um tema clássico da geologia, que com o passar do tempo deixou de ser aplicado no dia-a-dia dos exploracionistas de petróleo. Acredita-se que seu moderado uso, nos anos que sucederam as principais publicações, ou seja, nas décadas de 1970, 80 e 90, deveu-se à indisponibilidade de dados de poços e a pouca quantidade de informações disponíveis. Os métodos propostos demandam grandes volumes de dados.

Com o desenvolvimento da tecnologia da informação, aliado ao esforço das companhias de petróleo em atender a crescente demanda por energia, grandes quantidades de informações são geradas e armazenadas em depósitos de dados bem estruturados e controlados. Este cenário faz renascer as excelentes soluções propostas no passado, que não tiveram o aproveitamento adequado por questões de limitação tecnológica.

Discutem-se, aqui, os principais paradigmas de classificação de litofácies propostos no passado e que, nos dias de hoje, se tornaram perfeitamente viáveis. Em virtude do mapeamento de litofácies ser tratado na literatura como um problema de classificação envolvendo de três a quatro variáveis, os principais autores fazem uso de uma ferramenta gráfica em forma de triângulo, denominada ‘diagrama triangular’ ou ‘diagrama ternário’, para expressar os diversos modelos de classificação. O capítulo foi estruturado de maneira a apresentar, de início, os fundamentos para a compreensão e traçado dos diagramas triangulares, e, em seguida, descrever os principais modelos de classificação de litofácies.



Cambrian isopach and lithofacies maps, after L.L.Sloss. Post-Laramide erosion reconstructed; geosynclinal isopachs generalized.

Figura 2.1 – Exemplo de mapa litofaciológico (Krumbein, 1948).

2.1 Diagramas Triangulares ou Ternários

Para Krumbein e Pettijohn (1938), a elaboração de gráficos é uma das principais etapas de análise de qualquer estudo sedimentar. Eles servem não apenas para sintetizar resultados, mas também para sugerir novas estratégias de estudos complementares.

Os diagramas triangulares são um meio efetivo para representação gráfica de modelos de classificação de três variáveis. Cada amostra, ou ponto, é definido por uma trinca de valores, em que cada valor se refere a um percentual de composição e diz respeito a uma variável ou componente do modelo de classificação.

A Figura 2.2 mostra um exemplo de diagrama triangular ou ternário. Os pontos no interior do triângulo são expressos em termos de percentuais de silte, areia e argila. A soma dos componentes de qualquer ponto no interior do triângulo é obrigatoriamente igual a 100.

No diagrama em questão, a aresta da esquerda corresponde aos percentuais de areia e varia de zero (vértice da esquerda) a 100 (vértice do topo). A aresta da direita marca os percentuais de argila, variando, também, de zero (vértice do topo) a 100 (vértice da direita). A aresta horizontal marca os percentuais de silte e varia de zero (vértice da direita) a 100 (vértice da esquerda).

Uma amostra composta de 23% de areia, 46% de silte e 31% de argila é plotada no triângulo da seguinte maneira: a) areia - sobre a aresta da esquerda, que corresponde ao eixo das areias, traça-se uma reta horizontal, passando pela coordenada de valor 23; b) silte - sobre a aresta horizontal, que corresponde ao eixo dos siltes, traça-se uma reta paralela à aresta da direita, passando pelo valor 46. Após o traçado de duas retas já se dispõe da localização da amostra no diagrama, que é dada pela interseção dessas retas. Entretanto, a fim de se visualizar, graficamente, o completo relacionamento das três variáveis, traça-se a terceira reta; c) argila – sobre a aresta da direita, que corresponde ao eixo das argilas, desenha-se uma reta paralela à aresta da esquerda, passando pelo valor 31; d) a interseção das retas define a posição da amostra no diagrama triangular.

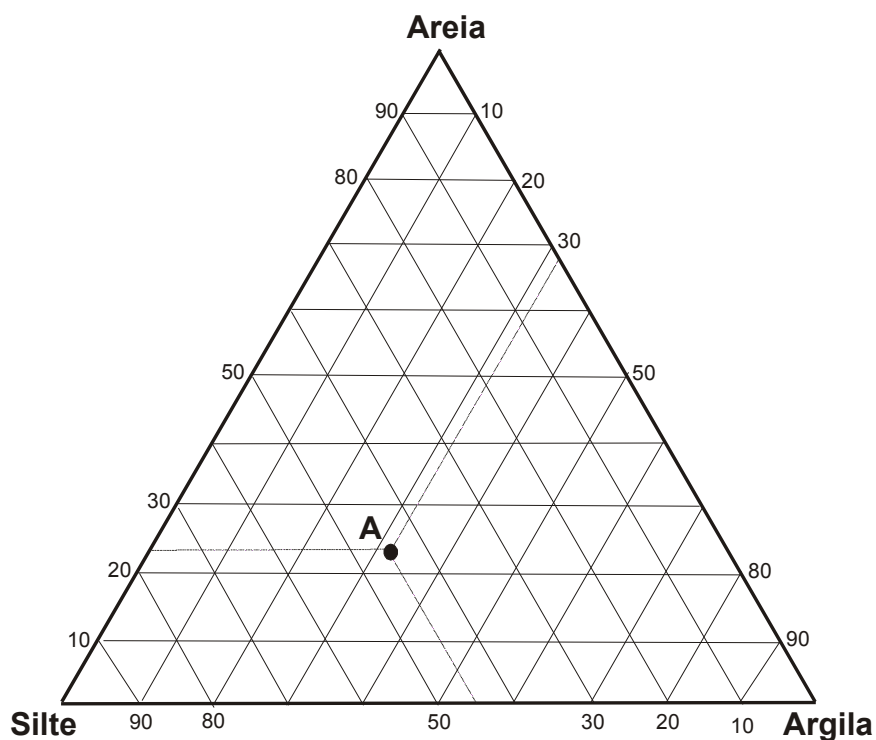


Figura 2.2 – Diagrama ternário.

Os diagramas triangulares são largamente utilizados em estudos de sedimentação, quer para a plotagem de tamanhos de grãos, quer para indicação de composições mineralógicas. Por exemplo, os minerais pesados podem ser representados, segundo suas origens, em: ígneos, sedimentares e metamórficos. A representação triangular indica, neste caso, a relativa contribuição de cada um dos componentes.

Pode-se, também, fazer uso de diagramas para representação de esquemas de classificação de quatro variáveis. Neste caso, a soma das quatro variáveis totaliza 100 e a plotagem de uma amostra pode não ser um ponto no diagrama, mas uma área compreendida por três retas, sendo cada uma das retas paralelas às arestas do triângulo. O resultado gráfico final é um triângulo equilátero de lado correspondente à quarta variável.

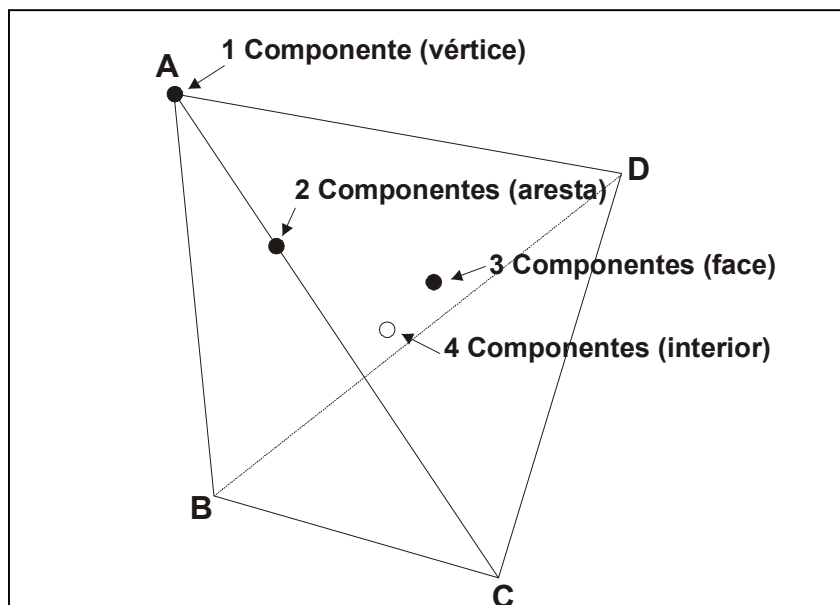


Figura 2.3 – Tetraedro de classificação de quatro variáveis.

Um modelo que considera quatro variáveis, na verdade, é definido por um tetraedro (Figura 2.3). Se uma amostra possui apenas um componente, ela é posicionada sobre o vértice correspondente à variável. Se a amostra possui dois componentes, ela assume a posição sobre a aresta que diz respeito às duas variáveis. Se a amostra possui três componentes, ela é plotada na face que define as três variáveis, e se possui quatro componentes, a amostra é projetada sobre a face do triângulo que se deseja visualizar (Figura 2.4).

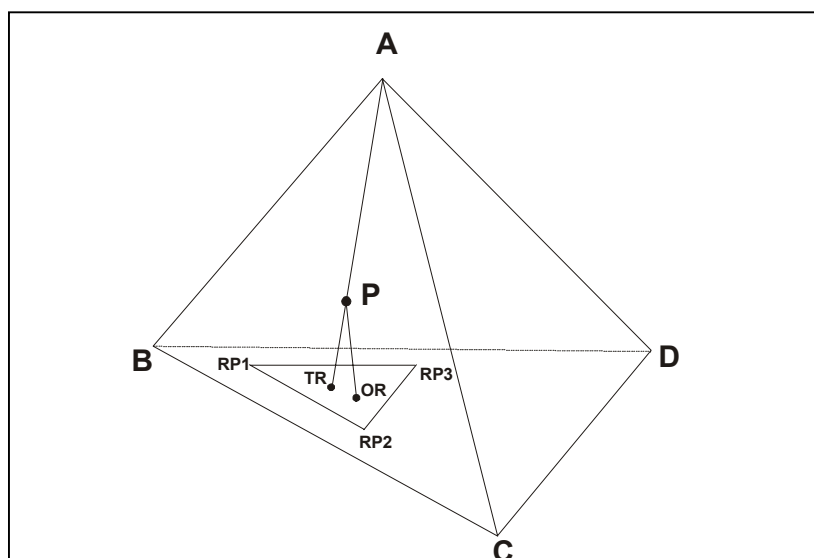


Figura 2.4 – Projeção do ponto interior P sobre uma face do tetraedro.

2.2 Modelo Razão Clástica e Razão Areia-Folhelho

Uma importante medida de distribuição de litologias é definida pelo agrupamento das rochas em clásticas (conglomerados, areias e folhelhos) e não clásticas (calcários, dolomitas e evaporitos). Para este modelo de medida, tem-se a razão clástica (RC) que é dada pelo somatório das espessuras, ou percentuais, de rochas clásticas dividida pelo somatório das espessuras, ou percentuais, de rochas não clásticas (equação 2.1).

Outro importante modelo de medida de distribuição de litologias leva em conta as ocorrências de areias e folhelhos, e é definido pela razão areia-folhelho (RAF), calculada dividindo-se o somatório das espessuras, ou percentuais, de areias e conglomerados pelo somatório das espessuras, ou percentuais, dos folhelhos (equação 2.2).

$$RC = \frac{\Sigma \text{conglomerados} + \Sigma \text{areias} + \Sigma \text{folhelhos}}{\Sigma \text{calcários} + \Sigma \text{dolomitas} + \Sigma \text{evaporitos}} \quad (\text{Equação 2.1})$$

$$RAF = \frac{\Sigma \text{conglomerados} + \Sigma \text{areias}}{\Sigma \text{folhelhos}} \quad (\text{Equação 2.2})$$

Estas equações são facilmente compreendidas por meio de um exercício numérico. Um valor equivalente a 2 de razão clástica significa que para cada 2 m de deposição de material clástico foi depositado, na mesma idade geológica, 1 m de material não clástico. Uma razão areia-folhelho de 0,25 significa que, para cada metro de acumulação de areias e conglomerados, foram acumulados 4 m de folhelhos.

As relações entre estas duas razões podem ser vistas na Tabela 2.1 e nas Figuras 2.5 e 2.6. A Tabela 2.1 mostra uma *seção hipotética* definida por quatro amostras, com variações nas proporções de areia, folhelho e calcário, e as respectivas razões clásticas (RC) e areia-folhelho (RAF). A Figura 2.5 mostra a posição das amostras em um diagrama ternário de percentuais e a Figura 2.6 ilustra a plotagem das mesmas amostras em um diagrama ternário que representa os possíveis valores de razões clásticas e areia-folhelho. Nesta última figura, a razão clástica é indicada por linhas horizontais, variando de zero, no topo, a infinito, na base. A razão areia-folhelho

é marcada por um conjunto de linhas que convergem para o vértice não clástico, variando de zero, no vértice direito, a infinito, no vértice da esquerda.

Tabela 2.1 – Amostras de uma unidade estratigráfica.

| Amostra | A | B | C | D |
|------------|----|-----|------|------|
| % Areia | 75 | 40 | 10 | 0 |
| % Folhelho | 19 | 40 | 40 | 20 |
| % Calcário | 6 | 20 | 50 | 80 |
| RC | 16 | 4 | 1 | 0,25 |
| RAF | 4 | 0,1 | 0,25 | 0 |

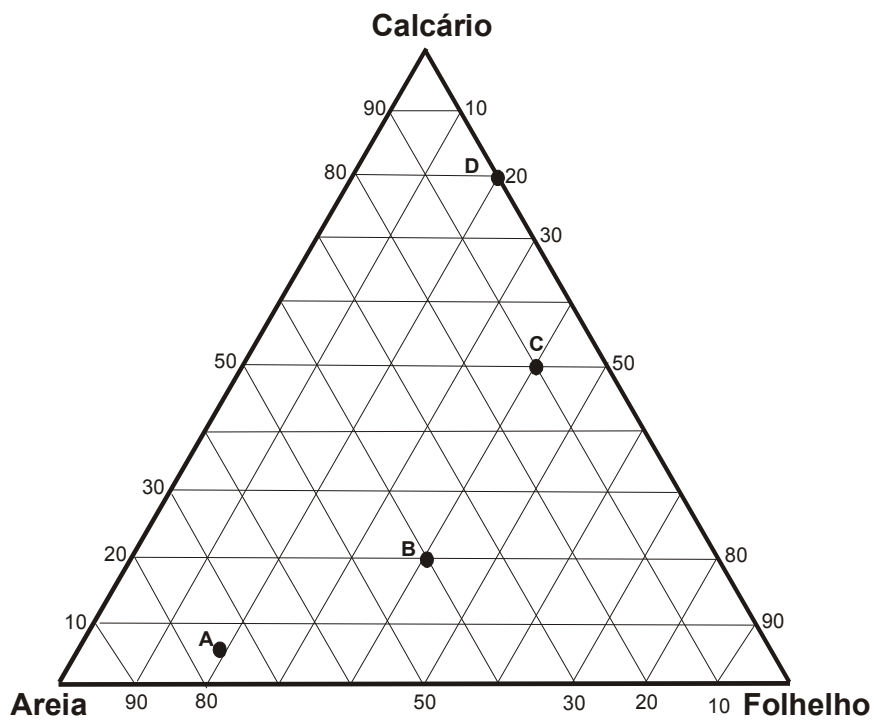


Figura 2.5 – Diagrama ternário percentual com a plotagem das amostras.

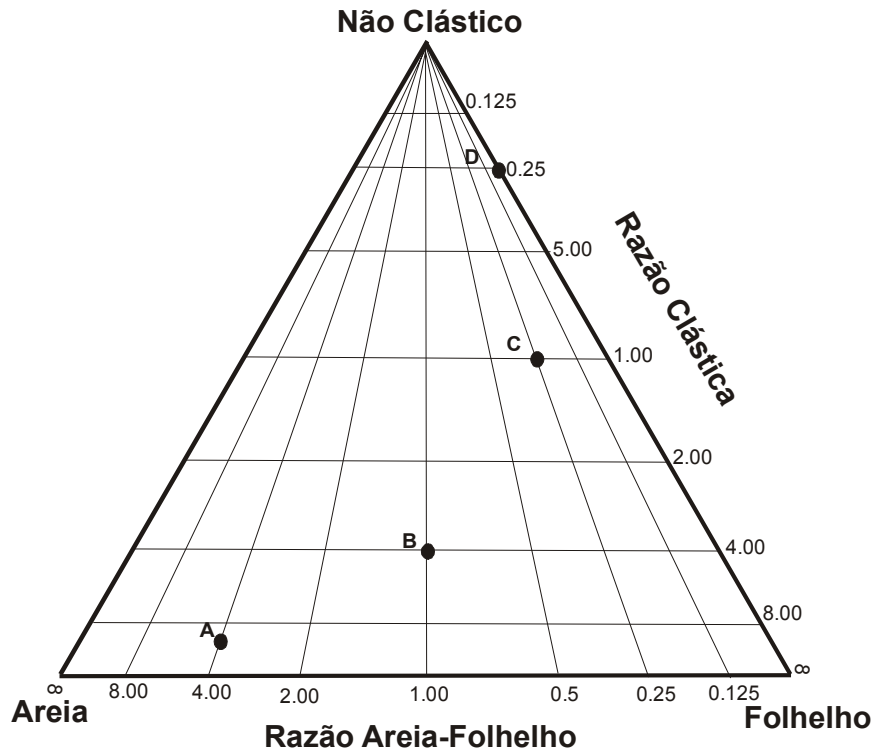


Figura 2.6 – Relação das razões clásticas e areia-folhelho com o diagrama de percentuais.

Da figura acima facilmente se deduz a existência de um forte relacionamento entre as razões clásticas e os percentuais de litologia. Esta relação é ilustrada, para alguns valores, na Tabela 2.2.

Tabela 2.2 – Relação razão clástica e percentagem de litologias.

| Razão Clástica | % Clásticas | % Não Clásticas |
|----------------|-------------|-----------------|
| ∞ | 100 | 0,0 |
| 32 | 97 | 3,0 |
| 16 | 94,1 | 5,9 |
| 8 | 88,9 | 11,1 |
| 4 | 80 | 20 |
| 2 | 66,7 | 33,3 |
| 1 | 50 | 50 |
| 0,5 | 33,3 | 66,7 |
| 0 | 0 | 100 |

O extenso *range* numérico de possíveis valores de razões impõe uma escolha adequada dos intervalos geométricos para construção de um mapa de litofácies (a Figura 2.6 sugere alguns valores notáveis). Em um possível procedimento *manual*, o traçado de um mapa de litofácies é iniciado com o desenho das linhas de contorno das isópacas. A litofácie correspondente à curva de isovalor igual a 1,0 para a razão clástica deve ser obrigatoriamente desenhada, uma vez que esta delimita a fronteira entre o mundo clástico e o não clástico. Nas demais curvas, tanto as razões clásticas quanto as razões areia-folhelho devem ser selecionadas em função do range dos pontos de controle. O mapa final é composto de três conjuntos de contorno, mostrando cada propriedade em estilo diferente de desenho, a fim de realçar cada um dos temas. Em etapa posterior, as duas razões são combinadas de maneira a gerar as representações de litologia entre as curvas.

A identificação da classe ou litologia predominante baseia-se na combinação das razões em torno de determinados limites. Por exemplo, na Figura 2.6, a área da base do triângulo que corresponde a valores acima de 8, para razão clástica e para razão areia-folhelho, define uma composição litológica de cerca de 90% de areia. Similarmente, neste mesmo intervalo de razão clástica, e para uma razão areia-folhelho inferior a 0,125, a composição litológica predominante é de 90% de argila, em média. Da mesma maneira, para razões clásticas inferiores a 0,125, a litologia predominante é composta de 90% de material não clástico. O restante do triângulo é, então, subdividido em áreas que correspondem a grupos de associações litológicas.

A Figura 2.7 ilustra o modelo de classificação proposto por Krumbein (1958), com nove classes de litofácies. Na prática, as classes são coloridas no mapa de litofácies em tons de amarelo, verde e azul, a depender da predominância de areia, folhelho e calcário, respectivamente.

Por conveniência, as diferentes classes de um sistema de classificação são batizadas por um código numérico e/ou por uma descrição. No sistema de Krumbein (*idem*), as classes foram batizadas segundo a Tabela 2.3.

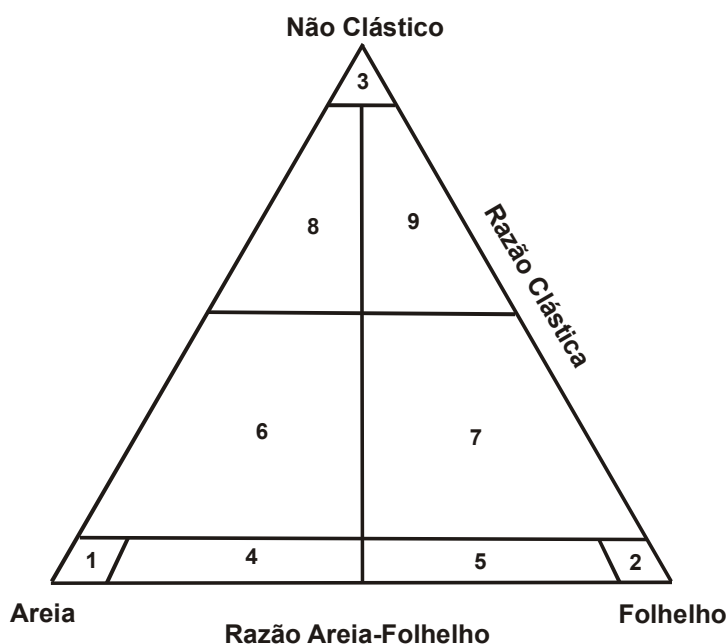


Figura 2.7 – Esquema de classificação razão clástica e razão areia-folhelho.

Tabela 2.3 – Codificação das classes

| Classe | Descrição |
|--------|--------------------|
| 1 | Areia |
| 2 | Folhelho |
| 3 | Carbonato |
| 4 | Areia-Folhelho |
| 5 | Folhelho-Areia |
| 6 | Areia-Carbonato |
| 7 | Folhelho-Carbonato |
| 8 | Carbonato-Areia |
| 9 | Carbonato-Folhelho |

As combinações geradas pelas razões clásticas e razões areia-folhelho produzem mapas de litofácies que realçam as principais feições litológicas de uma região. Os mapas podem ser tão complexos quanto se queira. O fator fundamental do processo recai sobre a escolha adequada dos limites numéricos das razões. A escolha destes limites pode ser controlada em função da espessura do intervalo estratigráfico ou em função de um determinado detalhe que se queira enfatizar. Ambas as razões se

constituem em processos simples e rápidos de execução e expressam, de forma qualitativa, as principais litofácies de uma região.

2.3 Modelos de Mapeamento de Multicomponentes

Esta seção apresenta três procedimentos de mapeamento de fácies sedimentares. Tais procedimentos baseiam-se nas proporções de componentes básicos, definidos na literatura como *end members*. Um componente básico, ou simplesmente componente, deve ser entendido como sendo um elemento atômico, indivisível, que, ao se misturar a outros componentes, forma, por exemplo, um tipo de solo, uma substância em solução, uma classe litofaciológica etc.

O primeiro procedimento descrito propõe um sistema de classes de litofácies baseado em uma função conhecida como ‘função de quantidade de mistura’. Os demais procedimentos são fundamentados em medidas de entropias (Peltó, 1953).

2.3.1 Modelo Função Quantidade de Mistura

No processo de mapeamento regional de fácies sedimentares considera-se que a subsuperfície é composta de misturas homogêneas de seus componentes (*idem*). O problema pode ser apreciado quando se quer representar estas misturas em um mapa, a fim de se definir as principais fácies da área em estudo.

A Figura 2.8 ilustra uma possível solução para o caso de um modelo de classificação de três componentes. O contorno em negrito, rotulado com o valor 100, divide o diagrama ternário em sete classes. Três destas classes, ou setores, caracterizam-se por dispor de misturas com um componente predominante (vértices do triângulo). Outras três se caracterizam por dispor de misturas de dois componentes predominantes (regiões sobre as arestas do triângulo), e uma, localizada na parte central do triângulo, define misturas aproximadamente iguais para os três componentes. Os contornos internos às classes convergem e declinam para um ponto denominado ‘fim-de-mistura da classe’.

A Figura 2.8 mostra um modelo de classificação definido pela plotagem dos contornos segundo a função quantidade de mistura D . Os pontos com valores de D igual a 100 delimitam as classes do sistema.

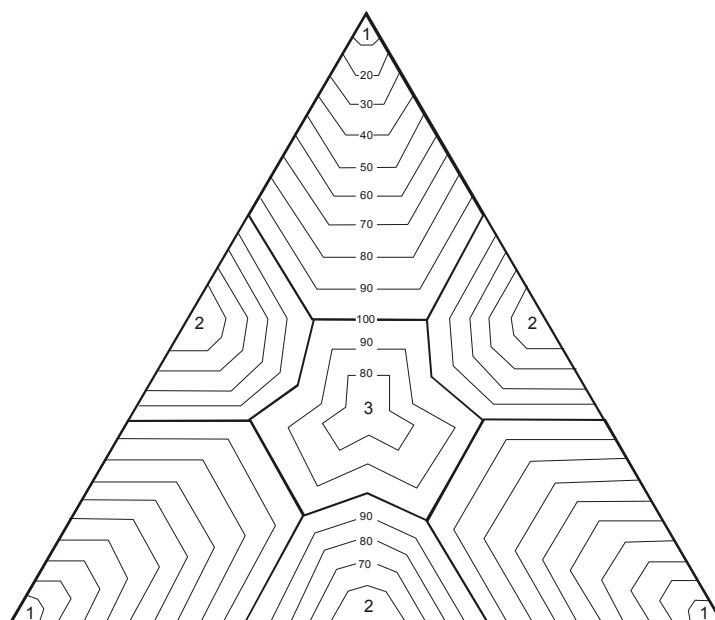


Figura 2.8 – Comportamento da função D para um sistema de classificação de três componentes.

A função D, de um modelo com n componentes, é calculada segundo a seguinte rotina: seja P_i o valor percentual do i-ésimo componente; para os n componentes do sistema, adicione mais um (que corresponde ao componente null) de valor igual a zero; faça o somatório dos componentes ser igual a 1 (normalização); ordene o conjunto dos componentes em ordem crescente e calcule as diferenças positivas entre os componentes adjacentes. O maior valor das diferenças corresponde ao termo Δp_m e o segundo maior Δp_{vm} . O valor de D é dado pela equação abaixo.

$$D = 100 [1 - (\Delta p_m - \Delta p_{vm})] \quad (\text{Equação 2.3})$$

Se duas ou mais diferenças são iguais e correspondem ao maior valor, o ponto se encontra sobre a fronteira de duas classes, ou seja, sobre o contorno de valor 100.

Uma amostra P, por exemplo, com as composições litológicas de 10% de não clástica, 40% de folhelho e 50% de areia, tem os P_i 's iguais a 0,1, 0,4 e 0,5,

respectivamente, e o somatório dos componentes igual a 1. O componente nulo é adicionado, com valor zero. Ordenando-se os componentes, tem-se a seguinte seqüência: 0, 0,1, 0,4 e 0,5. As diferenças entre os elementos da seqüência são 0,1, 0,3 e 0,1. Logo, $\Delta_{pm} = 0,3$, $\Delta_{pvm} = 0,1$ e $D = 80$.

O ponto analisado, se desenhado em um diagrama triangular de percentuais estará localizado em um setor que indica a predominância de dois componentes. A Figura 2.9 mostra o sistema de classificação de três componentes proposto por Pelto (1953), com o ponto acima plotado no diagrama. Usa-se, em determinadas situações, subdividir as classes com a predominância de um componente em duas regiões, por meio do desenho da curva de quantidade 50. Desta forma, são definidas áreas próximas aos componentes e áreas próximas à fronteira de classificação.

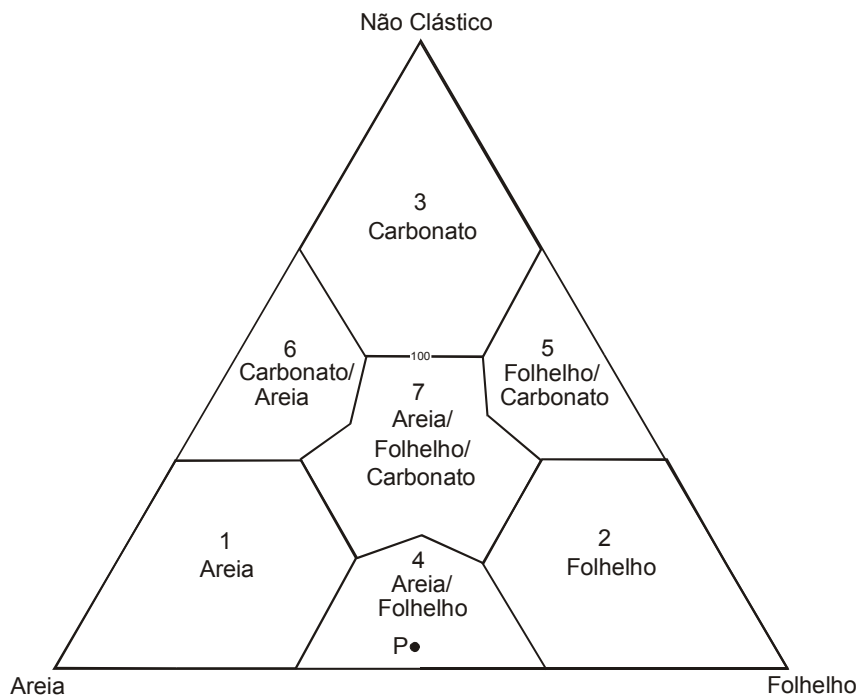


Figura 2.9 – Esquema de classificação de litofácies com base na função quantidade de mistura.

2.3.2 Modelo Função Entropia

A função entropia, proposta por Pélto (1953), se constitui em outro método de subdivisão do triângulo de fácies e estabelece fronteiras marcantes de fácies qualitativas. Pélto (idem) utiliza a função entropia para medir o grau de mistura dos componentes e a incerteza da composição de um sistema. Elevados valores de entropia indicam misturas mais ou menos igualitárias dos componentes, enquanto baixos valores de entropia sugerem a predominância de um único componente.

A função de entropia relativa, que subdivide o triângulo de fácies, é expressa pela equação:

$$100H_r = \frac{-100 \sum_i p_i \log p_i}{H_m} \quad (\text{Equação 2.4})$$

A entropia de um conjunto de probabilidades p_1, p_2, \dots, p_n é definida por $H = -\sum_i p_i \log p_i$, onde p_i é a probabilidade da ocorrência de cada componente. Em um sistema de três componentes, a entropia máxima acontece quando se dispõe de valores de probabilidades p_1, p_2 e p_3 iguais, $H_m = -3 (0,33 \log 0,33) = 1,0986$. No mapeamento de fácies, o termo ‘ p_i ’ diz respeito ao percentual de cada componente, expresso no intervalo de zero a um.

Em uma amostra, por exemplo, com as composições litológicas de 10% de não clástica, 40% de folhelho e 50% de areia, o valor da entropia é:

$$\begin{aligned} 100H_r &= \frac{-100 [(0,1 \log 0,1) + (0,4 \log 0,4) + (0,5 \log 0,5)]}{1,0986} \\ &= \frac{-100 [(-0,230) + (-0,366) + (-0,347)]}{1,0986} \\ H_r &= \frac{0,943}{1,099} = 0,858 \end{aligned}$$

O logaritmo natural pode ser adotado no cálculo da entropia. Como estamos preocupados com a entropia relativa, qualquer base logarítmica pode ser utilizada. O sinal de menos no início da expressão é necessário para que o resultado do cálculo seja positivo, uma vez que o *range* dos componentes são definidos para o intervalo de zero a um.

O comportamento da função 100Hr é mostrado no diagrama triangular da Figura 2.10. A amostra utilizada como exemplo do cálculo da entropia encontra-se plotada de acordo com seus percentuais.

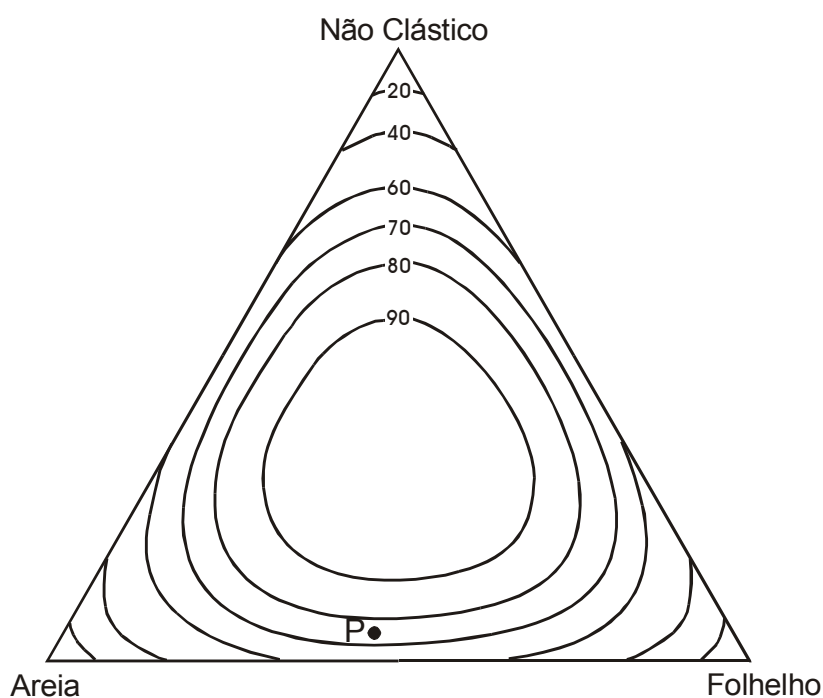


Figura 2.10 – Comportamento da função 100Hr.

Um mapa gerado pela função entropia não mostra mais informações de quantidades relativas entre os componentes do que os produzidos por outros métodos. Os valores da distribuição da entropia, representada nos mapas por curvas de contorno superpostas aos padrões de litologia ou cores, realçam os baixos valores de entropia.

A função 100Hr é adequada para se subdividir o sistema de três componentes em regiões dominadas por um deles e para mostrar áreas de misturas, sem contudo informar quais misturas. Para regiões onde dois componentes são predominantes, o método se mostra inadequado. A Figura 2.11 ilustra o sistema de classificação com base no cálculo das entropias.

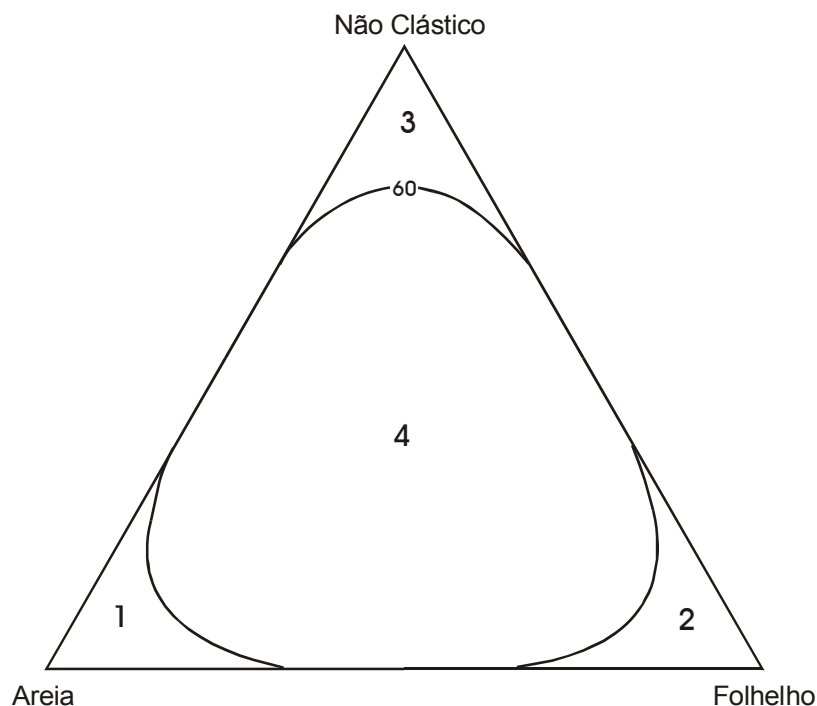


Figura 2.11 – Esquema de classificação de litofácies com base no cálculo das entropias.

Um mapa de contorno das entropias, com seus componentes predominantes desenhados com padrões de hachuras ou cores, pode levar a uma interpretação errônea da área. Isto se deve ao fato de que, nas amostras que possuem um componente predominante de valor 60% ou menor, esse valor numérico não é suficiente para indicar a predominância do componente.

2.3.3 Modelo Razão-Entropia

Valores unitários de três razões, entre dois componentes (Areia/Folhelho, Não Clástico/Folhelho, Não Clástico/Areia = 1), definidos no triângulo e combinados com os valores de entropia, formam um outro tipo de modelo de classificação. Um mapa baseado na razão-entropia informa mais sobre as misturas dos componentes do que um mapa baseado apenas na entropia. A combinação de linhas de razão unitária, representadas no triângulo pelas bissetrizes dos ângulos, com os isovalores da entropia subdivide o triângulo em classes que caracterizam misturas entre dois componentes.

As Figuras 2.12 e 2.13 ilustram o modelo de classificação com base na razão-entropia. As retas das razões dividem o sistema em outras seis novas classes, definidas entre os valores de 60 e 70 de entropia.

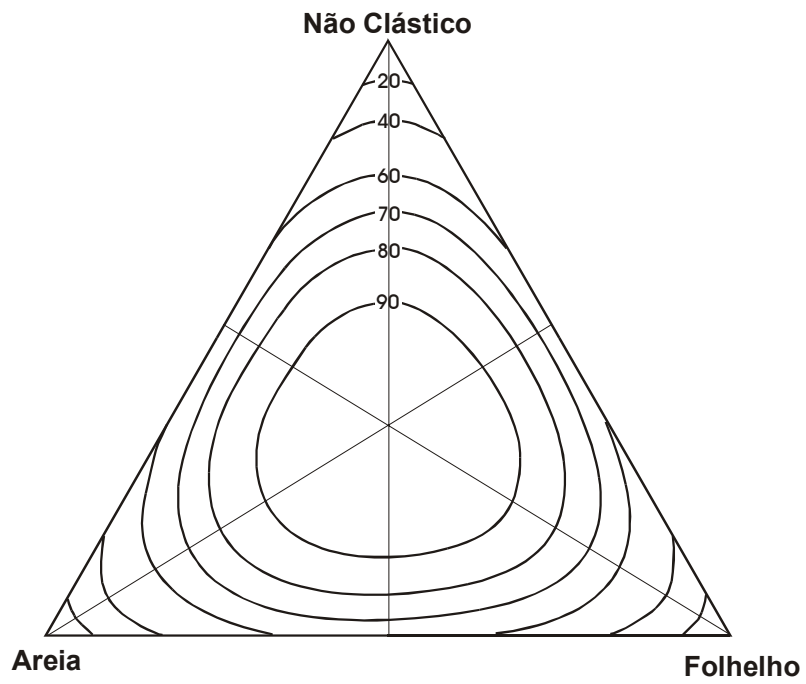


Figura 2.12 – Diagrama com a superposição das razões e entropias.

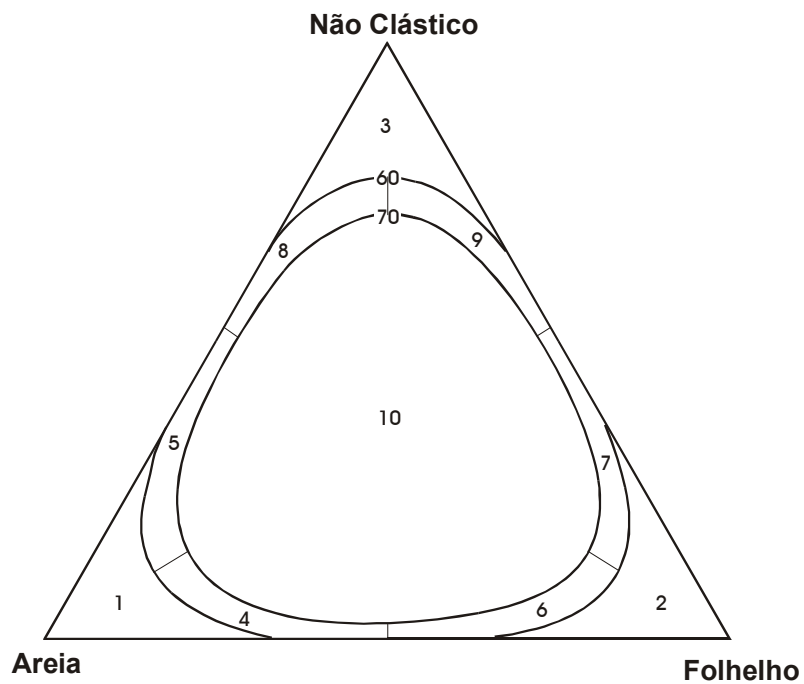


Figura 2.13 – Esquema de classificação de litofácies razão-entropia.

2.4 Modelos Areia-Silte-Argila

MacBride (1971) apresenta um conjunto de esquemas de classificação dedicados à análise de tamanho de grãos. A análise de grãos tem como objetivos:

- Descrever amostras levando em conta medidas estatísticas;
- Correlacionar amostras entre ambientes deposicionais similares ou unidades estratigráficas;
- Determinar agentes (vento, rio, corrente turbidítica etc.) de transporte ou deposição de materiais;
- Determinar processos (suspensão, tração, compressão etc.) de deposições finais;
- Determinar ambientes de deposição (canais, fluxos, praias, dunas etc.).

As Figuras 2.14, 2.15 e 2.16 ilustram os três paradigmas de classificação citados na publicação de MacBride (idem), todos relacionados às variáveis areia, silte e argila.

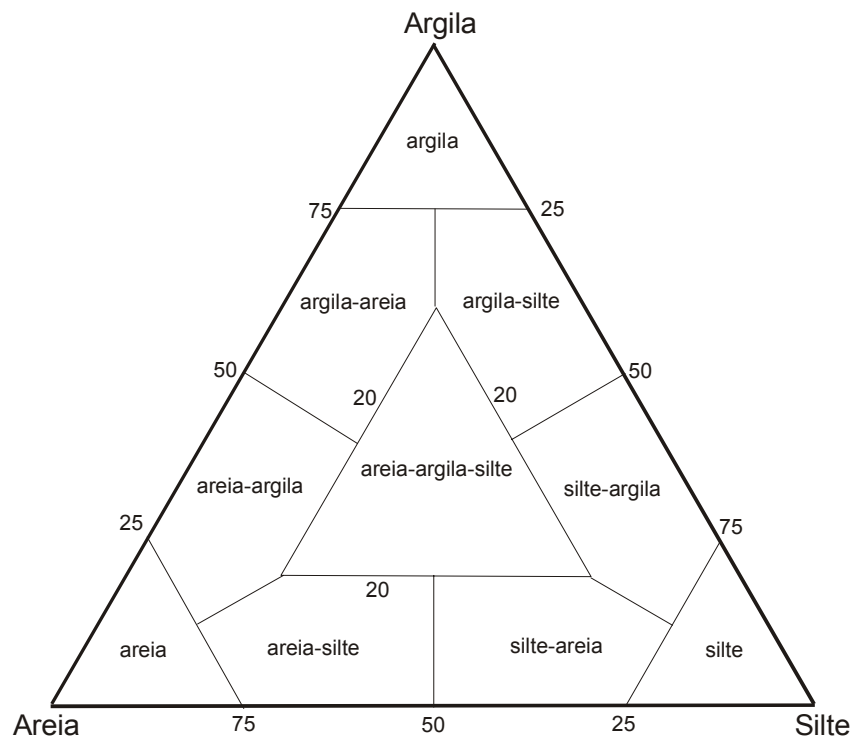


Figura 2.14 – Esquema areia-silte-argila (Shepard, 1967).

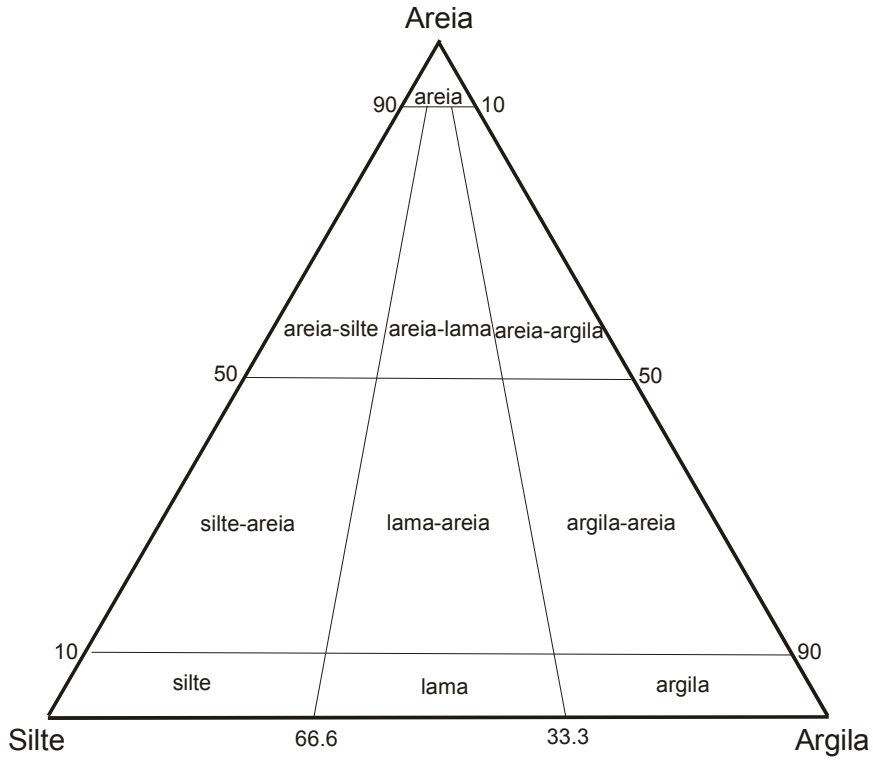


Figura 2.15 – Esquema areia-silte-argila (Folk, 1954).

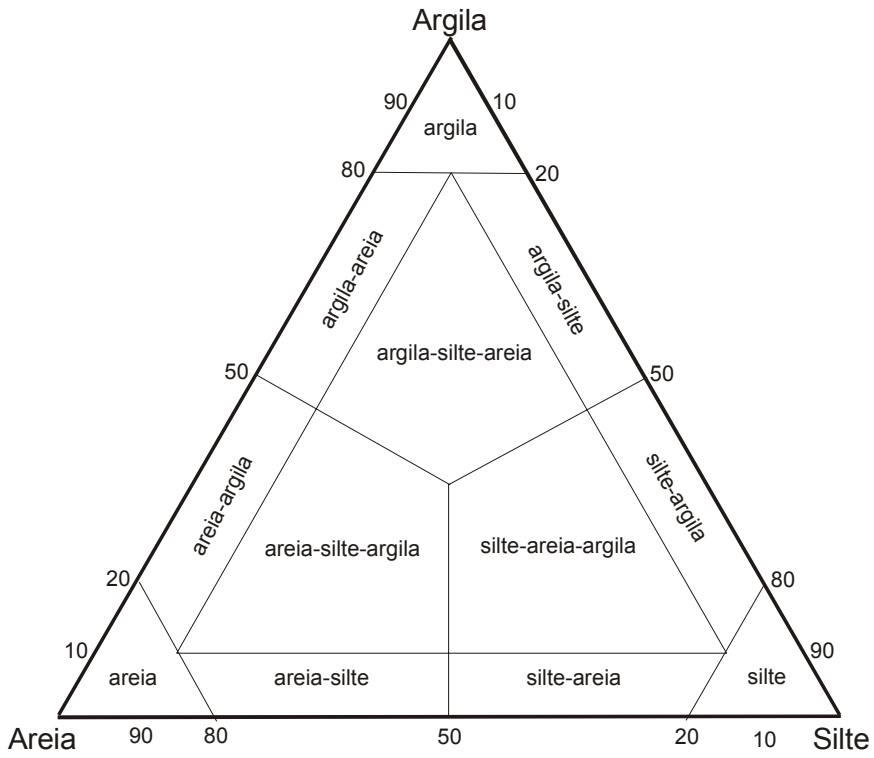


Figura 2.16 – Esquema areia-silte-argila (Gorsline, 1960).

2.5 Modelo Arenitos-Pelitos-Carbonatos

A Figura 2.17 mostra o modelo de classificação baseado nas variáveis arenitos, pelitos e carbonatos. Este modelo foi concebido por Santos (2003), com a finalidade de apoiar a modelagem geológica de sistemas petrolíferos.

Trata-se de uma classificação que registra os sistemas siliciclásticos, carbonáticos e mistos. Além de caracterizar a predominância dos *end members* (classes 1, 5 e 9), o modelo expressa misturas duas a duas das variáveis, indicando a predominância de uma delas (classes 2, 4, 6 e 8). Na parte central das arestas laterais, o modelo propõe duas classes com misturas igualitárias das variáveis (classes 3 e 7).

Uma característica marcante é que as relações entre as classes da base do triângulo são tratadas por sistemas mistos (classes 10, 11 e 12), diferentemente das distribuições de classes sobre as arestas laterais.

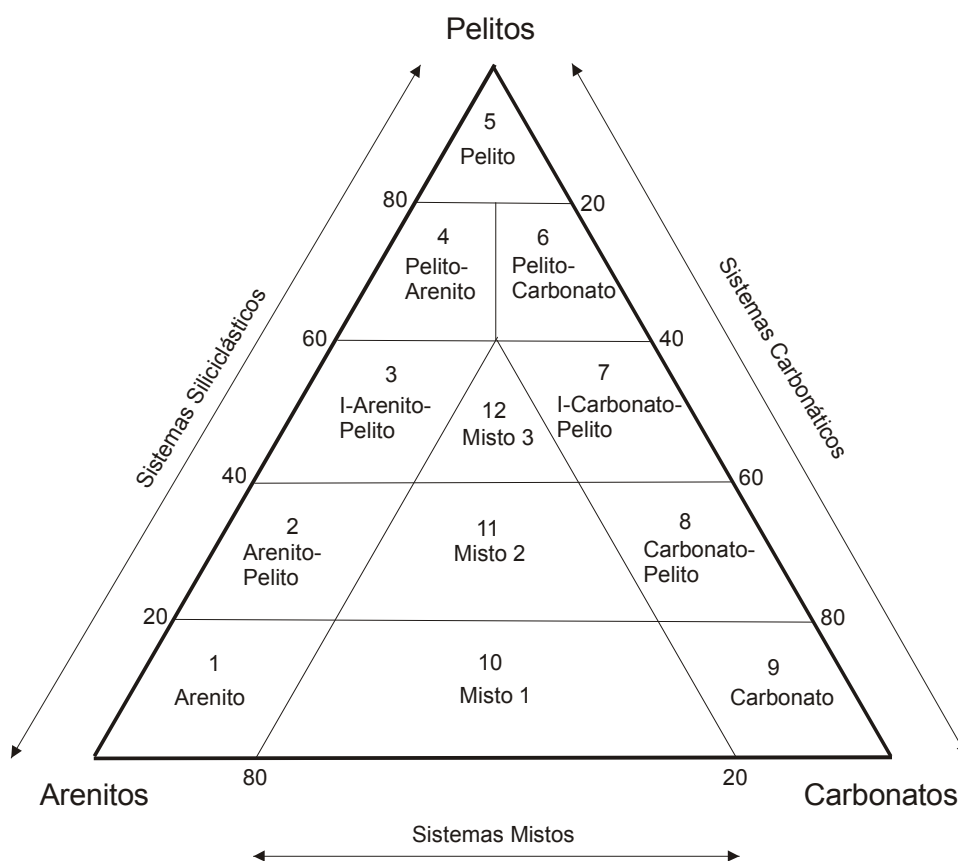


Figura 2.17 – Esquema arenitos-pelitos-carbonatos.

2.6 Modelos de Relações Granulométricas

Os modelos de relações granulométricas constituem um novo paradigma de classificação. A grandeza a ser mapeada passa a ser a distribuição dos tamanhos de grãos de um tipo de rocha sedimentar.

A Figura 2.18 mostra um possível sistema de classificação que mapeia os relacionamentos entre arenitos, pelitos e as granulometrias dos arenitos. Neste sistema, a geometria de distribuição das classes no diagrama triangular deriva do modelo proposto por Krumbein (1948).

Analisando o diagrama ternário, percebe-se que o modelo permite a classificação de litofácies com predominância de uma (classes 1, 4 e 9) e duas variáveis (demais classes). Na ausência total de pelitos, o mapa gerado por este esquema de classificação reflete a distribuição granulométrica das areias, distribuição esta que corresponde à aresta horizontal do triângulo.

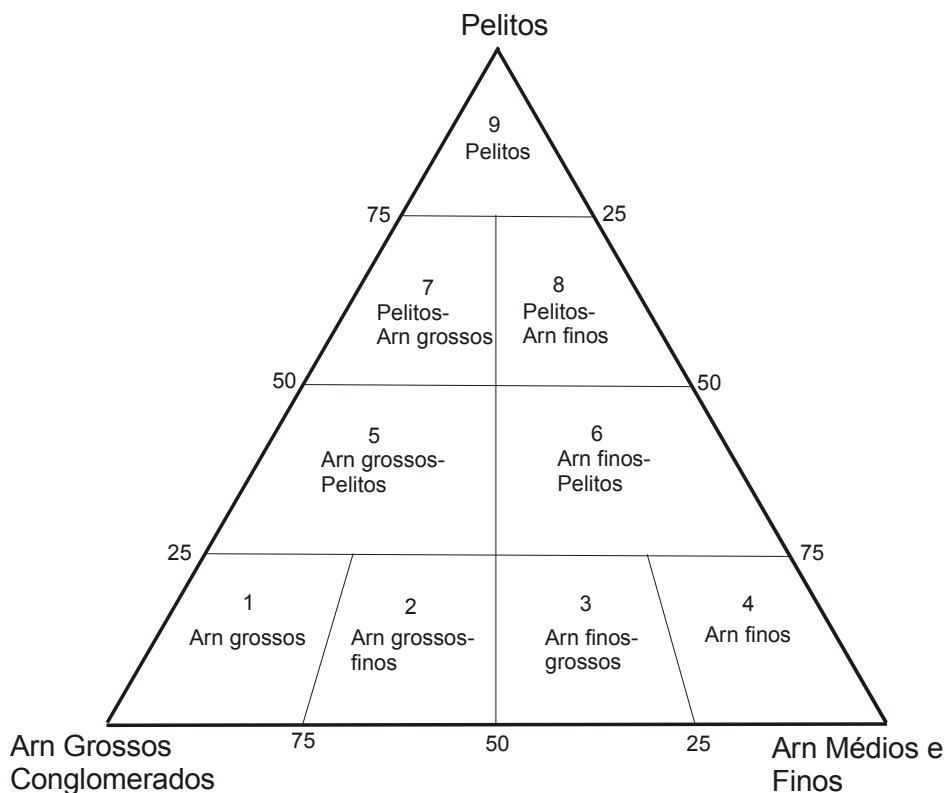


Figura 2.18 – Esquema arenitos-pelitos.

A Figura 2.19 ilustra dois outros esquemas para o mapeamento de distribuições granulométricas de arenitos. Estes modelos e o mostrado na Figura 2.18 permitem a representação completa da predominância e as misturas dos *end members*.

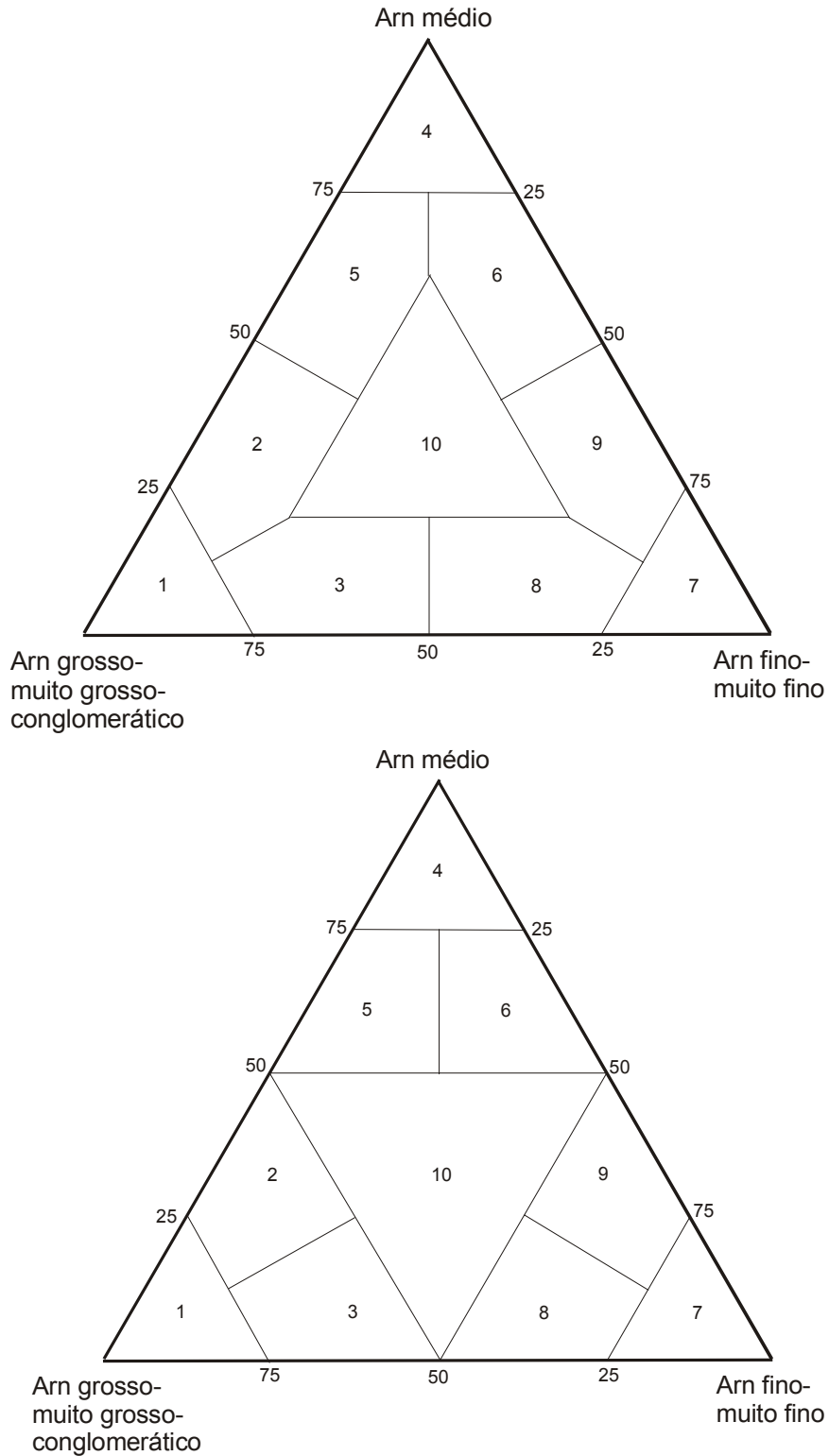


Figura 2.19 – Esquema granulometria de arenitos.

3. CONCEITOS GERAIS

O sistema computacional proposto neste estudo envolveu técnicas de diversas áreas: Computação Gráfica, Banco de Dados, Mineração de Dados e Sistemas de Informações Geográficas. O presente capítulo tem como objetivo descrever as técnicas, utilizadas destas diferentes áreas, que apoiaram o desenvolvimento do sistema.

3.1 O Processo de KDD

A denominação ‘Descoberta de Conhecimento em Bases de Dados’ (KDD) foi proposta em 1989 para designar as etapas do processo computacional que tem por objetivo produzir conhecimentos a partir de dados e, principalmente, à etapa de mineração de dados (Fayyad et al., 1996). O processo de KDD é dividido em várias etapas, conforme ilustrado na Figura 3.1.

A descoberta de conhecimento inicia-se com a definição e compreensão do problema. Após esta etapa, parte-se para a seleção dos dados que dizem respeito à análise de interesse. Na seleção, são realizadas as escolhas dos atributos relevantes à discretização de valores dos atributos e a remoção de inconsistências. Em seguida, executa-se um procedimento de pré-processamento dos dados, quando várias ações são efetuadas para a construção de uma base de dados consistente, tais como a eliminação de ruídos e erros, o estabelecimento de procedimentos para verificação da falta de dados e a definição de convenções para nomeação dos mesmos.

A etapa seguinte é a da transformação, que tem por objetivo converter os dados preparados, de acordo com o tipo de entrada específica do algoritmo de mineração de dados, a fim de alimentar a etapa posterior. Na mineração de dados, aplicam-se algoritmos para descoberta de padrões de dados – que no presente trabalho são utilizados na predição de colunas litológicas inexistentes no banco de dados. Esta etapa compreende a seleção de métodos, técnicas e modelos que melhor se adaptam ao cumprimento das metas estabelecidas na definição do problema. Ao final, os padrões gerados devem ser analisados e interpretados, de forma a qualificar a relevância do conhecimento gerado, validando-o para o uso em tomadas de decisões. Esta última etapa é denominada ‘interpretação’. Caso o resultado não seja satisfatório, o processo de KDD pode ser repetido parcial ou integralmente.

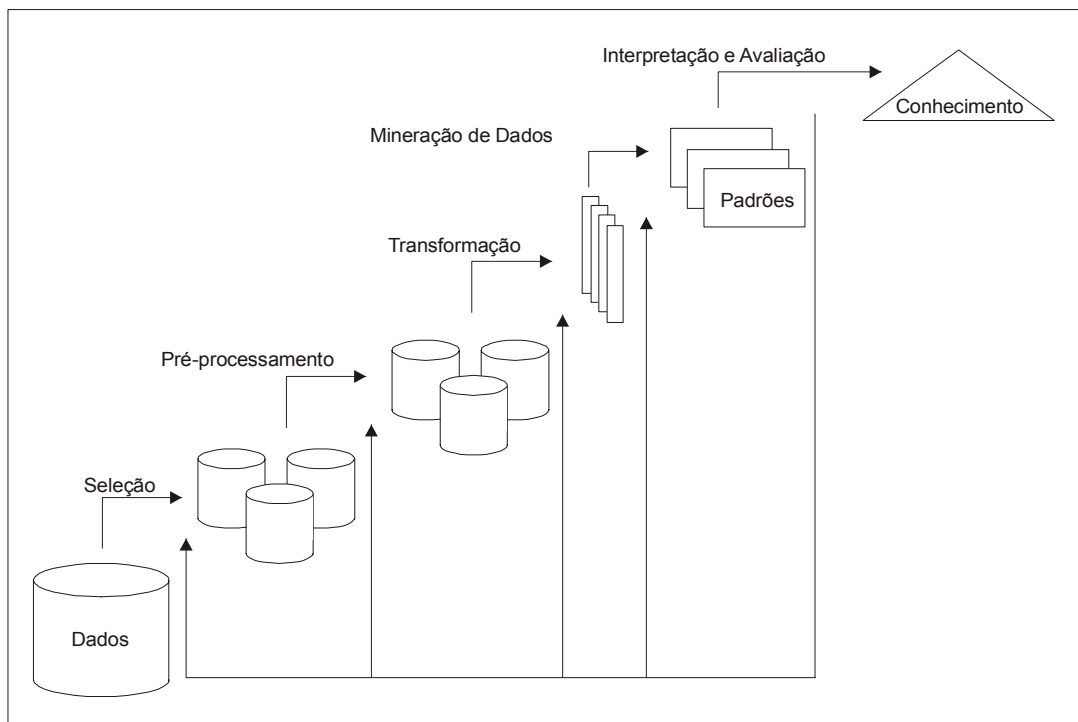


Figura 3.1 – Etapas do processo de KDD.

A etapa de mineração de dados é uma das mais importantes do processo de KDD. Ela é a responsável pela extração dos conhecimentos implícitos, potencialmente úteis e não óbvios dos dados. A tecnologia de mineração de dados possui a vantagem de extrair informações que não poderiam ser obtidas por meio de consultas tradicionais em bases de dados. As ferramentas convencionais limitam-se a fornecer respostas simples a questões feitas pelos usuários. Ao extrair preciosas informações das bases de dados, a mineração de dados auxilia o usuário a tomar decisões, melhorando o seu desempenho nos negócios e aumentando a qualidade dos serviços.

A mineração de dados encontra, contudo, algumas barreiras no seu uso. São elas: necessidade de poderosos servidores para armazenar grandes volumes de dados; capacitação para lidar com complexas ferramentas; desafios na preparação dos dados para posterior mineração; dificuldade na realização de uma análise custo/benefício do projeto de descoberta; pouca disponibilidade de ferramentas adequadas.

No contexto da mineração, é de grande importância se conhecer a diferença entre dado, informação e conhecimento. *Dado* é um conjunto de símbolos

que, se tomado isoladamente, não contém significado claro. *Informação* é todo dado trabalhado por pessoas ou por recursos computacionais, com valor agregado a ele e com sentido lógico para quem usa a informação – um mapa de litofácies sintetiza o conjunto de informações litológicas distribuídas sobre a área mapeada. *Conhecimento* é um conjunto de informações que permite articular os conceitos, os juízos e o raciocínio, usualmente disponíveis em um domínio particular de atuação.

Descobrir informações é o mesmo que encontrar padrões nos dados, que geralmente são estruturados sob a forma de árvores de decisão, regras SE-ENTÃO, regras de classificação, regras de associação e agrupamentos.

3.2 Conceitos de Redes Neurais

Uma rede neural é um sistema computacional organizado a partir de um grande número de elementos de processamento simples (neurônios artificiais), altamente interconectados, que processam a informação pelo seu estado dinâmico de resposta aos estímulos externos. Os estímulos se propagam na rede por intermédio de conexões ponderadas, interagindo com os elementos de processamento e modificando de forma dinâmica o estado de ativação da rede. A capacidade de reconhecer padrões e identificar classes é a principal característica das redes neurais.

A conectividade de uma rede específica como os neurônios são interligados entre si. Para uma arquitetura em camadas, uma solução simples pode ser definida com três camadas: entrada, interna ou intermediária e saída.

A Figura 3.2 mostra uma arquitetura de rede com um nó na camada de entrada, três na intermediária e um na de saída. Entretanto, pode-se ter n nós na camada de entrada, l nós na camada intermediária e m nós na camada de saída. A função G é denominada função de ativação. X_1, X_2, \dots, X_n são variáveis regressoras e Y_1, Y_2, \dots, Y_m as preditas. A função de propagação estimula a camada intermediária com os valores $P_j = \sum W_{ji} * X_i + \theta_j$. A função de saída da camada intermediária é dada por $A_j = G_j(P_j)$, onde G_j é a função de ativação do neurônio j – em geral uma função sigmoideal. Do mesmo modo, para um nó k , da camada de saída, a função de propagação é dada por $P_k = \sum W_{kj} * A_j + \theta_k$ e a função de ativação é $A_k = G_k(P_k)$.

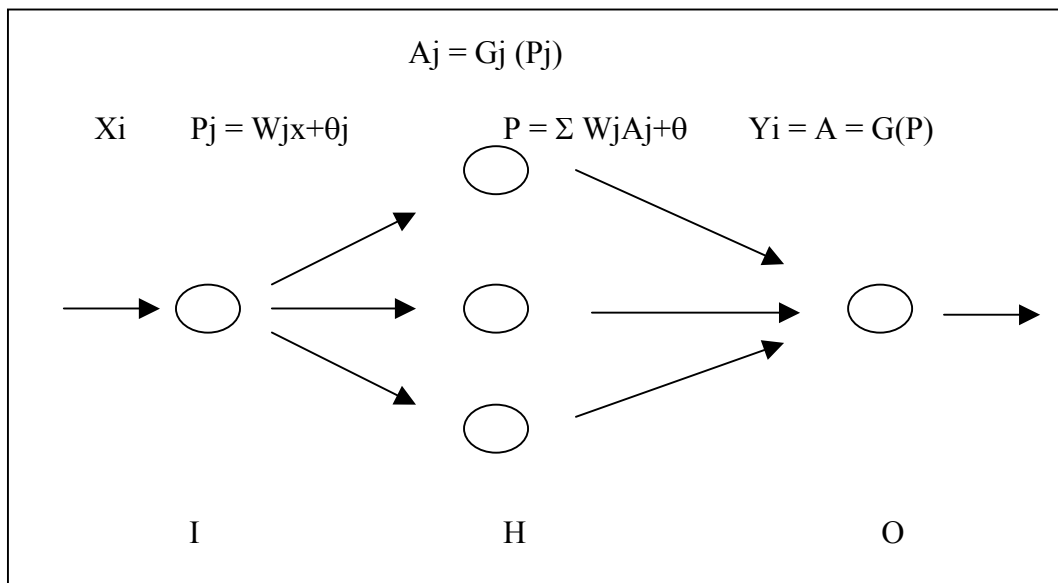


Figura 3.2 – Arquitetura de uma rede neural.

Na fase de treinamento de um conjunto de amostras previamente conhecidas, os valores de entrada e saída ajustam os pesos de forma a reduzir o erro entre a entrada e saída. Seja δ_k o erro do k -ésimo elemento de saída, o erro total $E_p = 0.5 \sum (\delta_k * \delta_k)$ é reduzido a cada iteração. Isto é realizado atualizando-se os pesos, quer na camada intermediária, quer na camada de saída.

Dentre os procedimentos de aprendizagem mais conhecidos, o de retropropagação de erros (*backpropagation*) é um dos mais utilizados. O algoritmo executa os seguintes passos durante a fase de treinamento da rede: a) aplicação do vetor X em todos os elementos da camada de entrada; b) cálculo dos valores de propagação da camada intermediária; c) cálculo dos valores de saída da camada intermediária; d) cálculo dos valores de propagação da camada de saída; e) cálculo das respectivas saídas; f) cálculo dos erros em cada elemento de saída; g) cálculo dos erros de cada elemento intermediário; h) atualização dos pesos da camada de saída; i) atualização dos pesos da camada intermediária; j) cálculo do erro total; k) se o erro for aceitável encerrar o processo; caso contrário passar para outro conjunto de treinamento, retornando ao primeiro passo.

Um classificador centrado em redes neurais pode ser visto como um dispositivo que separa estímulos do ambiente em classes distintas. O objetivo é fazer com que o sistema aprenda a classificar corretamente os estímulos para que, quando um

estímulo particular ou uma versão um pouco distorcida for apresentado à rede, o sistema o classifique de modo adequado.

3.3 Estimação de Litologias Via Redes Neurais

A identificação e arquivamento de colunas litológicas de poços de petróleo se constituem em uma tarefa exaustiva que consome grande quantidade de tempo de especialistas experientes. Conseqüentemente, algumas empresas adotam a política de arquivar apenas um subconjunto de poços. Na Petrobras, por exemplo, apenas os poços exploratórios possuem suas colunas litológicas levantadas e armazenadas nos bancos de dados. Sua execução, em geral, se dá a partir de análises combinadas de perfis elétricos e testemunhos de poços.

Como a modelagem e a visualização de distribuições litofaciológicas dependem fortemente de informações desta natureza, implementou-se um procedimento de classificação via redes neurais para estimar colunas litológicas a partir de dados obtidos via perfilagem.

Após a perfuração de trechos de um poço são utilizadas ferramentas com a finalidade de medir propriedades das rochas, fundamentais na caracterização e na avaliação técnica e econômica. Ao processo de engenharia de aquisição de perfis elétricos dá-se o nome de ‘perfilagem’.

A perfilagem obtém importantes dados a respeito das formações geológicas atravessadas pelo poço, tais como litologias, espessuras, porosidades, prováveis fluidos existentes nos poros, saturações etc. A maior limitação da perfilagem é a restrita extensão de seu raio de investigação lateral. Apenas uma pequena vizinhança do poço é medida.

Os perfis retratam, em relação à profundidade, uma ou mais características ou propriedades das rochas perfuradas – resistividade elétrica, potencial eletroquímico natural, tempo de trânsito de ondas mecânicas, radioatividade natural ou induzida etc. São obtidos com o deslocamento contínuo de sensores no interior do poço e denominados genericamente de perfis elétricos, independentemente do processo físico de medição utilizado.

Existem vários tipos de perfis elétricos, dedicados às mais diversas aplicações, todos com o objetivo de melhor avaliar as formações geológicas quanto à ocorrência de uma jazida comercial de hidrocarbonetos. Os mais comuns são:

- *Potencial Espontâneo (SP)*: é o registro da diferença de potencial entre um eletrodo móvel descido no interior do poço e outro fixo na superfície. Este perfil permite determinar as camadas permoporosas, calcular a argilosidade das rochas, determinar a resistividade da água da formação e auxiliar na correlação de informações com poços vizinhos.
- *Raios Gama (GR)*: permite detectar e avaliar a radioatividade total da formação geológica. Utilizado na identificação da litologia, identificação de minerais radioativos e no cálculo de volumes de argilas ou argilosidade. É útil, também, para interpretação de ambientes deposicionais e na investigação da subida do contato óleo-água em reservatórios fraturados.
- *Neutrônico (NPHI)*: os perfis mais antigos medem a quantidade de raios gama de captura após a excitação artificial através do bombardeio dirigido de nêutrons rápidos. Os mais modernos medem a quantidade de nêutrons epitermais e/ou termais da rocha após o bombardeio. São utilizados na estimação de porosidades, determinação de volumes de argilas, podendo, também, auxiliar na identificação de litologias e dos fluidos da formação e detecção de hidrocarbonetos leves ou gás.
- *Indução (ILD)*: fornece leitura aproximada da resistividade através da medição de campos elétricos e magnéticos induzidos nas rochas. A resistividade é a propriedade da rocha ao permitir ou não a passagem de uma corrente elétrica.
- *Sônico (DT)*: mede a diferença nos tempos de trânsito de uma onda mecânica através das rochas. É utilizado para estimar porosidades, litologias e constantes elásticas, para correlacionar poços, medir o grau de compactação das rochas, detectar fraturas e apoiar a sísmica na elaboração do sismograma sintético.

- *Densidade (RHOB)*: detecta os raios gama defletidos pelos elétrons orbitais dos elementos componentes das rochas após terem sido emitidos por uma fonte colimada no interior do poço. Além de avaliar a densidade das camadas, permite o cálculo da porosidade e a identificação de zonas de gás. É utilizado, também, como apoio à sísmica para o cálculo do sismograma sintético.

Até o início dos anos 1990, a interpretação de litologias a partir de perfis elétricos fundamentava-se basicamente em dois métodos: *crossplot* e estatístico. No primeiro método, dois ou mais perfis são *crossplotados* com o objetivo de estabelecer parâmetros visuais para a identificação das possíveis litologias de um poço. Este método gráfico, originalmente desenvolvido nos anos 1960, ainda é, nos dias de hoje, largamente utilizado para a identificação rápida de rochas.

O segundo método, o estatístico, caracteriza-se por possuir diferentes enfoques. Wolff e Pelisser Combescure (1982), utilizando análise de componentes principais e análise de cluster, desenvolveram um dos primeiros sistemas computacionais, denominado Faciolog, voltado para a determinação de eletrofácies. As eletrofácies de um poço, do ponto de vista conceitual, assemelham-se as litofácies, mas não expressam exatamente as mesmas fácies, uma vez que diferem no que diz respeito ao método de obtenção da informação. Enquanto as eletrofácies são obtidas por medidas indiretas – via perfis elétricos –, as litofácies são definidas por intermédio da observação direta de propriedades físicas das rochas – analisando-se testemunhos e amostras de calha.

Ao final dos anos 1980 e início dos anos 90, Baldwin et al. (1989, 1990) divulgaram os primeiros experimentos de um terceiro tipo de método. Este novo paradigma utilizava tecnologias de redes neurais na predição de litologias. Em Baldwin et al. (1989), é apresentada uma arquitetura de redes neurais, que faz uso do aprendizado *backpropagation*, para a determinação de porosidade e matriz de densidade, e um modelo auto-organizável de redes dedicado à obtenção de litologias. Baldwin et al. (1990) expõem as bases biológicas dos modelos de redes neurais auto-organizáveis, utilizando os mesmos exemplos da primeira publicação. De lá para cá, um sem-número de trabalhos têm sido desenvolvidos, comprovando a perfeita adequação das redes neurais à questão ora discutida.

A Figura 3.3 mostra a arquitetura de redes neurais, com aprendizado *backpropagation*, implementada na estimação de colunas litológicas ausentes no banco

de dados. A camada de entrada compõe-se de três elementos de processamento: o primeiro, para os dados de perfil raios gama; o segundo, para o perfil neutrônico; e o terceiro para o perfil densidade. A camada intermediária dispõe de quatro elementos de processamento, e a camada de saída é composta de quatro ou mais elementos, um para cada tipo de litologia: calcário, dolomita, folhelho, areia etc. As amostras são classificadas em função do maior valor de ativação dos elementos de saída.

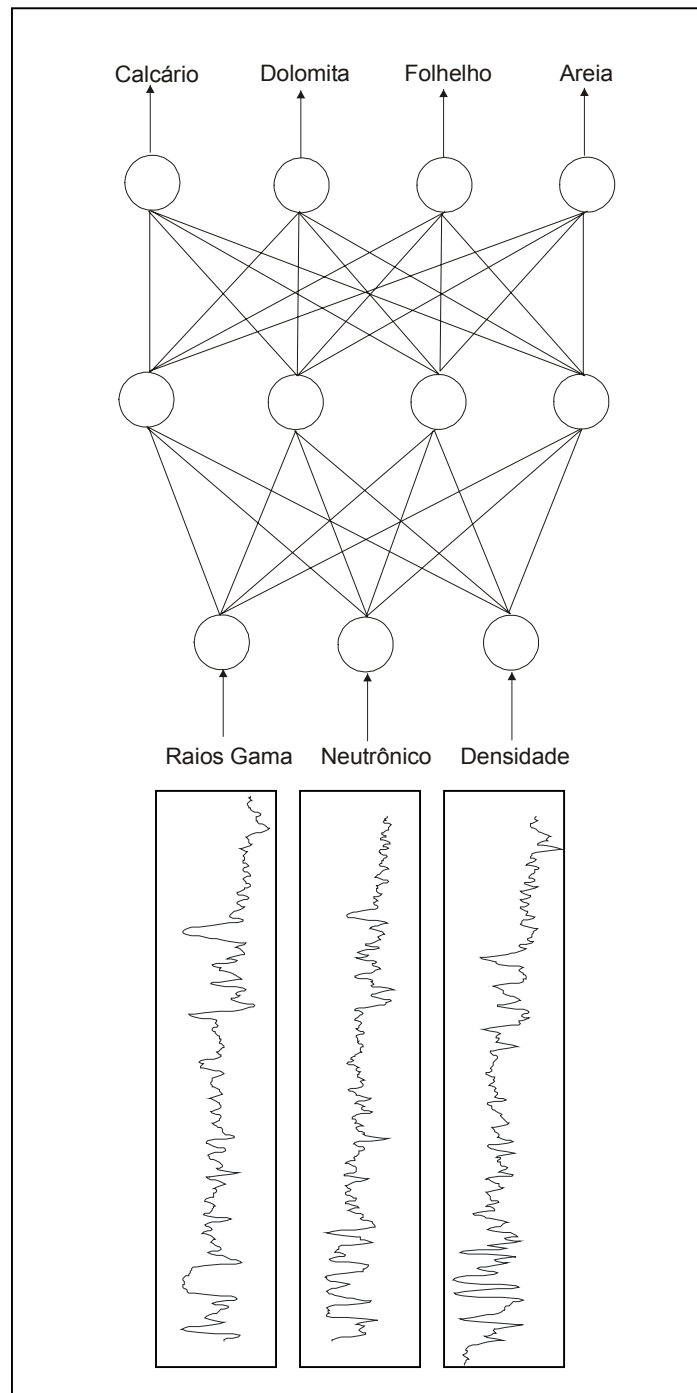


Figura 3.3 – Rede para estimativa de litologias.

3.4 Definição de Dados Espaciais

A Geologia, Geofísica, Cartografia e demais ciências da Terra lidam com dados de natureza complexa, denominados dados espaciais ou georeferenciados, que de modo geral definem objetos ou feições localizadas no espaço bi ou tridimensional. Em uma superfície de referência plana, tais objetos são posicionados com o auxílio de um sistema predefinido de coordenadas, que associados a um conjunto de atributos estabelecem relações espaciais com o universo no qual se encontram inseridos.

Segundo Aronoff (1989), um dado espacial possui quatro componentes: posição geográfica, atributo, relação espacial e tempo. O primeiro componente, a posição geográfica, é responsável pela localização do objeto, sendo representado sobre um sistema de coordenadas, por exemplo, latitude/longitude; o atributo visa especificar características não geométricas dos objetos; o terceiro componente, a relação espacial, também conhecida como topologia, relaciona cada objeto de um contexto com os demais objetos, ou seja, os dados são representados de maneira a se estabelecer relações de adjacências entre os diversos objetos; o último componente, o tempo, é útil quando se deseja descrever, por exemplo, as diversas etapas evolutivas de um dado elemento.

O autor classifica os tipos de representação de dados espaciais em dois modelos: vetorial e matricial. No modelo vetorial, os objetos do mundo real são descritos por pontos, retas e polígonos, enquanto que no matricial, o espaço que se deseja representar é regularmente subdividido em células. Neste último modelo, o enfoque da representação da informação é outro, ou seja, não mais se deseja modelar objetos, mais sim discretizar – em uma malha ou *grid* de células – o espaço a se representar, associando cada uma das células a um atributo.

Ambos os modelos de dados apresentam características bem distintas. O vetorial caracteriza-se pela definição de estruturas de dados mais elaboradas, fundamentadas nos postulados da geometria euclidiana, o que permite uma eficiente codificação da topologia. Outra vantagem que deve ser destacada é a facilidade de se representar, com elevada resolução, os objetos, associada a um baixo volume de dados.

Já o modelo matricial apresenta estruturas de dados mais simples, dificultando consideravelmente a representação das relações topológicas. Se, por um lado o modelo é de simples implementação, por outro, ele requer mais espaço em disco para armazenar um conjunto de objetos.

Analisando o mapeamento de distribuições de litofácies sob a ótica da natureza dos dados, pode-se formular o problema da seguinte maneira: dado um conjunto de pontos (poços de petróleo) definidos sobre um sistema de coordenadas geodésicas – com atributos de litologia – deseja-se, a partir destes pontos, produzir um mapa de fácies litológicas para toda a área, em formato matricial, em que cada célula é associada a uma classe do diagrama ternário.

3.5 Fundamentos de Modelagem Digital de Terreno

Historicamente, a denominação ‘Modelagem Digital de Terreno’ (DTM) tem sido utilizada para se referir a qualquer representação numérica de superfícies. Em princípio, a idéia de superfície digital pode ser aplicada a qualquer situação cujas informações numéricas sejam suficientes para uma modelagem. Nesse contexto, podem-se citar vários tipos de superfícies: topográficas, camadas geológicas, camadas de sedimentação de material assoreado etc.

No presente trabalho, as espessuras das variáveis de classificação (mapas de isólitais) e os mapas de percentuais de cada variável de classificação são calculados e representados por superfícies – em formato matricial – para, em etapa posterior, serem geradas as distribuições de litofácies.

A fim de descrever uma superfície para a qual se dispõe de um conjunto de amostras discretas, faz-se uso de funções de interpolação ou funções de aproximação. Tais funções podem ser utilizadas para descrever tanto problemas bidimensionais quanto problemas tridimensionais de modelagem de superfícies.

As teorias das funções de interpolação e das funções de aproximação possuem as mesmas bases primárias, ou seja, encontrar uma classe de função, a mais simples possível (polinômios), que seja a expressão exata ou aproximada de uma função desconhecida descrita por uma dependência funcional entre suas variáveis.

A diferença principal entre as duas teorias é que as funções de interpolação buscam definir, para dada função $f(x)$, uma função $p(x)$ que passe pelos pontos (x_0, y_0) , (x_1, y_1) , (x_2, y_2) , ..., (x_n, y_n) , onde, $y_0 = f(x_0)$, $y_1 = f(x_1)$, ..., $y_n = f(x_n)$; enquanto que as funções de aproximação visam encontrar para dada função $f(x)$, uma função aproximada $p(x)$ que se ajuste aos pontos (x_0, y_0) , (x_1, y_1) , ..., (x_n, y_n) , segundo uma regra de aproximação escolhida.

Tanto para interpolação como para aproximação, a função $f(x)$ só é conhecida para os seus valores discretos, em geral medidos de maneira descontínua ou irregular, em duas ou mais dimensões. A escolha de uma ou de outra teoria depende do tipo e da precisão dos dados disponíveis.

Os métodos de interpolação e de aproximação podem ser classificados em três grupos, segundo o modo de regionalização do domínio das variáveis: a) método de interpolação ou de aproximação global; b) método de interpolação ou de aproximação local; c) método de interpolação ou de aproximação pontual.

As funções de interpolação global envolvem o ajuste de uma superfície simples passando por todos os pontos medidos em uma superfície – que pode ser gerada através de uma função $p(x)$, do tipo trigonométrica, exponencial ou polinomial, onde $p(x_k) = f_k$, ($k = 1, 2, 3, \dots, n$).

É possível determinar uma função global para toda a região. Essa função é conhecida como superfície de tendência. No entanto, os métodos globais raramente são utilizados para grande quantidade de pontos, tendo em vista que esses métodos utilizam um sistema de equações de grau igual ao número de pontos amostrados.

Nos métodos de interpolação local, o espaço de referência é subdividido em subespaços e, para cada subespaço, define-se uma função de interpolação. As funções mais utilizadas são as funções segmentadas, pois elas descrevem o comportamento do problema em partes.

O método pontual interpola os novos valores usando somente os pontos de referência vizinhos. Desse modo, a adição, substituição ou movimentação de um ponto no domínio da função afeta apenas os pontos próximos ao local da mudança. Isto é o mesmo que considerar que apenas os pontos vizinhos ao novo ponto, dentro de um critério de proximidade, influenciam o valor estimado para o novo ponto interpolado.

O sistema de mapeamento de litofácies aqui apresentado faz uso de uma função de aproximação local para gerar as superfícies de isólicas e percentuais das variáveis de classificação. Tais superfícies são definidas por malhas regulares quadradas.

A qualidade das superfícies geradas por malhas regulares depende do tamanho da malha e do método de interpolação utilizado para calcular o valor de cada nó da malha. Uma malha grande demais pode causar distorções para regiões muito irregulares; uma malha muito pequena pode gerar valores de nós falsos para as regiões regulares.

Para os mapeamentos irregulares, ou seja, com distribuição aleatória dos pontos que dão origem à malha, os nós são calculados basicamente de duas formas: utilizando métodos de interpolação, ou utilizando métodos de aproximação, como, por exemplo, definindo uma vizinhança para cada nó da malha e calculando o seu valor por meio de uma média ponderada dos valores dos pontos vizinhos.

Para os métodos de aproximação por definição de vizinhança de nós existem muitas formas de se definir a região de vizinhança. Um primeiro critério estima um raio R , em função da densidade de pontos e da conformação da superfície, considerando todos os pontos que caem dentro de um círculo assim definido. Um segundo critério impõe a existência de um número mínimo de pontos – esse número tem sido estimado entre 6 e 10. Um terceiro critério pesquisa a distribuição dos pontos por quadrados ou octantes e exige de 2 a 4 pontos por setor (Figura 3.4).

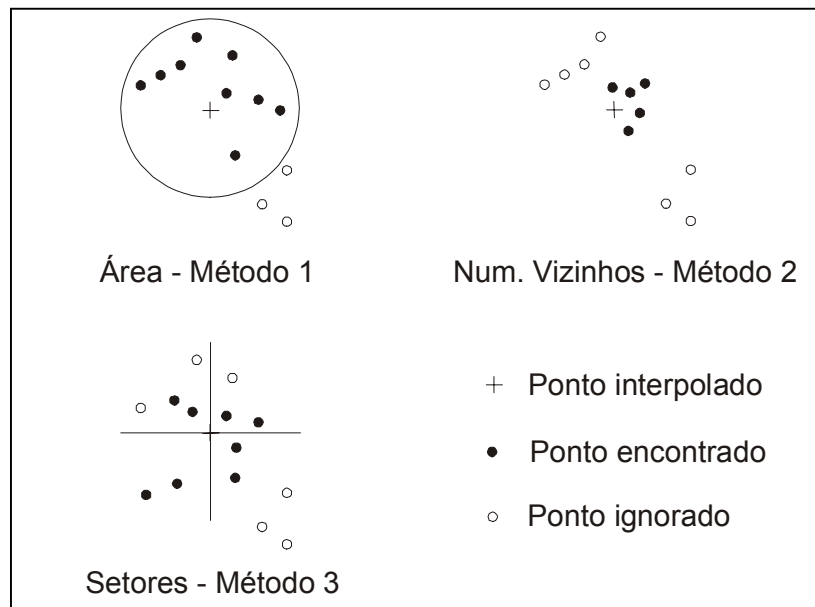


Figura 3.4 – Métodos de definição da região de vizinhança.

Em linhas gerais, um algoritmo de geração de superfícies que utiliza o método de aproximação é composto dos seguintes passos:

- a) Leitura dos pontos XYZ;
- b) Definição do tamanho da célula, número de linhas e número de colunas;
- c) Cálculo de um único ponto de valor médio para células que possuem mais de um ponto;
- d) Busca da vizinhança de cada célula que auxiliará no cálculo do plano da célula;
- e) Cálculo do plano médio, para cada célula, que no caso em questão minimiza o erro quadrático e define os valores dos quatro cantos da célula;
- f) Cálculo de um único ponto, para os nós com mais de um ponto, utilizando, por exemplo, a média ponderada em função do inverso da distância do nó a cada ponto de controle das células vizinhas;
- g) Repetição dos procedimentos a partir de d, tantas vezes até que não se tenha novos nós a estimar.

3.6 Classificação Geométrica do Diagrama Triangular

Como citado antes, o mapeamento de litofácies é um problema de classificação de três variáveis. A literatura descreve os paradigmas de classificação com o auxílio de diagramas triangulares, que podem ser representados em termos de percentuais das variáveis.

Se pensarmos no diagrama triangular como um plano pertencente à diagonal de um cubo de lado 100 – que define o lugar geométrico de todas as possíveis amostras de um mapa (Figura 3.5) –, a classificação pode ser tratada como um problema de geometria computacional. O espaço de três dimensões é reduzido a duas por meio da aplicação de uma projeção geométrica; e a classificação é feita via algoritmo de pertinência de ponto em polígono.

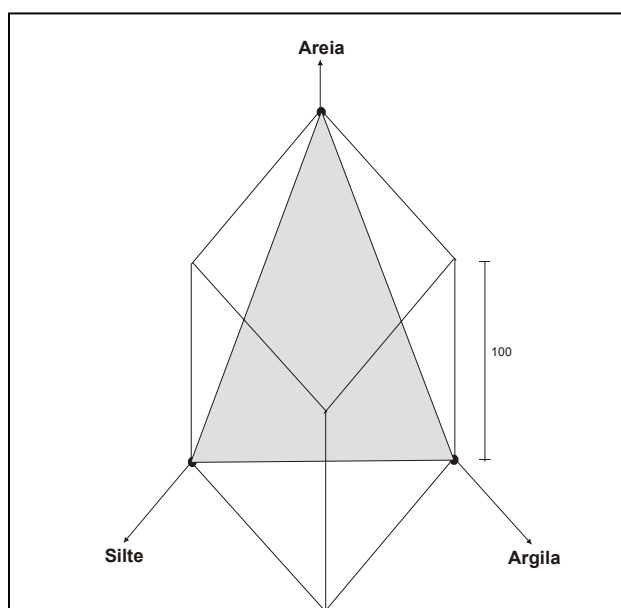


Figura 3.5 – Representação do diagrama triangular em R^3 .

A geometria computacional divide os sistemas de projeções em duas categorias: projeção paralela ou cilíndrica, e projeção cônica ou em perspectiva.

Supondo uma lanterna que projete seus raios luminosos sobre um objeto no espaço em uma tela plana, na projeção paralela a lanterna se encontra bem afastada do objeto. Neste caso, os raios luminosos da lanterna incidem sobre o objeto por meio de linhas paralelas. Conseqüentemente, as arestas do objeto perpendiculares aos raios luminosos têm suas dimensões preservadas. As arestas paralelas do objeto permanecem paralelas na projeção. Esta é a técnica usada para produzir desenhos em escala de objetos tridimensionais. As medidas do objeto podem ser obtidas no próprio desenho, uma vez conhecida a inclinação dos raios projetantes. Essa técnica, contudo, não fornece uma representação realista da aparência de objetos 3D.

Na projeção cônica ou perspectiva, os pontos dos objetos são projetados por meio de linhas que convergem para um ponto chamado “centro de projeção”. É o que se passa quando a lanterna se encontra relativamente próxima ao objeto a ser projetado sobre a tela plana. A projeção perspectiva cria um efeito semelhante ao do olho humano. As dimensões relativas não são preservadas. Quanto mais distante estiver um objeto do centro de projeção, menor será sua projeção perspectiva. Sendo assim, esta técnica não deve ser utilizada quando se desejar conhecer as medidas e o formato exato dos objetos, mas sim nos casos em que é importante o grau de realismo.

As projeções paralelas caracterizam-se pelo ângulo formado entre a direção de projeção e o plano de projeção. São três os tipos de projeção paralela: a) ortográfica; b) axonométrica isométrica; c) oblíqua.

Na projeção ortográfica, a direção dos raios projetantes é perpendicular ao plano de projeção. As projeções ortográficas mais comuns são as vistas frontal, lateral e superior. Em ambas as projeções, o plano de projeção é perpendicular a um dos eixos do sistema de coordenadas em que o objeto está definido. A direção de projeção é dada por esse eixo.

Embora as projeções ortográficas não encerrem nenhuma sensação de profundidade, o objeto projeta-se em verdadeira grandeza. Assim, é possível medir as distâncias e ângulos diretamente no desenho. Com frequência, esta projeção é apresentada em escala.

Na projeção axonométrica, o plano de projeção não é perpendicular a nenhum dos eixos principais do objeto. O paralelismo de linhas é preservado, mas não os ângulos, e as distâncias podem ser medidas usando-se um fator de escala para cada eixo.

A projeção axonométrica mais comum é a isométrica. Nesse caso, o plano de projeção intercepta cada um dos eixos principais a uma mesma distância da origem, ou seja, a direção de projeção forma um mesmo ângulo com cada um dos eixos. É como se inclinássemos o objeto de tal forma que os ângulos entre as arestas formassem 120 graus.

Existem, na verdade, oito casos possíveis para esse tipo de projeção, um para cada octante. Os fatores de escala para cada eixo são iguais. Conseqüentemente, as proporções relativas são preservadas. Os eixos são projetados formando ângulos iguais.

As projeções oblíquas se caracterizam por um plano de projeção normal a um dos eixos principais e por uma direção de projeção não perpendicular ao plano. As faces do objeto paralelas ao plano de projeção têm os ângulos e as distâncias preservadas; as outras faces permitem apenas a medida das distâncias ao longo dos eixos. Os tipos mais usuais de projeção oblíqua são a cavaleira e a *cabinet*. Na cavaleira, a direção de projeção faz um ângulo de 45 graus com o plano de projeção. Na *cabinet*, a direção de projeção forma um ângulo cuja tangente é 2 (63,4 graus).

A projeção perspectiva é especificada definindo-se um “centro de projeção” para onde convergem as linhas de projeção. Associando-se ao exemplo da lanterna, forma-se um cone de luz, que produz uma sombra maior que o objeto.

Qualquer conjunto de linhas paralelas da imagem, que não sejam paralelas ao plano de projeção, irá convergir para um ponto de fuga. Apesar de os pontos de fuga serem importantes em desenho manual, eles têm pouca importância em perspectivas criadas por computador. Neste caso, o que se faz em geral é especificar o ponto de projeção (a posição da lanterna), o que, automaticamente, define os pontos de fuga.

No caso de perspectiva, muitas vezes é mais adequado, ao invés de se pensar na lanterna que projeta uma imagem em uma tela, pensar em um olho voltado para um objeto através de um vidro. A imagem em projeção perspectiva é o desenho que seria obtido se alguém o acompanhasse, riscando no vidro, o lugar onde o raio visual passasse.

O método de classificação aqui proposto utiliza a projeção isométrica, a fim de obter, em duas dimensões, os polígonos que definem as classes do diagrama triangular. O sistema de mapeamento de litofácies também utiliza esta projeção para desenhar os diagramas triangulares na tela do computador.

Seja um ponto $P(x, y, z)$ definido em termos de suas coordenadas x , y e z , correspondente aos percentuais de cada variável de classificação e que se encontre sobre o diagrama triangular de percentuais. Sua posição no espaço bidimensional, $P'(x', y')$, é dada pelas seguintes equações:

$$x' = (x + z) \cos (30) \quad \text{(Equação 3.1)}$$

$$y' = -(x + z) \sin (30) + y \quad \text{(Equação 3.2)}$$

Tais equações reproduzem apenas uma formulação das oito possíveis (uma para cada octante espacial) que podem ser usadas a depender da vista esperada. A visão que se obtém por meio da formulação acima é uma visão traseira do objeto. Uma vista de frente pode ser obtida com as seguintes equações:

$$x' = (x - z) \cos (30) \quad \text{(Equação 3.3)}$$

$$y' = (x + z) \sin (30) + y \quad \text{(Equação 3.4)}$$

A Figura 3.6 ilustra o modelo de classificação de Krumbein (1948) em 3D. As classes do modelo são definidas em percentuais de três componentes e variam de 1 a 9. A identificação da classe, a qual um dado ponto $P(x, y, z)$ pertence, é feita projetando-se os vértices das classes em 2D, por exemplo, C1, C2, C3 e C4 da classe 6,

via projeção isométrica, assim como o ponto P. Em seguida, testa-se a pertinência do ponto contra as classes, via algoritmo de ponto em polígono.

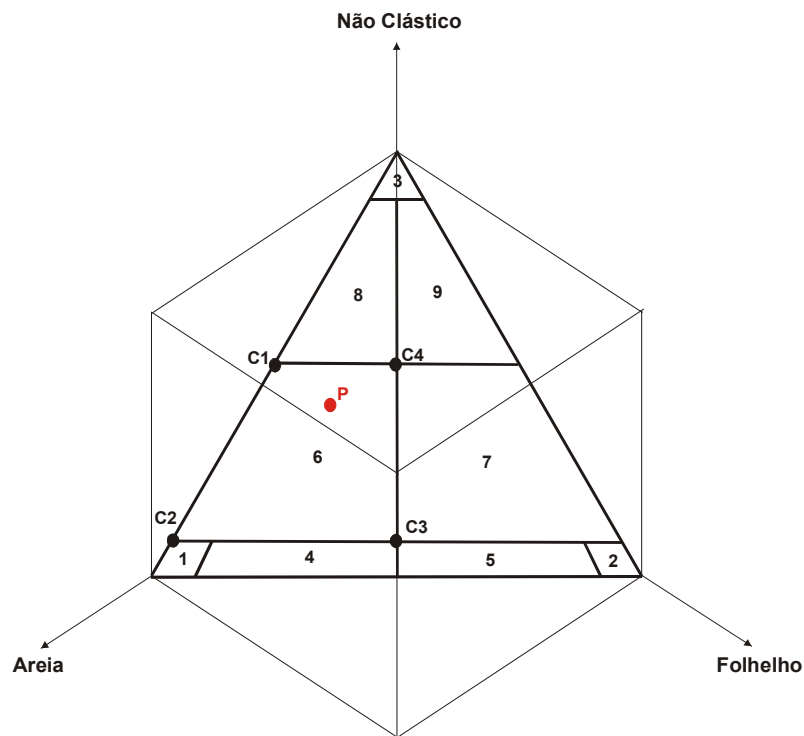


Figura 3.6 – Modelo de classificação de Krumbein (1948) em R^3

A classificação de n pontos é feita segundo o algoritmo a seguir:

- Construir polígonos 2D, via projeção isométrica, para todas as classes do diagrama ternário (Equações 3.3 e 3.4)
- Para cada ponto a ser classificado, faça
 - Projetar ponto via projeção isométrica (Equações 3.3 e 3.4)
 - Enquanto não achou classe do ponto, faça
 - Testar pertinência do ponto à classe
 - Se ponto dentro do polígono, então
 - Ponto pertence à classe corrente
 - Fim-se
 - Fim-enquanto
- Fim-para

3.7 Coordenadas Baricêntricas

As coordenadas de um ponto p , em um diagrama triangular, são conhecidas na geometria computacional como ‘coordenadas baricêntricas’.

Seja o diagrama triangular (Figura 3.7 esquerda) de vértices a , b , c e o ponto p , em \mathbb{R}^2 . Pode-se escrever p como uma combinação baricêntrica de a , b , c :

$$p = ua + vb + wc, \quad (\text{Equação 3.5})$$

onde u , v , w são números reais que satisfazem

$$u + v + w = 1. \quad (\text{Equação 3.6})$$

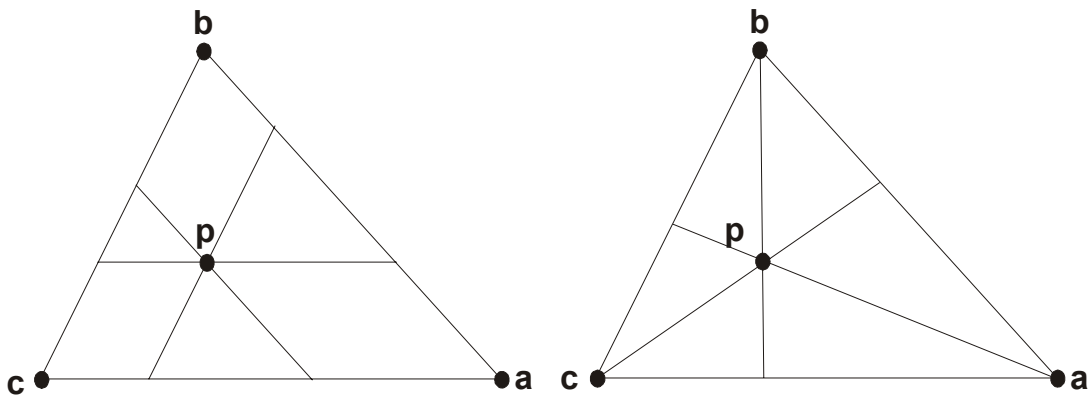


Figura 3.7 – Coordenadas baricêntricas.

Os coeficientes $u := (u, v, w)$ são chamados de coordenadas baricêntricas de p com respeito a a , b e c . Dados quatro pontos a , b , c , e p , pode-se determinar as coordenadas baricêntricas u , v , w , a partir das equações acima, uma vez que se tem um sistema de três equações a três incógnitas:

$$ux_a + vx_b + wx_c = x_p$$

$$uy_a + vy_b + wy_c = y_p$$

$$u + v + w = 1$$

A solução para o sistema é obtida aplicando-se a regra de Cramer, com as seguintes relações, expressas em valores de áreas do diagrama triangular (Figura 3.7 direita):

$$u = \text{área}(p, b, c) / \text{área}(a, b, c);$$

$$v = \text{área}(a, p, c) / \text{área}(a, b, c);$$

$$w = \text{área}(a, b, p) / \text{área}(a, b, c).$$

Observando as coordenadas baricêntricas de um ponto, pode-se interpretá-las como imagens da transformação afim $T: \mathbb{R}^2 \rightarrow \mathbb{R}^3$ tal que $T(a) = (1, 0, 0)$, $T(b) = (0, 1, 0)$ e $T(c) = (0, 0, 1)$. Tal transformação é injetiva e leva o \mathbb{R}^2 no plano de equação $x + y + z = 1$.

As coordenadas baricêntricas têm aplicação direta na implementação da interface com o usuário, na qual a superfície de exibição é o diagrama ternário. Em um procedimento de interação com o usuário, a posição do *mouse* em coordenadas de tela (\mathbb{R}^2), é levada para o espaço de classificação através da formulação demonstrada.

4. SISTEMA DE MODELAGEM E VISUALIZAÇÃO DE LITOFÁCIES

Os capítulos anteriores foram dedicados à análise do problema, apresentação geral das técnicas utilizadas na formulação da solução e à fundamentação teórica, ou seja, definiu-se – em linhas gerais – o escopo do trabalho, com a exposição informal de alguns processos, conceitos e técnicas necessárias à implementação de um sistema computacional voltado para a modelagem e visualização de distribuições de litofácies.

No presente capítulo são descritos os processos e dados do sistema que implementa a metodologia proposta na tese. Devido ao pequeno número de processos e a pouca quantidade de fluxos de dados não foi adotada nenhuma metodologia clássica de análise estruturada de sistemas para a especificação da solução.

Cada processo é aqui detalhado com uma descrição funcional, e, em alguns casos, apresentados os respectivos algoritmos. Os dados encontram-se descritos de forma resumida, de maneira a permitir a compreensão das principais etapas de transformação de dados.

Vale ressaltar que todos os processos foram totalmente desenvolvidos em um único sistema computacional. Utilizaram-se estações de trabalho Unix e Linux, linguagem de programação C, interface com usuário X-Windows/Motif e interface gráfica X11. Todas as saídas gráficas mostradas são resultados do sistema.

4.1 Descrição Geral do Sistema

A Figura 4.1 apresenta, esquematicamente, os processos e dados envolvidos no mapeamento de uma região de interesse, cujo objetivo principal é a modelagem das distribuições litofaciológicas de uma unidade estratigráfica. O sistema é composto de seis processos: Preparação dos Dados; Geração de Superfícies, Classificação Litofaciológica, Edição de Malhas, Geração de Volumes e Exportação de Dados.

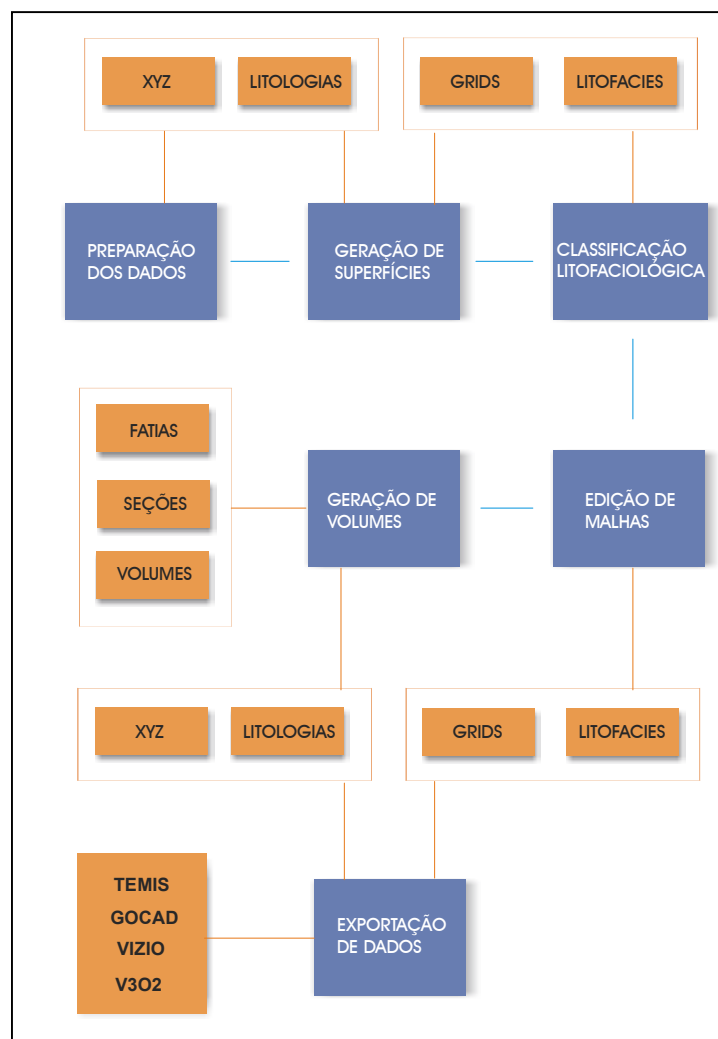


Figura 4.1 – Visão geral do sistema, processos e dados.

O processo de Preparação dos Dados desempenha o papel do pré-processamento de um sistema de KDD (*Knowledge Discovery in Database*). Nele, a área a ser mapeada é preparada a partir da definição de um conjunto de pontos esparsos (XYZ) que descreve – em cada ponto – a posição geográfica de um poço e o topo e base

do intervalo estratigráfico. Além do tratamento de dados XYZ são estimadas via redes neurais, para o intervalo estratigráfico em questão, as colunas litológicas que não se encontram armazenadas no banco de dados.

A Geração de Superfícies é responsável pela criação das superfícies das variáveis do modelo de classificação (diagrama ternário) escolhido. De início, para cada ponto XYZ, o processo consulta o banco de dados de litologia ou a coluna litológica estimada e calcula os percentuais das três variáveis de classificação. Em uma segunda etapa, são geradas as superfícies, em formato grid, das variáveis via técnicas de modelagem digital de terreno.

A Classificação Litofaciológica constrói o *grid* de distribuição de litofácies a partir da combinação das superfícies das variáveis de classificação. No *grid* de saída, as células são codificadas segundo suas respectivas classes.

Neste ponto já se dispõe de um esboço do mapa de litofácies. No processo de Edição de Malhas, o geólogo interage com o sistema, alterando o *grid* de litofácies de maneira a introduzir seu conhecimento.

A Geração de Volumes fornece uma modelagem e visualização gráfica bi e tridimensional do intervalo estratigráfico mapeado. Podem-se visualizar seções (perfis), fatias e a distribuição volumétrica das litofácies.

A Exportação de Dados completa o ciclo de execução, permitindo que os dados modelados no mapeamento sejam transportados para outros aplicativos, de maneira a atender aos mais diversos objetivos.

As seções que se seguem discutem cada um dos processos do sistema.

4.2 Preparação dos Dados

A Preparação dos Dados dá início ao mapeamento. O processo atua sobre três estruturas de dados: arquivo de pontos XYZ, banco de dados litológico e coluna litológica estimada.

O arquivo XYZ contém uma lista de poços, descritos por suas siglas, coordenadas e uma seqüência de cotas de topos e bases de unidades estratigráficas. O intervalo estratigráfico de interesse é informado ao sistema por meio da seleção de dois topos ou bases. As Figuras 4.2 e 4.3 ilustram, respectivamente, um arquivo XYZ típico e a distribuição espacial dos poços. O banco de dados de litologia armazena as ocorrências das diferentes rochas nos poços de petróleo. Como nem todos os poços

possuem suas litologias armazenadas no banco de dados, o sistema prevê a estimativa de litologias, através de um método baseado em redes neurais.

| | | | | | | | | | |
|-----------|----|------------|-----------|----|---------|---------|----------|----------|----------|
| 1BSS 0054 | BS | 7079850.0S | 338394.0M | 16 | -189.00 | -879.00 | -1336.00 | -2479.00 | -2690.00 |
| 1BSS 0055 | BS | 7064571.0S | 313555.0M | 1 | -146.00 | -744.00 | -1110.00 | -2204.00 | -2538.00 |
| 1BSS 0056 | BS | 7051347.0S | 313390.0M | 1 | -152.00 | -749.00 | -1510.00 | -2289.00 | -2657.00 |
| 1BSS 0057 | BS | 7087178.0S | 322487.0M | 16 | -151.00 | -944.00 | -1331.00 | -2156.00 | -2407.00 |
| 1BSS 0058 | BS | 7051937.0S | 340682.0M | 16 | -268.00 | -873.00 | -1432.00 | -2572.00 | -2873.00 |
| 4BSS 0059 | BS | 7051313.0S | 318628.0M | 16 | -164.00 | -934.00 | -1566.00 | -2311.00 | |
| 1BSS 0060 | BS | 7046417.0S | 323994.0M | 5 | -187.00 | -817.00 | -1290.00 | -2487.00 | -2755.00 |
| 1BSS 0062 | BS | 7282785.0S | 552676.0M | 16 | -263.00 | -967.00 | -1250.00 | -1573.00 | -1762.00 |

Figura 4.2 – Arquivo XYZ.

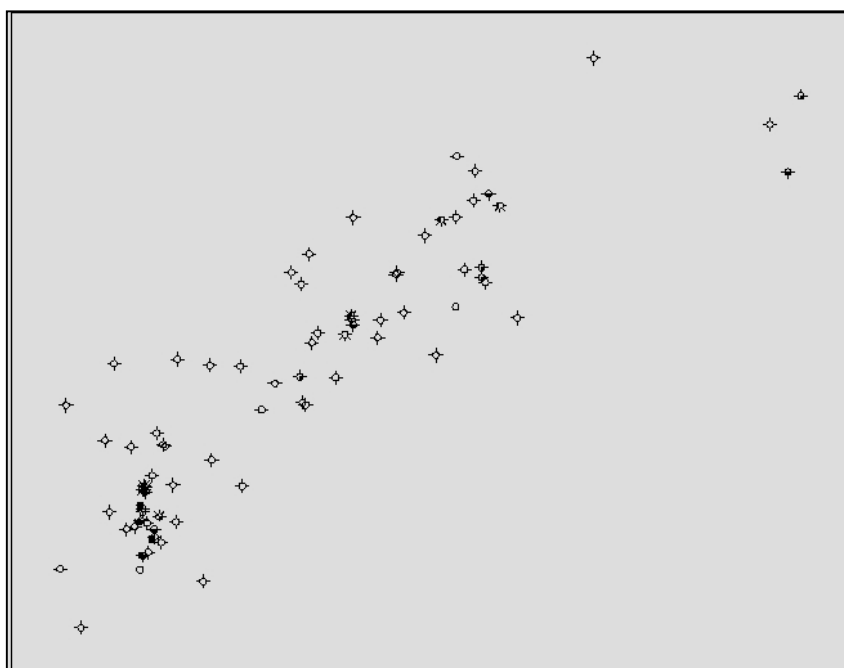


Figura 4.3 – Distribuição espacial dos poços.

Esta etapa inicial se caracteriza pela análise detalhada da quantidade e distribuição espacial do conjunto de poços; dos intervalos estratigráficos definidos em cada poço; e dos dados armazenados no banco de litologias. São detectados problemas que devem ser resolvidos caso a caso. Em geral, são problemas ligados ao arquivamento de dados, como ausência de informações ou necessidade de novos levantamentos e interpretações.

Em certas situações, o sistema sinaliza, com suas saídas gráficas, ocorrências de fatos indesejáveis. A qualidade do resultado do mapeamento depende muito dos dados de entrada. Os problemas não resolvidos vão se refletir nas saídas e são imediatamente detectados pelo intérprete em função da geração de resultados anômalos.

A Figura 4.4 mostra o comportamento do sistema quando um determinado poço não é considerado no mapeamento. Em todas as saídas gráficas produzidas, os poços descartados do processamento são desenhados em cor diferente das demais.

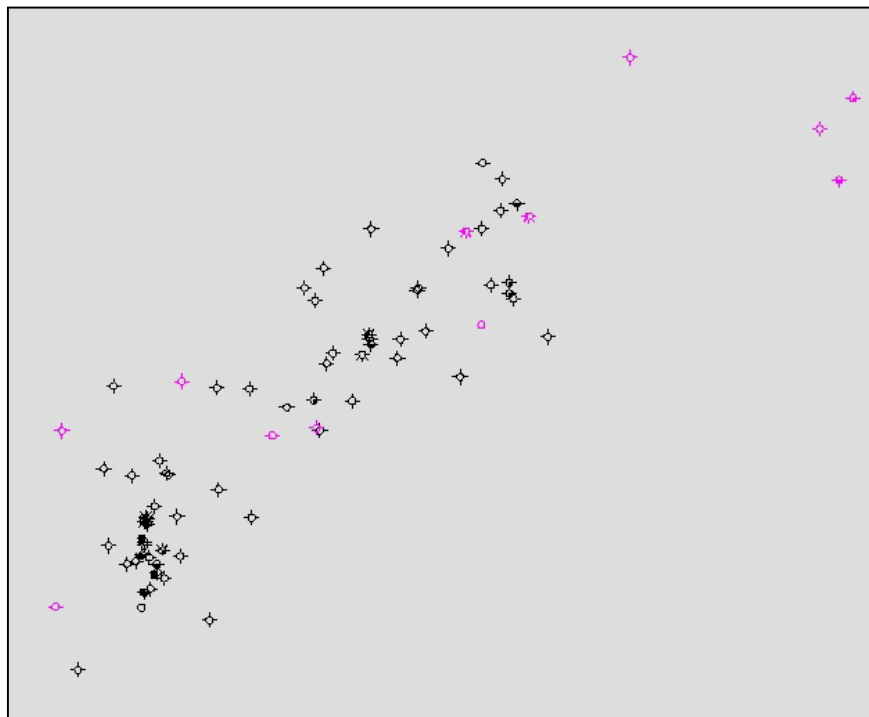


Figura 4.4 – Indicação dos poços descartados, em vermelho.

Algumas ações devem ser tomadas ao se iniciar a execução do sistema. Sem dúvida, uma boa preparação dos dados resulta em mapas de melhor qualidade gráfica, mais realistas, que indicam com elevado grau de certeza as principais distribuições de litofácies da região. Dentre as ações a serem tomadas, destacam-se as seguintes:

- Verificar se a quantidade de poços é suficiente para o mapeamento. Se a distribuição espacial cobre toda a área desejada e se o conjunto de poços aliado ao método de geração de superfícies utilizado produz estruturas geologicamente coerentes;
- Analisar em cada poço as cotas dos topos ou bases do intervalo estratigráfico. As ausências de topos e bases devem ser conhecidas e controladas;

- Para o mapeamento de unidades estratigráficas muito profundas, confrontar os intervalos definidos no arquivo XYZ com as profundidades finais dos poços. É possível que a profundidade final de um determinado poço seja menor, em cota, que o intervalo definido. Neste caso, não se dispõe de dados de litologia. Uma solução é estabelecer como limite do intervalo a profundidade final do poço.
- Verificar a existência de dados de litologia para os poços definidos no arquivo XYZ. Algumas companhias de petróleo armazenam dados de litologia somente dos poços exploratórios.
- Para o caso da existência de poucos poços com dados de litologia, é aconselhável se escolher alguns, segundo um critério bem definido, e executar o treinamento das redes neurais a fim de se gerar as colunas litológicas ausentes.
- Se uma feição indesejável ocorrer em determinado local, é provável que o arquivamento das litologias no banco tenha sido executado erradamente. Uma solução é analisar as curvas de proporção vertical, definida na visualização unidimensional.

A fim de apoiar a etapa de preparação dos dados, foram desenvolvidas funcionalidades de análise/correção e complementação dos dados de entrada. A primeira funcionalidade se constitui na visualização unidimensional da distribuição litofaciológica no poço. A Figura 4.5 sintetiza o conjunto de informações de um intervalo estratigráfico de um poço.

Nas duas primeiras colunas da Figura 4.5, a partir da esquerda, encontram-se plotados os perfis GR, NPHI e RHOB (inexistente para o poço em questão). Na coluna seguinte é definida, com um único retângulo colorido, a classe do diagrama ternário correspondente a todo intervalo estratigráfico do poço. Na quarta coluna, são representados os percentuais das variáveis de classificação. Cada variável possui altura proporcional ao seu valor. Na quinta coluna, as litologias são desenhadas em suas respectivas profundidades. As duas últimas colunas estabelecem a curva de proporção vertical. Esta curva é construída em função da definição de uma janela ou de uma espessura de fatiamento, em metros, da unidade estratigráfica. Na penúltima coluna encontram-se desenhadas as janelas, com alturas constantes, em suas profundidades, nas

cores correspondentes às classes do diagrama ternário. A última coluna, a curva propriamente dita, é composta, para cada janela, de um, dois ou três retângulos horizontais, dispostos de forma contígua. Cada um dos retângulos representa uma variável de classificação e possui dimensão horizontal proporcional ao seu valor, em termos percentuais.

Analisando a curva de proporção vertical da Figura 4.5, a última janela, a mais profunda, possui coloração verde-clara, indicando no diagrama ternário uma mistura de pelitos com areias. Sua representação na curva se dá por meio de dois retângulos, uma vez que, para esta profundidade, ocorrem somente duas variáveis do modelo de classificação. Graficamente, deduz-se que a janela em questão é composta de cerca de 20% de areias e 80% de pelitos. As janelas imediatamente acima possuem composições de apenas uma variável, somente pelitos, representadas pela cor verde-escura. Acima da última janela totalmente pelítica, percebe-se uma transição, com a presença de areias e a redução das espessuras de pelitos. As janelas superiores mostram a saída dos pelitos e a entrada de camadas carbonáticas, em azul.

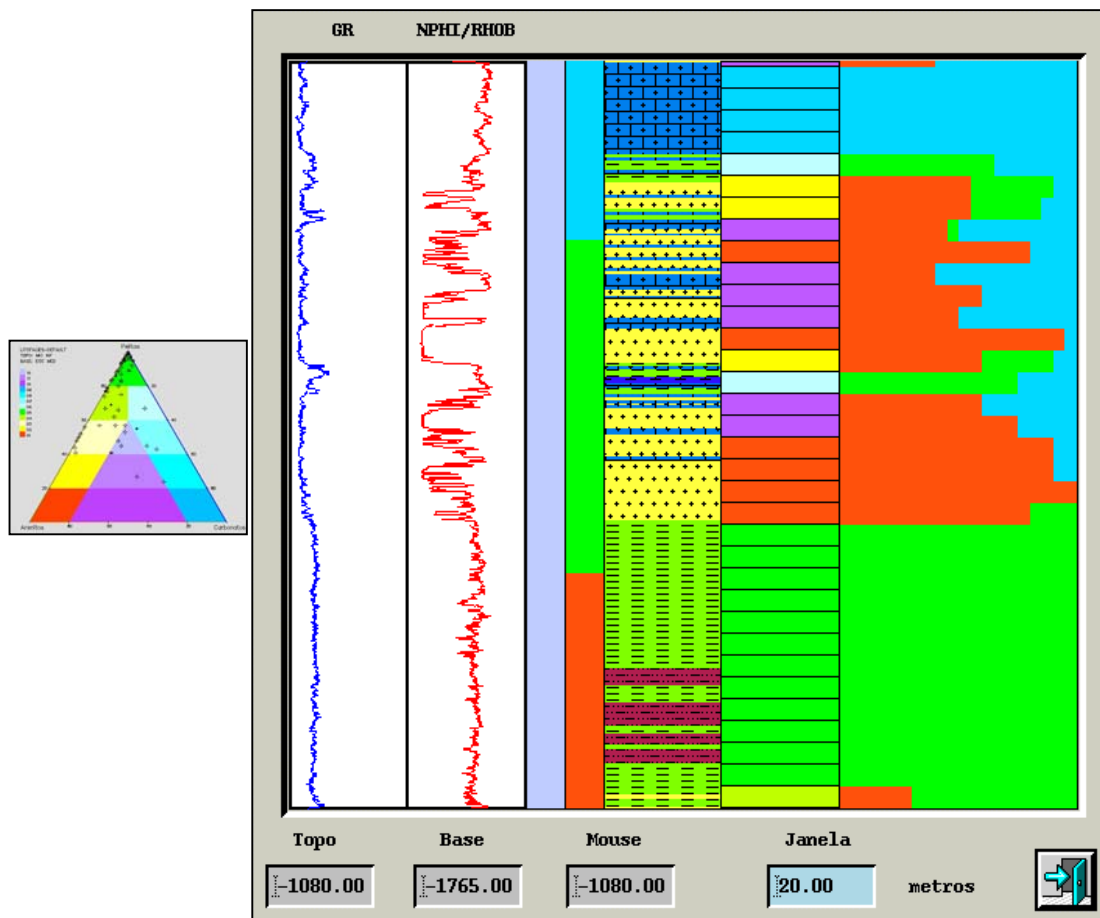


Figura 4.5 – Visualização unidimensional. Curva de proporção vertical.

A análise da curva de proporção vertical nos permite concluir que, para o intervalo estratigráfico em estudo, os sedimentos pelíticos foram depositados em um tempo geológico mais remoto. Em um segundo momento, mais recente, ocorreram as deposições dos arenitos, seguindo-se as deposições carbonáticas.

A visualização unidimensional se constitui em importante ferramenta na elaboração do modelo litofaciológico. Além de fornecer informações efetivas à compreensão e análise geológica da área, ela estabelece parâmetros que permitem a validação dos dados e a definição da quantidade de fatias quando na geração do volume litofaciológico. Ao se alterar as dimensões da janela, tem-se uma idéia aproximada das distribuições litofaciológicas que serão geradas na confecção do modelo final. A Figura 4.6 ilustra as curvas de proporções para duas outras janelas de 30 e 60m.

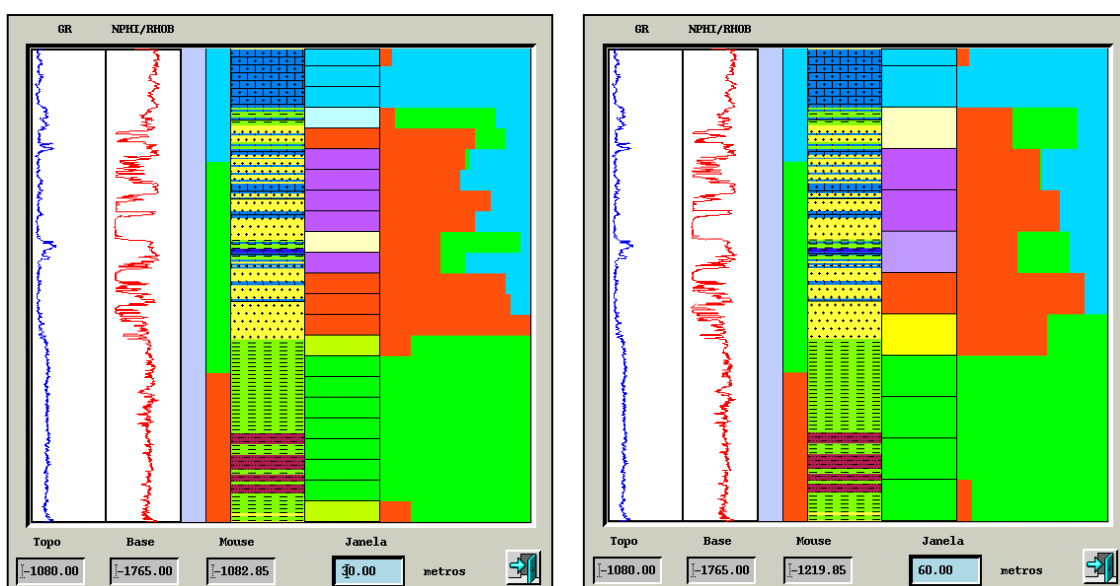


Figura 4.6 – Curvas de proporção vertical. Janelas de 30 e 60m.

Completando o processo de preparação dos dados, a funcionalidade de estimativa de litologias via redes neurais permite a adição de novos dados ou a correção das litologias envolvidas no mapeamento como um todo. Uma etapa importante é a identificação da necessidade de aplicação do procedimento, que é realizada por meio da visualização e análise das contribuições de cada conjunto de dados de poços.

Identificada a necessidade de estimação de uma coluna litológica de um poço, o passo seguinte é a escolha do poço que servirá de base para o treinamento da rede. Uma boa estratégia é a escolha de poços próximos ao que se deseja estimar, pois quanto menor a distância, menores são as diferenças geológicas entre o poço treinado e o estimado. Entretanto, alguns cuidados devem ser tomados. Deve-se verificar se os dados disponíveis para o treinamento são suficientes e reproduzem as feições geológicas que se espera para o poço a ser estimado. Isto é feito comparando-se os perfis elétricos dos poços, especialmente os perfis GR, NPHI e RHOB.

A Figura 4.7 ilustra os dados e resultados das duas fases da estimação de litologias: treinamento e reconhecimento. O quadro da esquerda expõe a primeira fase, a de treinamento da rede. As três primeiras colunas mostram os dados de entrada da rede, os perfis GR, NPHI e RHOB. A quarta coluna define o padrão que se deseja treinar, e a quinta coluna mostra o resultado do reconhecimento, após o treinamento, aplicado sobre os perfis elétricos utilizados no treinamento.

No quadro da direita, a rede treinada é utilizada para o reconhecimento com a geração das litologias de um poço que não dispõe de dados armazenados no banco de dados. Nas três primeiras colunas são plotados os perfis elétricos do poço e as outras duas colunas as litologias geradas.

Uma característica importante é a possibilidade de execução do treinamento sobre todo poço ou apenas sobre o intervalo estratigráfico de interesse. Deve-se adotar o critério de treinar sempre duas redes, uma para todo poço e outra restrita ao intervalo estratigráfico, e avaliar cada um dos resultados.

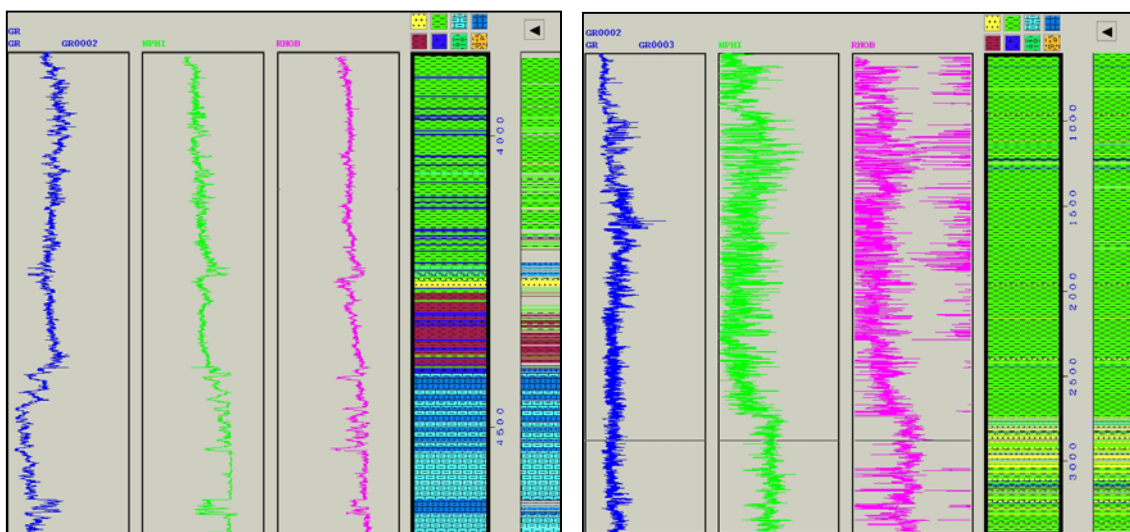


Figura 4.7 – Geração de colunas litológicas. Treinamento e reconhecimento.

4.3 Geração de Superfícies

A Geração de Superfícies é responsável pela estimação dos componentes ou variáveis de classificação da área mapeada. São geradas dez superfícies: três superfícies de percentuais normalizadas, nas quais o somatório dos componentes dos nós de cada *grid* totaliza 100; três superfícies de percentuais não normalizadas; três superfícies de isólitas (espessuras litológicas); e uma superfície de erro.

A estimação de cada superfície é feita em função do modelo de classificação escolhido quando são definidas as variáveis – com suas respectivas rochas – e o espaço de classificação das litofácies (diagrama triangular). O modelo de classificação *default* é composto das variáveis arenitos, pelitos e carbonatos (Figura 4.8). Pode-se, entretanto, alterar seus conteúdos, inserindo ou retirando eventuais ocorrências de rochas. Um exemplo típico é a inclusão de um tufo vulcânico em uma das variáveis.



Figura 4.8 – Variáveis do modelo de classificação *default*.

Considerando os poços, com as definições dos topos e bases do intervalo estratigráfico, e o modelo de classificação escolhido, o processo inicia a geração das superfícies, montando uma estrutura de dados interna que leva em conta as ocorrências de litologias armazenadas no banco de dados ou preditas. A estrutura de dados contém as seguintes informações que se repetem para cada poço do arquivo XYZ:

Poços *(1-número de poços do arquivo XYZ)

Sigla do poço

Coordenadas X e Y do poço

Topo e Base da unidade estratigráfica

Percentual da variável 1

Percentual da variável 2

Percentual da variável 3

Uma vez construída a estrutura de dados, o passo seguinte é a geração das superfícies de percentuais das variáveis de classificação. Isto é feito via algoritmo de modelagem digital de terreno, podendo ser utilizado dois diferentes métodos, a saber: aproximação local, estimando-se as superfícies através da minimização do erro quadrático (método baseado no inverso do quadrado das distâncias) e triangulação de Akima. As Figuras 4.9, 4.10 e 4.11 ilustram os mapas de percentuais não normalizados das variáveis – arenitos, pelitos e carbonatos.

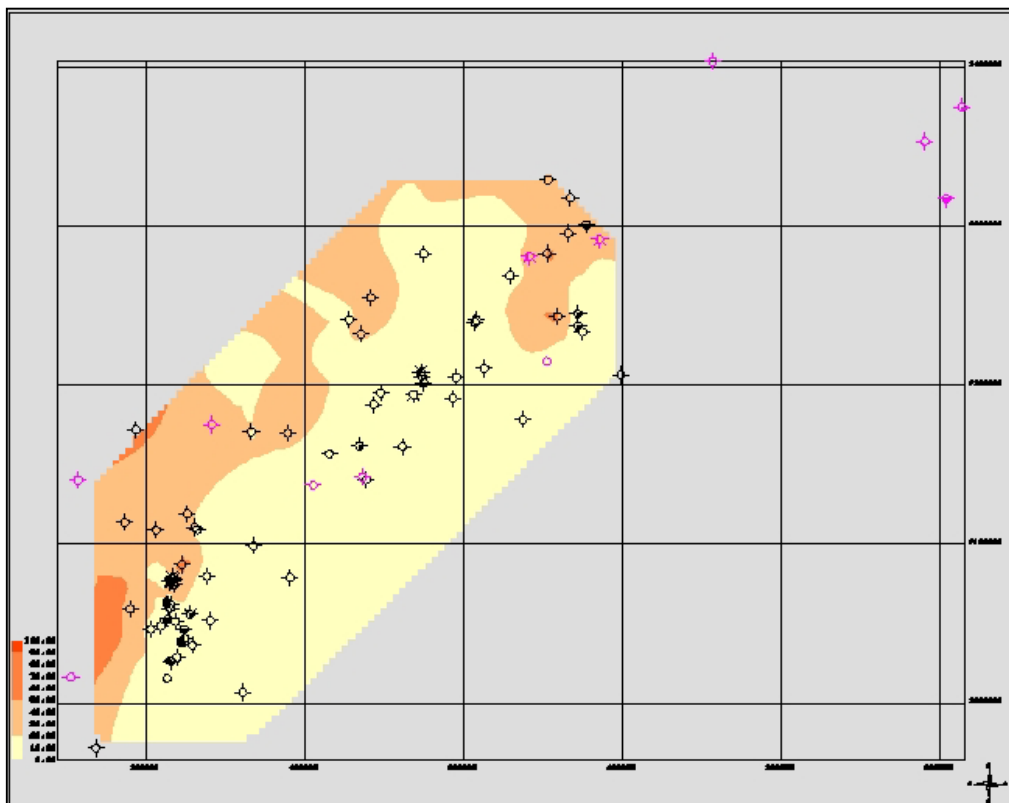


Figura 4.9 – Mapa de percentual não normalizado dos arenitos.

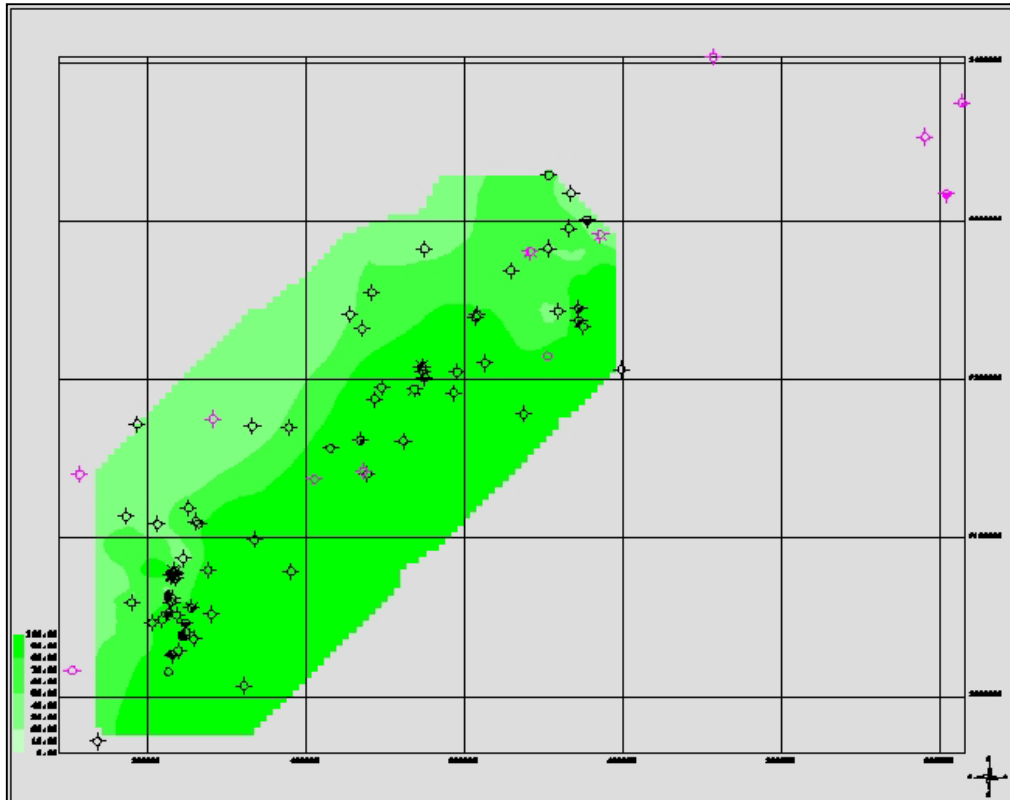


Figura 4.10 – Mapa de percentual não normalizado dos pelitos.

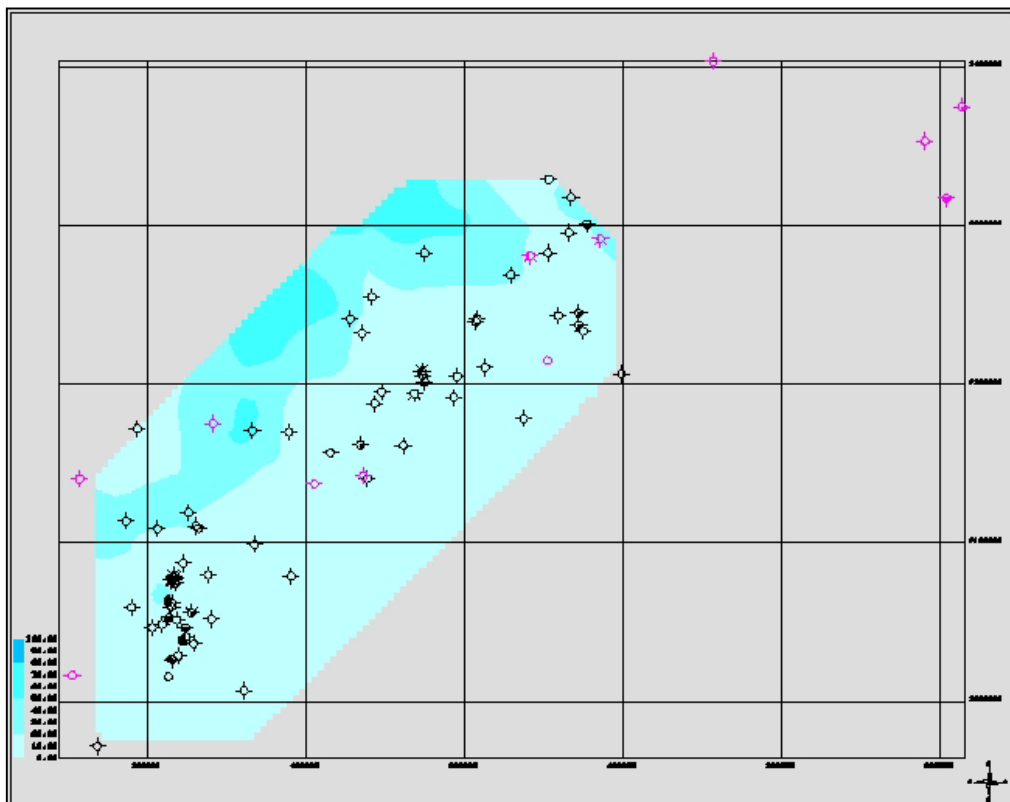


Figura 4.11 – Mapa de percentual não normalizado dos carbonatos.

Os *grids* de percentuais são então duplicados a fim de se aplicar uma normalização nos nós, garantindo-se, assim, que todos os pontos não nulos recaiam sobre o plano diagonal do diagrama triangular. Isto significa dizer que para estes novos *grids*, o somatório das três variáveis, em cada nó, é igual a 100.

As Figuras 4.12, 4.13 e 4.14, a seguir, mostram os mapas normalizados. Pode-se notar que o comportamento geral destas superfícies, se comparado com as não normalizadas, não apresenta diferenças de vulto. Isto decorre de uma boa preparação dos dados.

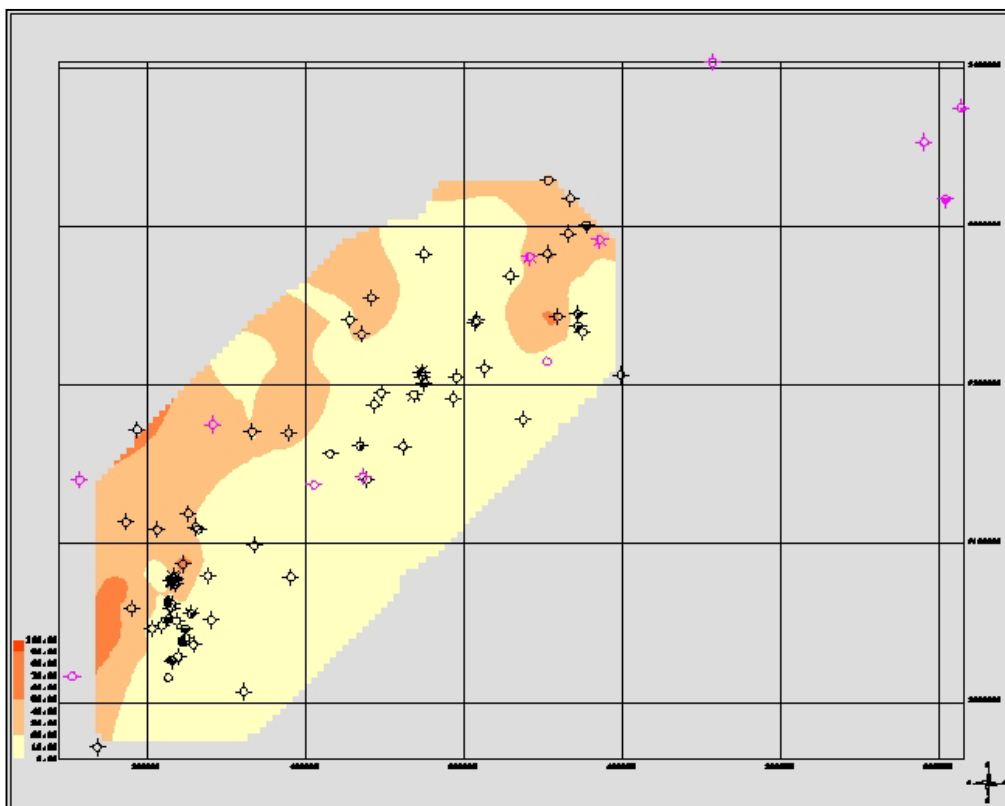


Figura 4.12 – Mapa de percentual normalizado dos arenitos.

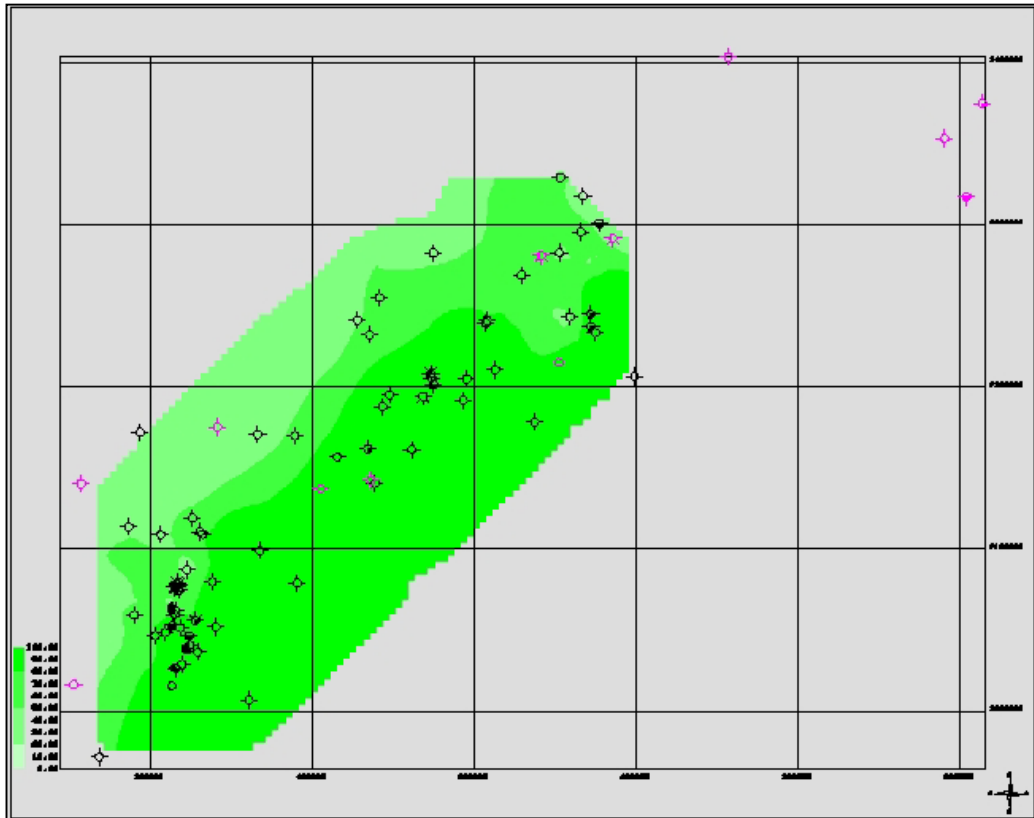


Figura 4.13 – Mapa de percentual normalizado dos pelitos.

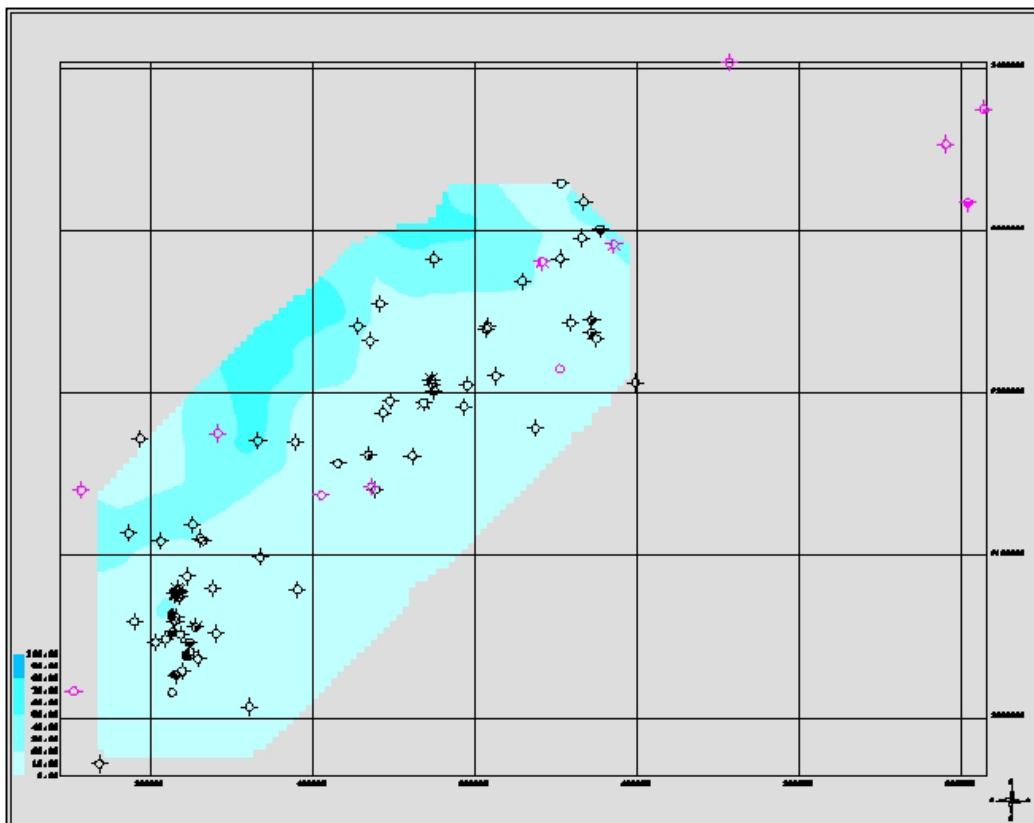


Figura 4.14 – Mapa de percentual normalizado dos carbonatos.

Uma maneira de se quantificar os efeitos produzidos pela normalização é a análise de um mapa que mostra, para cada cela, a diferença em valor absoluto do somatório dos *grids* não normalizados subtraído de 100. Este mapa é desenhado em níveis de cinza, indicando as menores diferenças nas células de cor branca e as maiores nas células de cor preta (Figura 4.15).

As regiões mais escuras, portanto, com maior índice de erro, acusam problemas causados pelo processo de estimação de superfícies e/ou a ausência de litologias no intervalo estratigráfico.

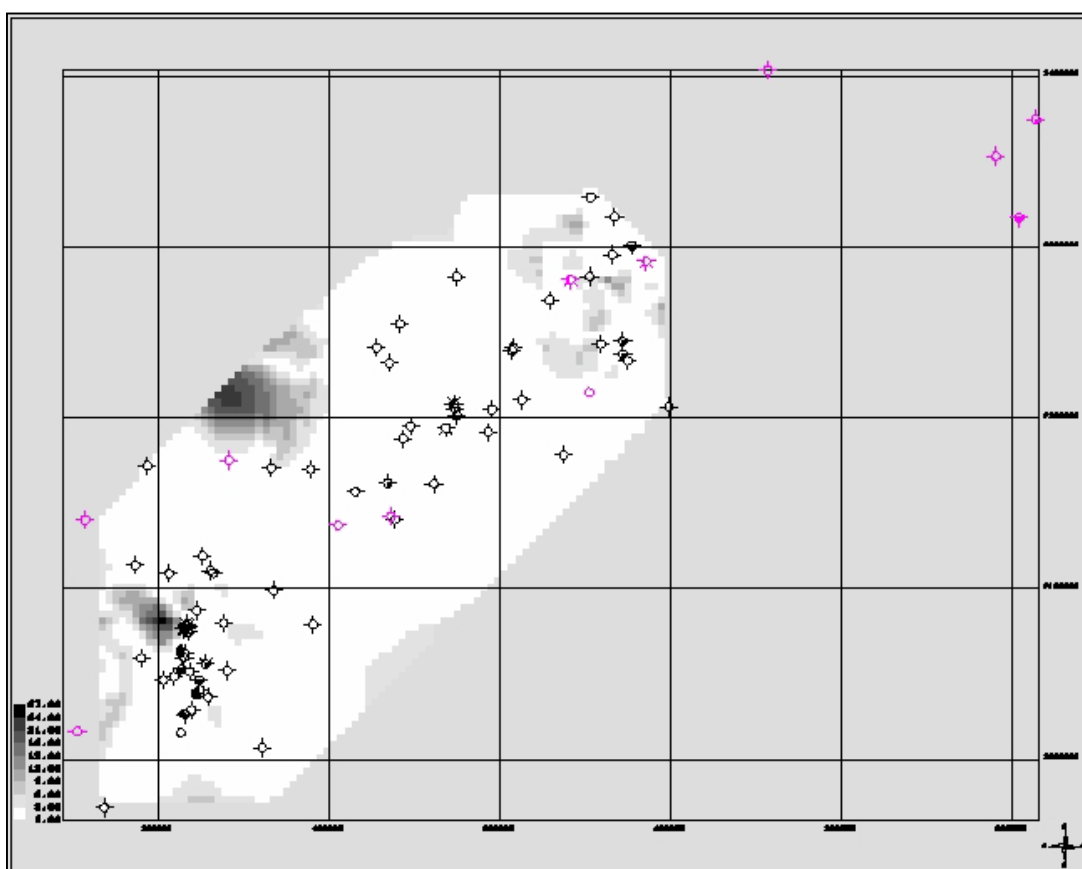


Figura 4.15 – Mapa de erro.

Os mapas de isólitais quantificam as espessuras de cada variável de classificação. Estas informações são úteis para interpretação e compreensão das fácies da região e servem, basicamente, para auxiliar o intérprete durante a edição do mapa de litofácies.

As Figuras 4.16, 4.17 e 4.18 ilustram as espessuras do intervalo estratigráfico para cada uma das variáveis de classificação.

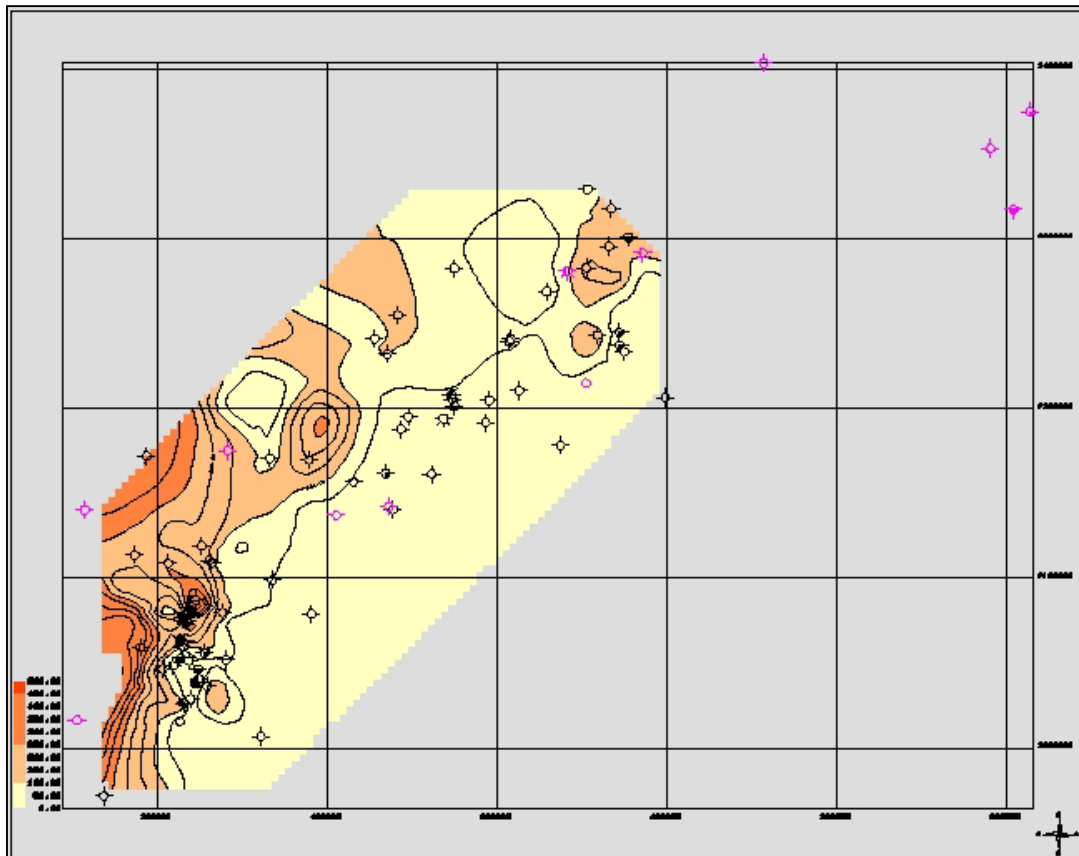


Figura 4.16 – Mapa de isólitais dos arenitos.

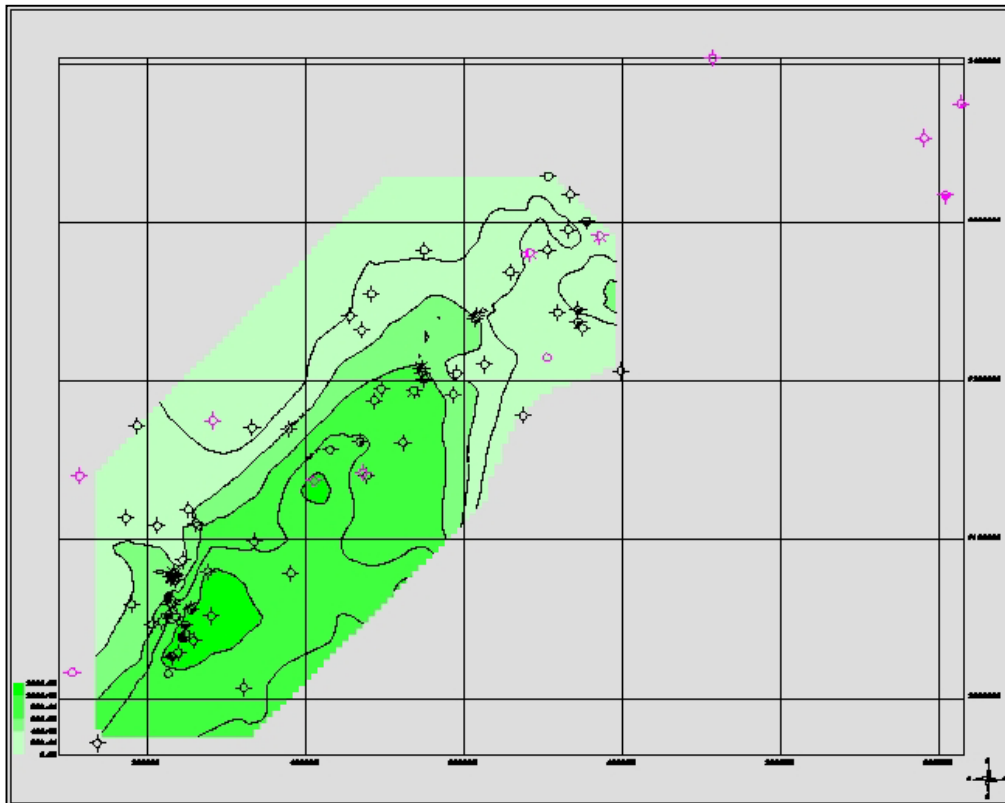


Figura 4.17 – Mapa de isólita dos pelitos.

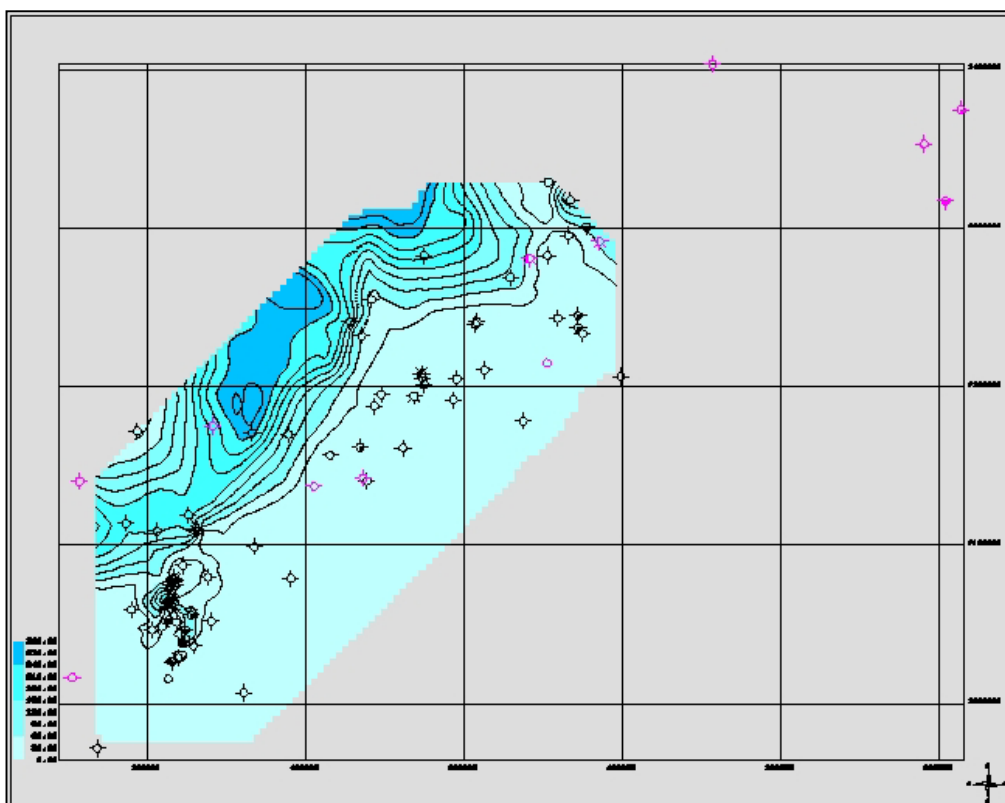


Figura 4.18 – Mapa de isólita dos carbonatos.

4.4 Classificação Litofaciológica

De posse das superfícies de percentuais – variáveis do sistema de classificação – o passo seguinte é a geração do mapa de litofácies. Com base nos três *grids* de percentuais normalizados e no modelo de classes escolhido, o processo de classificação litofaciológica gera uma nova malha. Os nós desta malha possuem valores *dummy* em locais em que não se dispõe de dados para classificação, e valores inteiros, que correspondem aos códigos das classes do diagrama triangular nos locais onde existem os três percentuais necessários à classificação.

O modelo de classes *default* do sistema (Figura 4.19) é uma variação ou extensão do modelo proposto por Krumbein (1948). Este modelo, citado antes, foi concebido por Santos (2003) e procura mostrar os principais sistemas deposicionais.

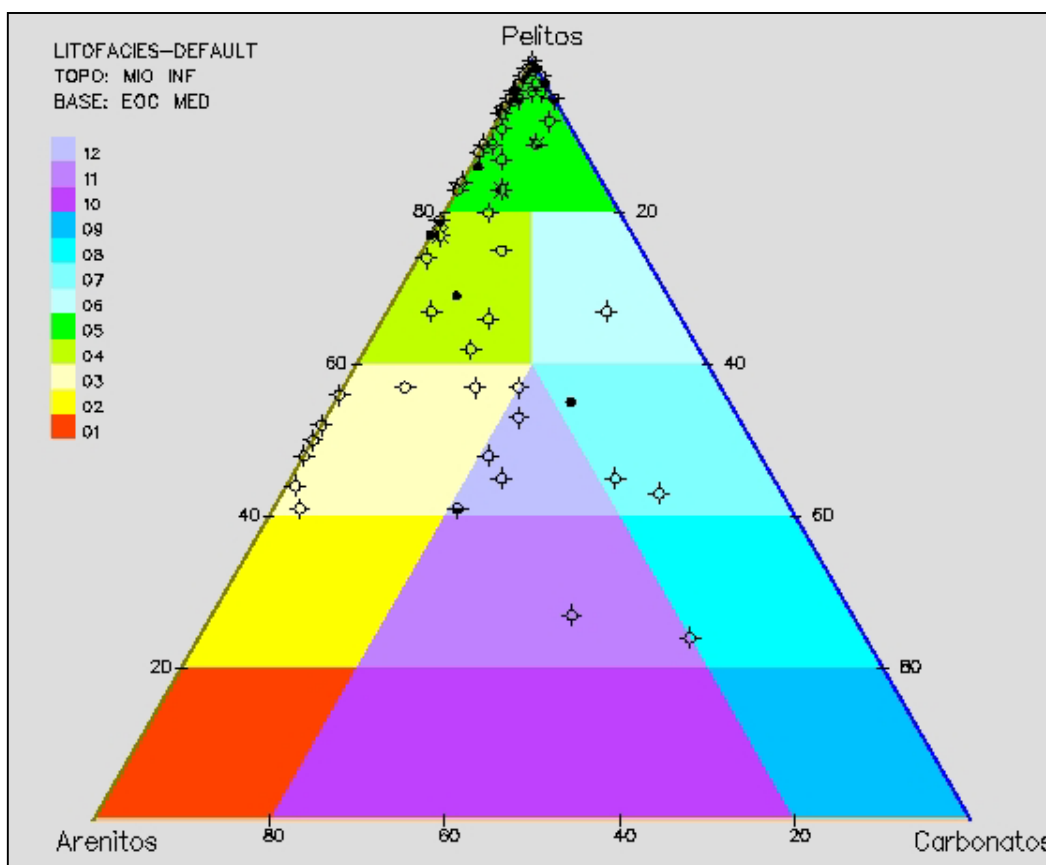


Figura 4.19 – Modelo de classes arenitos-pelitos-carbonatos.

A Figura 4.20 retrata uma das principais saídas do sistema. Como já mencionado nos capítulos anteriores, os mapas litofaciológicos mostram relacionamentos entre diferentes quantidades de rochas, distribuídas sobre determinada área.

Analisando a saída gerada, deduz-se que, na parte mais profunda da bacia mapeada – à direita da figura – a unidade estratigráfica é predominantemente pelítica, representada pela coloração verde e código de classe igual a 5. Na parte mais rasa, à esquerda, têm-se entradas de carbonatos – representada pela coloração azul – e códigos de classe 8 e 9. Na parte mais ao sul e ao extremo norte, têm-se algumas entradas de misturas de areias e pelitos – representadas em tons de amarelo – e códigos de classe 3 e 4.

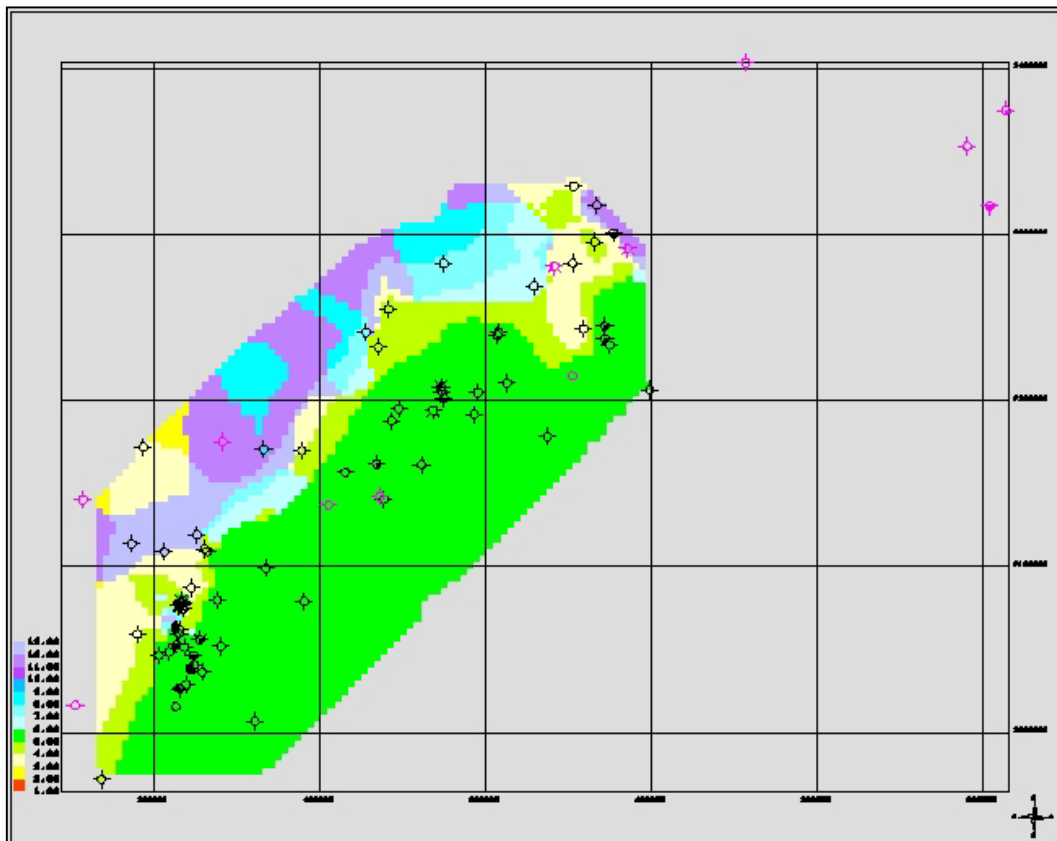


Figura 4.20 – Visualização bidimensional da distribuição litofaciológica.

O algoritmo, em linguagem natural, do processo de Classificação Litofaciológica consiste dos seguintes passos:

- Para cada classe do diagrama triangular corrente, faça
 - Montar polígono 3D com as coordenadas dos percentuais de cada vértice da classe
 - Montar polígono 2D, aplicando em cada vértice uma projeção isométrica
 - Armazenar polígono 2D da classe
- Fim-para
- Criar *grid* com os nós iguais a *dummies*
- Para cada nó do *grid*, faça
 - Obter ponto 3D do nó a partir dos *grids* de percentuais normalizados
 - Se o ponto for diferente de *dummy*, então
 - Levar ponto para o plano 2D, via projeção isométrica
 - Enquanto não achou classe do nó, faça
 - Testar pertinência do ponto contra a classe, via algoritmo de pertinência de ponto em polígono
 - Se o ponto pertence à classe, atribuir código da classe ao nó
 - Fim-Enquanto
 - Fim-se
- Fim-para
- Fim classificação litofaciológica

4.5 Edição de Malhas

A Edição de Malhas fornece ao intérprete um conjunto de funcionalidades destinadas à alteração do mapa de litofácies. Nesta etapa, pode-se inserir e/ou alterar fácies em função do conhecimento de que se dispõe da área. O intérprete interage com o sistema introduzindo informações derivadas de sua experiência profissional. O contexto geológico é analisado e modificado, se necessário, de forma a adequar as litofácies modeladas a um sistema de deposição compatível com a visão particular do geólogo.

Foram desenvolvidas três funcionalidades: inserção de poços; inserção de litofácies; e alteração de classes. Na implementação destas operações, utilizou-se uma estrutura de dados em pilha das ações executadas sobre o mapa, permitindo que, a qualquer momento, a edição seja desfeita (operação de *undo*).

A inserção de poços funciona como um controlador pontual do processo de geração de superfícies. O intérprete insere um ponto e sua respectiva classe, alterando todos os *grids*, tanto os de percentuais, quanto os de isólitais, e, conseqüentemente, o de litofácies. A Figura 4.21 ilustra a inserção de três poços na região mais profunda do mapa – à direita.

Na inserção de litofácies, o intérprete introduz uma nova feição no mapa ou estende uma feição existente. O procedimento consiste na definição de um polígono e sua classe. A Figura 4.22 mostra a expansão da área pelítica, introduzida na região profunda e ao norte do mapa de litofácies.

A última operação de malhas, a alteração de classes, é responsável por alterações globais que afetam todo o mapa. Pode-se substituir uma classe que ocorre em uma região por outra classe. O intérprete identifica via *mouse* a classe que deseja substituir, e em seguida informa ao sistema a nova classe. Na Figura 4.23, as ocorrências de carbonatos – com código igual a 9 – foram alteradas para areias, de código 2.

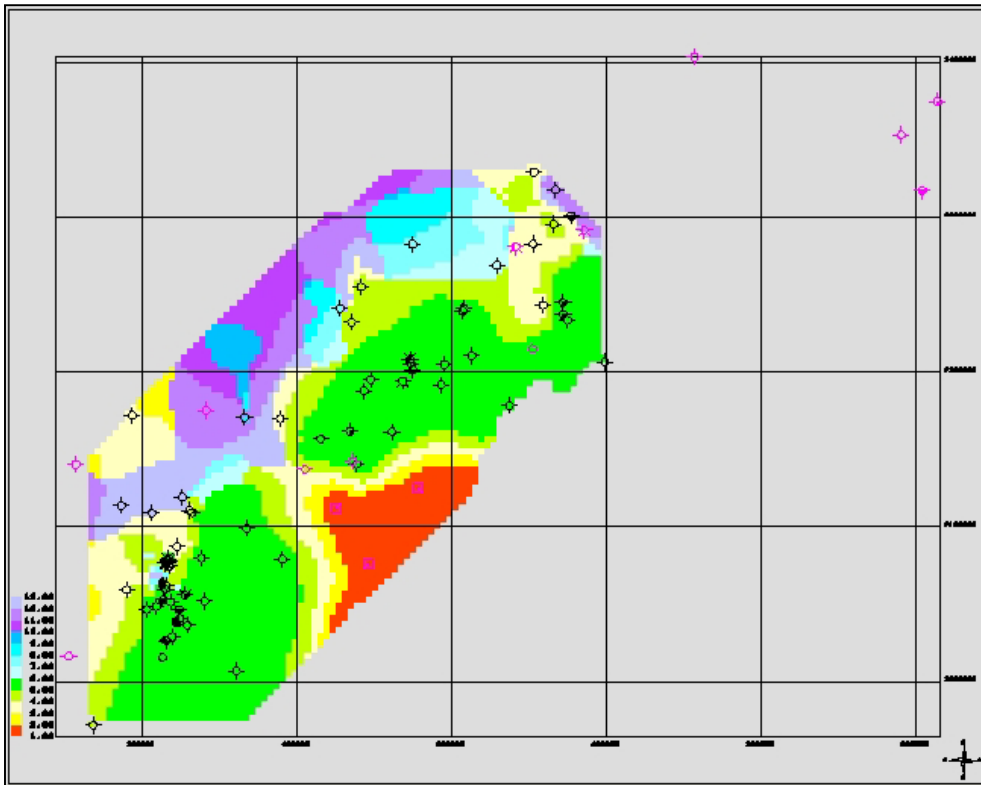


Figura 4.21 – Inserção de poços.

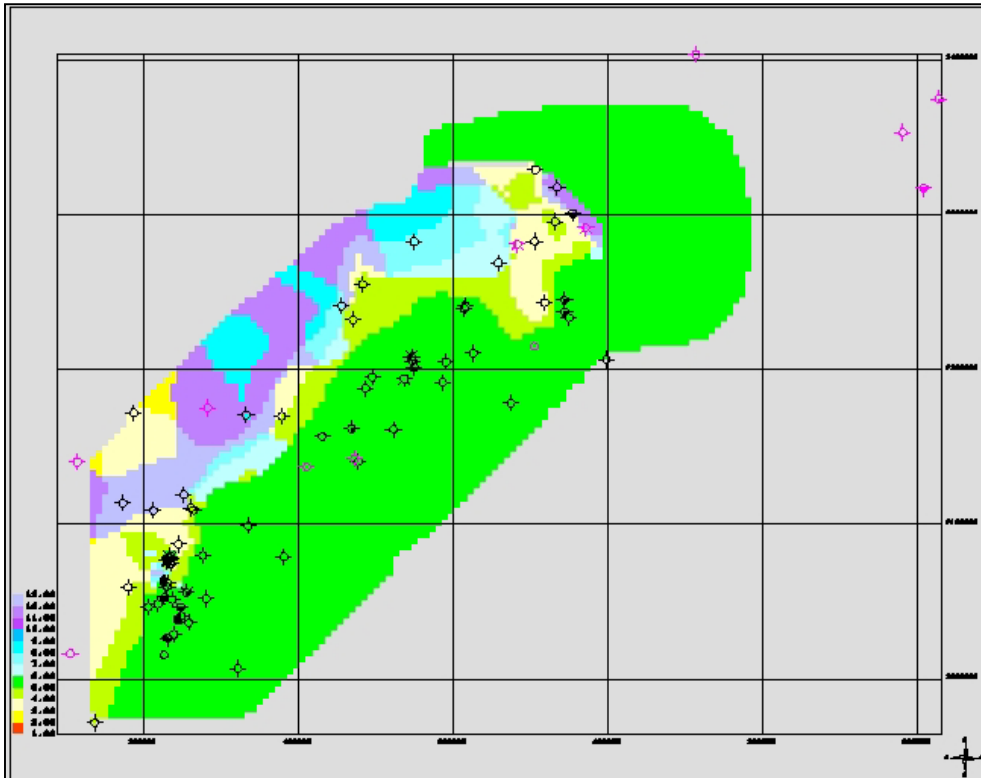


Figura 4.22 – Inserção de litofácies.

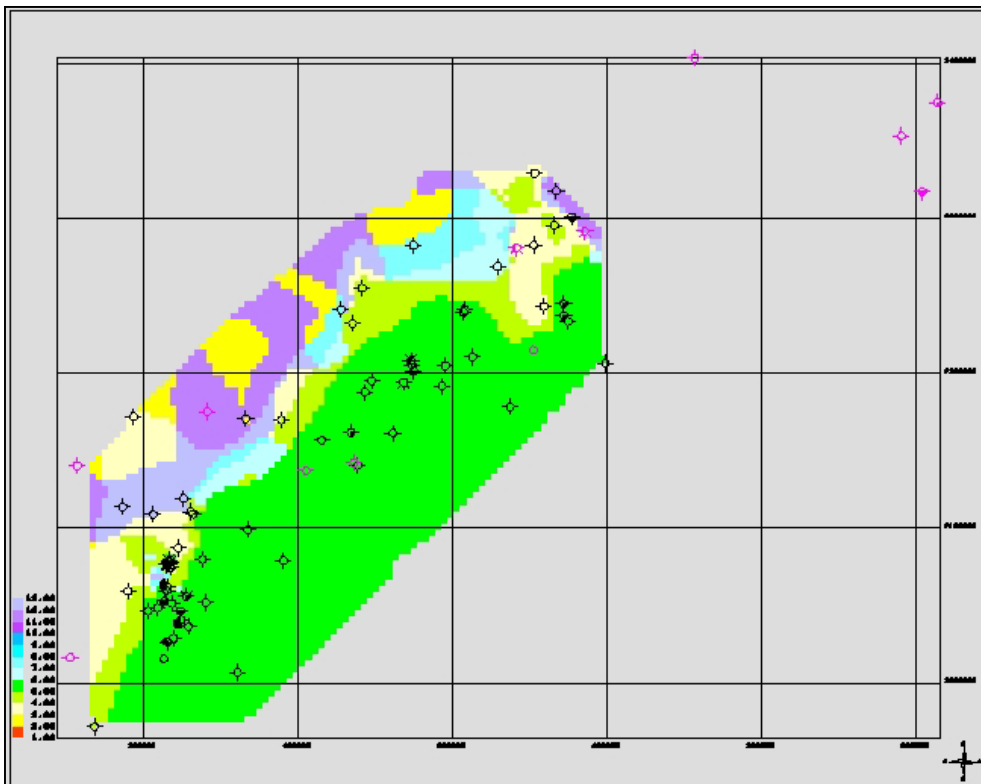


Figura 4.23 – Alteração de classes.

4.6 Geração de Volumes

Na Geração de Volumes, o objetivo principal é detalhar a unidade estratigráfica em estudo. Até o presente momento, o intervalo foi tratado como um todo, mostrando feições qualitativas (mapa de litofácies) e quantitativas (mapas de percentuais) sem a preocupação de relatar as distribuições das litofácies em função de suas profundidades. A geração de volumes decompõe o intervalo estratigráfico em fatias e exibe, através de diversos tipos de visualizações gráficas, as diferentes litofácies que se sobrepõem ao longo do intervalo. É como se recheássemos o interior das duas superfícies, topo e base da unidade estratigráfica, com um conteúdo litofaciológico.

A construção do volume se dá através da definição do número de fatias. As profundidades de topo e base utilizadas anteriormente no arquivo XYZ são substituídas por frações do intervalo e o processamento de modelagem do sistema litofaciológico é repetido, gerando-se novas superfícies de percentuais e um novo mapa de litofácies para cada fatia. Este modelo, agora, se refere a uma fração de tempo geológico de deposição da unidade estratigráfica e não mais a toda unidade estratigráfica.

O processamento é repetido até que se construam todos os mapas de litofácies. Cada fatia é representada por um novo mapa de litofácies. A figura 4.24 mostra o esquema de decomposição do intervalo estratigráfico. Vale ressaltar que este fracionamento é feito em termos de percentuais.

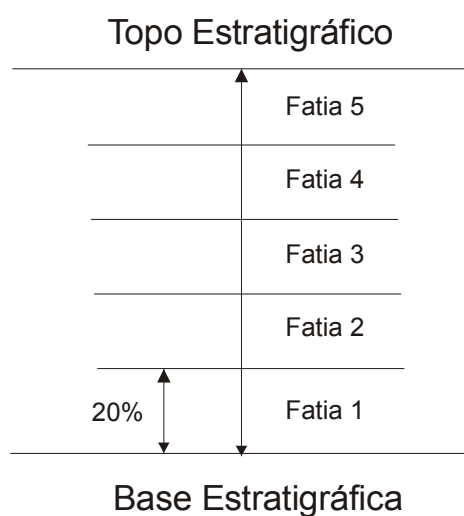


Figura 4.24 – Decomposição do intervalo estratigráfico.

Neste ponto, pode-se visualizar uma seqüência de mapas bidimensionais que descrevem, em profundidade, a distribuição vertical das litofácies. As Figuras 4.25 a 4.29 mostram uma seqüência de cinco fatias do intervalo estratigráfico.

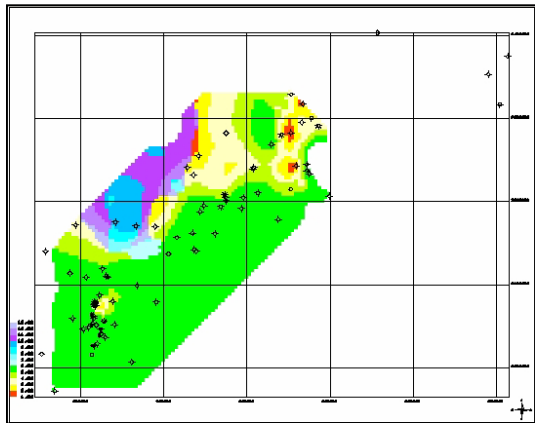


Figura 4.25 – Fatia 1.

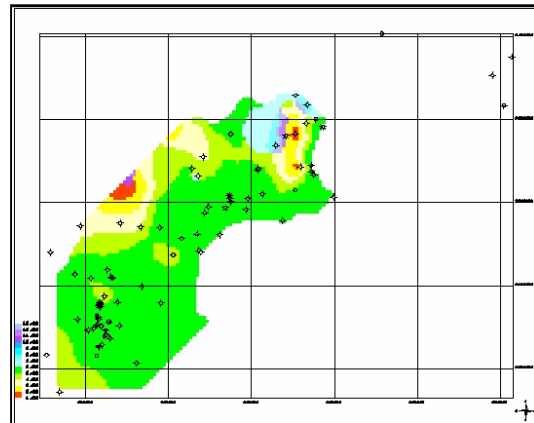


Figura 4.26 – Fatia 2.

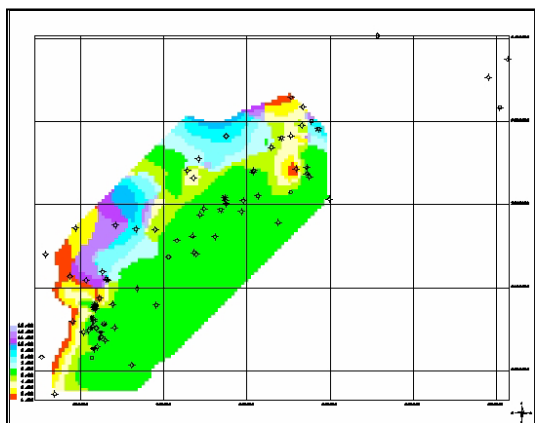


Figura 4.27 – Fatia 3.

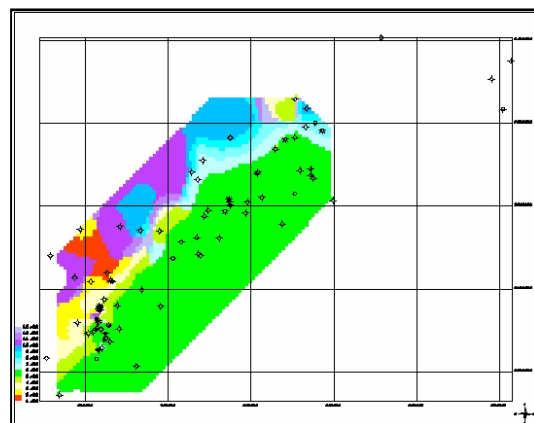


Figura 4.28 – Fatia 4.

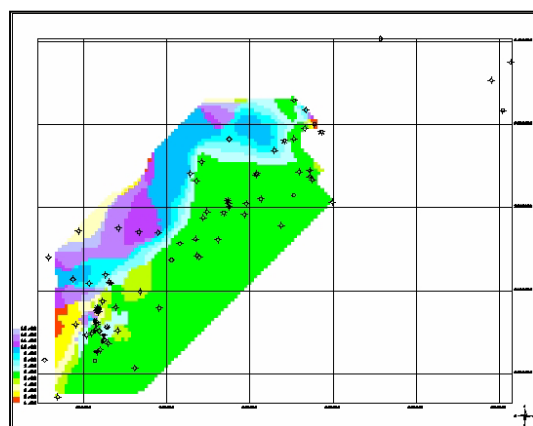


Figura 4.29 – Fatia 5.

Outra forma de visualizar a disposição vertical das litofácies é através de seções (perfis). Uma vez construído o volume, o intérprete define o caminho de corte, interagindo com o *mouse*. As Figuras 4.30 a 4.35 mostram três seções para um volume de cinco fatias.

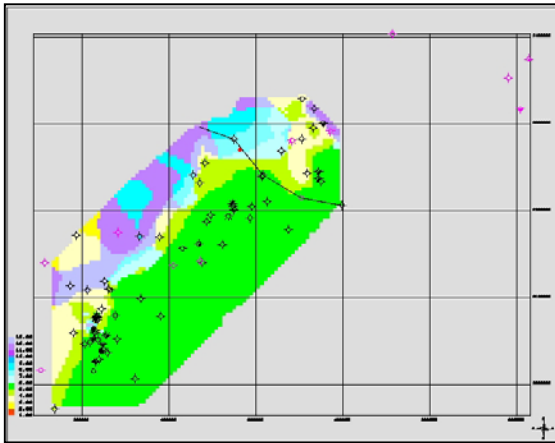


Figura 4.30 – Direção da seção *dip* 1.

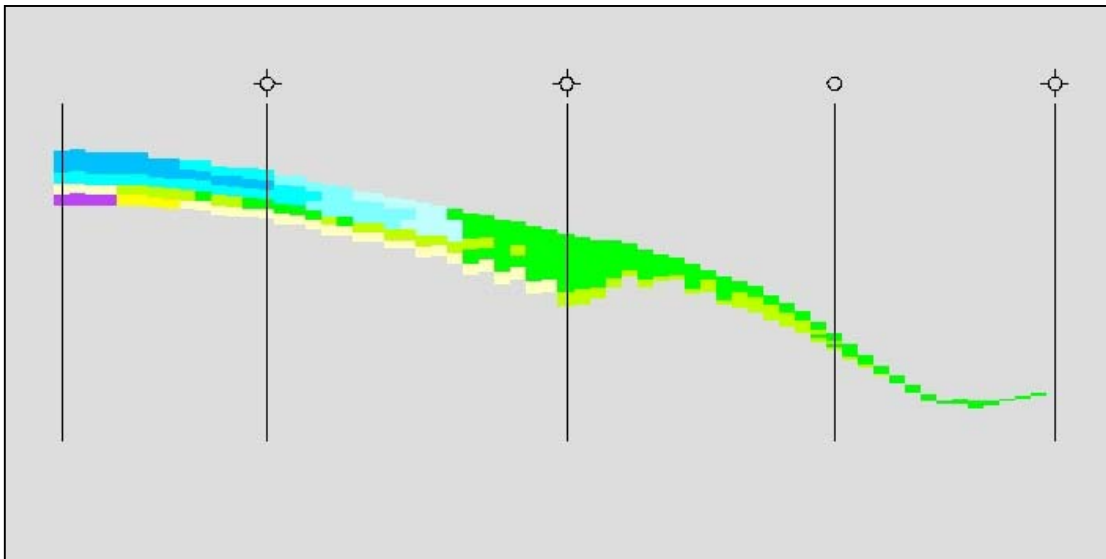


Figura 4.31 – Seção *dip* 1.

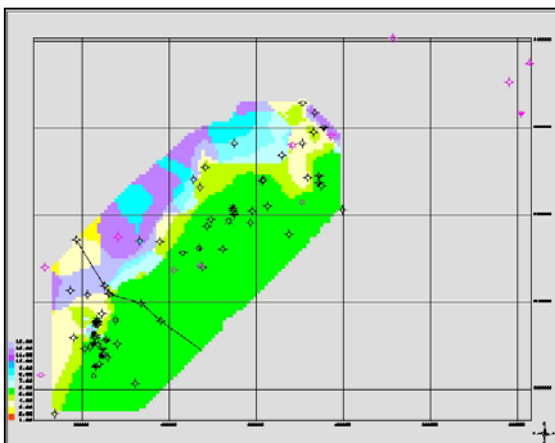


Figura 4.32 – Direção da seção *dip* 2.

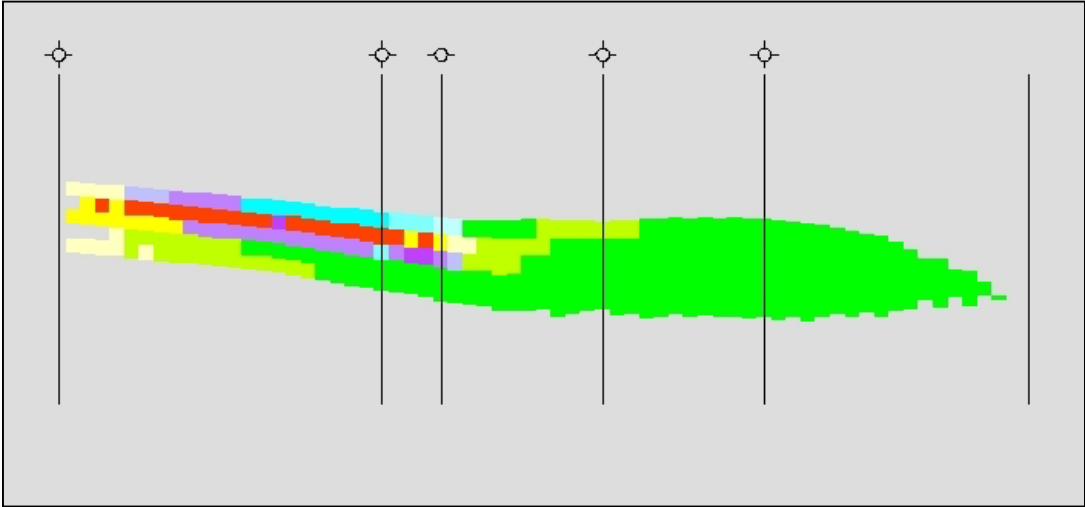


Figura 4.33 – Seção *dip* 2.

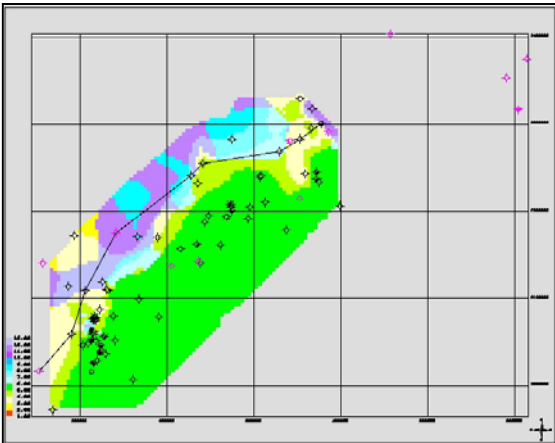


Figura 4.34 – Direção da seção *strike* 3.

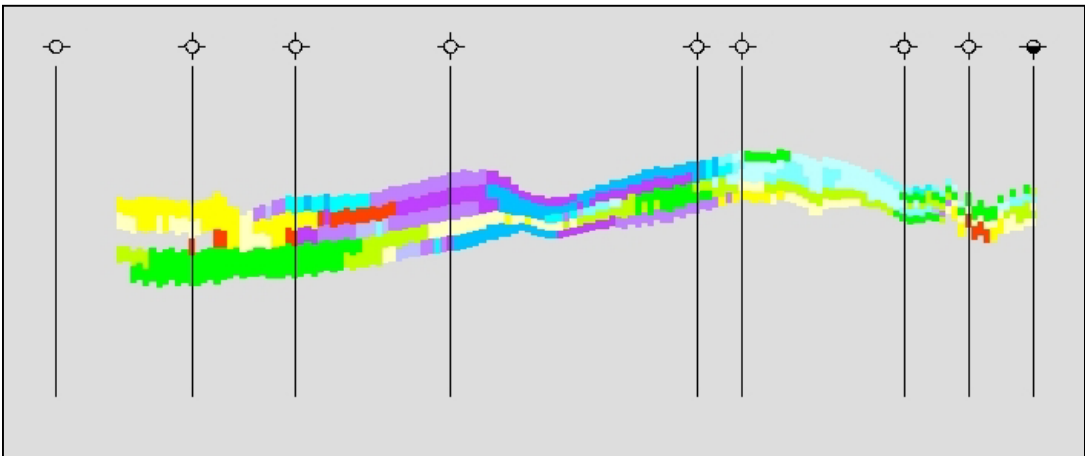


Figura 4.35 – Seção *strike* 3.

Tanto as funcionalidades de geração de seções, quanto a de volumes, requerem a modelagem de superfícies litofaciológicas de cada uma das fatias, assim como as respectivas geometrias dos intervalos de cada fatia. Isto significa dizer que a construção de uma seção ou volume que considera cinco fatias é necessária à modelagem de cinco *grids* de litofácies e seis *grids* geométricos que delimitam as espessuras de cada fatia.

A Figura 4.36 ilustra as superfícies que compõem o volume litofaciológico de uma região com cinco fatias. O volume da primeira fatia, definido entre a base estratigráfica e 20% acima da base, é perfeitamente descrito pelas superfícies Topo 1, Topo 2 e Litofácies 1. As superfícies Topo 1 e Topo 2 definem a geometria da fatia, enquanto a Litofácies 1 define o conteúdo litofaciológico de todo o intervalo. O volume da segunda fatia, definido sobre o intervalo de 20% e 40% a partir da base estratigráfica, é descrito pelas superfícies Topo 2, Topo 3 e Litofácies 2, e assim são modelados, sucessivamente, todos os volumes de cada fatia. Um detalhe importante é que todos os *grids* envolvidos no processamento possuem as mesmas características geométricas, ou seja, possuem as mesmas origens, mesmos tamanhos de células, número de linhas e número de colunas.

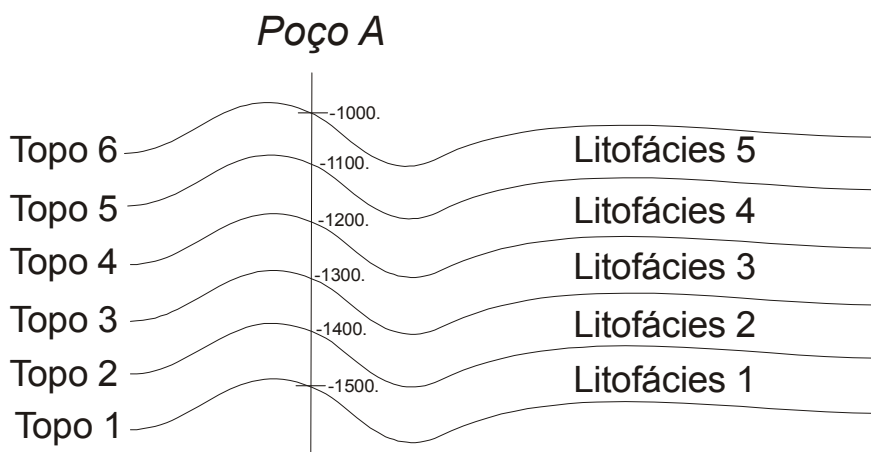


Figura 4.36 – Superfícies envolvidas na geração de seções e volumes.

A geração de cada um dos *grids* de topo de fatia se dá através das cotas de topo e base da unidade estratigráfica, contidas no arquivo XYZ. Para cada fatia, o valor de Z que define o topo da fatia em um poço é obtido interpolando-se linearmente o intervalo estratigráfico. Se um poço possui, por exemplo, um intervalo estratigráfico correspondente a -1000 e -1500, o topo da fatia de 20% acima da base estratigráfica é

definido pela cota -1400. Uma vez montado o conjunto de pontos XYZ de uma fatia, executa-se o algoritmo de estimação de superfície e gera-se o *grid* de topo que irá delimitar uma fração da unidade estratigráfica.

Esse conjunto de superfícies associadas a uma função, extremamente simples, que dada uma coordenada XYZ, devolve a litofácia correspondente, se constitui na base da modelagem tridimensional apresentada neste estudo.

O problema da construção de seções é tratado no sistema como o de exibição de uma seqüência de painéis ou planos contíguos. Cada painel é delimitado por dois pontos de inflexão. A Figura 4.37 apresenta um exemplo de seção com três pontos de inflexão (I1, I2 e I3), e, conseqüentemente dois painéis. Os painéis são subdivididos em células verticais e a coloração de cada célula que equivale a uma classe do diagrama ternário é calculada em função da coordenada de centro da célula.

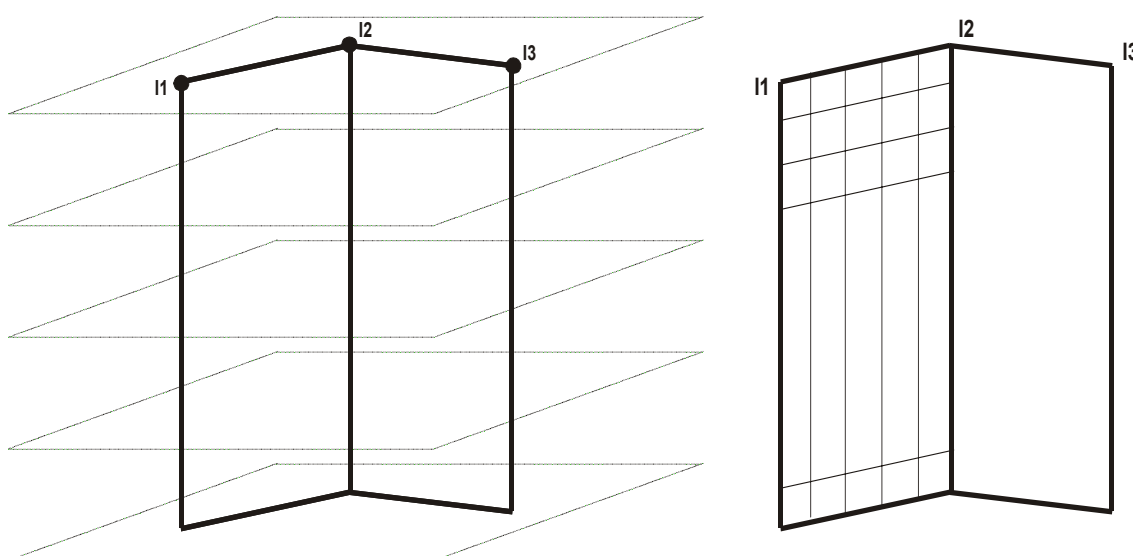


Figura 4.37 – Esquema da visualização de seções.

Todos os painéis de uma seção possuem alturas constantes com o valor de topo igual à cota máxima do *grid* do topo estratigráfico e valor de base igual à cota mínima do *grid* da base estratigráfica. Um aspecto importante é o tamanho das células verticais. Adotou-se como regra para a construção do *grid* vertical os tamanhos utilizados nas superfícies de litofácies e superfícies de topos das fatias.

O algoritmo de geração de seções consiste dos seguintes passos:

- Obter número de fatias
- Construir modelo tridimensional, superfícies litofaciológicas e superfícies dos topos das fatias
- Obter pontos de inflexão
- Montar painéis
- Calcular janela de exibição considerando os painéis definidos
- Para cada painel, faça
 - Montar *grid* vertical do painel
 - Para cada célula do *grid* vertical, faça
 - Calcular ponto médio da célula
 - Obter litofácies para o ponto médio da célula
 - Se litofácies for diferente de *null*, faça
 - Montar retângulo 3D com os cantos da célula
 - Executar projeção isométrica sobre o retângulo
 - Desenhar retângulo
 - Fim-se
- Fim-para
- Fim-para
- Desenhar inflexões
- Fim desenho seção

A última forma de visualização de fatias da unidade estratigráfica é via discretização do espaço em *voxels*. O sistema gera o recheio litofaciológico da camada geológica a ser modelada, em um formato de arquivo volumétrico, para sua posterior visualização. Os exemplos contidos nas Figuras 4.38 a 4.43 ilustram diferentes visualizações de um volume.

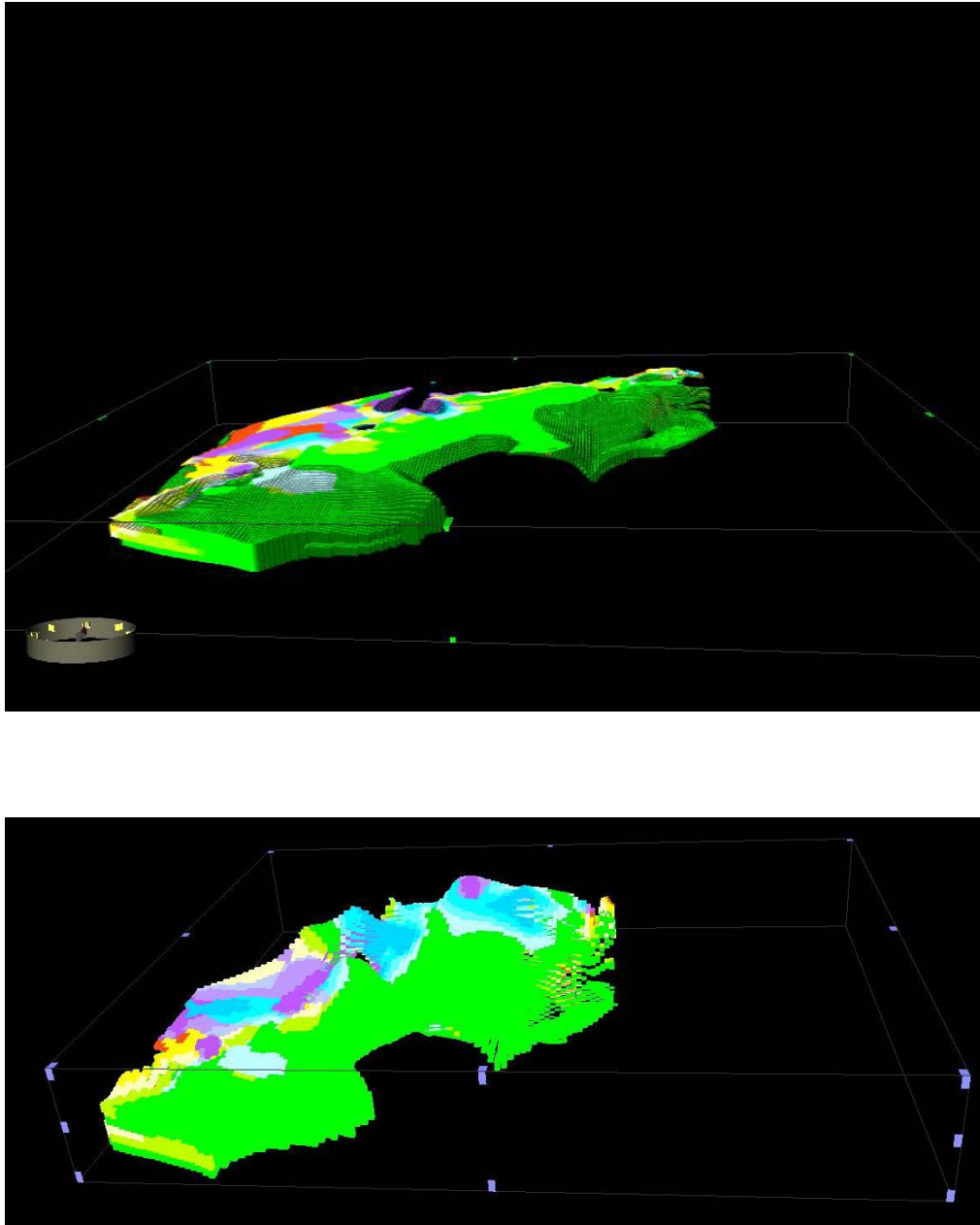


Figura 4.38 – Volumes litofaciológicos.

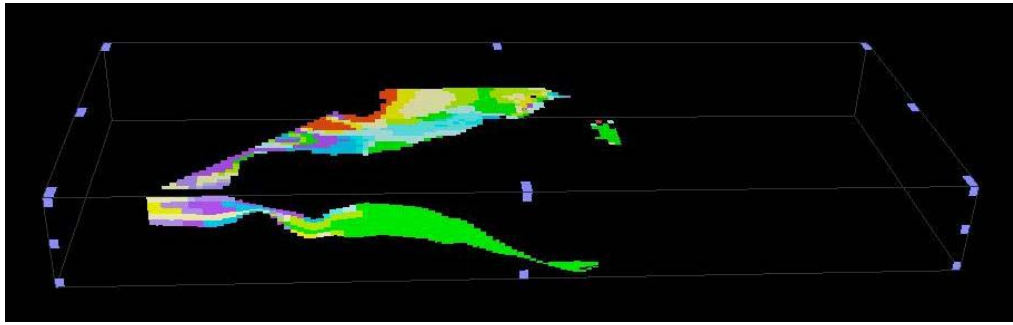


Figura 4.39 – Visualização das faces do volume.

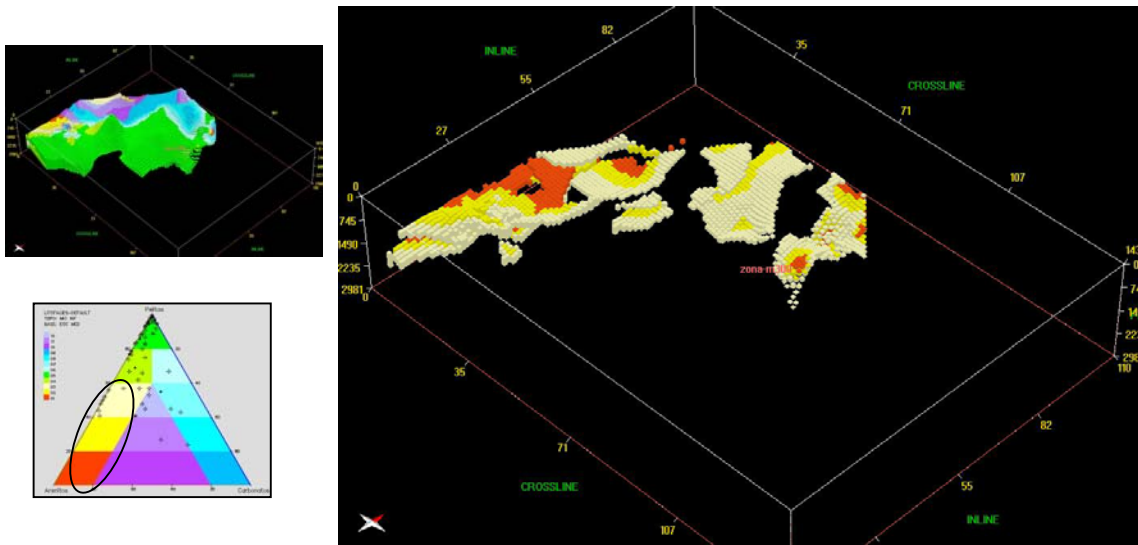


Figura 4.40 – Visualização dos arenitos.

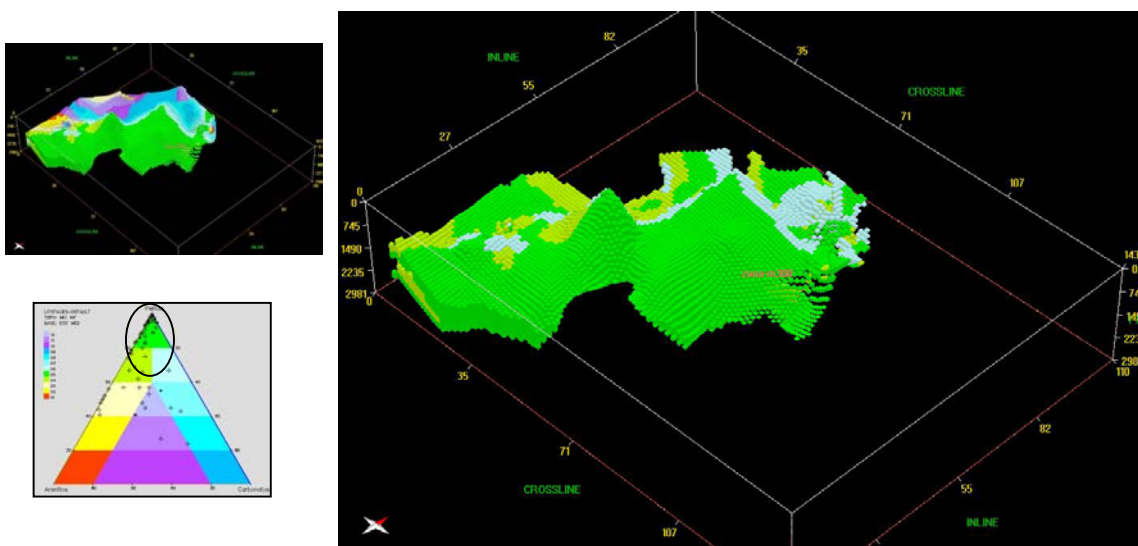


Figura 4.41 – Visualização dos pelitos.

A subdivisão do volume em *voxels* também se dá através do fatiamento da unidade estratigráfica. Em função do número de fatias estabelecidas pelo usuário, são modeladas as superfícies de litofácies que definem o conteúdo litofaciológico das fatias, assim como as superfícies de topos que delimitam as geometrias de cada fatia. O volume é então gerado em formatos de arquivos específicos que podem ser exibidos em visualizadores 3D, externos ao sistema.

Apesar de se adotar diferentes visualizadores 3D, o que impõe a necessidade de geração de diferentes estruturas de arquivos, os volumes são descritos de maneiras semelhantes, diferenciando-se, basicamente, na ordem e tamanho dos campos. Em geral, um volume é composto de um registro *header* e uma lista de *voxels*. No registro *header* são definidas as dimensões do volume, sua localização espacial e o tamanho dos *voxels*. Na lista de *voxels* são representadas as seqüências de atributos inteiros que dizem respeito às classes do diagrama ternário.

A Figura 4.44 mostra, esquematicamente, a decomposição em *voxels* de um volume destinado a alimentar um visualizador 3D. A distribuição litofaciológica tridimensional é modelada sob a forma de uma matriz tridimensional, $M(x, y, z)$, com origem no canto superior esquerdo. Cada elemento da matriz ou *voxel* define um paralelepípedo em uma dada posição no espaço associado a um atributo litofaciológico. O número de células no eixo x é o mesmo do número de colunas dos *grids* de topo e litofácies. O número de células no eixo y é o mesmo do número de linhas dos *grids* de topo e litofácies. O número de células no eixo z é definido pelo usuário.

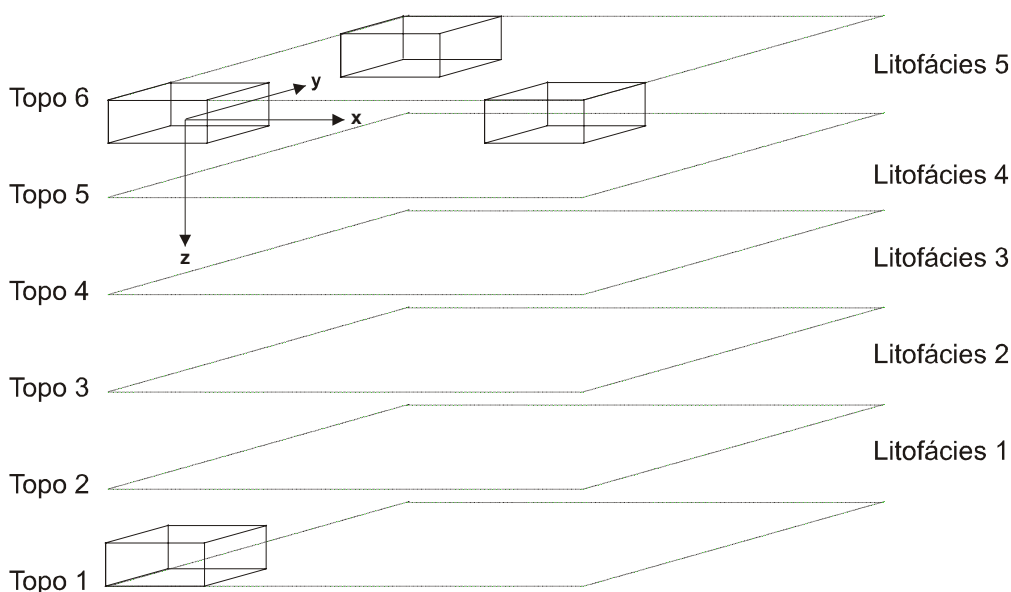


Figura 4.44 – Geração de *voxels* do volume litofaciológico.

4.7 Exportação de Dados

A Exportação de Dados estabelece um canal de comunicação entre o sistema e o mundo exterior. As informações modeladas no mapeamento de litofácies são transportadas, em diferentes formatos de arquivos, para outros ambientes computacionais a fim de apoiar as mais diversas atividades da cadeia de exploração e produção de petróleo.

Os dados exportados podem ser bidimensionais ou tridimensionais. Os bidimensionais são os mapas de percentuais, os mapas de isólitais, os mapas de litofácies e os diagramas triangulares. Os tridimensionais são os volumes gerados pelo fatiamento da unidade estratigráfica e representados por *voxels*.

Dos aplicativos que recebem dados do sistema, os que mais se destacam em termos de importância dentro do segmento de E&P são os sistemas de modelagem de bacias e de interpretação sísmica.

Grande parte dos formatos de dados exportados são formatos proprietários, não padrões, à exceção do VRML (*Virtual Reality Modeling Language*). Este formato é gerado para o mapa de litofácies sob a forma de textura aplicada sobre a geometria do topo ou da base da unidade estratigráfica (Figura 4.45).

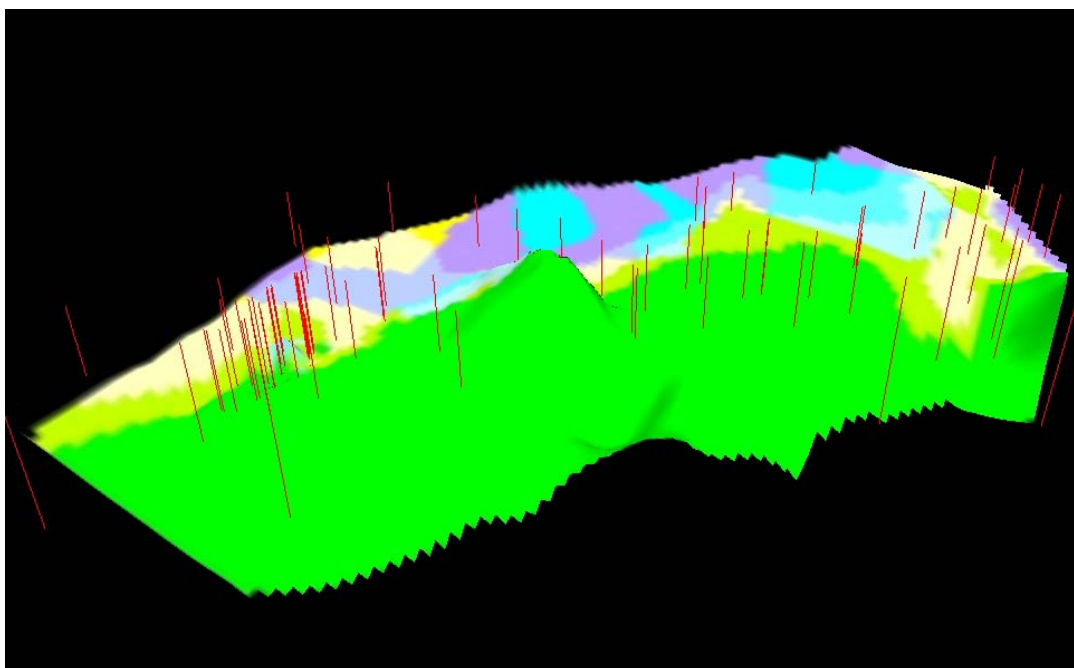


Figura 4.45 – Superfície do topo da unidade estratigráfica em formato VRML.

4.8 Estrutura de Dados LFC

A estrutura de dados denominada LFC (litofácies) tem por objetivo armazenar os modelos de classificação (diagramas ternários). Ela descreve sob a forma de listas, encadeadas ou contíguas, os diagramas ternários (Fácies) disponibilizados na modelagem litofaciológica. Cada diagrama ternário é definido por três variáveis de classificação (Variáveis) e por um grupo de classes (Classes) que subdividem geometricamente os diagramas. Deve-se entender a estrutura de dados sob a ótica de quatro entidades: Fácies, Variáveis, Rochas e Classes (Figura 4.46).

A entidade Fácies descreve os diagramas ternários existentes. O número de registros do tipo Fácies é igual ao número de diagramas ternários implementados. Tem-se um registro para o modelo de classificação litofácies *default*, outro para o razão clástica e razão areia-folhelho, outro para o modelo função quantidade de mistura e assim por diante. Os registros são identificados por um nome no campo Fácies. Cada uma das três variáveis é definida nos campos Var1, Var2 e Var3 que apontam para seus respectivos registros da entidade Variável. A subdivisão geométrica do diagrama ternário que estabelece as classes do modelo de classificação é representada por uma lista de classes, definidas nos campos Clas1, Clas2, ClasN. Cada um desses campos aponta para um registro de entidade Classe.

A entidade Variável define todas as variáveis de classificação de todos os diagramas ternários. No modelo de classificação *default*, por exemplo, têm-se as variáveis arenitos, pelitos e carbonatos. Cada uma dessas variáveis possui um registro que identifica a variável no campo Var, podendo ser, por exemplo, arenitos, e uma lista de rochas definida nos campos Roc1, Roc2, ..., RocN. Os campos Roc apontam para os registros da entidade Rocha.

Os tipos de rochas utilizados no sistema foram tratados como uma entidade, a fim de estabelecer uma independência entre o sistema e o banco de dados. A adoção desta estratégia deveu-se as constantes mudanças sofridas no banco de dados. Durante o desenvolvimento do sistema, constatou-se que os códigos das rochas do banco sofriam periódicas mudanças, assim como eram acrescentados novos tipos de rochas. A entidade é composta da descrição de todas as rochas de todas as variáveis de classificação. Cada registro possui a identificação da rocha, por exemplo, folhelho, e seu código numérico no banco de dados.

A entidade Classe descreve, geometricamente, todas as classes de todos os modelos de classificação. No modelo de classificação *default*, por exemplo, o diagrama ternário é subdividido em 12 classes. Cada uma dessas classes é delimitada por uma área, definida por uma seqüência de pontos P(Var1, Var2, Var3) que definem um polígono. Para este modelo têm-se, então, doze registros. Cada registro possui uma identificação da classe, um atributo de cor e uma lista encadeada de trincas de coordenadas, em valores de percentuais, que definem um polígono fechado.

O Apêndice A apresenta, na íntegra, o conteúdo da estrutura de dados LFC, com todos os diagramas ternários, variáveis, rochas, classes e demais atributos.

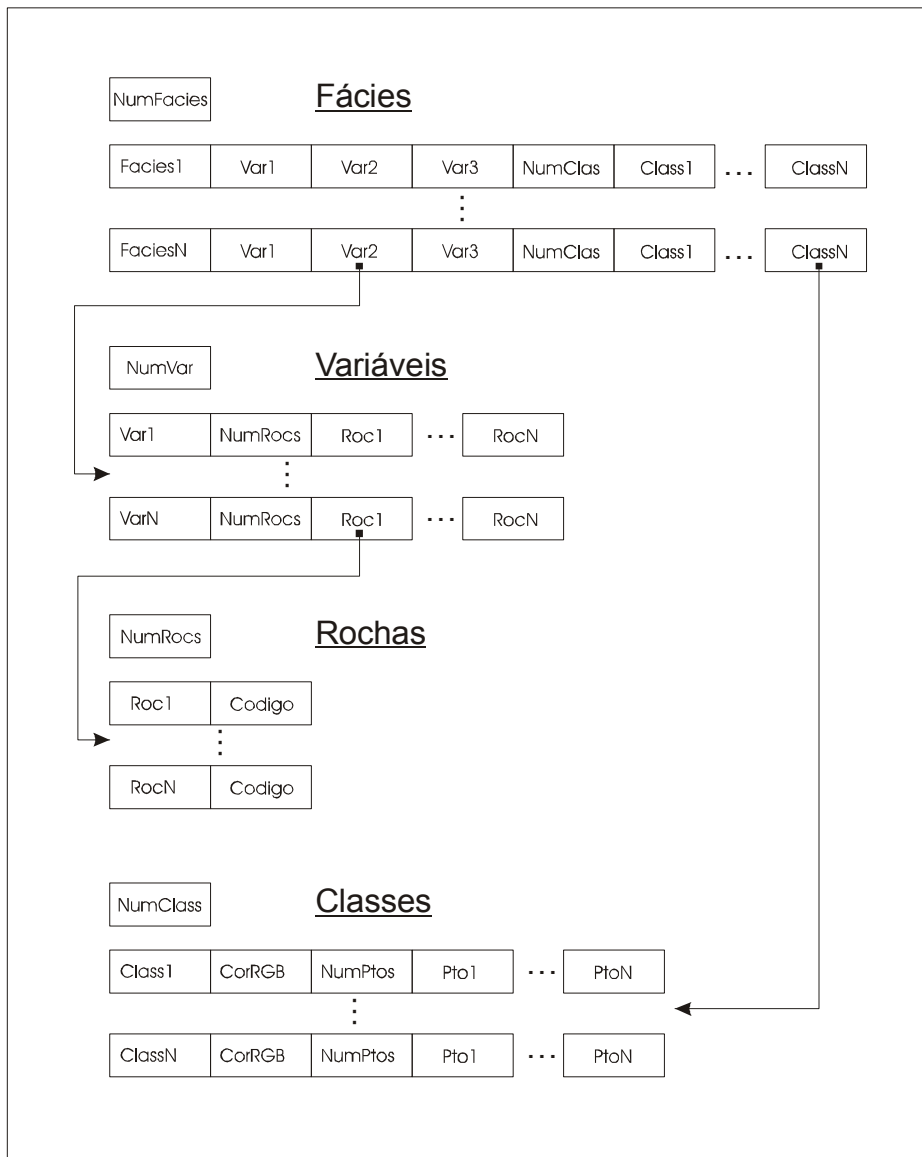


Figura 4.46 – Esquema da estrutura de dados LFC.

4.9 Interface com Usuário

A tela principal do sistema (Figura 4.47) consiste de um conjunto de opções distribuídas sobre dois tipos de elementos de interface com o usuário: barra de menu e botões. A comunicação com o usuário se dá por meio das caixas de diálogos que são apresentadas em função das opções escolhidas; da área de desenho, onde são exibidas as superfícies bidimensionais; e das áreas de mensagens, que reportam o contexto atual do processamento.

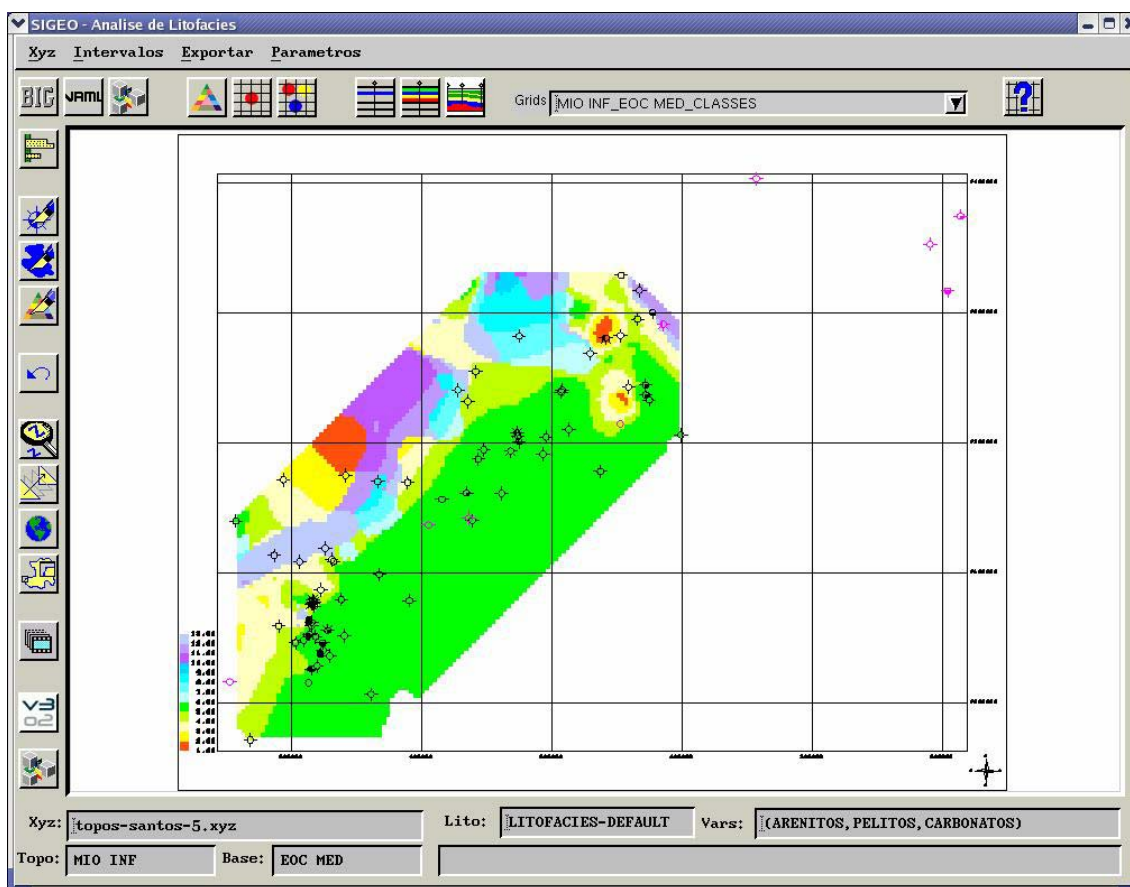


Figura 4.47 – Tela principal do sistema.

A barra de menu encontra-se organizada com quatro grupos de funcionalidades: Xyz, Intervalos, Exportar e Parâmetros. O grupo Xyz efetua operações diretas sobre estruturas de arquivos do tipo XYZ. Este grupo dispõe de três opções: seleção, consulta e alteração. Na seleção se estabelece o arquivo XYZ a ser processado. Na consulta, o arquivo XYZ corrente é exibido a fim de que os topos e bases das unidades estratigráficas sejam analisados, e a alteração permite que os dados do arquivo XYZ corrente sejam editados.

O grupo Intervalos é composto de seleção, consulta e estimação de litologias. Na primeira função, seleção, o usuário informa ao sistema a unidade estratigráfica a ser considerada no mapeamento. Na consulta é apresentada uma caixa de diálogo contendo, para o modelo de classificação corrente e unidade estratigráfica corrente, os percentuais de cada variável de classificação. Na estimação de litologias, o usuário executa o treinamento e reconhecimento de colunas litológicas.

O grupo Exportar fornece seis diferentes opções para geração de arquivos, com o objetivo de alimentar sistemas externos. São elas: Grid (formato ASCII com pontos regularmente espaçados), Vizio (volume), v3o2 (horizonte), v3o2 (volume), Gocad (horizonte) e Gocad (volume). Estas opções geram os arquivos com a distribuição litofaciológica corrente, podendo ser em duas ou três dimensões.

O último grupo da barra de menu, Parâmetros, destina-se a alterar e/ou informar os parâmetros necessários aos processos do sistema. As possíveis opções são as seguintes: *Grids*, VRML, Litofácies, *Cut-offs* de Litologias, Mapa Base e Atributos do Diagrama Ternário. Na opção *Grids*, informa-se o método de geração de superfície a ser utilizado e os parâmetros dos *grids* para a modelagem, tais como, tamanho de célula, número de linhas e colunas, raio de pesquisa e etc. Na opção VRML, se definem os objetos e atributos da cena 3D a ser gerada. Em Litofácies, é especificado o modelo de classificação, por meio da escolha do diagrama ternário, suas variáveis e as rochas de cada variável. Em *Cut-offs* de Litologias, o usuário informa os limiares dos percentuais das variáveis que são considerados no processamento. As duas últimas opções destinam-se à especificação de atributos de desenho para plotagem dos poços, quer no mapa de litofácies, quer no diagrama ternário.

Abaixo da barra de menu, encontram-se disponíveis nove botões responsáveis pela execução de algumas saídas gráficas e execução dos principais processos de modelagem, seguidos de um elemento de interface do tipo caixa de lista com os nomes das superfícies em processamento, podendo ser exibidas na área de desenho, e um último botão que, quando acionado, informa as características do *grid* corrente. Os três primeiros botões, da esquerda para a direita, gravam, respectivamente, estruturas de arquivos gráficos do tipo BIG (arquivo de desenho em formato proprietário da Petrobras), VRML e volume. Os três botões seguintes são responsáveis pela exibição do diagrama ternário em uma janela a parte, a geração das superfícies e a classificação litofaciológica. Os últimos três botões, mais à direita da janela e antes da caixa de lista de superfícies, executam, respectivamente, a exibição de uma fatia da

unidade estratigráfica, a exibição de uma seqüência de fatias, e a modelagem de seções ou perfis do volume corrente.

À esquerda da tela principal encontram-se dispostos, verticalmente, outros 12 botões. O primeiro, de cima para baixo, exibe a curva de proporção vertical de um poço selecionado pelo usuário. Os três botões imediatamente abaixo executam as funções de edição de malhas: inserção de poços, inserção de litofácies e alteração de classes. O botão abaixo deste trio, e que compõe a edição de malhas, é responsável pela operação de desfazer (undo).

Descendo ainda em linha vertical, sobre a tela principal, os quatro botões abaixo da operação de desfazer oferecem funções de exibição da área de desenho: *zoom*, translação da janela, panorâmica e *zoom* sobre *pixels*. Os últimos três botões, dispostos no canto inferior esquerdo, acionam visualizadores 3D.

5. ANÁLISE DE RESULTADOS

Este capítulo foi organizado em três seções. Na primeira, o objetivo é comparar e avaliar os mapas de litofácies gerados pelos diferentes modelos de classificação. Na segunda, é feita uma análise da distribuição litofaciológica produzida pelo sistema onde foram geradas colunas litológicas para os poços que não dispunham de dados de litologia arquivados. Na última seção, são avaliadas as principais características dos processos, dados e saídas do sistema proposto.

5.1 Modelos de Classificação

O primeiro modelo de classificação a ser analisado é o que se baseia nas relações arenitos-pelitos-carbonatos (Figura 5.1). Por ser considerado o mais importante, ele foi o que efetivamente motivou o desenvolvimento do sistema apresentado no trabalho. Antes mesmo de se implementar uma versão inicial, vários mapas haviam sido construídos em função desta classificação litológica. Os resultados alcançados com o modelo eram satisfatórios e confirmavam sua adequação às características das principais bacias sedimentares brasileiras.

Vale ressaltar que os primeiros mapas possuíam imperfeições, com concentrações excessivas de linhas de contorno nas bordas e nas fronteiras entre as classes. Isto ocorria porque o mapa de litofácies era gerado por um procedimento de estimação de superfícies não adequado ao processo. Entre duas classes distintas, definidas por diferentes códigos numéricos, por exemplo 3 e 6, o procedimento utilizado interpolava as classes 4 e 5. Este fato gerou severas críticas – no sentido construtivo, é claro – e sinalizava para um importante requisito de implementação dos procedimentos de geração do *grid* de litofácies e da modelagem e visualização bi e tridimensional.

Ambos os procedimentos não poderiam ser desenvolvidos por nenhuma técnica de interpolação. Tanto a criação do *grid* de litofácies, quanto a visualização bidimensional foram elaboradas de maneira a atender este importante requisito. Entretanto, a exibição volumétrica, feita por meio de visualizadores tridimensionais externos ao sistema, mostra, a depender do aplicativo utilizado, resultados com este tipo de deficiência. Alguns dos principais visualizadores 3D disponíveis no mercado interpolam valores entre os dados originais com o objetivo de suavizar as variações nos volumes.

Um resultado aparentemente inadequado – a princípio atribuído ao processo de classificação – é causado pela visualização, ao acrescentar contornos indesejáveis nas fronteiras das classes.

A implementação do modelo de classificação Arenitos-Pelitos-Carbonatos mostrou resultados bastante satisfatórios. Os mapas apresentam feições e distribuições geologicamente consistentes. As ocorrências de litofácies com predominância de uma variável são muito bem representadas, assim como as misturas entre duas e três variáveis.

Analisando a Figura 5.1, a área pelítica na região mais profunda da bacia reflete a geologia real da unidade estratigráfica mapeada. Na parte central da bacia são indicadas áreas bem delimitadas de misturas de pelitos e areias com a predominância de pelitos. Na parte mais rasa, vêem-se feições com misturas das três variáveis e algumas entradas com a predominância de uma variável, no caso, os carbonatos.

Um segundo modelo de classificação desenvolvido pode ser apreciado na Figura 5.2. O modelo denominado ‘mapa de *end members*’ foi criado empiricamente, com o propósito de expressar a predominância dos *end members*. O triângulo de percentuais foi subdividido em 54 classes sobre os valores múltiplos de 10%. As variáveis são as mesmas que as do modelo anterior – arenitos, pelitos e carbonatos.

No mapa gerado através deste diagrama triangular, as regiões de mistura das três variáveis foram praticamente suprimidas. As variações entre diferentes classes se apresentam suavizadas, transmitindo uma aparência visual confortável ao olhar. Apesar do efeito visual positivo, gerado pela excessiva decomposição do triângulo de classes, com cores formando escalas em *dégradé* em cada variável, o mapa esconde importantes feições caracterizadas pelas misturas de duas e três variáveis.

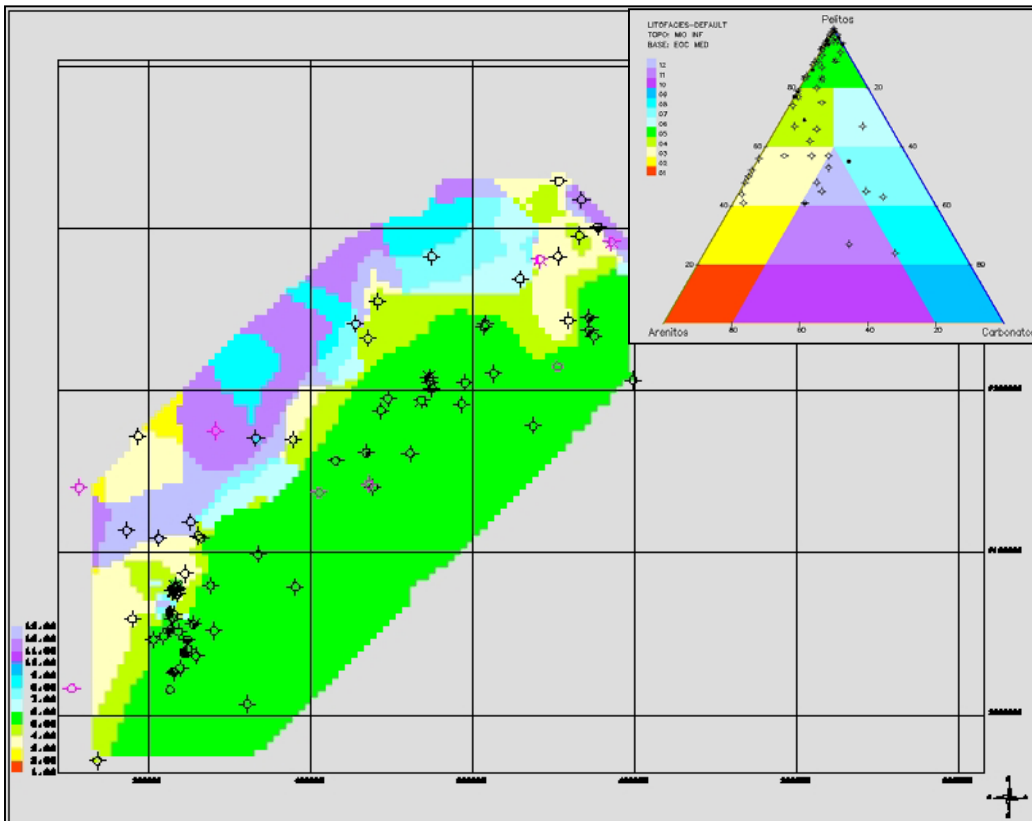


Figura 5.1 – Resultado da classificação Arenitos-Pelitos-Carbonatos.

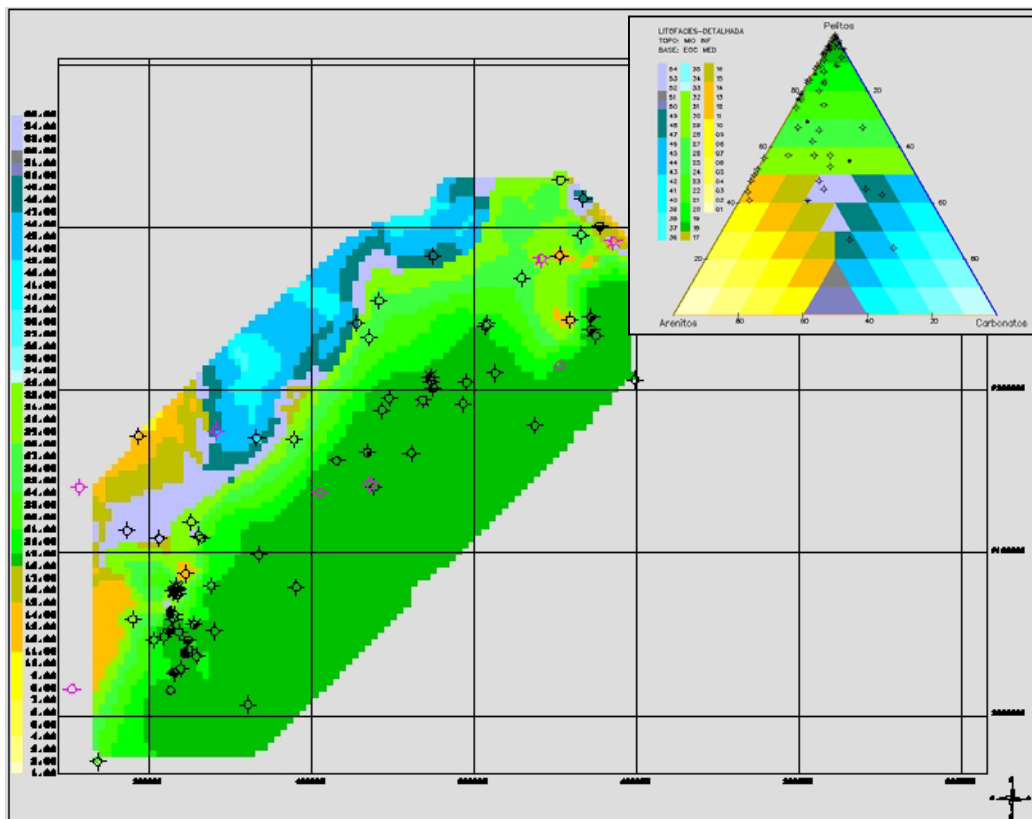


Figura 5.2 – Resultado da classificação ‘mapa de *end members*’.

Um terceiro modelo de classificação disponibilizado no sistema subdivide o espaço de classes (diagrama ternário) em função de alguns valores notáveis de razões areia-folhelho e razão clástica, Krumbein (1948). A Figura 5.3 mostra um mapa de litofácies gerado para a mesma área e mesma unidade estratigráfica do modelo anterior, considerando-se, também, as mesmas variáveis de classificação – arenitos, pelitos e carbonatos.

No mapa abaixo, os sistemas siliciclásticos, que correspondem à aresta da esquerda do diagrama ternário, e os carbonáticos, definidos pela aresta da direita do diagrama, encontram-se bem representados. Se comparadas ao modelo anterior, verifica-se que as fácies geradas para estes dois sistemas deposicionais foram dilatadas, enquanto que as dos sistemas mistos – responsáveis pela representação de misturas das três variáveis, foram completamente eliminadas.

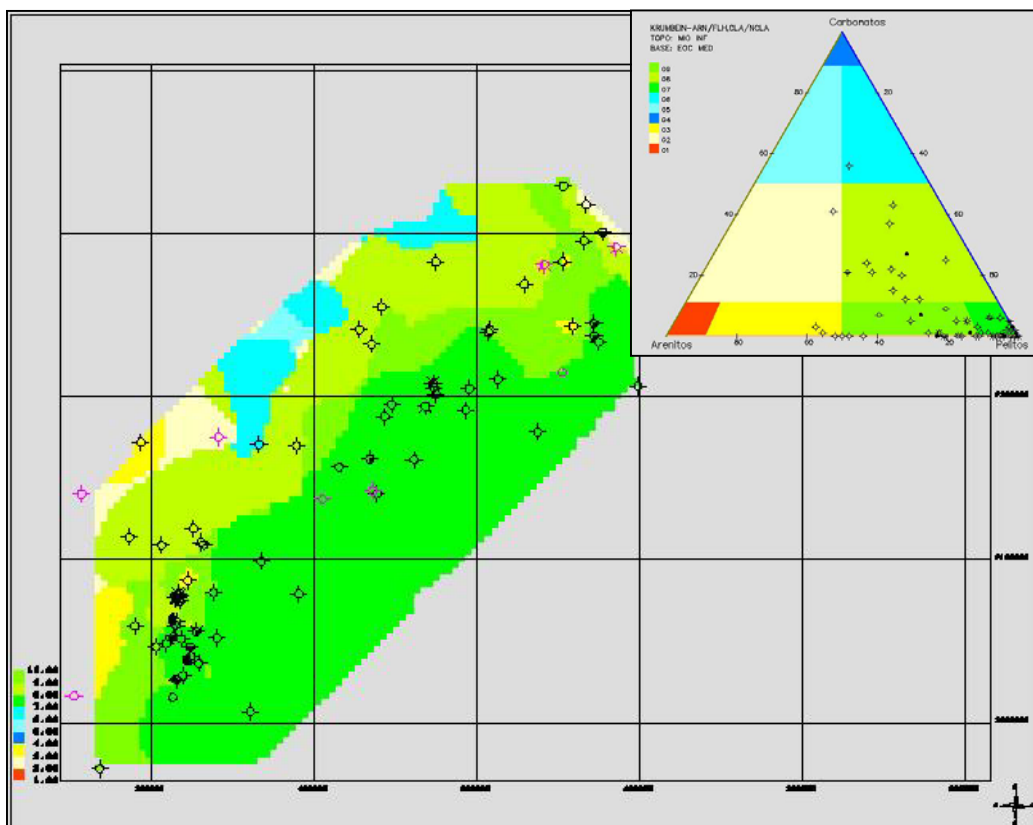


Figura 5.3 – Resultado da classificação de Krumbein (1948).

Um quarto modelo de classificação implementado subdivide o diagrama ternário em sete classes, fazendo uso da função quantidade de mistura (Pelto, 1953). A Figura 5.4 ilustra um mapa de litofácies gerado para a mesma área e mesma unidade estratigráfica do primeiro modelo, considerando-se, também, as mesmas variáveis de classificação – arenitos, pelitos e carbonatos.

No mapa produzido pela classificação de Pelto, os sistemas siliciclásticos, que correspondem à aresta da esquerda do diagrama ternário, os carbonáticos, definidos pela aresta da direita, e o misto, delimitado pela região central do diagrama, encontram-se relativamente bem representados. Tomando-se como referência o primeiro modelo de classificação, verifica-se que as fácies definidas por duas misturas com a predominância de uma delas foram distribuídas entre as classes dos *end members* e a central. A redução do número de classes enfatiza o caráter qualitativo do mapeamento.

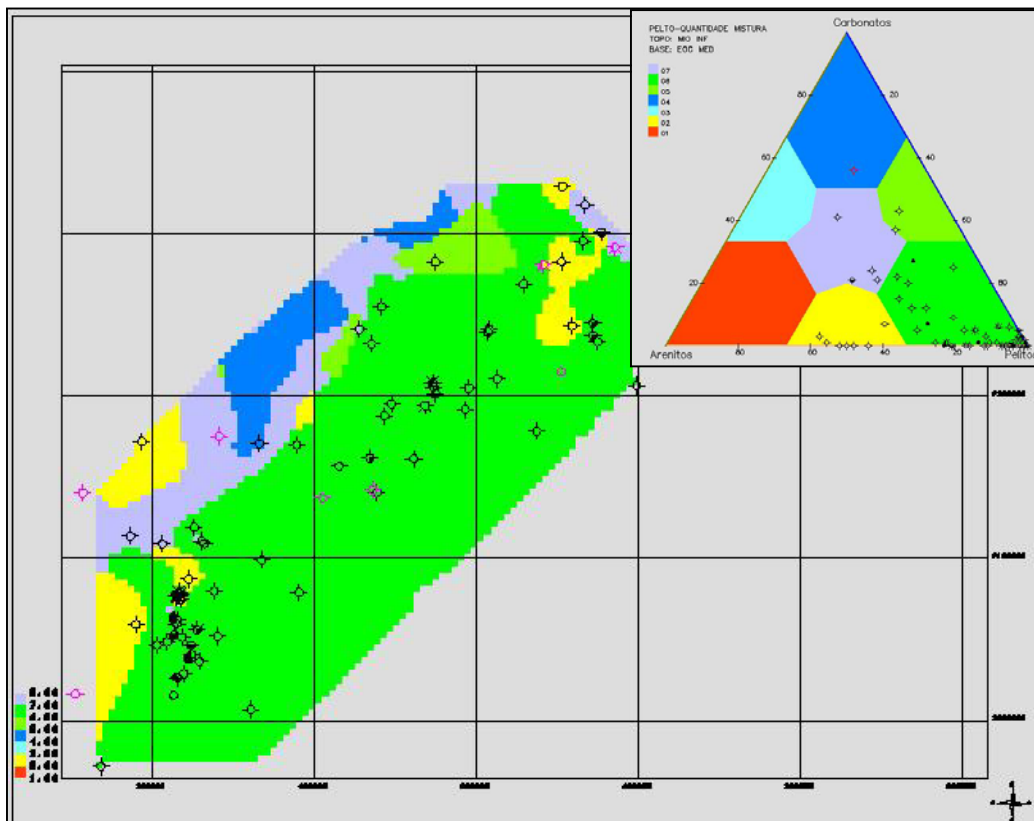


Figura 5.4 – Resultado da classificação de Pelto (1953).

Já os modelos de classificação de relações granulométricas visam mapear qualitativamente as distribuições granulométricas das rochas da família das areias. O primeiro modelo desenvolvido relaciona arenitos de diferentes granulometrias com pelitos, procurando representar as diferentes distribuições dos grãos de arenitos e as ocorrências de pelitos, assim como suas respectivas misturas. Este modelo incorpora um atributo geológico adicional em relação aos modelos anteriores – a granulometria das areias. Pode-se indicar em um mapa as misturas de arenitos grossos com pelitos, arenitos finos com pelitos, arenitos finos com arenitos grossos etc.

A Figura 5.5 ilustra um mapa de litofácies com base no modelo arenitos-pelitos da mesma unidade estratigráfica mapeada nos modelos anteriores. A unidade é predominantemente pelítica (verde), com algumas misturas de arenitos finos (verde amarelado) e grossos (verde claro). Ao sul da bacia, ocorrem algumas entradas de arenitos grossos com pouca mistura de pelitos (rosa).

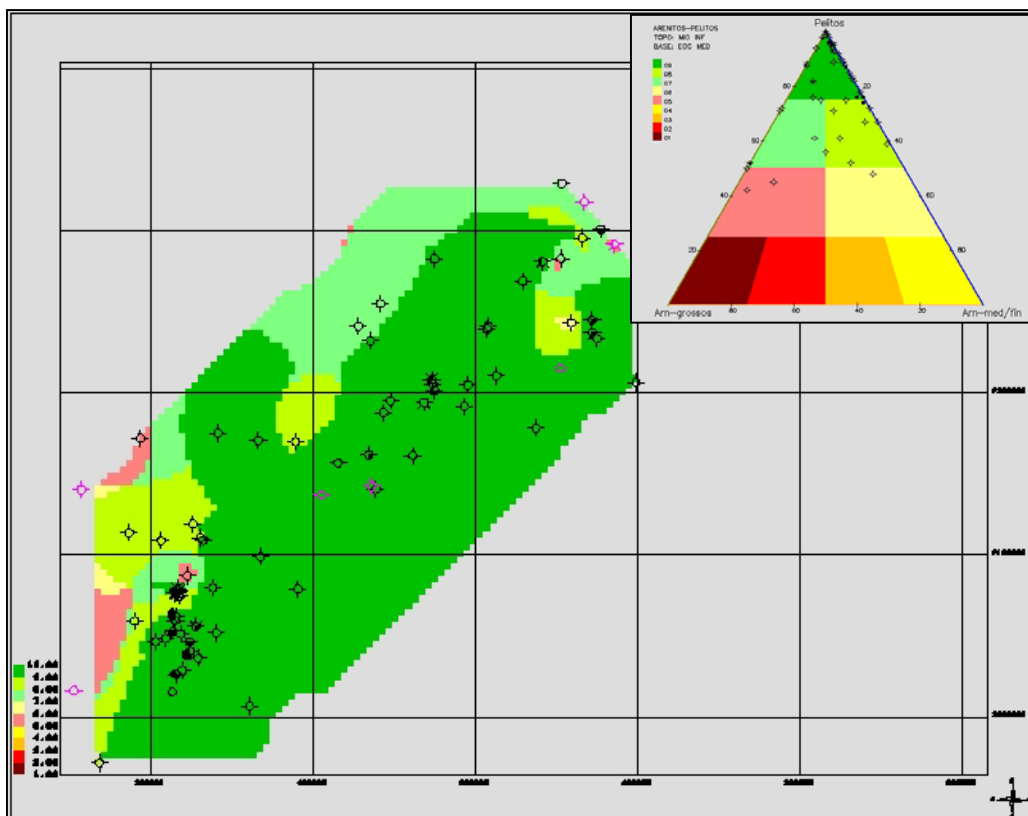


Figura 5.5 – Resultado da classificação Arenitos-Pelitos.

Os outros dois modelos de relações granulométricas disponibilizados consideram somente os arenitos. Os modelos são muito parecidos e, conseqüentemente, os mapas gerados são quase idênticos (vide Figuras 5.6 e 5.7). A principal diferença entre eles fica por conta da região de mistura das três variáveis, o que corresponde à parte central dos diagramas ternários. O modelo 1 define uma abrangência maior para a mistura das três variáveis.

Analisando a distribuição dos diferentes arenitos em ambos os mapas, facilmente se percebe a consistência geológica das litofácies geradas. A parte mais rasa da bacia mostra a predominância dos arenitos grossos (vinho, vermelho e rosa). A parte intermediária caracteriza-se por dispor de arenitos de granulometria média (tons de amarelo) e as regiões profundas mostram acumulações de areias finas (tons de azul).

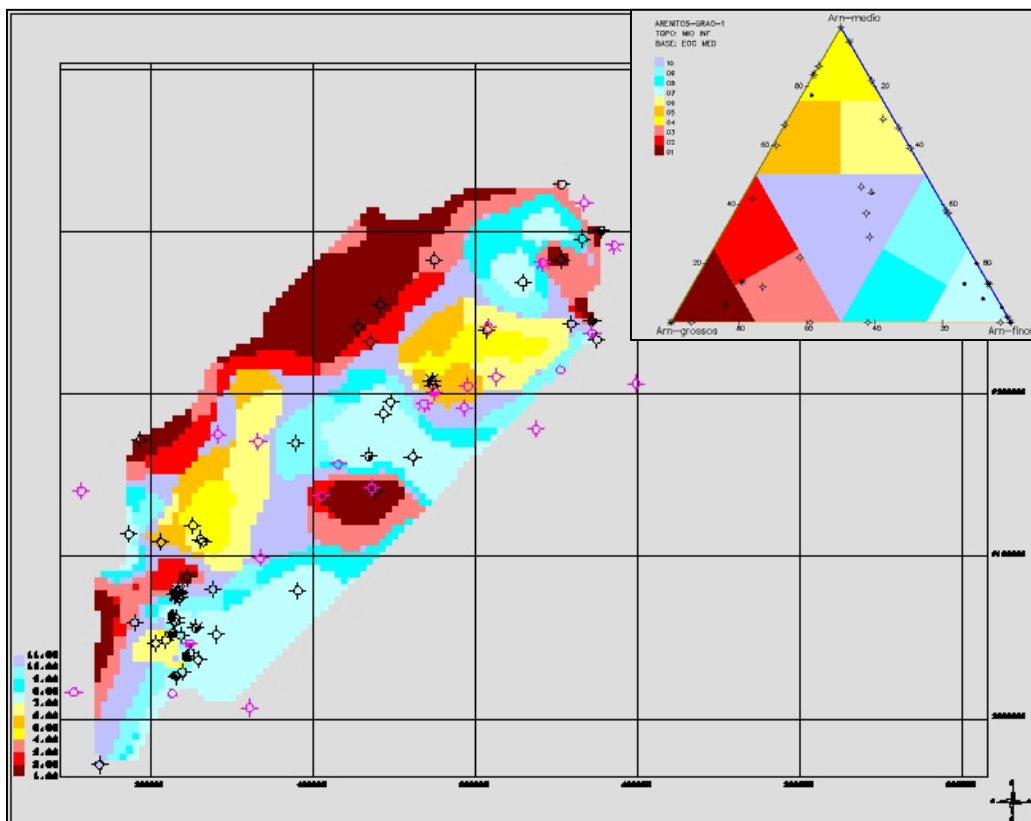


Figura 5.6 – Resultado da classificação do modelo 1 de granulometria de arenitos.

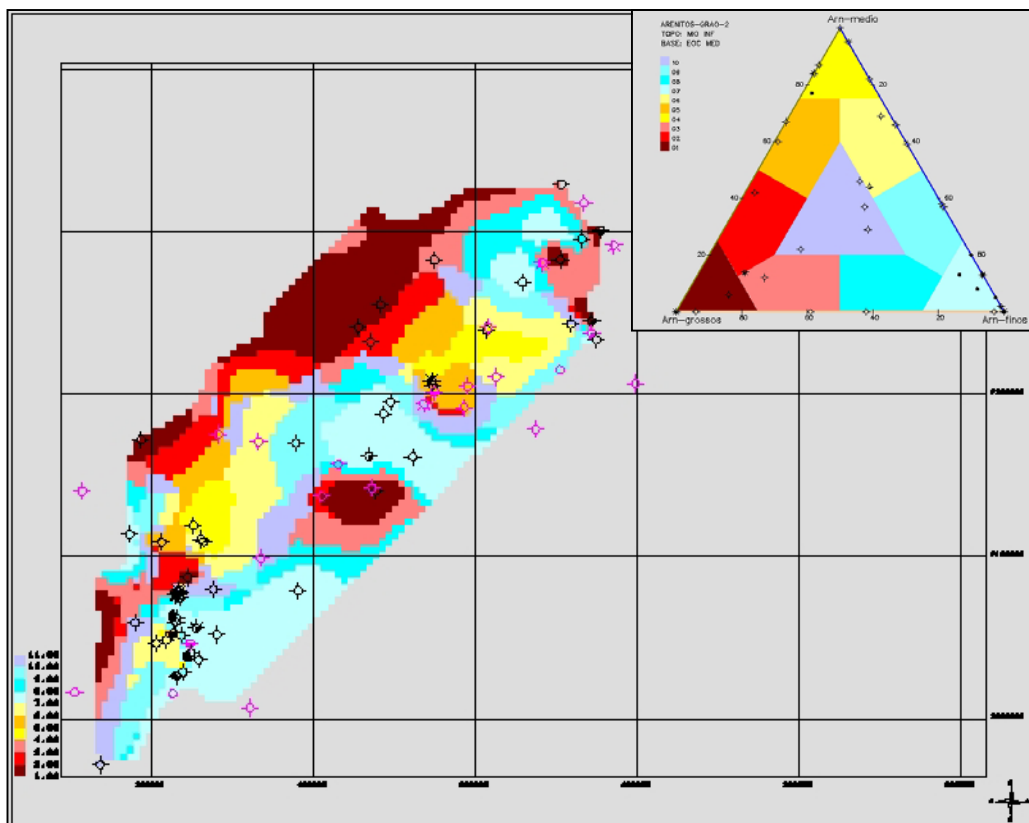


Figura 5.7 – Resultado da classificação do modelo 2 de granulometria de arenitos.

5.2 Estimação de Colunas Litológicas

Como citado anteriormente, a funcionalidade de estimação de litologias desempenha um papel de fundamental importância no mapeamento de litofácies, em especial quando se dispõe de poucos poços na área que se deseja mapear ou quando se faz necessária a complementação ou correção dos dados existentes. Em determinadas situações, quando o número de poços é excessivamente baixo – um, dois ou três poços – a metodologia proposta neste estudo de tese não se adequa, face à sua forte dependência da quantidade de dados.

Em situações em que se dispõe de um número razoável de poços, portanto, com a possibilidade de se confeccionar um mapa de litofácies, a estimação de colunas litológicas via redes neurais atua no sentido de complementar e corrigir os dados armazenados no banco de dados e, conseqüentemente, tornar o mapeamento mais realista. Os efeitos produzidos pela simples inserção de uma única coluna litológica em uma área a ser mapeada são grandes e merecem ser analisados.

A fim de ilustrar tais efeitos, os três poços indicados em vermelho na Figura 5.8 tiveram suas colunas litológicas estimadas. Esses poços, nos exemplos anteriores, não foram considerados na elaboração dos mapas de litofácies por não disporem de litologias armazenadas no banco de dados.

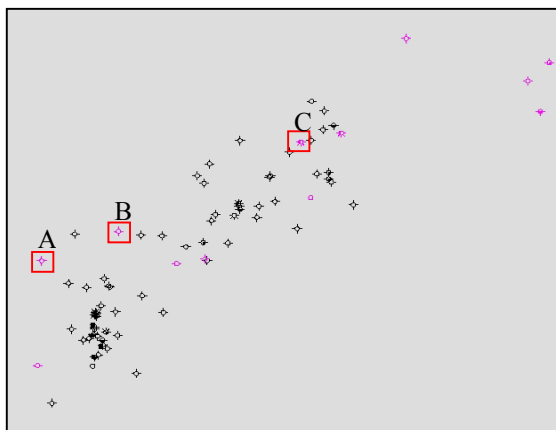


Figura 5.8 – Estimação de colunas litológicas, poços A, B e C.

As Figuras 5.9 a 5.11 mostram os resultados obtidos na estimação das litologias via redes neurais dos poços A, B e C. Os quadros da esquerda de cada uma das figuras ilustram a etapa de treinamento e os da direita a etapa de reconhecimento. Em todos os poços estimados tomaram-se para o treinamento os poços mais próximos que dispunham de padrões de litologia.

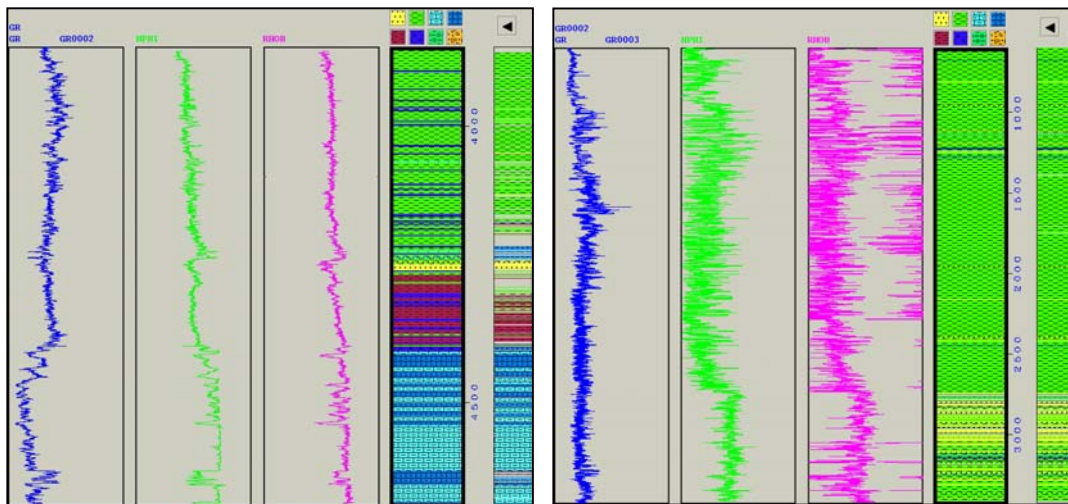


Figura 5.9 – Poço A, coluna litológica estimada.

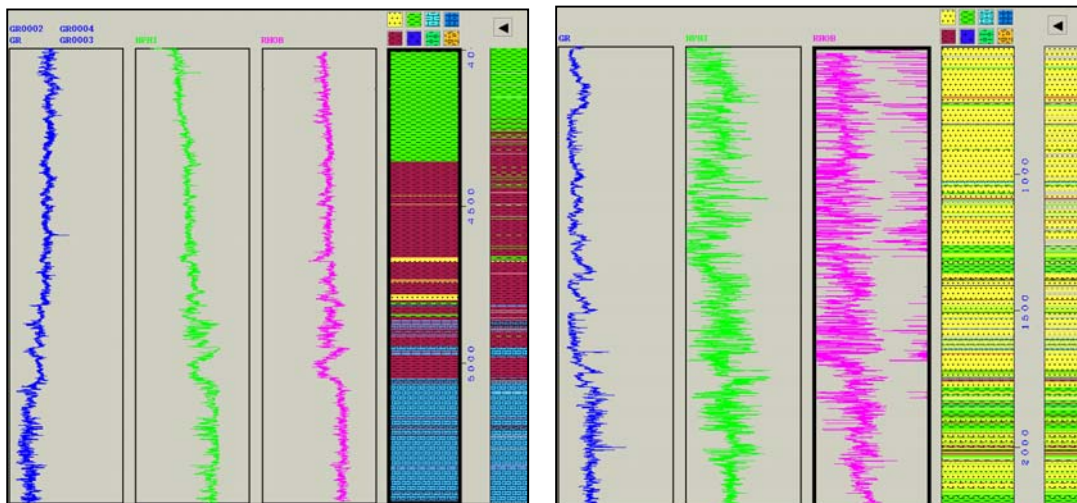


Figura 5.10 – Poço B, coluna litológica estimada.

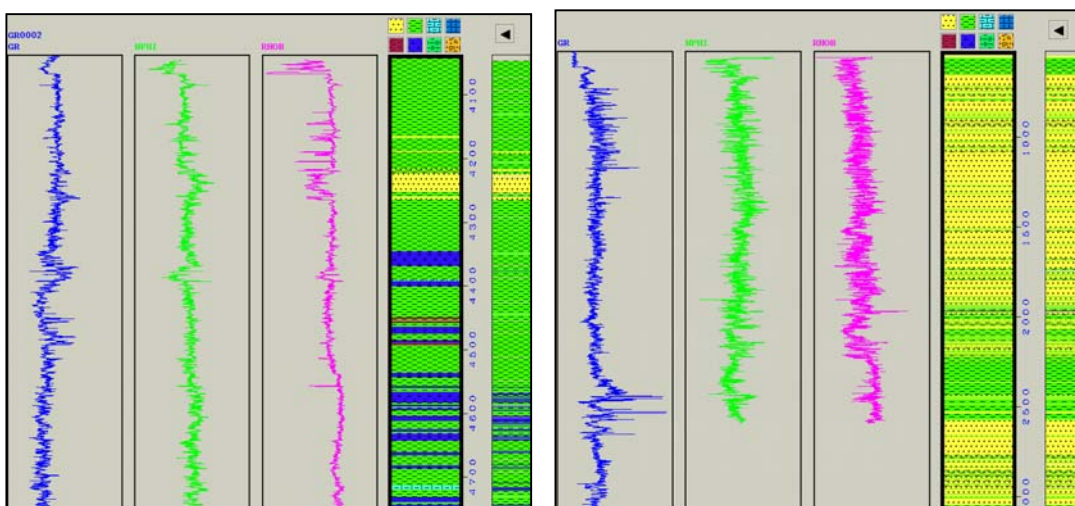


Figura 5.11 – Poço C, coluna litológica estimada.

A Figura 5.12 sintetiza os resultados obtidos com a estimação das três colunas litológicas. Pode-se observar que, para o modelo de classificação arenitos-pelitos-carbonatos e o intervalo estratigráfico em questão, o poço A possui, basicamente, estruturas pelíticas – classe 5 de coloração verde. O poço B possui estruturas com predominância de arenitos, podendo conter misturas de pelitos, e algumas ocorrências de carbonatos, indicando para todo intervalo classe 2 de coloração amarelo-claro. O poço C é predominantemente composto de arenitos – classe um de coloração laranja.

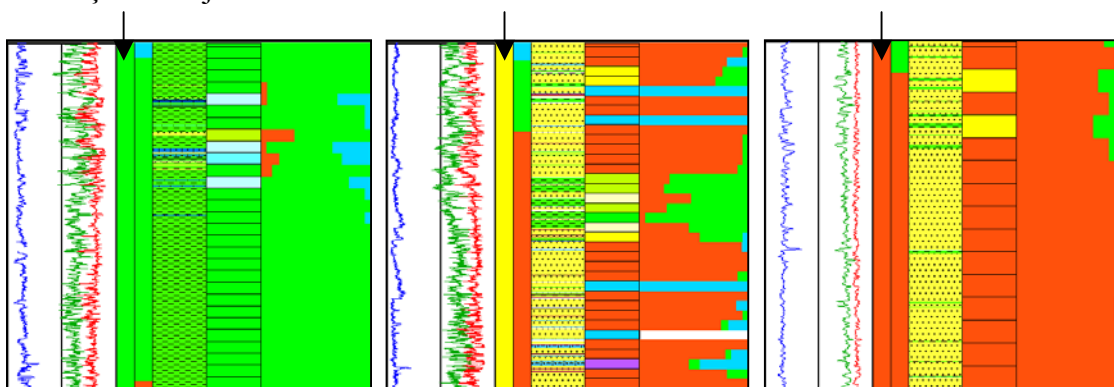


Figura 5.12 – Curvas de proporção vertical do intervalo estratigráfico, poços A, B e C.

Estes novos dados introduzem, localmente no mapa final de litofácies, concentrações de pelitos e arenitos com misturas de pelitos na parte a oeste da área de mapeamento, e uma concentração quase que pura de arenito na parte mais ao norte.

A Figura 5.13 mostra o resultado final. Na região próxima ao poço A, foi inserido um sistema de pelitos, tendendo a se misturar com arenitos. Nas imediações do poço B, um sistema antes mapeado como misto, de coloração lilás, deu lugar a um novo sistema baseado em arenitos que se estende até a borda do mapa. Uma região carbonática, de coloração azul claro, foi completamente suprimida. Na vizinhança do poço C, foi introduzida uma pequena área de arenitos.

Um detalhe interessante é que as dimensões das mudanças ocorridas no mapeamento são diretamente proporcionais às condições de vizinhança dos poços e, também, à proximidade dos poços em relação às bordas do mapa. O poço B, se comparado com os demais poços, produziu mudanças mais efetivas.

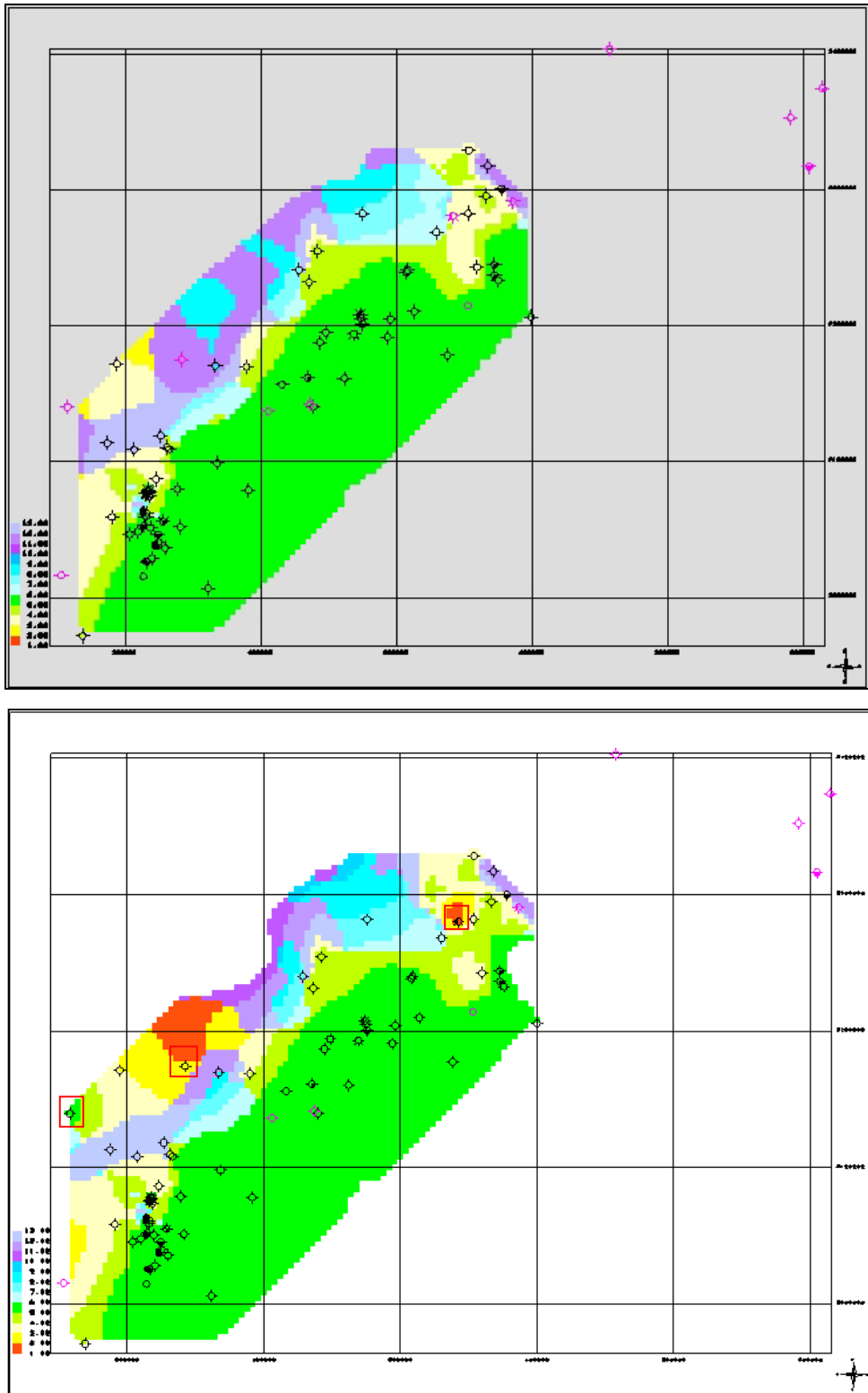


Figura 5.13 – Resultados das distribuições litofaciológicas bidimensionais sem e com estimativa de colunas litológicas dos poços A, B e C.

5.3 Características dos Processos e Dados

Do ponto de vista da qualidade dos resultados, o sistema desenvolvido é fortemente dependente dos dados de litologia e da definição precisa do intervalo estratigráfico nos pontos de controle (poços). Outro fator também importante é a quantidade de pontos de controle utilizado no mapeamento. O número de pontos deve ser adequado, a fim de representar com exatidão a área a ser mapeada. As saídas do sistema melhoram consideravelmente à medida que se aumenta o volume de dados.

O processo de Preparação dos Dados é de fundamental importância para a obtenção de mapas de boa qualidade. Sua implementação limitou-se apenas a informar ao intérprete sobre possíveis irregularidades, sem contudo atuar de maneira a corrigi-las.

Um exemplo é a indicação dos poços excluídos do mapeamento. O sistema exhibe diferentemente os poços que não dispõem de dados, ou seja, aqueles que não contribuem para a estimativa das superfícies. A possível ausência de informações deve ser atribuída à política de arquivamento de dados litológicos. No caso da Petrobras, apenas os poços exploratórios, em particular os pioneiros, possuem litologias arquivadas. Isto corresponde a apenas 10% do total de poços existentes na base de dados. Esta política restringe o uso do sistema aos mapeamentos regionais.

Para contornar esta deficiência incorporou-se ao sistema uma funcionalidade de geração de litologias a partir de perfis elétricos. A literatura atual propõe um grande número de tecnologias para este fim, mostrando que as redes neurais despontam com excelentes resultados (Rogers et al., 1992; Cunha, 2002).

O processo de Geração de Superfícies estima dois tipos distintos de superfícies de distribuição de rochas: superfícies de percentuais e superfícies de espessuras (mapas de isólitais). O método utilizado não leva em conta falhas geológicas e atua essencialmente sobre dados de poços. Estas características, a depender da escala de mapeamento, podem se mostrar inadequadas para a estimativa das superfícies de espessuras de rochas. Como os mapas de isólitais são gerados apenas para auxiliar a interpretação da área, eles não influenciam no resultado final.

Quanto à estimativa das superfícies de percentuais de rocha, pode-se admitir que elas independem da geometria da unidade estratigráfica, face à natureza das variáveis estimadas, as quais são definidas em termos de percentuais. Este fato estabelece um grau de independência entre o mapeamento de litofácies e a modelagem geométrica das unidades estratigráficas, permitindo o uso de métodos de geração de

superfícies simples, rápidos e de baixo custo computacional. Nos exemplos citados ao longo do trabalho utilizou-se um método baseado no inverso do quadrado da distância. A *performance* do processo de geração de superfícies é de grande importância, uma vez que para se chegar ao mapa de litofácies são geradas dez superfícies em tempo real.

Os resultados produzidos pelo processo de Classificação Litofaciológica, descritos na primeira seção, dependem do modelo de classe escolhido. Uma característica importante, especialmente para os modelos de mapeamento de relações granulométricas, é a escolha adequada de um parâmetro de *cut-off* que o sistema implementa a fim de considerar as litologias de um dado poço. Este parâmetro estabelece um limiar a partir de um valor percentual de ocorrência das variáveis na unidade estratigráfica. Para um valor de *cut-off* igual a 50%, por exemplo, e um modelo de classificação que considera somente os arenitos, são descartados os poços que possuem menos de 50% de arenitos no intervalo estratigráfico considerado.

O processo de Edição de Malhas caracteriza-se pela interatividade. O intérprete dispõe de operações dedicadas à manipulação dos dados. A visão particular do geólogo sobre a área em estudo é introduzida no mapa. As edições são feitas diretamente sobre o mapa de litofácies e propagadas automaticamente para as superfícies de percentuais e isólicas.

O processo de Geração de Volumes tem como objetivo principal produzir um ambiente de visualização gráfica dedicada ao entendimento da distribuição das litofácies em três dimensões. As visualizações podem ser em duas dimensões, e são produzidas a partir do fatiamento da unidade estratigráfica. A exibição seqüencial, em mapa, das fatias, detalha a distribuição das litofácies em profundidade.

Um aspecto de grande importância diz respeito ao número de fatias solicitado pelo usuário para a construção do volume. Para cada fatia, o sistema executa os passos necessários à geração do mapa de litofácies, ou seja, gera seis novas superfícies de percentuais das variáveis. Um número exagerado de fatias requer muito tempo de processamento. Foram adotadas cinco fatias como valor *default*.

O último processo, Exportação de Dados, implementa um conjunto de saídas das litofácies em formatos de arquivos digitais para uso em outros aplicativos. Os dados gerados pelo sistema podem ser exportados para *softwares* de visualização volumétrica (VIZIO e V3O2), modelagem geométrica (GOCAD) e modelagem de bacias sedimentares (TEMIS, SimBR, Petromod etc).

6. CONCLUSÕES

Grande variedade de atributos estratigráficos podem ser representados qualitativa e quantitativamente, e ilustrados sob a forma de mapas. A configuração geométrica de uma unidade estratigráfica, a distribuição espacial de diferentes rochas sedimentares e o grau de mistura dos componentes são matematicamente modelados e visualizados sob a forma de mapas. Os diferentes atributos podem ser combinados em um único mapa, com o objetivo de descrever relacionamentos espaciais entre atributos de uma unidade estratigráfica. Variações de espessuras, composições de rochas sedimentares e variabilidades verticais de unidades estratigráficas formam o conjunto de informações básicas para a interpretação paleogeográfica e paleotectônica.

Este estudo propôs uma metodologia e um sistema computacional dedicado à elaboração de distribuições de litofácies uni, bi e tridimensionais que mapeia espacialmente composições de rochas sedimentares de unidades estratigráficas. Foram implementados os principais modelos de classificação de rochas citados na literatura e desenvolvidas novas soluções. A maioria dos modelos trata o mapeamento de litofácies como um problema de classificação de três variáveis.

Krumbein (1948) deixa um importante registro, que perdura até os dias de hoje. O autor cita como um dos grandes desafios da Geologia o desenvolvimento de tecnologias de organização e interpretação de dados. Atualmente, apesar do avanço alcançado pela ciência da computação, ainda nos deparamos com sérios problemas de organização de dados.

A maior limitação da metodologia sugerida diz respeito à organização e disponibilização de dados. A política de arquivamento de dados de litologia de algumas empresas – restringindo o armazenamento das ocorrências de rochas a poços exploratórios – faz com que o mapeamento de litofácies seja aplicado apenas em mapeamentos regionais. Este fato limita o uso do sistema à área de exploração de petróleo. O mapeamento de litofácies em reservatórios, segundo a metodologia aqui proposta, torna-se difícil em função da pouca quantidade de dados.

Uma característica do sistema que merece ser destacada é o conjunto de técnicas utilizadas para a geração de superfícies. Como são geradas várias superfícies para se produzir um único mapa de litofácies, o tempo de processamento é de

fundamental importância. Considerando, também, que a construção de um volume de fácies se dá através do fatiamento da unidade estratigráfica, com a geração de vários mapas de litofácies, este problema torna-se ainda mais sério. Portanto, os algoritmos de estimação de superfície devem ser simples, rápidos e honrar os pontos de controle. Vale ressaltar que a geração de superfícies atua sobre percentuais, o que facilita sobremaneira o uso de procedimentos de baixo custo computacional.

Uma importante ferramenta de análise, voltada para a compreensão das distribuições das composições de uma unidade estratigráfica, é a visualização sequencial das fatias. Esta visualização permite a obtenção de conclusões relativas à estrutura de deposição associadas ao tempo geológico do intervalo estratigráfico.

Nosso estudo deve ser visto como um ponto de partida para o desenvolvimento de outros sistemas de mapeamento de distribuições de rochas sedimentares. Naturalmente, ele não esgota as pesquisas e aponta uma série de desafios a serem vencidos. Como sugestões para futuros trabalhos, destacam-se os seguintes temas:

- Desenvolver soluções de estimação de colunas litológicas via redes neurais para regiões em que não se dispõe de dados adequados ao treinamento;
- Implementar estrutura de dados topológica, na modelagem tridimensional, de forma a permitir uma completa análise de vizinhança entre as diferentes classes do diagrama ternário;
- Construir volumes litofaciológicos para geometrias de unidades estratigráficas geradas por modeladores geométricos externos ao sistema;
- Prever o tratamento de estruturas geológicas complexas tais como falhas, canais, leques etc;
- Desenvolver metodologia e sistema computacional voltados para o mapeamento de litofácies para escalas menores e regiões sem dados de poços. Uma estratégia é o uso de atributos sísmicos (Sismofácies) como dados de entrada, com a adoção de métodos de Geoestatística de mapeamento bivariado, *cokrigagem* colocalizada e *krigagem* com deriva externa.

7. APÊNDICES

7.1 Apêndice A – Conteúdo da Estrutura de Dados LFC

```
#define LITNUMFACIES          9
#define LITNUMVARIABLEIS    13
#define LITNUMROCHAS        47
#define LITTAMNOMEROCCHAS   32
#define LITNUMGRANULO       8

/*-----
   Diagramas ternarios
-----*/
char    *LitNomeFacies[LITNUMFACIES]=
        {"LITOFACIES-DEFAULT", "ARENITOS-PELITOS",
         "ARENITOS-GRAO-1", "ARENITOS-GRAO-2",
         "LITOFACIES-DETALHADA", "KRUMBEIN-ARN/FLH,CLA/NCLA",
         "PELTO-QUANTIDADE MISTURA", "ENERGIA-DIAGENESE",
         "FACIES DE EVAPORITOS"};
long    LitNumVariaveisFacies[LITNUMFACIES] = {3,3,3,3,3,3,3,3,3};
long    LitVariaveisFacies[LITNUMFACIES][8] =
        {0,1,2,-1,-1,-1,-1,-1,
         3,1,4,-1,-1,-1,-1,-1,
         3,6,5,-1,-1,-1,-1,-1,
         3,6,5,-1,-1,-1,-1,-1,
         0,1,2,-1,-1,-1,-1,-1,
         0,2,1,-1,-1,-1,-1,-1,
         0,2,1,-1,-1,-1,-1,-1,
         7,8,9,-1,-1,-1,-1,-1,
         10,11,12,-1,-1,-1,-1,-1};

/*-----
   Variaveis de classificacao
-----*/
char    LitNomeVariaveis    [LITNUMVARIABLEIS][64]=
        {"ARENITOS", "PELITOS", "CARBONATOS",
         "ARN-GROSSOS", "ARN-MED/FIN", "ARN-FINOS", "ARN-MEDIO",
         "CARBON (E+)", "DOLOMITOS", "CARBON (E-)",
         "ANIDRITA/GIPS", "SILIC/CARB", "SAIS"};

long    LitNumRochasVariavel [LITNUMVARIABLEIS] =
        {3,6,6,7,6,4,2,3,1,3,2,15,5};

long    LitRochasVariavel    [LITNUMVARIABLEIS][16] =
        {12,13,9,-1,-1,-1,-1,-1,-1,-1,-1,-1,-1,-1,-1,-1,
         16,17,18,19,15,10,-1,-1,-1,-1,-1,-1,-1,-1,-1,-1,
         3,4,5,6,2,7,-1,-1,-1,-1,-1,-1,-1,-1,-1,-1,
         12,12,12,13,13,13,9,-1,-1,-1,-1,-1,-1,-1,-1,-1,
         12,12,12,13,13,13,-1,-1,-1,-1,-1,-1,-1,-1,-1,-1,
         12,12,13,13,-1,-1,-1,-1,-1,-1,-1,-1,-1,-1,-1,-1,
         12,13,-1,-1,-1,-1,-1,-1,-1,-1,-1,-1,-1,-1,-1,-1,
         6,5,2,-1,-1,-1,-1,-1,-1,-1,-1,-1,-1,-1,-1,-1,
         7,-1,-1,-1,-1,-1,-1,-1,-1,-1,-1,-1,-1,-1,-1,-1,
         3,19,4,-1,-1,-1,-1,-1,-1,-1,-1,-1,-1,-1,-1,-1}
```

```

37,38,-1,-1,-1,-1,-1,-1,-1,-1,-1,-1,-1,-1,-1,-1,
12,13,9,16,17,18,19,15,10,3,4,5,6,2,7,-1,
36,42,40,41,39,-1,-1,-1,-1,-1,-1,-1,-1,-1,-1,-1,-1};

long LitRochasGranulo [LITNUMVARIAVEIS][16] =
{-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,-1,-1,-1,-1,-1,-1,-1,
-1,-1,-1,-1,-1,-1,-1,-1,-1,-1,-1,-1,-1,-1,-1,-1,
5,6,7,5,6,7,-1,-1,-1,-1,-1,-1,-1,-1,-1,-1,-1,
2,3,4,2,3,4,-1,-1,-1,-1,-1,-1,-1,-1,-1,-1,-1,-1,
2,3,2,3,-1,-1,-1,-1,-1,-1,-1,-1,-1,-1,-1,-1,-1,
4,4,-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,-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,-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,-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,-1,-1,-1,-1,-1,-1,-1,-1,-1,-1,-1};

/*-----
Rochas
-----*/
long LitNumRochas = LITNUMROCHAS;

char LitNomeRochas[LITNUMROCHAS][LITTAMNOMEROCCHAS] =
{"CALCARIO CRISTALINO", "MARMORE", "COQUINA",
"CALCILUTITO", "CALCISSILTITO", "CALCARENITO",
"CALCIRUDITO", "DOLOMITO", "BRECHA",
"CONGLOMERADO", "DIAMICTITO", "TILITO",
"AREIA", "ARENITO",
"ARENITO BIOTURBADO",
"SILTITO", "ARGILA", "ARGILITO",
"FOLHELHO", "MARGA", "TUFO VULCANICO",
"CINZA VULCANICA", "IGNEA NAO IDENT", "DIABASIO",
"BASALTO", "GRANITO",
"METAMORFICA NAO IDENT",
"GNAISSE", "FILITO", "XISTO",
"QUARTZITO", "META-ARENITO", "METASSILTITO",
"ARDOSIA", "ULTRABASICA", "METASSEDIMENTO",
"TAQUIDRITA", "ANIDRITA", "GIPSITA",
"SAL NAO IDENT", "HALITA", "SILVINITA",
"CARNALITA", "LINHITO",
"TALCOESTIVENCITA",
"CARVAO", "SILEXITO"};

long LitCodRochas[LITNUMROCHAS] = { 2, 3, 4, 6, 7, 8,
10, 30, 40, 42, 44, 46,
48, 49, 50, 54, 55, 56,
57, 58, 61, 62, 64, 65,
66, 67, 70, 71, 72, 73,
74, 75, 76, 77, 78, 79,
81, 82, 83, 84, 85, 86,
87, 90, 91, 92, 94};

```

```

/*-----
Granulometria
-----*/
char *LitNomeGranulo[LITNUMGRANULO] =
    {"AFANITICO", "FARENITICO", "MUITO FINO", "FINO",
     "MEDIO", "GROSSEIRO", "MUITO GROSSEIRO", "CONGLOMERATICO"};

char *LitCodGranulo[LITNUMGRANULO] =
    {"AFN", "FAN", "MFN", "FNO", "MED", "GRO", "MGR", "CGO"};

/*-----
Classes dos diagramas ternarios
-----*/
long NumClassesFacies[LITNUMFACIES] = {12,9,10,10,54,9,7,11,7};
long ClassesFacies[LITNUMFACIES][64] =
    {0,1,2,3,4,5,6,7,8,9,10,11,-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,-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,-1,-1,-1,-1,-1,-1,-1,-1,-1,-1,-1,-1,-1,-1,

     12,13,14,15,16,17,18,19,20,-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,-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,-1,-1,
     -1,-1,-1,-1,-1,-1,-1,-1,-1,-1,-1,-1,-1,-1,-1,-1,-1,-1,-1,-1,

     21,22,23,24,25,26,27,28,29,30,-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,-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,-1,-1,
     -1,-1,-1,-1,-1,-1,-1,-1,-1,-1,-1,-1,-1,-1,-1,-1,-1,-1,-1,-1,

     31,32,33,34,35,36,37,38,39,40,-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,-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,-1,-1,
     -1,-1,-1,-1,-1,-1,-1,-1,-1,-1,-1,-1,-1,-1,-1,-1,-1,-1,-1,-1,

     41,42,43,44,45,46,47,48,49,50,51,52,53,54,55,56,
     57,58,59,60,61,62,63,64,65,66,67,68,69,70,71,72,
     73,74,75,76,77,78,79,80,81,82,83,84,85,86,87,88,
     89,90,91,92,93,94,-1,-1,-1,-1,-1,-1,-1,-1,-1,-1,-1,-1,-1,-1,

     95,96,97,98,99,100,101,102,103,-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,-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,-1,-1,
     -1,-1,-1,-1,-1,-1,-1,-1,-1,-1,-1,-1,-1,-1,-1,-1,-1,-1,-1,-1,

     104,105,106,107,108,109,110,-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,-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,-1,-1,-1,-1,
     -1,-1,-1,-1,-1,-1,-1,-1,-1,-1,-1,-1,-1,-1,-1,-1,-1,-1,-1,-1,

```

```

111,112,113,114,115,116,117,118,119,120,121,-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,-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,-1,-1,-1,

104,105,106,107,108,109,110,-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,
-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,-1,-1,-1,-1,-1,-1,-1};

```

```

long NumptosClasses[122]={5,5,5,5,4,5,5,5,5,5,5,4,
5,5,5,5,5,5,5,5,4,
4,5,5,4,5,5,4,5,5,4,
4,6,6,4,6,6,4,6,6,4,
5,5,5,5,5,5,5,5,5,5,5,5,5,5,5,5,
4,5,5,5,4,5,5,5,5,5,5,5,4,5,5,
5,5,5,5,5,5,5,5,5,5,5,5,5,5,5,
5,5,5,5,4,5,5,5,4,
5,5,5,4,5,5,5,5,5,
6,6,6,6,6,6,10,
5,5,5,5,5,5,5,5,5,5,4};

```

```

float Classes3d[122][30] ={100.,0.,0., 80.,0.,20., 60.,20.,20.,
80.,20.,0., 100.,0.,0., 0., 0., 0.,
0.,0.,0., 0.,0.,0., 0.,0.,0., 0.,0.,0.,

80.,20.,0., 60.,20.,20., 40.,40.,20.,
60.,40.,0., 80.,20.,0., 0., 0., 0.,
0.,0.,0., 0.,0.,0., 0.,0.,0., 0.,0.,0.,

60.,40.,0., 40.,40.,20., 20.,60.,20.,
40.,60.,0., 60.,40.,0., 0., 0., 0.,
0.,0.,0., 0.,0.,0., 0.,0.,0., 0.,0.,0.,

40.,60.,0., 20.,60.,20., 10.,80.,10.,
20.,80.,0., 40.,60.,0., 0., 0., 0.,
0.,0.,0., 0.,0.,0., 0.,0.,0., 0.,0.,0.,

20.,80.,0., 00.,80.,20., 0.,100.,0.,
20.,80.,0., 0.,0.,0., 0., 0., 0.,
0.,0.,0., 0.,0.,0., 0.,0.,0., 0.,0.,0.,

20.,60.,20., 0.,60.,40., 0.,80.,20.,
10.,80.,10., 20.,60.,20., 0., 0., 0.,
0.,0.,0., 0.,0.,0., 0.,0.,0., 0.,0.,0.,

20.,40.,40., 0.,40.,60., 0.,60.,40.,
20.,60.,20., 20.,40.,40., 0., 0., 0.,
0.,0.,0., 0.,0.,0., 0.,0.,0., 0.,0.,0.,

20.,20.,60., 0.,20.,80., 0.,40.,60.,
20.,40.,40., 20.,20.,60., 0., 0., 0.,
0.,0.,0., 0.,0.,0., 0.,0.,0., 0.,0.,0.,

20.,00.,80., 0.,0.,100., 0.,20.,80.,
20.,20.,60., 20.,0.,80., 0., 0., 0.,
0.,0.,0., 0.,0.,0., 0.,0.,0., 0.,0.,0.,

80.,00.,20., 20.,0.,80., 20.,20.,60.,

```

60.,20.,20., 80.,0.,20., 0., 0., 0.,
0.,0.,0., 0.,0.,0., 0.,0.,0., 0.,0.,0.,

60.,20.,20., 20.,20.,60., 20.,40.,40.,
40.,40.,20., 60.,20.,20., 0., 0., 0.,
0.,0.,0., 0.,0.,0., 0.,0.,0., 0.,0.,0.,

40.,40.,20., 20.,40.,40., 20.,60.,20.,
40.,40.,20., 0.,0.,0., 0., 0., 0.,
0.,0.,0., 0.,0.,0., 0.,0.,0., 0.,0.,0.,

100.,0.,0., 75.,0.,25., 56.,25.,19.,
75.,25.,0., 100.,0.,0., 0., 0., 0.,
0.,0.,0., 0.,0.,0., 0.,0.,0., 0.,0.,0.,

75.,0.,25., 50.,0.,50., 37.5,25.,37.5,
56.,25.,19., 75.,0.,25., 0., 0., 0.,
0.,0.,0., 0.,0.,0., 0.,0.,0., 0.,0.,0.,

50.,0.,50., 25.,0.,75., 19.,25.,56.,
37.5,25.,37.5, 50.,0.,50., 0., 0., 0.,
0.,0.,0., 0.,0.,0., 0.,0.,0., 0.,0.,0.,

25.,0.,75., 0.,0.,100., 0.,25.,75.,
19.,25.,56., 25.,0.,75., 0., 0., 0.,
0.,0.,0., 0.,0.,0., 0.,0.,0., 0.,0.,0.,

75.,25.,0., 37.5,25.,37.5, 25.,50.,25.,
50.,50.,0., 75.,25.,0., 0., 0., 0.,
0.,0.,0., 0.,0.,0., 0.,0.,0., 0.,0.,0.,

37.5,25.,37.5, 0.,25.,75., 0.,50.,50.,
25.,50.,25., 37.5,25.,37.5, 0., 0., 0.,
0.,0.,0., 0.,0.,0., 0.,0.,0., 0.,0.,0.,

50.,50.,0., 25.,50.,25., 12.5,75.,12.5,
25.,75.,0., 50.,50.,0., 0., 0., 0.,
0.,0.,0., 0.,0.,0., 0.,0.,0., 0.,0.,0.,

25.,50.,25., 0.,50.,50., 0.,75.,25.,
12.5,75.,12.5, 25.,50.,25., 0., 0., 0.,
0.,0.,0., 0.,0.,0., 0.,0.,0., 0.,0.,0.,

25.,75.,0., 0.,75.,25., 0.,100.,0.,
25.,75.,0., 0.,0.,0., 0., 0., 0.,
0.,0.,0., 0.,0.,0., 0.,0.,0., 0.,0.,0.,

100.,0.,0., 75.,0.,25., 75.,25.,0.,
100.,0.,0., 0.,0.,0., 0.,0.,0.,
0.,0.,0., 0.,0.,0., 0.,0.,0., 0.,0.,0.,

75.,25.,0., 50.,50.,0., 50.,25.,25.,
75.,12.5,12.5, 75.,25.,0., 0.,0.,0.,
0.,0.,0., 0.,0.,0., 0.,0.,0., 0.,0.,0.,

75.,0.,25., 75.,12.5,12.5, 50.,25.,25.,
50.,0.,50., 75.,0.,25., 0.,0.,0.,
0.,0.,0., 0.,0.,0., 0.,0.,0., 0.,0.,0.,

0.,100.,0., 0.,75.,25., 25.,75.,0.,
0.,100.,0., 0.,0.,0., 0.,0.,0.,
0.,0.,0., 0.,0.,0., 0.,0.,0.,

50.,50.,0., 25.,75.,0., 12.5,75.,12.5,
25.,50.,25., 50.,50.,0., 0.,0.,0.,
0.,0.,0., 0.,0.,0., 0.,0.,0.,

25.,50.,25., 12.5,75.,12.5, 0.,75.,25.,
0.,50.,50., 25.,50.,25., 0.,0.,0.,
0.,0.,0., 0.,0.,0., 0.,0.,0.,

0.,0.,100., 25.,0.,75., 0.,25.,75.,
0.,0.,100., 0.,0.,0., 0.,0.,0.,
0.,0.,0., 0.,0.,0., 0.,0.,0.,

50.,0.,50., 25.,25.,50., 12.5,12.5,75.,
25.,0.,75., 50.,0.,50., 0.,0.,0.,
0.,0.,0., 0.,0.,0., 0.,0.,0.,

25.,25.,50., 0.,50.,50., 0.,25.,75.,
12.5,12.5,75., 25.,25.,50., 0.,0.,0.,
0.,0.,0., 0.,0.,0., 0.,0.,0.,

50.,0.,50., 50.,50.,0., 0.,50.,50.,
50.,0.,50., 0.,0.,0., 0.,0.,0.,
0.,0.,0., 0.,0.,0., 0.,0.,0.,

100.,0.,0., 75.,25.,0., 75.,0.,25.,
100.,0.,0., 0.,0.,0., 0.,0.,0.,
0.,0.,0., 0.,0.,0., 0.,0.,0.,

75.,25.,0., 50.,50.,0., 40.,40.,20.,
60.,20.,20., 75.,12.5,12.5, 75.,25.,0.,
0.,0.,0., 0.,0.,0., 0.,0.,0.,

75.,12.5,12.5, 60.,20.,20., 40.,20.,40.,
50.,0.,50., 75.,0.,25., 75.,12.5,12.5,
0.,0.,0., 0.,0.,0., 0.,0.,0.,

0.,100.,0., 0.,75.,25., 25.,75.,0.,
0.,100.,0., 0.,0.,0., 0.,0.,0.,
0.,0.,0., 0.,0.,0., 0.,0.,0.,

25.,75.,0., 12.5,75.,12.5, 20.,60.,20.,
40.,40.,20., 50.,50.,0., 25.,75.,0.,
0.,0.,0., 0.,0.,0., 0.,0.,0.,

12.5,75.,12.5, 0.,75.,25., 0.,50.,50.,
20.,40.,40., 20.,60.,20., 12.5,75.,12.5,
0.,0.,0., 0.,0.,0., 0.,0.,0.,

0.,0.,100., 25.,0.,75., 0.,25.,75.,
0.,0.,100., 0.,0.,0., 0.,0.,0.,
0.,0.,0., 0.,0.,0., 0.,0.,0.,

40.,20.,40., 20.,20.,60., 12.5,12.5,75.,
25.,0.,75., 50.,0.,50., 40.,20.,40.,
0.,0.,0., 0.,0.,0., 0.,0.,0.,

20.,40.,40., 0.,50.,50., 0.,25.,75.,
12.5,12.5,75., 20.,20.,60., 20.,40.,40.,
0.,0.,0., 0.,0.,0., 0.,0.,0., 0.,0.,0.,

60.,20.,20., 20.,20.,60., 20.,60.,20.,
60.,20.,20., 0.,0.,0., 0.,0.,0.,
0.,0.,0., 0.,0.,0., 0.,0.,0., 0.,0.,0.,

100.,0.,0., 90.,0.,10., 80.,10.,10.,
90.,10.,0., 100.,0.,0., 0.,0.,0.,
0.,0.,0., 0.,0.,0., 0.,0.,0., 0.,0.,0.,

90.,0.,10., 80.,0.,20., 70.,10.,20.,
80.,10.,10., 90.,0.,10., 0.,0.,0.,
0.,0.,0., 0.,0.,0., 0.,0.,0., 0.,0.,0.,

90.,10.,0., 80.,10.,10., 70.,20.,10.,
80.,20.,00., 90.,10.,0., 0.,0.,0.,
0.,0.,0., 0.,0.,0., 0.,0.,0., 0.,0.,0.,

80.,0.,20., 70.,0.,30., 60.,10.,30.,
70.,10.,20., 80.,0.,20., 0.,0.,0.,
0.,0.,0., 0.,0.,0., 0.,0.,0., 0.,0.,0.,

80.,10.,10., 70.,10.,20., 60.,20.,20.,
70.,20.,10., 80.,10.,10., 0.,0.,0.,
0.,0.,0., 0.,0.,0., 0.,0.,0., 0.,0.,0.,

80.,20.,0., 70.,20.,10., 60.,30.,10.,
70.,30.,0., 80.,20.,0., 0.,0.,0.,
0.,0.,0., 0.,0.,0., 0.,0.,0., 0.,0.,0.,

70.,00.,30., 60.,00.,40., 50.,10.,40.,
60.,10.,30., 70.,00.,30., 00.,00.,00.,
0.,0.,0., 0.,0.,0., 0.,0.,0., 0.,0.,0.,

70.,10.,20., 60.,10.,30., 50.,20.,30.,
60.,20.,20., 70.,10.,20., 0.,0.,0.,
0.,0.,0., 0.,0.,0., 0.,0.,0., 0.,0.,0.,

70.,20.,10., 60.,20.,20., 50.,30.,20.,
60.,30.,10., 70.,20.,10., 0.,0.,0.,
0.,0.,0., 0.,0.,0., 0.,0.,0., 0.,0.,0.,

70.,30.,00., 60.,30.,10., 50.,40.,10.,
60.,40.,0., 70.,30.,0., 0.,0.,0.,
0.,0.,0., 0.,0.,0., 0.,0.,0., 0.,0.,0.,

60.,10.,30., 50.,10.,40., 40.,20.,40.,
50.,20.,30., 60.,10.,30., 00.,00.,00.,
0.,0.,0., 0.,0.,0., 0.,0.,0., 0.,0.,0.,

60.,20.,20., 50.,20.,30., 40.,30.,30.,
50.,30.,20., 60.,20.,20., 0.,0.,0.,
0.,0.,0., 0.,0.,0., 0.,0.,0., 0.,0.,0.,

60.,30.,10., 50.,30.,20., 40.,40.,20.,
50.,40.,10., 60.,30.,10., 0.,0.,0.,
0.,0.,0., 0.,0.,0., 0.,0.,0., 0.,0.,0.,

60.,40.,00., 50.,40.,10., 40.,50.,10.,
50.,50.,00., 60.,40.,00., 0.,0.,0.,
0.,0.,0., 0.,0.,0., 0.,0.,0., 0.,0.,0.,

50.,20.,30., 40.,20.,40., 35.,30.,35.,
40.,30.,30., 50.,20.,30., 00.,00.,00.,
0.,0.,0., 0.,0.,0., 0.,0.,0., 0.,0.,0.,

50.,30.,20., 40.,30.,30., 30.,40.,30.,
40.,40.,20., 50.,30.,20., 0.,0.,0.,
0.,0.,0., 0.,0.,0., 0.,0.,0., 0.,0.,0.,

50.,40.,10., 40.,40.,20., 30.,50.,20.,
40.,50.,10., 50.,40.,10., 0.,0.,0.,
0.,0.,0., 0.,0.,0., 0.,0.,0., 0.,0.,0.,

10.,90.,00., 00.,90.,10., 00.,100.,0.,
10.,90.,00., 00.,00.,00., 00.,00.,00.,
0.,0.,0., 0.,0.,0., 0.,0.,0., 0.,0.,0.,

20.,80.,00., 10.,80.,10., 05.,90.,5.,
10.,90.,00., 20.,80.,00., 00.,00.,00.,
0.,0.,0., 0.,0.,0., 0.,0.,0., 0.,0.,0.,

10.,80.,10., 00.,80.,20., 00.,90.,10.,
5.,90.,5., 10.,80.,10., 00.,00.,00.,
0.,0.,0., 0.,0.,0., 0.,0.,0., 0.,0.,0.,

30.,70.,00., 20.,70.,10., 10.,80.,10.,
20.,80.,0., 30.,70.,00., 00.,00.,00.,
0.,0.,0., 0.,0.,0., 0.,0.,0., 0.,0.,0.,

20.,70.,10., 10.,70.,20., 10.,80.,10.,
20.,70.,10., 00.,00.,00., 00.,00.,00.,
0.,0.,0., 0.,0.,0., 0.,0.,0., 0.,0.,0.,

10.,70.,20., 00.,70.,30., 00.,80.,20.,
10.,80.,10., 10.,70.,20., 00.,00.,00.,
0.,0.,0., 0.,0.,0., 0.,0.,0., 0.,0.,0.,

40.,60.,00., 30.,60.,10., 20.,70.,10.,
30.,70.,00., 40.,60.,00., 00.,00.,00.,
0.,0.,0., 0.,0.,0., 0.,0.,0., 0.,0.,0.,

30.,60.,10., 20.,60.,20., 15.,70.,15.,
20.,70.,10., 30.,60.,10., 00.,00.,00.,
0.,0.,0., 0.,0.,0., 0.,0.,0., 0.,0.,0.,

20.,60.,20., 10.,60.,30., 10.,70.,20.,
15.,70.,15., 20.,60.,20., 00.,00.,00.,
0.,0.,0., 0.,0.,0., 0.,0.,0., 0.,0.,0.,

10.,60.,30., 00.,60.,40., 00.,70.,30.,
10.,70.,20., 10.,60.,30., 00.,00.,00.,
0.,0.,0., 0.,0.,0., 0.,0.,0., 0.,0.,0.,

50.,50.,00., 40.,50.,10., 30.,60.,10.,
40.,60.,00., 50.,50.,00., 00.,00.,00.,

0.,0.,0., 0.,0.,0., 0.,0.,0., 0.,0.,0.,
 40.,50.,10., 30.,50.,20., 20.,60.,20.,
 30.,60.,10., 40.,50.,10., 00.,00.,00.,
 0.,0.,0., 0.,0.,0., 0.,0.,0., 0.,0.,0.,
 30.,50.,20., 20.,50.,30., 20.,60.,20.,
 30.,50.,20., 00.,00.,00., 00.,00.,00.,
 0.,0.,0., 0.,0.,0., 0.,0.,0., 0.,0.,0.,
 20.,50.,30., 10.,50.,40., 10.,60.,30.,
 20.,60.,20., 20.,50.,30., 00.,00.,00.,
 0.,0.,0., 0.,0.,0., 0.,0.,0., 0.,0.,0.,
 10.,50.,40., 00.,50.,50., 00.,60.,40.,
 10.,60.,30., 10.,50.,40., 00.,00.,00.,
 0.,0.,0., 0.,0.,0., 0.,0.,0., 0.,0.,0.,
 10.,00.,90., 00.,00.,100., 00.,10.,90.,
 10.,10.,80., 10.,00.,90., 00.,00.,00.,
 0.,0.,0., 0.,0.,0., 0.,0.,0., 0.,0.,0.,
 20.,00.,80., 10.,00.,90., 10.,10.,80.,
 20.,10.,70., 20.,00.,80., 00.,00.,00.,
 0.,0.,0., 0.,0.,0., 0.,0.,0., 0.,0.,0.,
 10.,10.,80., 00.,10.,90., 00.,20.,80.,
 10.,20.,70., 10.,10.,80., 00.,00.,00.,
 0.,0.,0., 0.,0.,0., 0.,0.,0., 0.,0.,0.,
 30.,00.,70., 20.,00.,80., 20.,10.,70.,
 30.,10.,60., 30.,00.,70., 00.,00.,00.,
 0.,0.,0., 0.,0.,0., 0.,0.,0., 0.,0.,0.,
 20.,10.,70., 10.,10.,80., 10.,20.,70.,
 20.,20.,60., 20.,10.,70., 00.,00.,00.,
 0.,0.,0., 0.,0.,0., 0.,0.,0., 0.,0.,0.,
 10.,20.,70., 00.,20.,80., 00.,30.,70.,
 10.,30.,60., 10.,20.,70., 00.,00.,00.,
 0.,0.,0., 0.,0.,0., 0.,0.,0., 0.,0.,0.,
 40.,00.,60., 30.,00.,70., 30.,10.,60.,
 40.,10.,50., 40.,00.,60., 00.,00.,00.,
 0.,0.,0., 0.,0.,0., 0.,0.,0., 0.,0.,0.,
 30.,10.,60., 20.,10.,70., 20.,20.,60.,
 30.,20.,50., 30.,10.,60., 00.,00.,00.,
 0.,0.,0., 0.,0.,0., 0.,0.,0., 0.,0.,0.,
 20.,20.,60., 10.,20.,70., 10.,30.,60.,
 20.,30.,50., 20.,20.,60., 00.,00.,00.,
 0.,0.,0., 0.,0.,0., 0.,0.,0., 0.,0.,0.,
 10.,30.,60., 00.,30.,70., 00.,40.,60.,
 10.,40.,50., 10.,30.,60., 00.,00.,00.,
 0.,0.,0., 0.,0.,0., 0.,0.,0., 0.,0.,0.,
 40.,10.,50., 30.,10.,60., 30.,20.,50.,
 40.,20.,40., 40.,10.,50., 00.,00.,00.,

0.,0.,0., 0.,0.,0., 0.,0.,0., 0.,0.,0.,
 30.,20.,50., 20.,20.,60., 20.,30.,50.,
 30.,30.,40., 30.,20.,50., 00.,00.,00.,
 0.,0.,0., 0.,0.,0., 0.,0.,0., 0.,0.,0.,
 20.,30.,50., 10.,30.,60., 10.,40.,50.,
 20.,40.,40., 20.,30.,50., 00.,00.,00.,
 0.,0.,0., 0.,0.,0., 0.,0.,0., 0.,0.,0.,
 10.,40.,50., 00.,40.,60., 00.,50.,50.,
 10.,50.,40., 10.,40.,50., 00.,00.,00.,
 0.,0.,0., 0.,0.,0., 0.,0.,0., 0.,0.,0.,
 40.,20.,40., 30.,20.,50., 30.,30.,40.,
 35.,30.,35., 40.,20.,40., 00.,00.,00.,
 0.,0.,0., 0.,0.,0., 0.,0.,0., 0.,0.,0.,
 30.,30.,40., 20.,30.,50., 20.,40.,40.,
 30.,40.,30., 30.,30.,40., 00.,00.,00.,
 0.,0.,0., 0.,0.,0., 0.,0.,0., 0.,0.,0.,
 20.,40.,40., 10.,40.,50., 10.,50.,40.,
 20.,50.,30., 20.,40.,40., 00.,00.,00.,
 0.,0.,0., 0.,0.,0., 0.,0.,0., 0.,0.,0.,
 60.,00.,40., 40.,00.,60., 40.,10.,50.,
 50.,10.,40., 60.,00.,40., 00.,00.,00.,
 0.,0.,0., 0.,0.,0., 0.,0.,0., 0.,0.,0.,
 50.,10.,40., 40.,10.,50., 40.,20.,40.,
 50.,10.,40., 00.,00.,00., 00.,00.,00.,
 0.,0.,0., 0.,0.,0., 0.,0.,0., 0.,0.,0.,
 40.,30.,30., 30.,30.,40., 30.,40.,30.,
 40.,30.,30., 00.,00.,00., 00.,00.,00.,
 0.,0.,0., 0.,0.,0., 0.,0.,0., 0.,0.,0.,
 40.,40.,20., 30.,40.,30., 25.,50.,25.,
 30.,50.,20., 40.,40.,20., 0.,0.,0.,
 0.,0.,0., 0.,0.,0., 0.,0.,0., 0.,0.,0.,
 30.,40.,30., 20.,40.,40., 20.,50.,30.,
 25.,50.,25., 30.,40.,30., 00.,00.,00.,
 0.,0.,0., 0.,0.,0., 0.,0.,0., 0.,0.,0.,
 100.,00.,0., 88.9,00.,11.1, 79.,11.1,9.9,
 88.9,11.1,0., 100.,0.,0., 00.,00.,00.,
 0.,0.,0., 0.,0.,0., 0.,0.,0., 0.,0.,0.,
 88.9,11.1,0., 44.4,11.2,44.4, 25.,50.,25.,
 50.,50.,0., 88.9,11.1,0., 00.,00.,00.,
 0.,0.,0., 0.,0.,0., 0.,0.,0., 0.,0.,0.,
 88.9,0.,11.1, 50.,0.0,50., 44.4,11.2,44.4,
 79.,11.1,9.9, 88.9,0.0,11.1, 00.,00.,00.,
 0.,0.,0., 0.,0.,0., 0.,0.,0., 0.,0.,0.,

0.0,100.,0.0, 0.,88.9,11.1, 11.1,88.9,0.0,
0.0,100.,0.0, 00.0,0.0,00.0, 00.,00.,00.,
0.,0.,0., 0.,0.,0., 0.,0.,0., 0.,0.,0.,

50.0,50.,0.0, 25.,50.,25., 5.55,88.9,5.55,
11.1,88.9,0.0, 50.0,50.0,00.0,00.,00.,00.,
0.,0.,0., 0.,0.,0., 0.,0.,0., 0.,0.,0.,

25.0,50.,25.0, 00.,50.,50., 0.,88.9,11.1,
5.55,88.9,5.55,25.0,50.0,25.0,00.,00.,00.,
0.,0.,0., 0.,0.,0., 0.,0.,0., 0.,0.,0.,

0.0,0.0,100.0,0.,11.1,88.9, 9.9,11.1,79.0,
11.1,0.0,88.9, 0.0,0.0,100., 00.,00.,00.,
0.,0.,0., 0.,0.,0., 0.,0.,0., 0.,0.,0.,

44.4,11.2,44.4,0.,11.1,88.9, 0.0,50.,50.,
25.,50.,25.0,44.4,11.2,44.4, 00.,00.,00.,
0.,0.,0., 0.,0.,0., 0.,0.,0., 0.,0.,0.,

50.0,0.0,50.,11.1,0.0,88.9, 9.9,11.1,79.0,
44.4,11.2,44.4,50.0,0.0,50.0, 00.,00.,00.,
0.,0.,0., 0.,0.,0., 0.,0.,0., 0.,0.,0.,

100.,0.,0., 66.65,0.,33.35,0.,16.65,33.35,
50.,33.35,16.65,66.65,33.35,0.,100.,0.,0.,
0.,0.,0., 0.,0.,0., 0.,0.,0., 0.,0.,0.,

66.6,0.,33.3, 50.,16.65,33.35,40.,20.,40.,
33.3,16.6,50.,33.3,0.,66.6,66.65,0.,33.35,
0.,0.,0., 0.,0.,0., 0.,0.,0., 0.,0.,0.,

66.6,33.3,0., 50.,33.3,16.65, 40.,40.,20.,
33.3,50.,16.6, 33.3,66.6,0.,66.6,33.35,0.,
0.,0.,0., 0.,0.,0., 0.,0.,0., 0.,0.,0.,

0.,100.,0., 0.,66.6,33.35,16.65,50.,33.35,
33.3,50.,16.6, 33.35,66.65,0., 0.,100.,0.,
0.,0.,0., 0.,0.,0., 0.,0.,0., 0.,0.,0.,

0.,66.6,33.3, 16.6,50.,33.35, 20.,40.,40.,
16.6,33.3,50., 0.,33.3,66.6,0.,66.6,33.35,
0.,0.,0., 0.,0.,0., 0.,0.,0., 0.,0.,0.,

0.,0.,100.,33.3,0.,66.65, 33.35,16.65,50.,
16.6,33.35,50.,0.,33.35,66.65, 0.,0.,100.,
0.,0.,0., 0.,0.,0., 0.,0.,0., 0.,0.,0.,

50.,16.6,33.3, 50.,33.3,16.6, 40.,40.,20.,
33.3,50.,16.6, 16.6,50.,33.3, 20.,40.,40.,
16.6,33.3,50., 33.3,16.6,50., 40.,20.,40.,
50.,16.65,33.35,

0.,0.,100., 25.,0.,75., 19.,25.,56.,
0.,25.,75., 0.,0.,100., 0.,0.,0.,
0.,0.,0., 0.,0.,0., 0.,0.,0., 0.,0.,0.,

```

50.,0.,50., 25.,0.,75., 19.,25.,56.,
37.5,25.,37.5, 50.,0.,50., 0., 0., 0.,
0.,0.,0., 0.,0.,0., 0.,0.,0., 0.,0.,0.,

50.,0.,50., 75.,0.,25., 56.,25.,19.,
37.5,25.,37.5, 50.,0.,50., 0., 0., 0.,
0.,0.,0., 0.,0.,0., 0.,0.,0., 0.,0.,0.,

100.,0.,0., 75.,0.,25., 56.,25.,19.,
75.,25.,0., 100.,0.,0., 0., 0., 0.,
0.,0.,0., 0.,0.,0., 0.,0.,0., 0.,0.,0.,

75.,25.,0., 56.,25.,19., 37.5,50.,12.5,
50.,50.,0., 75.,25.,0., 0., 0., 0.,
0.,0.,0., 0.,0.,0., 0.,0.,0., 0.,0.,0.,

56.,25.,19., 37.5,25.,37.5,25.,50.,25.,
37.5,50.,12.5, 56., 25., 19., 0.,0.,0.,
0.,0.,0., 0.,0.,0., 0.,0.,0., 0.,0.,0.,

37.5,25.,37.5, 19.,25.,56., 12.5,50.,37.5,
25.,50.,25., 37.5,25.,37.5,0., 0., 0.,
0.,0.,0., 0.,0.,0., 0.,0.,0., 0.,0.,0.,

0.,25.,75., 0.,50.,50., 12.5,50.,37.5,
19.,25.,56., 0.,25.,75., 0., 0., 0.,
0.,0.,0., 0.,0.,0., 0.,0.,0., 0.,0.,0.,

25.,50.,25., 0.,50.,50., 0.,75.,25.,
12.5,75.,12.5, 25.,50.,25., 0., 0., 0.,
0.,0.,0., 0.,0.,0., 0.,0.,0., 0.,0.,0.,

50.,50.,0., 25.,50.,25., 12.5,75.,12.5,
25.,75.,0., 50.,50.,0., 0., 0., 0.,
0.,0.,0., 0.,0.,0., 0.,0.,0., 0.,0.,0.,

0.,100.,0., 0.,75.,25., 25.,75.,0.,
0.,100.,0., 0.,0.,0., 0., 0., 0.,
0.,0.,0., 0.,0.,0., 0.,0.,0., 0.,0.,0.};

```

```

float CentroClasses[LITNUMFACIES][165] =
{100.,0.,0., 60.,30.,10., 40.,50.,10., 20.,70.,10.,
0.,100.,0., 10.,70.,20., 10.,50.,40., 10.,30.,60.,
0.,0.,100., 45.,10.,45., 35.,30.,35., 25.,50.,25.,
0.,0.,0., 0.,0.,0., 0.,0.,0., 0.,0.,0.,
0.,0.,0., 0.,0.,0., 0.,0.,0., 0.,0.,0.,
0.,0.,0., 0.,0.,0., 0.,0.,0., 0.,0.,0.,
0.,0.,0., 0.,0.,0., 0.,0.,0., 0.,0.,0.,
0.,0.,0., 0.,0.,0., 0.,0.,0., 0.,0.,0.,
0.,0.,0., 0.,0.,0., 0.,0.,0., 0.,0.,0.,
0.,0.,0., 0.,0.,0., 0.,0.,0., 0.,0.,0.,
0.,0.,0., 0.,0.,0., 0.,0.,0., 0.,0.,0.,
0.,0.,0., 0.,0.,0., 0.,0.,0., 0.,0.,0.,
0.,0.,0., 0.,0.,0., 0.,0.,0., 0.,0.,0.,
80.,10.,10., 55.,10.,35., 35.,10.,55.,
10.,10.,80., 45.,40.,15., 15.,40.,45.,
30.,60.,10., 10.,60.,30., 7.5,85.,7.5,
0., 0., 0., 0., 0., 0., 0., 0., 0.,

```

0.,0.,0., 0.,0.,0., 0.,0.,0., 0.,0.,0.,
0.,0.,0., 0.,0.,0., 0.,0.,0., 0.,0.,0.,
0.,0.,0., 0.,0.,0., 0.,0.,0., 0.,0.,0.,
0.,0.,0., 0.,0.,0., 0.,0.,0., 0.,0.,0.,
0.,0.,0., 0.,0.,0., 0.,0.,0., 0.,0.,0.,
0.,0.,0., 0.,0.,0., 0.,0.,0., 0.,0.,0.,
0.,0.,0., 0.,0.,0., 0.,0.,0., 0.,0.,0.,
0.,0.,0., 0.,0.,0., 0.,0.,0., 0.,0.,0.,
0.,0.,0., 0.,0.,0., 0.,0.,0., 0.,0.,0.,
0.,0.,0., 0.,0.,0., 0.,0.,0., 0.,0.,0.,
0.,0.,0., 0.,0.,0., 0.,0.,0., 0.,0.,0.,
0.,0.,0., 0.,0.,0., 0.,0.,0., 0.,0.,0.,

85.,7.5,7.5, 60.,30.,10., 60.,10.,30., 7.5,85.,7.5,
30.,60.,10., 10.,60.,30., 7.5,10.,82.5, 30.,10.,60.,
10.,30.,60., 35.,30.,35., 0., 0., 0., 0., 0., 0.,
0.,0.,0., 0.,0.,0., 0.,0.,0., 0.,0.,0.,
0.,0.,0., 0.,0.,0., 0.,0.,0., 0.,0.,0.,
0.,0.,0., 0.,0.,0., 0.,0.,0., 0.,0.,0.,
0.,0.,0., 0.,0.,0., 0.,0.,0., 0.,0.,0.,
0.,0.,0., 0.,0.,0., 0.,0.,0., 0.,0.,0.,
0.,0.,0., 0.,0.,0., 0.,0.,0., 0.,0.,0.,
0.,0.,0., 0.,0.,0., 0.,0.,0., 0.,0.,0.,
0.,0.,0., 0.,0.,0., 0.,0.,0., 0.,0.,0.,
0.,0.,0., 0.,0.,0., 0.,0.,0., 0.,0.,0.,
0.,0.,0., 0.,0.,0., 0.,0.,0., 0.,0.,0.,
0.,0.,0., 0.,0.,0., 0.,0.,0., 0.,0.,0.,

85.,7.5,7.5, 60.,30.,10., 60.,10.,30., 7.5,85.,7.5,
30.,60.,10., 10.,60.,30., 7.5,10.,82.5, 30.,10.,60.,
10.,30.,60., 33.,33.,34., 0., 0., 0., 0., 0., 0.,
0.,0.,0., 0.,0.,0., 0.,0.,0., 0.,0.,0.,
0.,0.,0., 0.,0.,0., 0.,0.,0., 0.,0.,0.,
0.,0.,0., 0.,0.,0., 0.,0.,0., 0.,0.,0.,
0.,0.,0., 0.,0.,0., 0.,0.,0., 0.,0.,0.,
0.,0.,0., 0.,0.,0., 0.,0.,0., 0.,0.,0.,
0.,0.,0., 0.,0.,0., 0.,0.,0., 0.,0.,0.,
0.,0.,0., 0.,0.,0., 0.,0.,0., 0.,0.,0.,
0.,0.,0., 0.,0.,0., 0.,0.,0., 0.,0.,0.,
0.,0.,0., 0.,0.,0., 0.,0.,0., 0.,0.,0.,
0.,0.,0., 0.,0.,0., 0.,0.,0., 0.,0.,0.,

90.,5.,5., 80.,5.,15., 80.,15.,5.,
70.,5.,25., 70.,15.,15., 70.,25.,5.,
60.,5.,35., 60.,15.,25., 60.,25.,15., 60.,35.,5.,
50.,15.,35., 50.,25.,25., 50.,35.,15., 50.,45.,5.,
40.,25.,35., 40.,35.,25., 40.,45.,15.,

2.5,95.,2.5, 10.,85.,5., 5.,85.,10.,
20.,75.,5., 15.,75.,10., 5.,75.,20.,
30.,65.,5., 20.,65.,15., 15.,65.,20.,
5.,65.,30., 40.,55.,5., 30.,55.,15.,
22.5,55.,22.5, 15.,55.,30., 5.,55.,40.,

05.,05.,90., 15.,05.,80., 05.,15.,80.,
25.,05.,70., 15.,15.,70., 05.,25.,70.,
35.,05.,60., 25.,15.,60., 15.,25.,60., 05.,35.,60.,
35.,15.,50., 25.,25.,50., 15.,35.,50., 05.,45.,50.,
35.,25.,40., 25.,35.,40., 15.,45.,40.,

0., 0.85, 1.,
0.75, 0.35, 1.,
0.75, 0.60, 1.0,
0.75, 0.80, 1.,

0.6, 0., 0.,
1., 0., 0.,
1., 0.76, 0.,
1., 1., 0.,
1.0, 0.5, 0.5,
1., 1., 0.55,
0.50, 1.0, 0.50,
0.75, 1., 0.,
0., 0.75, 0.,

0.6, 0., 0.,
1., 0., 0.,
1., 0.5, 0.5,
1., 1., 0.,
1., 0.76, 0.,
1., 1., 0.55,
0.75, 1., 1.,
0., 1., 1.,
0.40, 1.0, 1.0,
0.75, 0.80, 1.,

0.6, 0., 0.,
1., 0., 0.,
1., 0.5, 0.5,
1., 1., 0.,
1., 0.76, 0.,
1., 1., 0.55,
0.75, 1., 1.,
0., 1., 1.,
0.40, 1.0, 1.0,
0.75, 0.80, 1.,

1.0, 1.0, 0.8,
1.0, 1.0, 0.55,
1.0, 1.0, 0.55,
1.0, 1.0, 0.3,
1.0, 1.0, 0.3,
1.0, 1.0, 0.3,
1.0, 1.0, 0.05,
1.0, 1.0, 0.05,
1.0, 1.0, 0.05,
1.0, 1.0, 0.05,
1.0, 0.698, 0.0,
1.0, 0.698, 0.0,
1.0, 0.698, 0.0,
1.0, 0.698, 0.0,
0.698, 0.698, 0.098,
0.698, 0.698, 0.098,
0.698, 0.698, 0.098,

0.000, 0.75, 0.0,
0.000, 1.00, 0.0,
0.000, 1.00, 0.0,
0.250, 1.000, 0.000,
0.250, 1.000, 0.000,
0.250, 1.000, 0.000,

0.298,1.000,0.298,
0.298,1.000,0.298,
0.298,1.000,0.298,
0.298,1.000,0.298,
0.500,1.000,0.098,
0.500,1.000,0.098,
0.500,1.000,0.098,
0.500,1.000,0.098,
0.500,1.000,0.098,

0.800,1.000,1.000,
0.550,1.000,1.000,
0.550,1.000,1.000,
0.300,1.000,1.000,
0.300,1.000,1.000,
0.300,1.000,1.000,
0.050,1.000,1.000,
0.050,1.000,1.000,
0.050,1.000,1.000,
0.050,1.000,1.000,
0.000,0.800,1.000,
0.000,0.800,1.000,
0.000,0.800,1.000,
0.000,0.800,1.000,
0.000,0.600,0.600,
0.000,0.600,0.600,
0.000,0.600,0.600,

0.494,0.396,0.796,
0.498,0.400,0.600,
0.75,0.80,1.,
0.75,0.80,1.,
0.75,0.80,1.,

1.0,0.32,0.05,
1.0,1.0,0.75,
1.0,1.0,0.0,
0.0,0.50,1.,
0.4,1.0,1.,
0.0,1.0,1.,
0.0,1.0,0.,
0.75,1.0,0.,
0.5,1.0,0.,

1.0,0.32,0.05,
1.0,1.0,0.,
0.4,1.0,1.,
0.0,0.50,1.,
0.5,1.0,0.,
0.0,1.0,0.,
0.75,0.80,1.,

0.75,1.,1.,
0.40,1.0,1.0,
0.,1.,1.,
0.,0.85,1.,
0.75,0.,0.75,
0.75,0.,1.,
0.75,0.40,1.0,
0.75,0.65,1.,
0.5,1.0,0.,

```

        0.0,1.0,0.,
        1.,0.32,0.05};

char    *NomeClasses [122] = {"01","02","03","04","05",
                              "06","07","08","09","10",
                              "11","12",

                              "01","02","03","04","05",
                              "06","07","08","09",

                              "01","02","03","04","05",
                              "06","07","08","09","10",

                              "01","02","03","04","05",
                              "06","07","08","09","10",

                              "01","02","03","04","05",
                              "06","07","08","09","10",
                              "11","12","13","14","15",
                              "16","17","18","19","20",
                              "21","22","23","24","25",
                              "26","27","28","29","30",
                              "31","32","33","34","35",
                              "36","37","38","39","40",
                              "41","42","43","44","45",
                              "46","47","48","49","50",
                              "51","52","53","54",

                              "01","02","03","04","05",
                              "06","07","08","09",

                              "01","02","03","04","05",
                              "06","07",

                              "01","02","03","04","05",
                              "06","07","08","09","10",
                              "11"};

float    CoresEndMembers[27][3] = {1.,0.32,0.05,
                                   0.,1.,0.,
                                   0.,0.85,1.,

                                   0.6,0.,0.,
                                   0.,0.75,0.,
                                   1.,1.,0.,

                                   0.6,0.,0.,
                                   1.,1.,0.,
                                   0.75,1.,1.,

                                   0.6,0.,0.,
                                   1.,1.,0.,
                                   0.75,1.,1.,

                                   1.0,1.0,0.8,
                                   0.000,0.75,0.0,
                                   0.800,1.000,1.000,

                                   1.0,0.32,0.05,
                                   0.0,0.50,1.,
                                   0.0,1.0,0.,

```

1.0,0.32,0.05,
0.0,0.50,1.,
0.0,1.0,0.,

0.,0.85,1.,
1.,0.32,0.05,
0.75,1.,1.,

1.0,0.32,0.05,
0.0,0.50,1.,
0.0,1.0,0.};

8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ARONOFF, S. *Geographic Information Systems: A Management Perspective*, WDL Publications, Canada, 1989.

BALDWIN, J. L.; BATEMAN, A. R. M.; WHEATLEY, C. L. “Application of Neural Network to the Problem of Mineral Identification From Well Logs”, *The Log Analyst*, v. 3, p. 279-293, 1990.

BALDWIN, J. L.; OTTE, D. N.; WHEATLEY, C. L. “Computer Emulation of Human Mental Process: Application of Neural Network Simulations to Problems in Well Log Interpretation”, *Society of Petroleum Engineers SPE*, paper 19619, p. 481-493, 1989.

CAMPOS, I. O. *Análise de técnicas para o estabelecimento de modelos digitais de terrenos*, Tese M. Sc., USP - São Carlos, São Paulo, 1994.

CARVALHO, Deborah R. *Data Mining através de indução de regras e algoritmos genéticos*, M. Sc., PUC-PR, abril, 1999.

CHANG, H.; KOPASKA-MERKEL, D. C.; CHEN, H. “Identification of Lithofacies Using Kohonen Self-Organizing Maps”, *Computers and Geoscience*, n.28, p. 223-229, 2002.

CLARK, D. A. “A System for Regional Lithofacies Mapping”, *Bulletin of Canadian Petroleum Geology*, v.20, n.2, p. 197-208, jun 1981.

CUNHA, E. S. *Identificação de litofácies de poços de petróleo utilizando um método baseado em redes neurais artificiais*, Tese M. Sc., Universidade Federal de Campina Grande, agosto, 2002.

DICKEY, PARKE, A., ROHN, RICHARD E. “Facies Control of Oil Occurrence”, *Bulletin of The American Association of Petroleum Geologists*, v.39, n.11, p.2.306-2.320, nov 1955.

DOVETON, John H. "Composition Analysis of Lithologies from Wireline Logs", *Geologic Log Analysis Using Computer Methods AAPG Computer Application in Geology*, n.2, p.47-63, 1994.

_____. "The Geological Application of Wireline Logs; A Keynote Perspective", *Geological Application of Well Logs - AAPG Methods in Exploration*, n.13, p.115-122, 2002.

DUARTE, O. O. *Dicionário enciclopédico inglês-português de geofísica e geologia*. 2 ed. Rio de Janeiro, Sociedade Brasileira de Geofísica, 2003.

ESTER, M.; FROMMELT, A.; KRIEGEL, H.; SANDER, J. "Spatial Data Mining: Database Primitives, Algorithms and Efficient DBMS Support", *Data Mining and Knowledge Discovery*, n.4, p.193-216, 2000.

FARIN, G. *Curves and Surfaces for Computer Aided Geometric Design*, New York, Academic Press Inc., 1988.

FAYYAD, U. M.; SHAPIRO, G. P.; SMYTH, P. & UTHURUSAMY, R. *Advances in Knowledge Discovery and Data Mining*, AAAI Press, The MIT Press, 1996.

FIGUEIREDO, L. H.; CARVALHO, P. C. P. *Introdução à geometria computacional*, Rio de Janeiro, Instituto de Matemática Pura e Aplicada, 1991.

FOLK, R. L. "The Distinction Between Grain Size and Mineral Composition in Sedimentary Rock Nomenclature", *J. Geol.*, v.62, p.334-359, 1954.

FOLK, ROBERT L. *Petrology of Sedimentary Rocks*, University of Texas, 1964.

FORGOTSON, J. M. "Review and Classification of Quantitative Mapping Techniques", *Bulletin of The American Association of Petroleum Geologists*, v.44, n.1, p.83-100, jan 1960.

_____. "Depositional History and Paleotectonic Framework of Comanchean Cretaceous Trinity Stage, Gulf Coast Area", *Bulletin of The American Association of Petroleum Geologists*, v.47, n.1, p.69-103, jan 1963.

GORSLINE, D. S. *Lecture*, Univ. of Texas at Austin, 1960.

KRUMBEIN, W. C. “Lithofacies Maps and Regional Sedimentary Stratigraphic Analysis”, *Bulletin of The American Association of Petroleum Geologists*, v.32, n.10, p.1.909-1.923, oct 1948.

KRUMBEIN, W. C. “Regional and Local Components in Facies Maps”, *Bulletin of The American Association of Petroleum Geologists*, v.40, n.9, p.2.163-2.194, sep 1956.

_____. “The Tetrahedron as a Facies Mapping Device”, *Journal of Sedimentary Petrology*, v.24, n.1, p.3-19, mar 1954.

_____.; PETTIJOHN, F. J. *Manual of Sedimentary Petrography* 1 ed. New York, The Century Earth Science Series, 1938.

KUMAR, ANISH, KEAR, GEORGE R. “Lithofacies Classification Based on Spectral Yields and Borehole Microresistivity Images”, *GCAGS/GCSSEPM Transactions*, v.53, 2003.

LEMOS, Carlos A. A. *Uma implementação fuzzy de algoritmo para classificação de dados*, Tese M. Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, out 1999.

MACBRIDE, Earle F. “Mathematical Treatment of Size Distribution Data”, *Procedures in Sedimentary Petrology*, v. , n.1, p.109-127, 1971.

MICHIE, D.; SPIEGELHALTER, D. J.; TAYLOR, C. C. *Machine Learning, Neural and Statistical Classification*. Ellis Horwood, p.35-36, 1994.

MORAIS, D. R. S. *Inteligência computacional na classificação litológica*, Tese M. Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, out 2004.

OPENSHAW, S.; TURTON I. “A Parallel Kohonen Algorithm for the Classification of Large Spatial Datasets”, *Computer & Geosciences*, v.22, n.9, p.1.019-1.026, 1996.

PELTO, CHESTER R. “Mapping of Multicomponent Systems”, *Jour. Geol.*, v.62, n.5, p.501-511, aug 1953.

PESCE, Mark, *VRML-Browsing and Building Cyberspace*, Indianapolis: New Riders Publishing, 1995.

ROGERS, Samuel J.; FANG, J. H.; KARR, C. L.; STANLEY, D. A. “Determination of Lithology from Well Logs Using a Neural Network”, *The American Association of Petroleum Geologists Bulletin*, v.76, n.5, p.731-739, 1992.

SAMET, Hanan. *Applications of Spatial Data Structures*. Massachusetts, AddisonWesley Reading, 1990.

SANTOS, Saulo F.; ARAÚJO, L. M.; MARTINS, F. A. L.; OLIVEIRA FILHO, J. S.; PAULA, O. B. “*Inferências Paleogeográficas a Partir de Diagramas Litofaciológicos – Exemplos da Porção Meridional da Bacia de Santos*”, Petrobras, VI Seminário de Interpretação Exploratória, Aracajú, 2003.

SCHNEIDER, Philip J.; EBERLY, David H. *Geometric Tools for Computer Graphics*, Morgan Kaufmann Publishers, 2003.

SCHRAMM, Martin W. “Paleogeologic and Quantitative Lithofacies Analysis”, *Bulletin of The American Association of Petroleum Geologists*, v.48, n.7, p.1.164-1.195, jul 1964.

SHEPARD, F. P. “Nomenclature Based on Sand-Silt-Clay Ratios”, *J. Sed. Pet.*, v.24, p.151-158, 1967.

WALKER, Roger G. *Facies Models*, 2 ed. Geoscience Canada, 1984.

WITTEN, Ian H.; FRANK, Eibe. *Data Mining Practical Machine Learning Tools and Techniques with Java Implementations*. California: Morgan Kaufmann Publishers, 1999.

WOLFF, M.; PELISSIER-COMBESURE, J. “Faciolog: Automatic Electrofacies Determination”, *SPWLA Annual Logging Symposium*, paper FF, p.6-9, 1982.

WONG, P. M.; JIAN, F. X.; TAGGART, I. J. “A Critical Comparison of Neural Network and Discriminant Analysis in Lithofacies, Porosity and Permeability Predictions”, *Journal of Petroleum Geology*, v.18, p.191-206, apr 1995.

XIAOWEI, Xu; JAGER, J.; KRIEGEL, H. "A Fast Parallel Clustering Algorithm for Large Spatial Databases", *Data Mining and Knowledge Discovery*, n.3, p.263-290, 1999.

ZANGL, G.; HANNERER, J. *Data Mining: Applications in The Petroleum Industry* Round Oak Publishing, 2003.

Livros Grátis

(<http://www.livrosgratis.com.br>)

Milhares de Livros para Download:

[Baixar livros de Administração](#)

[Baixar livros de Agronomia](#)

[Baixar livros de Arquitetura](#)

[Baixar livros de Artes](#)

[Baixar livros de Astronomia](#)

[Baixar livros de Biologia Geral](#)

[Baixar livros de Ciência da Computação](#)

[Baixar livros de Ciência da Informação](#)

[Baixar livros de Ciência Política](#)

[Baixar livros de Ciências da Saúde](#)

[Baixar livros de Comunicação](#)

[Baixar livros do Conselho Nacional de Educação - CNE](#)

[Baixar livros de Defesa civil](#)

[Baixar livros de Direito](#)

[Baixar livros de Direitos humanos](#)

[Baixar livros de Economia](#)

[Baixar livros de Economia Doméstica](#)

[Baixar livros de Educação](#)

[Baixar livros de Educação - Trânsito](#)

[Baixar livros de Educação Física](#)

[Baixar livros de Engenharia Aeroespacial](#)

[Baixar livros de Farmácia](#)

[Baixar livros de Filosofia](#)

[Baixar livros de Física](#)

[Baixar livros de Geociências](#)

[Baixar livros de Geografia](#)

[Baixar livros de História](#)

[Baixar livros de Línguas](#)

[Baixar livros de Literatura](#)
[Baixar livros de Literatura de Cordel](#)
[Baixar livros de Literatura Infantil](#)
[Baixar livros de Matemática](#)
[Baixar livros de Medicina](#)
[Baixar livros de Medicina Veterinária](#)
[Baixar livros de Meio Ambiente](#)
[Baixar livros de Meteorologia](#)
[Baixar Monografias e TCC](#)
[Baixar livros Multidisciplinar](#)
[Baixar livros de Música](#)
[Baixar livros de Psicologia](#)
[Baixar livros de Química](#)
[Baixar livros de Saúde Coletiva](#)
[Baixar livros de Serviço Social](#)
[Baixar livros de Sociologia](#)
[Baixar livros de Teologia](#)
[Baixar livros de Trabalho](#)
[Baixar livros de Turismo](#)