

Marcelo Bernardes Vieira
Orientador: Arnaldo de Albuquerque Araújo
Co-orientador: Paulo Martins Jr.

Vetorização e Análise de Tendência de Cartas de Lineamentos Geológicos

Dissertação apresentada ao Curso de Pós-Graduação em Ciência da Computação da Universidade Federal de Minas Gerais como requisito parcial para a obtenção do grau de Mestre em Ciência da Computação.

Belo Horizonte
9 de Março de 1998

Dedico este trabalho à memória de meu pai, Aristóbulo Vieira dos Santos, que sempre respeitou, incentivou e apoiou as minhas aspirações.

Agradecimentos

À minha mãe e ao meu irmão, pelo companheirismo.

À Fernanda Mineiro Fernandes, pelo carinho, compreensão e pela valiosa colaboração.

Ao prof. Arnaldo de Albuquerque Araújo, por sua orientação, incentivo e apoio.

Ao prof. Paulo Pereira Martins Jr., pela amizade, paciência e pelos ensinamentos sempre pertinentes.

À Fundação Centro Tecnológico de Minas Gerais, pelo apoio.

Resumo

Vetorização e Análise de Tendência de Cartas de Lineamentos Geológicos

O principal objetivo deste trabalho foi desenvolver uma metodologia para vetorização de lineamentos representativos de estruturas rúpteis em imagens de cartas para sua análise de tendência.

Com o uso de técnicas de processamento digital de imagens e métodos estatísticos de regressão, propõe-se uma alternativa ao processo clássico de análise de tendência no que diz respeito à medição dos atributos dos lineamentos e à sua representação matemática.

Neste trabalho, apresenta-se os problemas, os conceitos e as soluções pertinentes à aquisição dos atributos. Isso corresponde ao conjunto de questões que vão desde os parâmetros básicos sobre a confecção da carta até a obtenção da topologia observada, passando pelo método de vetorização em imagens afinadas.

Para a análise de tendência, usa-se a modelagem matemática dos dados obtidos com a aplicação de uma função de regressão polinomial. Soluções para representar graficamente a tendência de uma topologia a partir de um polinômio também são apresentadas.

Um estudo comparativo entre o resultado obtido pela metodologia proposta e pelo processo clássico de análise de tendência sobre uma mesma região é realizado neste trabalho. O resultado obtido a partir desse estudo é favorável à utilização dos processos propostos.

Abstract

Vectorization and Trend Analysis of Mapped Geological Lineations

The main objective of this work was to develop a methodology for vectorization of lines representing rock structures such as joints drawn in structural maps.

Using digital image processing techniques and statistical regression methods, an alternative to the classical process of topological trend analysis is proposed for the measurements of lineation attributes and their mathematical representation.

The problems, concepts and pertinent solutions for the acquisition of those attributes are presented in this work. These subjects are in correspondence to the questions about the basic parameters of mapping, the vectorization methods in thinned images and the retrieving of topological tendencies.

The mathematical modeling of the data is done with the application of polynomial function regression. Solutions for graphical representation of the topological trends obtained with the polynomial functions are also presented.

A comparative study with both methods for a common region is presented here. The comparative results obtained from the methodology proposed here and those from the classical process of data retrieving and trend analysis are shown to be of high confidence. Thus the results of this research are favorable to the use of the proposed processes.

SUMÁRIO

1 - ANÁLISE GEO-ESTRUTURAL: CONSIDERAÇÕES INICIAIS.....	10
1.1 - INTRODUÇÃO	10
1.2 - O PROCESSO CLÁSSICO DE ANÁLISE GEO-ESTRUTURAL	11
1.2.1 - <i>As fases do processo clássico</i>	11
1.2.1.1 - Aquisição de dados por sensores sobre a região de interesse.....	12
1.2.1.2 - Interpretação visual dos dados	12
1.2.1.3 - Transcrição dos dados.....	12
1.2.1.4 - Medição sistemática das estruturas	12
1.2.1.5 - Produção da geo-estatística.....	13
1.2.1.6 - Interpretação estrutural no espaço e no tempo	14
1.3 - O PROCESSO PROPOSTO PARA AUTOMAÇÃO	14
1.3.1 - <i>Objetivos</i>	15
1.3.1.1 - Metas do desenvolvimento tecnológico	16
1.3.1.2 - Trabalhos relacionados	16
1.4 - PROPEDÊUTICA	17

SEÇÃO I - A AQUISIÇÃO DE ATITUDES

2 - O MÉTODO DE AQUISIÇÃO DE ATITUDES	20
2.1 - INTRODUÇÃO	20
2.2 - DO OBJETO REAL AO OBJETO OPERACIONAL.....	21
2.2.1 - <i>Do objeto real ao objeto formal</i>	21
2.2.2 - <i>Do objeto formal ao objeto operacional</i>	22
2.3 - O PROCESSO DE VETORIZAÇÃO	23
2.3.1 - <i>Os objetos operacionais como vetores</i>	24
2.4 - AMOSTRAGEM E QUANTIFICAÇÃO	25
2.4.1 - <i>Parâmetros da imagem</i>	25
2.4.2 - <i>Frequência espacial</i>	27
2.4.3 - <i>A carta de estruturas rúpteis</i>	29
2.4.3.1 - O meio de transcrição	29
2.4.3.2 - A caneta e o traçado dos lineamentos	30
2.4.3.3 - O contraste entre fundo e objeto	31
2.5 - ADEQUAÇÃO DA IMAGEM	31
2.5.1 - <i>Propriedades da imagem</i>	32
2.5.2 - <i>Segmentação da imagem</i>	34
2.5.2.1 - Limiarização	34
2.5.2.2 - Seleção interativa.....	35
2.5.3 - <i>A imagem binária</i>	36
2.5.3.1 - Fechamento morfológico	37
2.6 - SÍNTESE E CONCLUSÃO.....	38
3 - REPRESENTAÇÃO LINEAR.....	40
3.1 - INTRODUÇÃO	40
3.2 - ASPECTOS GERAIS DA REPRESENTAÇÃO LINEAR.....	41
3.2.1 - <i>Etapas da representação linear</i>	42
3.3 - AFINAMENTO DOS LINEAMENTOS.....	44
3.3.1 - <i>Métodos iterativos de afinamento</i>	45
3.3.2 - <i>O método de Zhang-Suen</i>	46
3.3.3 - <i>Distorções na fase de afinamento</i>	47

3.4 - DETERMINAÇÃO DOS SEGMENTOS E SEGMENTAÇÃO DAS CURVAS.....	50
3.4.1 - <i>Linearização das curvas</i>	52
3.4.2 - <i>Prolongamento dos extremos finais</i>	53
3.5 - JUNÇÃO DOS SEGMENTOS COLINEARES E CONSECUTIVOS.....	54
3.5.1 - <i>Problemas com a junção dos menores segmentos</i>	56
3.6 - SÍNTESE E CONCLUSÃO.....	58
4 - PROCESSAMENTO MÉTRICO E ANÁLISE DE ERRO.....	60
4.1 - INTRODUÇÃO	60
4.2 - PROCESSAMENTO MÉTRICO.....	61
4.2.1 - <i>Isolamento e agrupamento dos vetores</i>	62
4.2.2 - <i>Medição de atitudes e cálculo da topologia nas unidades</i>	63
4.2.2.1 - O comprimento	63
4.2.2.2 - O azimute.....	64
4.3 - AQUISIÇÃO DE ATITUDES E ANÁLISE DE ERRO	65
4.3.1 - <i>A análise de erro</i>	66
4.3.1.1 - Variação do processo de aquisição	67
4.3.1.2 - Medida de aderência dos dados	67
4.3.2 - <i>Somatório dos comprimentos</i>	69
4.3.3 - <i>Média dos azimutes</i>	70
4.3.4 - <i>Quantidade de lineamentos</i>	71
4.4 - SÍNTESE E CONCLUSÃO.....	71
 SEÇÃO II - A ANÁLISE TOPOLÓGICA	
5 - ANÁLISE DE TENDÊNCIA.....	74
5.1 - INTRODUÇÃO	74
5.2 - ANÁLISE DE TENDÊNCIA POLINOMIAL	75
5.2.1 - <i>Critério dos mínimos quadrados</i>	75
5.2.2 - <i>Classificação de funções de tendência</i>	76
5.2.3 - <i>Cálculo dos coeficientes</i>	77
5.2.3.1 - Coeficientes do polinômio até o oitavo grau	78
5.2.4 - <i>Medida estatística de aderência do polinômio</i>	79
5.3 - REGRESSÃO POLINOMIAL DE DADOS OBSERVADOS	80
5.4 - SÍNTESE E CONCLUSÃO.....	83
6 - REPRESENTAÇÃO TOPOLÓGICA: UM ESTUDO COMPARATIVO.....	84
6.1 - INTRODUÇÃO	84
6.2 - O ESTUDO REALIZADO NA ÁREA DE SERRA AZUL-MATEUS LEME	84
6.3 - ANÁLISE TOPOLÓGICA AUTOMÁTICA DA SERRA AZUL-MATEUS LEME	87
6.4 - CONCLUSÃO GERAL	91
6.4.1 - <i>Encaminhamentos prospectivos</i>	92
7 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	94

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1.1 - FASES DO PROCESSO CLÁSSICO DE ANÁLISE ESTRUTURAL.....	11
FIGURA 1.2 - ESTRUTURAS RÚPTEIS NO LESTE DE SÃO PAULO E SUL DO RIO DE JANEIRO NA ESCALA DE 1:1.000.000.....	13
FIGURA 1.3 - FASES DA ANÁLISE ESTRUTURAL COM AUTOMAÇÃO.	14
FIGURA 2.1 - MODELO DO PROCESSO AUTOMÁTICO DE MEDIÇÃO DE ATITUDES.	21
FIGURA 2.2 - DO OBJETO FORMAL AO OBJETO OPERACIONAL.....	22
FIGURA 2.3 - O PROCESSO DE VETORIZAÇÃO NO DIAGRAMA DE BLOCOS DA AQUISIÇÃO DE ATITUDES.	23
FIGURA 2.4 - OBJETO OPERACIONAL COMO VETOR	24
FIGURA 2.5 - GRADE DE AMOSTRAGEM E SEUS INTERVALOS.	26
FIGURA 2.6 - A FREQUÊNCIA DE NYQUIST.....	27
FIGURA 2.7 - EXEMPLOS DE DISTÂNCIAS A SEREM CONSIDERADAS E <i>ALIASING</i>	28
FIGURA 2.8 - EXEMPLOS DE CARTAS DIGITALIZADAS E DE SEUS CONTRASTES A 200PPP E COM CANETA PRETA DE 0,5MM DE ESPESSURA.....	29
FIGURA 2.9 - IMAGEM DE ESTRUTURAS EM POLIESTER COM CANETA AZUL DE 1MM A 100PPP.....	30
FIGURA 2.10 - IMAGEM DE CARTA DE ESTRUTURAS RÚPTEIS EM PAPEL VEGETAL A 200PPP	32
FIGURA 2.11 - HISTOGRAMA BIMODAL.	32
FIGURA 2.12 - HISTOGRAMA DA IMAGEM DA FIGURA 2.10.....	33
FIGURA 2.13 - IMAGEM BINARIZADA COM LIMIAR = 130.....	35
FIGURA 2.14 - SEGMENTAÇÃO DA IMAGEM PELA SELEÇÃO DO OBJETO NA TABELA DE CORES.....	36
FIGURA 2.15 - PROBLEMAS DA SEGMENTAÇÃO E SEUS REFLEXOS NA IMAGEM AFINADA.....	37
FIGURA 2.16 - RESULTADO DO AFINAMENTO APÓS A OPERAÇÃO DE FECHAMENTO	38
FIGURA 3.1 - PARTE DE UMA CARTA COM LINEAMENTOS.	41
FIGURA 3.2 - RESULTADO DA VETORIZAÇÃO DA IMAGEM DO DÍGITO “6”	42
FIGURA 3.3 - O PROCESSO DE REPRESENTAÇÃO LINEAR	43
FIGURA 3.4 - EXEMPLOS DO NÚMERO DE CONEXIDADE	45
FIGURA 3.5 - EXEMPLOS DO MÉTODO DE AFINAMENTO DE ZHANG & SUEN (1984).....	47
FIGURA 3.6 - EXEMPLOS DAS DISTORÇÕES GERADAS NO AFINAMENTO	48
FIGURA 3.7 - MÁSCARAS UTILIZADAS PARA O ESTÁGIO DE PRÉ-PROCESSAMENTO DE ÊNFASE DE ÂNGULOS AGUDOS.	49
FIGURA 3.8 - ELIMINAÇÃO DE PONTOS REDUNDANTES.....	49
FIGURA 3.9 - APLICAÇÃO DA PRÉ-SUAVIZAÇÃO, ÊNFASE DE ÂNGULOS AGUDOS, AFINAMENTO DE ZHANG-SUEN E ELIMINAÇÃO DE PONTOS REDUNDANTES NA IMAGEM DA FIGURA 3.1.....	50
FIGURA 3.10 - DETECÇÃO DOS SEGMENTOS A PARTIR DA IMAGEM AFINADA.....	51
FIGURA 3.11 - MENORES SEGMENTOS COM LINEARIZAÇÃO DAS CURVAS.....	52
FIGURA 3.12 - SEGMENTAÇÃO DE UM LINEAMENTO CURVILÍNEO ATRAVÉS DE APROXIMAÇÃO POLIGONAL: $D(p1) > \alpha$, $D(p2) > \alpha$ E $D(p3) > \alpha$	52
FIGURA 3.13 - SEGMENTO DETECTADO MENOR QUE O LINEAMENTO	53
FIGURA 3.14 - REPRESENTAÇÃO DOS MENORES SEGMENTOS COMO UM GRAFO	54
FIGURA 3.15 - VERIFICAÇÃO DO SEGMENTO FORMADO POR VÉRTICES ADJACENTES A V	55
FIGURA 3.16 - DETERMINAÇÃO DOS MAIORES VETORES PELA VERIFICAÇÃO DOS VÉRTICES PERTENCENTES AOS ARCOS DO VÉRTICE A SER ANALISADO.....	55
FIGURA 3.17 - FORMAÇÃO DE GRUPOS PARA CONEXÃO	57
FIGURA 3.18 - LIGAÇÃO DOS VÉRTICES DOS GRUPOS E ENTRE OS GRUPOS.....	58
FIGURA 4.1 - ISOLAMENTO DA ÁREA DE INTERESSE E AGRUPAMENTO DOS LINEAMENTOS EM UNIDADES DE MALHA	61
FIGURA 4.2 - ELEMENTOS PARA O RECORTE DE RETAS.	62
FIGURA 4.3 - RECORTE DOS LINEAMENTOS NA REGIÃO DE INTERESSE E NA MALHA.	63
FIGURA 4.4 - EXEMPLO DE OBSERVAÇÃO DE TOPOLOGIA	64
FIGURA 4.5 - DIAGRAMA DE BLOCOS DA AQUISIÇÃO DE ATITUDES.....	65
FIGURA 4.6 - TRECHO DE CARTA USADA NA ANÁLISE DE ERRO EM TAMANHO REAL.....	66

FIGURA 5.1 - AJUSTE DE LINHA RETA A UM CONJUNTO DE PONTOS E POSSÍVEIS CRITÉRIOS PARA MINIMIZAÇÃO DE DESVIOS QUADRÁTICOS	76
FIGURA 5.2 - CLASSIFICAÇÃO DE POLINÔMIOS EM RELAÇÃO AO NÚMERO DE VARIÁVEIS E AO GRAU E SUA REPRESENTAÇÃO GEOMÉTRICA.	77
FIGURA 5.3 - IMAGEM DE LINEAMENTOS, OS SEGMENTOS DIVIDIDOS EM UNIDADES DE 25 POR 25 PONTOS E OS DADOS OBSERVADOS SOBRE O SOMATÓRIO DOS COMPRIMENTOS (EM PONTOS) COM X E Y CENTRADOS NA UNIDADE DE MALHA.	81
FIGURA 5.4 - SUPERFÍCIES GERADAS PELA FUNÇÃO POLINOMIAL CALCULADA E OS DADOS ESTIMADOS DA SUPERFÍCIE DE OITAVO GRAU COM $R=0,55$	82
FIGURA 6.1 - ESTRUTURAS RÚPTEIS DA REGIÃO DE SERRA AZUL - MATEUS LEME.	85
FIGURA 6.2 - MAPA DE TENDÊNCIA DOS VALORES CALCULADOS PARA O SOMATÓRIO DOS COMPRIMENTOS DAS FRATURAS POR UNIDADE DE MALHA. A LINHA SÓLIDA INDICA AS ISOLINHAS E A PONTILHADA INDICA CONTATOS GEOLÓGICOS.	87
FIGURA 6.3 - SUPERFÍCIES DE TENDÊNCIA DOS DADOS OBSERVADOS AUTOMATICAMENTE NA ÁREA DE SERRA AZUL E AS RESPECTIVAS ISOLINHAS DO PRIMEIRO E SEGUNDO GRAUS.	88
FIGURA 6.4 - SUPERFÍCIES DE TENDÊNCIA DOS DADOS OBSERVADOS AUTOMATICAMENTE NA ÁREA DE SERRA AZUL E AS RESPECTIVAS ISOLINHAS DO TERCEIRO AO SEXTO GRAUS.	89
FIGURA 6.5 - SUPERFÍCIES DE TENDÊNCIA DOS DADOS OBSERVADOS AUTOMATICAMENTE NA ÁREA DE SERRA AZUL E AS RESPECTIVAS ISOLINHAS DO SÉTIMO E OITAVO GRAUS.	90
FIGURA 6.6 - DIAGRAMA DE BLOCOS DA DETECÇÃO AUTOMÁTICA E ANÁLISE TOPOLÓGICA DE ESTRUTURAS RÚPTEIS.	91

1 - ANÁLISE GEO-ESTRUTURAL: CONSIDERAÇÕES INICIAIS

1.1 - Introdução

As geociências lidam, freqüentemente, com estruturas terrestres como rochas nas dimensões de montanhas inteiras, de bacias sedimentares ou de tamanho microscópico como anisotropias em corpos rochosos.

Segundo LOCZY & LADEIRA (1980), a *geotectônica* é a ciência da estrutura e deformação da crosta terrestre, ocupando-se dos movimentos e processos deformatórios originados no interior do globo. A *geologia estrutural*, englobada pela geotectônica, ocupa-se com o estudo da forma, da atitude e do modo de ocorrência de rochas na crosta, sendo essas apresentadas nas mais variadas formas e configurações. Assim, a geologia estrutural é a ciência que estuda a forma e a geometria externa e interna dos corpos rochosos, isto é, a sua estrutura.

O tema deste trabalho visa criar um instrumento efetivo de estudo para um tipo de anisotropia específica das rochas denominadas estruturas rúpteis, que são fissuras ou planos partidos ao longo dos quais tem havido pouco ou nenhum deslocamento (BADGLEY, 1965). Assim, estrutura rúptil ou lineamentar, é um objeto de estudo da geologia estrutural e geotectônica.

Tais estruturas advêm de diversos fatos físicos que ocorrem sobre as rochas, tais como compressões, distensões, torções cisalhantes, descompressões litostáticas (peso do corpo rochoso), que deixam marcas como *fraturas* nos corpos rochosos, conforme se estuda no domínio da geologia estrutural e geotectônica.

As estruturas aparecem em aero-fotos, imagens de radar, imagens de satélite e outras como lineamentos mais ou menos retilíneos (HAMAN, 1964). Sua determinação dá-se através de análise geológica nessas fontes e o resultado é uma carta contendo somente as linhas que representam as estruturas rúpteis. Sua representação, portanto, possui aspecto de retas ou quase retas que têm direção e sentido nos quatro eixos cardiais já que as estruturas expressam alterações vetoriais nos corpos rochosos provenientes de tensões tangenciais ou gravitacionais na crosta terrestre.

As estruturas lineamentares são anisotrópicas, não são inerentes a qualquer tipo de rocha, mas são impostas em diversas situações geológicas.

O significado dessas estruturas é de extrema importância para se entender as distribuições de tensões na crosta terrestre, para a pesquisa de petróleo, para a pesquisa de água subterrânea, análise morfo-estrutural, zoneamentos geo-ecológicos (MARTINS & ROSA, 1993; MARTINS et al., 1994b), para estudos de evolução estrutural de corpos rochosos, montanhas, bacias sedimentares, oceanos e mares em geral. São úteis também para a prospecção mineral e para se avaliar os risco de infiltração de poluentes

em água subterrânea e fontes (SILVA et al., 1989).

As estruturas lineamentares são lidas por dois de seus atributos mais simples conhecidos como *atitudes* (LOCZY & LADEIRA, 1980:197), ou posição no espaço, da estrutura, a saber, o comprimento e o azimute. Com essas duas referências e as posições relativas, pode-se extrair grande quantidade de informações e correlações que envolvem questões de distribuição espacial e temporal dos eventos produtores dessas anisotropias (BLANCHET, 1956).

É na leitura desses atributos que se concentra o desenvolvimento deste trabalho. A proposta é apresentar soluções para viabilizar a determinação automática dessas atitudes a partir de cartas.

1.2 - O processo clássico de análise geo-estrutural

O trato com a questão das estruturas lineamentares é consagrado e encontra solução via análise clássica, uso de SIG¹, de CAD², de pacotes estatísticos e de outros recursos computacionais, existentes hoje, combinados. Entretanto, existe o problema da não integralização dos sistemas envolvidos no processo e problemas com complexidades existentes para isso.

1.2.1 - As fases do processo clássico

O modo tradicional de se estudar as estruturas rúpteis baseia-se nas fases ilustradas na FIGURA 1.1.

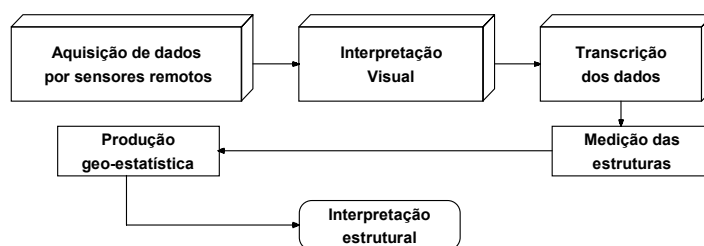


FIGURA 1.1 - Fases do processo clássico de análise estrutural.

Algumas etapas desta seqüência de operações podem ser suportadas por ferramentas automatizadas, obtendo-se soluções parciais.

¹ SIG: Sistema de Informação Geográfica.

² CAD: *Computer Aided Design*, ou projeto assistido por computador.

1.2.1.1 - Aquisição de dados por sensores sobre a região de interesse

São quatro as principais fontes de dados sobre as estruturas rúpteis:

- aero-fotos;
- imagem de radar;
- imagem de satélite;
- perfis sísmicos.

A partir dessas fontes pode-se extrair as informações das estruturas lineamentares, distinguindo-as entre outras feições não estruturais. As aero-fotos têm sido as mais utilizadas fontes de informação sobre essas estruturas. Os recursos das outras fontes podem ser usados para completar o conteúdo da carta com a agregação de novos dados pertinentes à questão estrutural.

1.2.1.2 - Interpretação visual dos dados

No caso de aero-fotos, as imagens são analisadas aos pares para se obter a estereoscopia e com ela a distinção entre as diversas estruturas. A decisão sempre envolve análise interpretativa, o que impede uma eventual automatização completa do processo. Essa automatização implicaria no modelo ideal de análise de estruturas rúpteis suprimindo várias etapas do processo clássico.

1.2.1.3 - Transcrição dos dados

A transcrição dá-se pelas técnicas convencionais de desenho. Com as aero-fotos, essa transcrição se faz através da confecção de mosaicos. No caso de fitas em papel de imagens de radar³ aero-transportado, ocorre também a montagem de mosaicos. Cópias de mapas são usadas extensivamente nas transcrições.

Os dados dos mosaicos montados são transferidos para uma carta segundo regras derivadas das formas de vôo, de tomada das fotos e de métodos de restituição óptica.

1.2.1.4 - Medição sistemática das estruturas

A proposta principal deste trabalho se insere nesta fase. Após a transcrição de dados, a carta confeccionada pode conter milhares de lineamentos (FIG. 1.2a). A produção estatística não se dá diretamente nesses lineamentos, e sim em divisões da carta em sub-unidades (FIG. 1.2b). Dada uma sub-unidade, deve-se medir as atitudes de cada lineamento (FIG. 1.2c, d). Obviamente, quanto menor essa divisão maior o número de lineamentos a serem medidos.

³ Projeto RADAM, ou Radar na Amazônia.

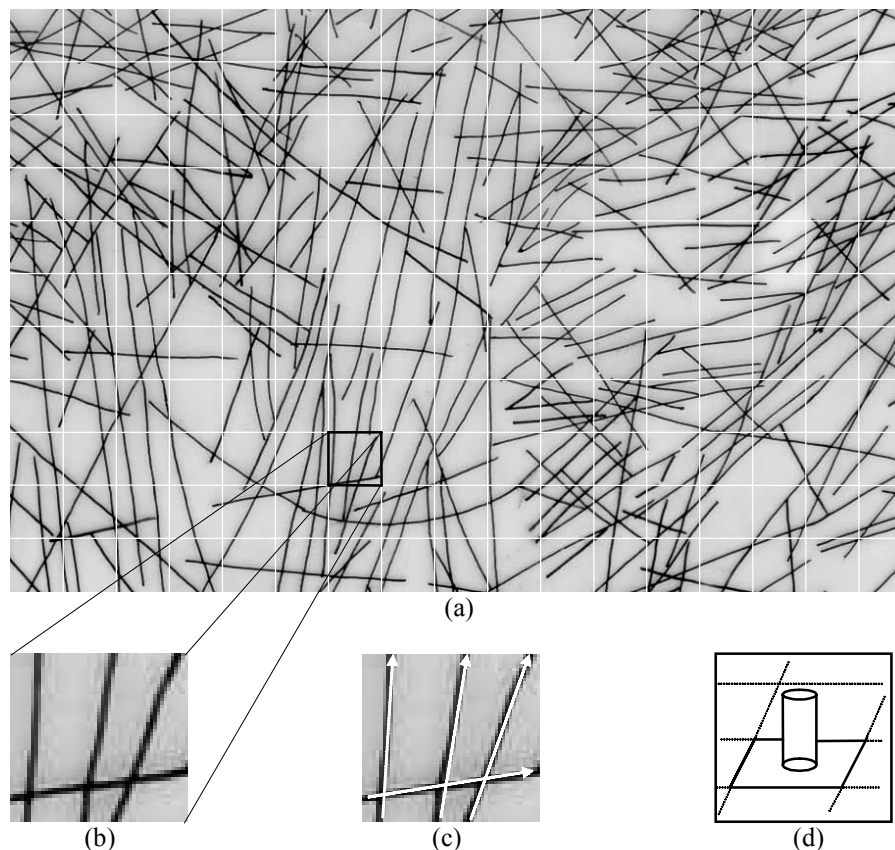


FIGURA 1.2 - Estruturas rúpteis no leste de São Paulo e sul do Rio de Janeiro na escala de 1:1.000.000

(a) Estruturas rúpteis em região montanhosa (b) Unidade de malha isolada
(c) Linhas detectadas (d) Representação do valor topológico calculado a partir de todos os valores dos lineamentos.

No processo clássico, esses lineamentos são medidos a partir do uso de régua e transferidor para os comprimentos e azimutes. Um nível maior de automação pode ser obtido a partir de mesas digitalizadoras. Mesmo assim, o trabalho estará sujeito a erros e imprecisões em virtude dos desenhos serem de modo geral muito densos de informação.

Neste trabalho, propõe-se medir automaticamente estes lineamentos a partir de imagens das cartas obtidas via leitor óptico.

1.2.1.5 - Produção da geo-estatística

Os valores observados em cada unidade de malhas formam o conjunto de dados nos quais métodos estatísticos de análise são aplicados. Assim, a continuação do processo resume-se na análise geo-matemática e na produção cartográfica.

A análise geo-matemática é realizada através de análises estatísticas com funções polinomiais, série de Fourier e métodos dos mínimos quadrados para a

estimativa das superfícies ideais da topologia, e através de análises espectrais dos dados medidos (DAVIS, 1973; HARBAUGH & MERRIAN, 1968).

Com os dados topológicos sintetizados e geo-referenciados, é produzida a carta contendo suas estimativas representadas por isolinhas de tendência. Esta modelagem topológica pode ser automatizada juntamente com a medição de atitudes.

1.2.1.6 - Interpretação estrutural no espaço e no tempo

Esta interpretação derivará de um completo relatório sobre as análises produzidas que permitirá ao geólogo realizar as interpretações diversas para petróleo, água subterrânea, evolução estrutural, geotecnia, segurança de obras de engenharia, sismologia, etc.

1.3 - O processo proposto para automação

As questões de informática envolvidas derivam do fato de que as estruturas rúpteis costumam ser numerosas em qualquer área da crosta terrestre, seja em superfície ou sub-superfície, sendo desejável a automação da determinação de seus atributos (SILVA et al., 1989; CAIRE, 1975).

Nesse contexto, os geólogos pouco consagraram seus esforços a fazer uso dessas estruturas extensivamente para questões interpretativas (HARBAUGH & MERRIAN, 1968; HARBAUGH & BONHAM-CARTER, 1970; DAVIS, 1973; MARTINS & ROSA, 1993; MARTINS et al., 1994).

Sua utilidade é enorme, mas seu uso tem sido mínimo. Nesse trabalho busca-se resolver, do modo mais automático possível, medir, contabilizar e expressar matematicamente (FIG. 1.3) as relações no espaço que possam existir entre essas estruturas e outras que existam comumente associadas.

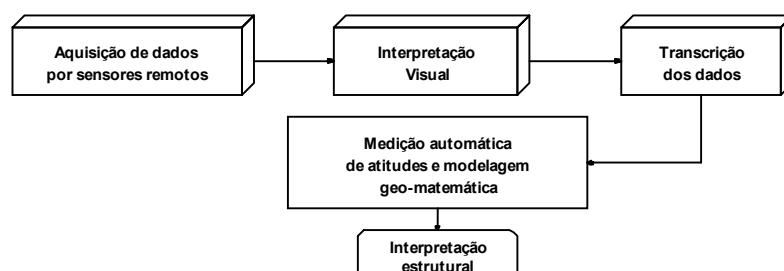


FIGURA 1.3 - Fases da análise estrutural com automação.

A proposta apresenta-se no encaminhamento de soluções de grande utilidade, com fortes repercussões sobre custos operacionais de projetos em termos de homem-hora e de eficiência por meio deste tratamento mais automatizado.

1.3.1 - Objetivos

A premissa primeira para esta dissertação é que a abordagem do tema proposto é eminentemente um *desenvolvimento tecnológico*. Espera-se, portanto, estabelecer regras de análise geo-estrutural baseadas em plataformas computacionais com a adaptação e uso de técnicas existentes.

O *objetivo principal* é desenvolver uma metodologia para a automação da medição de atributos de estruturas rúpteis cartografadas e da sua análise de tendência. Esse objetivo se traduz em apresentar soluções viáveis para as várias etapas que envolvem o processo de análise estrutural das estruturas rúpteis cartografadas, tais como:

- a aquisição e o processamento digital da carta contendo os lineamentos;
- o processamento digital necessário às imagens para a detecção automática dos lineamentos;
- reconhecimento e medição das atitudes dos lineamentos;
- a modelagem matemática de relações topológicas dos atributos.

Objetivos *secundários* surgem como consequência desse objetivo primeiro:

- definir parâmetros para diminuir o tempo de execução da análise de estruturas lineamentares. Este objetivo tem como consequência a diminuição dos custos em projetos de análise estrutural;
- prover métodos para o desenvolvimento de uma ferramenta capaz de integrar, em um só ambiente, recursos de detecção automática de lineamentos e recursos de análise matemática para a montagem de cartas geo-matemáticas (MOLLARD, 1959);
- viabilizar interpretações massivas de toda uma região para o complexo de sub-unidades de estruturas lineamentares como fraturas, falhas e diáclases⁴.

Sendo um desenvolvimento tecnológico, torna-se necessário a definição de metas básicas para o encaminhamento das soluções. Essas metas compõem o conjunto mínimo de soluções que viabilizam os objetivos apresentados.

⁴ São fraturas nas quais não ocorreu deslocamento entre as paredes rochosas paralelas aos planos de ruptura.

1.3.1.1 - Metas do desenvolvimento tecnológico

A partir dos objetivos primários e secundários têm-se como metas básicas da solução as seguintes:

- diminuir os possíveis erros causados na aquisição via leitor óptico pela parametrização da confecção das cartas e da digitalização;
- adequar o resultado da aquisição para a detecção automática com processamento intermediário da imagem;
- obter os segmentos de reta a partir da imagem digitalizada da carta com o mínimo de erro;
- estabelecer métodos para o agrupamento dos segmentos nas sub-regiões e nas unidades de malha;
- estudar o comportamento do processo de aquisição automática de atitudes;
- comparar resultados de análise estatística com funções polinomiais de até 8ª ordem para a modelagem das superfícies da topologia;
- gerar com precisão isolinhas de tendência a partir do modelo matemático;
- realizar o estudo de caso em uma área já interpretada para comparar os resultados das cartas geo-matemáticas.

A solução visa atender, assim, a algumas questões técnicas de máxima importância do ponto de vista funcional. Nos termos da proposta, ela se encerra na questão entre a implantação de uma carta de estruturas lineamentares, sua leitura, medições e a representação de sua tendência para estudos topológicos.

1.3.1.2 - Trabalhos relacionados

Esta proposta encontra-se no entroncamento de soluções parciais (SILVA et al., 1989) não obtidas em um nível satisfatório de operação. Existe a expectativa de colocar essas soluções como parte de um sistema único amigável (MARTINS et al., 1997).

Nesse sentido, essa proposta e seu produto inserem-se na pesquisa e desenvolvimento que vêm sendo realizados na Fundação Centro Tecnológico de Minas Gerais, no sentido de criar-se um Sistema de Informação Científica Ambiental (MARTINS et al., 1993; MARTINS et al., 1994a, b) dentro de critérios de SIG altamente amigáveis e no contexto da abordagem inter-disciplinar para estudos ambientais.

Este trabalho foi realizado em conjunto com as dissertações de mestrado de Cláudio Márcio Silva UFOP/EM/DEGEO, Marco Antônio Martins Cantisano UFOP/EM/DEGEO e Rodrigo Fábio Viana UFV/DEC, que visam realizar estudos geomorfológicos, de geologia estrutural, geotécnicos, ambientais e do ciclo erosão / sedimentação na alta bacia do Rio das Velhas - sub-bacia das Codornas. Essa união

consiste na aplicação desta tecnologia de detecção automática nos trabalhos mencionados, subsidiando-os para um menor tempo de execução e maior eficácia de interpretação.

1.4 - Propedêutica

A abordagem das metas e encaminhamento de soluções passam pela seguinte divisão estrutural da dissertação:

a) seção I - Aquisição das atitudes

- o método de aquisição de atitudes;
- representação linear;
- processamento métrico e análise de erro.

b) seção II - Análise topológica

- análise de tendência;
- representação topológica: um estudo comparativo.

Os capítulos são distribuídos de tal forma que é evidenciada a relação entre essas seções e as duas etapas automatizadas do processo clássico (FIG. 1.1): medição das estruturas e produção geo-estatística.

A seção primeira aborda as questões pertinentes à aquisição de atitudes desde a confecção da carta de estruturas rúpteis. A segunda trata a representação topológica dos dados observados através da análise de tendência.

No primeiro capítulo da primeira seção, são apresentados os conceitos gerais do processo de vetorização de lineamentos e o diagrama de blocos de toda a etapa de aquisição das atitudes. Questões sobre a aquisição e a adequação da imagem são os primeiros aspectos da automação abordados. Entre as fases da vetorização, nesse capítulo são discutidas as soluções para se diminuir os possíveis erros causados na aquisição via leitor óptico. Isso dá-se pelo estudo e levantamento das características da carta e da sua imagem que resultam em um conjunto de constatações e regras para viabilizar as fases seguintes do processo automático.

O capítulo da representação linear é complementar ao primeiro. Nele encerram-se as fases de reconhecimento dos lineamentos com todos os requisitos necessários para se obter o mínimo de erro. Esse capítulo constitui a principal etapa da metodologia proposta.

O terceiro e último capítulo da primeira seção apresenta dois assuntos distintos. O processamento métrico diz respeito às técnicas de isolamento dos vetores

previamente detectados em sub-regiões de interesse, de seu agrupamento em unidades de malha e para sua medição. Essa é a última fase da aquisição de atitudes e seu resultado é a topologia observada, no formato matricial, sobre a imagem. A análise de erro objetiva evidenciar o comportamento da detecção automática em vários casos a partir dos resultados do processamento métrico.

Na segunda seção, apresentam-se as questões relativas à análise de tendência sobre os dados observados automaticamente. Entende-se a análise topológica como sendo a análise de tendência dos valores referentes aos atributos invariáveis das estruturas rúpteis.

No primeiro capítulo é apresentado o método de regressão polinomial que, com o critério dos mínimos quadrados, é utilizado para estimar a superfície de tendência de uma topologia. A regressão polinomial dá-se até superfícies de oitavo grau, possibilitando a geração de cartas precisas de isolinhas de tendência para a interpretação estrutural dos lineamentos.

Para efeito de comparação, todo o processo automático de aquisição e análise de tendência é aplicado em uma carta de estruturas rúpteis real, cuja análise estrutural clássica é conhecida. Procura-se com isso comprovar a eficácia da metodologia desenvolvida, apresentando os resultados sobre a região estudada nos formatos de superfície e isolinhas. Os resultados dessa comparação são apresentados no segundo capítulo da segunda seção.

SEÇÃO I

A AQUISIÇÃO DAS ATITUDES

2 - O MÉTODO DE AQUISIÇÃO DE ATITUDES

2.1 - Introdução

A metodologia de aquisição de atitudes consiste dos processos e das informações necessárias à determinação dos atributos de lineamentos representados em imagens de cartas.

Uma das metas deste trabalho é viabilizar a análise de tendência em estudos de escala regional no que diz respeito à qualidade da análise matemática e ao tempo de execução. Esses fatores são determinantes no custo de um projeto.

O processo de vetorização constitui o centro da questão, já que envolve uma das etapas de maior custo operacional. Dentro da perspectiva gerada pela meta principal, tem-se a possibilidade de uma integração das diversas ferramentas disponíveis no mercado.

O problema da representação da imagem de lineamentos é abordado de acordo com as características inerentes ao objeto real e com alguns requisitos operacionais e metodológicos. Esses requisitos balizam o trabalho no sentido de se objetivar uma maior qualidade dos resultados a serem obtidos.

A aquisição da carta de lineamentos via leitor óptico constitui a primeira fase do processo de vetorização. Uma carta de estruturas rúpteis possui algumas particularidades que definem como esta etapa do processo deve ser parametrizada (GREEN, 1983). Alguns atributos da imagem original, como por exemplo o contraste entre o fundo e o objeto, são determinantes para o sucesso da automação e devem ser levados em consideração já na confecção da carta.

Com os parâmetros adequados, a aquisição simplifica bastante a fase de pré-processamento. Esta etapa objetiva a adaptação da imagem original para o formato binário necessário à fase de representação linear. O ponto central para o pré-processamento é a não alteração das estruturas originais. Preservar os objetos formais significa preservar o potencial de sucesso da análise de tendência.

Aqui, portanto, são dadas as definições da metodologia de aquisição de atitudes e são descritos os problemas, os requisitos, as interfaces e os resultados das etapas básicas do processo de vetorização: a aquisição da imagem da carta, o pré-processamento da imagem, a representação linear e o processamento métrico.

2.2 - Do objeto real ao objeto operacional

As estruturas rúpteis são o *objeto real* em escala de grandeza atual que constituem o alvo da análise topológica (MARTINS, 1997b). A primeira representação está em mapeá-las em imagens. Esta primeira transformação fornece as informações necessárias para a identificação e o agrupamento dos objetos reais.

Através da interpretação geológica são identificados esses objetos reais. As aero-fotos, imagens de satélite, imagens de radar e dados sismográficos, mencionados na FIGURA 2.1, são dados sensoriais das estruturas rúpteis da região piloto.

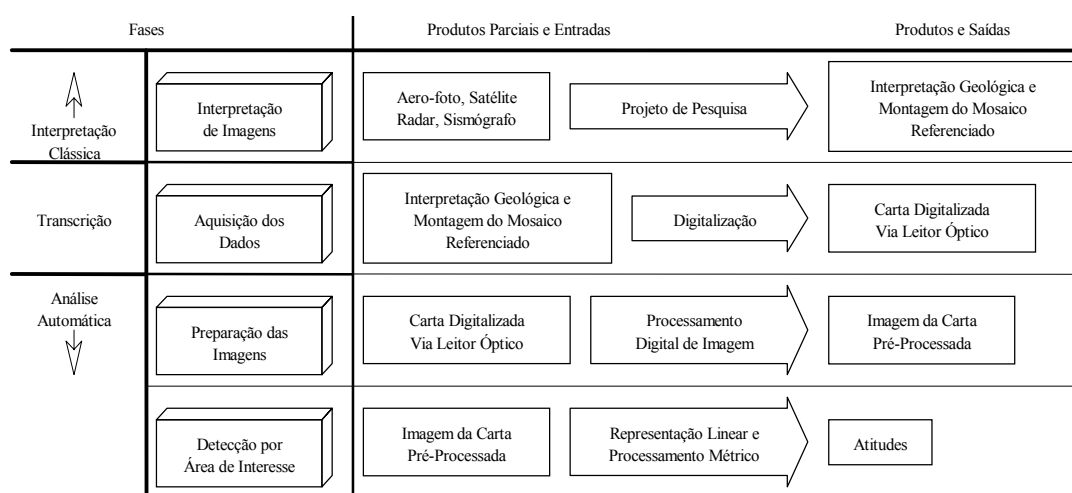


FIGURA 2.1 - Modelo do processo automático de medição de atitudes.

FONTE - MARTINS & VIEIRA, 1997. p.84.

2.2.1 - Do objeto real ao objeto formal

Através da interpretação de imagens sobre uma área de estudo, são determinadas as estruturas rúpteis da região. Isto se dá pela interpretação de dados levantados por sensores. As diversas fontes de informação são unidas e comparadas para a representação cartográfica.

Especialmente a partir das aero-fotos e as imagens de radar, que podem ser agrupadas em mosaicos, obtém-se como produto uma carta, que se apresenta com segmentos de linhas geralmente retilíneos que constituem os *objetos formais* representativos dos objetos reais.

Os objetos formais constituem o final da fase de interpretação clássica (FIG. 2.1). Sendo formais, esses objetos devem obedecer a regras cartográficas na sua transcrição. Por essa formalização, procura-se estabelecer um padrão para a sua confecção facilitando a posterior leitura.

As regras cartográficas dessa transcrição podem sofrer pequenas alterações para

que o processo seja viabilizado. Algumas dessas regras devem ser seguidas para que o processo de vetorização tenha êxito.

Com exceção das regras de confecção da carta que podem ser alteradas, a evolução do objeto real ao objeto formal é a mesma do processo clássico. Os objetos formais são, portanto, a entrada para a metodologia de aquisição de atitudes proposta neste trabalho.

2.2.2 - Do objeto formal ao objeto operacional

O processo de vetorização é aplicado nos objetos formais (FIG. 2.2a) para se obter os objetos operacionais. Define-se como sendo o processo de vetorização a seqüência de ações que transforma a imagem original de uma carta de lineamentos do formato matricial ao vetorial.

O objeto operacional, então, é definido como sendo os vetores representativos (FIG. 2.2b) dos objetos formais, ou seja, os vetores que representam os atributos das estruturas rúpteis.

Os vetores, ou segmentos de linha, mantêm os atributos geométricos desejados dos objetos formais. No espaço vetorial, a determinação desses atributos se dá de forma muito mais simples (SIMONS, 1987; HILL, 1990; MILLMAN & PARKER, 1981).

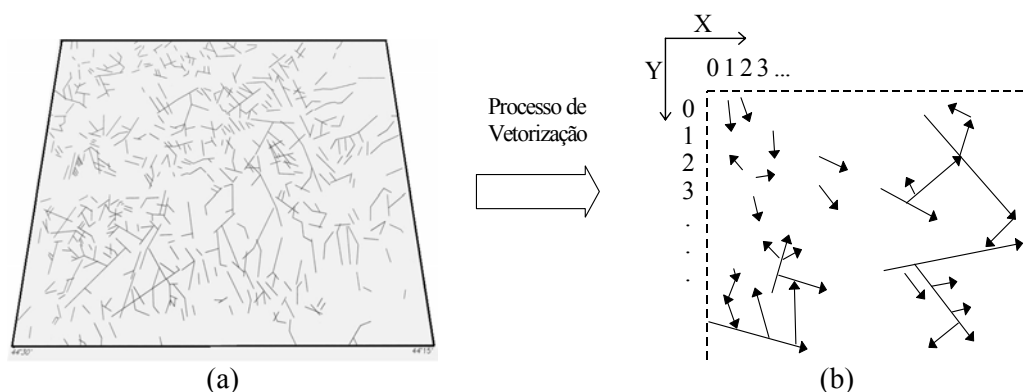


FIGURA 2.2 - Do objeto formal ao objeto operacional

(a) Objeto formal transcrito de dados de sensores: carta de estruturas rúpteis (b) Objeto operacional obtido pelo processo de vetorização: vetores em um plano cartesiano referenciado com a carta.

Os vetores ou objetos operacionais constituem a entrada para o processamento métrico no qual seus atributos serão calculados a partir de regiões de interesse para a análise de tendência.

2.3 - O Processo de Vetorização

Como dito anteriormente, o processo de vetorização (FIG. 2.3) é a sequência de ações que transforma uma carta original de lineamentos do formato matricial ao vetorial. São os processos aplicados nos objetos formais que resultam nos objetos operacionais. O termo *vetorização*, aqui, é usado no contexto de se criar segmentos de linhas a partir de uma imagem (PARKER, 1997).

Constitui apenas uma etapa do processo mais abrangente que é a própria análise topológica. Sendo assim, é necessário uma descrição de todo o processo, desde a transcrição do objeto real, para a identificação de todos os requisitos da representação automatizada.

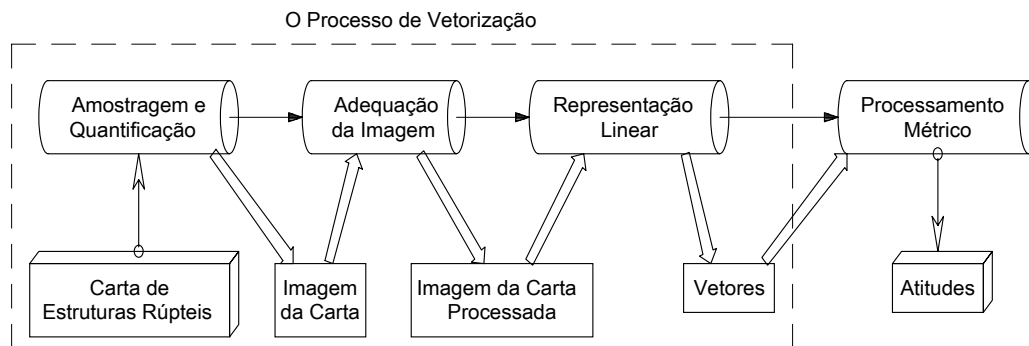


FIGURA 2.3 - O processo de vetorização no diagrama de blocos da aquisição de atitudes.

O objetivo é extrair segmentos de linhas com o máximo de precisão. Dessa forma, pode-se definir como metas básicas desse processo:

- definir parâmetros básicos para a aquisição da imagem a fim de aumentar a qualidade da detecção;
- adequar a imagem aos requisitos básicos do algoritmo de detecção;
- representar os lineamentos como vetores: a partir da imagem processada extrair os lineamentos representativos das estruturas rúpteis.

O primeiro passo é a aquisição da carta via leitor óptico. O objeto formal de entrada para a vetorização é a carta de estruturas rúpteis. Para assegurar uma boa qualidade da imagem deve-se estabelecer parâmetros operacionais para a confecção da carta e para a sua aquisição.

A fase de adequação da imagem objetiva a preparação da imagem original em uma imagem binária, contendo somente os lineamentos das estruturas rúpteis. O processo pelo qual a imagem original deve ser submetida dependerá dos recursos de aquisição utilizados e do método de transcrição da carta (PRATT, 1978).

Em resumo, a amostragem e quantificação e a fase de adequação da imagem têm como objetivo básico a diferenciação entre os pontos do objeto formal e os que

pertencem ao fundo da imagem, codificados em uma imagem binária.

Na representação linear extraem-se os vetores a partir da imagem binária da carta. As estruturas lineares da imagem são transformadas do formato matricial para o vetorial.

O processamento métrico é favorecido com os objetos formais representados como objetos operacionais no espaço vetorial. Esta representação das estruturas rúpteis fornece um conjunto de dados mais favoráveis ao cálculo das atitudes (MILLMAN & PARKER, 1981).

2.3.1 - Os objetos operacionais como vetores

Uma grandeza física como massa, temperatura ou energia cinética é completamente determinada por um único número real que caracteriza sua extensão. Esses exemplos são chamados de grandezas escalares ou simplesmente escalares. Existem outras entidades que precisam da caracterização de dimensão, direção e sentido. São chamadas de grandezas vetoriais ou vetores. Tem-se como exemplo a velocidade, a força e o deslocamento (SIMONS, 1987).

Do ponto de vista matemático, *um vetor é um segmento de reta orientado*. Isso nos dá liberdade de desenvolver a álgebra dos vetores independente de qualquer interpretação particular (SIMONS, 1987:270; BLYTH & ROBERTSON, 1984). A FIGURA 2.4 ilustra um vetor representativo de um lineamento.

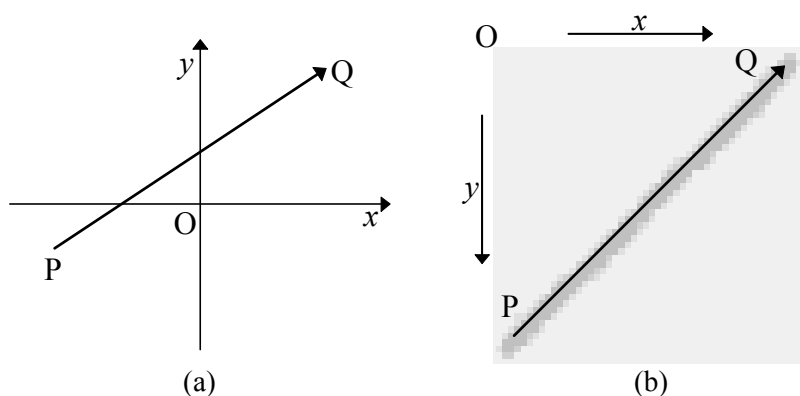


FIGURA 2.4 - Objeto operacional como vetor

(a) Vetor no espaço vetorial R^2 (b) Lineamento representado como vetor nas coordenadas da imagem.

Neste exemplo, a grandeza representa o comprimento e a direção representa o azimuth.

Além dos atributos inerentes às estruturas rúpteis, é preciso referenciar a localização do objeto real. O cálculo de atitudes médias dá-se em sub-regiões da imagem. Dessa forma, é imperativo que se saiba a localização do objeto em relação a

cada sub-região. Um vetor posição $\vec{p}$, em relação à origem da imagem, pode ser utilizado para essa referência de cada objeto formal.

Em uma aplicação mais complexa, na qual é necessário um maior número de atributos, pode-se expandir os graus de liberdade da representação. Por exemplo, se fosse necessário a utilização do atributo largura da estrutura rúptil, poderia se utilizar outros espaços vetoriais como R^3 .

Conclui-se que apenas uma coordenada não é suficiente para a representação da estrutura rúptil. A melhor forma de representá-la é através de duas coordenadas cartesianas que coincidam com seus pontos extremos. Denota-se o vetor que se estende de um ponto P a um ponto Q por $\vec{PQ}$. Chama-se P de ponto inicial e Q de ponto terminal ou extremidades do vetor (SIMONS, 1987; VALLADARES, 1982).

Em resumo, diz-se vetor de uma estrutura rúptil o par de coordenadas $P=(x, y)$ e $Q=(z, t)$ que determinam o segmento de reta correspondente na imagem da carta. Desta forma, o objeto operacional é representado pelo vetor $\vec{PQ}$.

2.4 - Amostragem e Quantificação

No processo de vetorização, a fase de amostragem e quantificação aborda as questões relacionadas com a digitalização da carta de estruturas rúpteis via leitor óptico. Esta etapa dimensiona os requisitos desde a confecção da carta até a sua adequação para a fase de representação linear.

A imagem da carta poderá ser amostrada em níveis de cinza, em cores ou diretamente em preto e branco. No caso de imagens em níveis de cinza e em cores, será necessária a sua binarização. Isso porque a etapa de representação linear requer como entrada uma imagem binária.

Neste trabalho são abordadas as questões relacionadas com a carta digitalizada em níveis de cinza em dois aspectos importantes: a carta possui uma frequência espacial simples por ter somente fundo e lineamentos; a imagem pode ser melhor processada com a informação dada em escala de cinza (JAIN, 1989; CASTLEMAN, 1979).

2.4.1 - Parâmetros da imagem

O modelo de imagem se refere a função de duas variáveis independentes para a intensidade de luz denotada por $f(x, y)$. O valor ou a amplitude de f na coordenada espacial (x, y) significa a intensidade da imagem neste ponto (HAIL, 1972; GONZALEZ, 1992). Para uma imagem $f(x, y)$ contínua representam-se seus componentes de forma matricial. As dimensões dessa imagem, obviamente, são finitas e

a cada elemento pertencente a ela é dado um valor discreto para sua amplitude.

Para o processamento digital, uma função de imagem $f(x, y)$ deve ser digitalizada espacialmente e em amplitude. Na leitura óptica, tem-se a amostragem da imagem e a quantificação de níveis de cinza. Essa amostragem é a digitalização de cada coordenada (x, y) , e a quantificação de níveis de cinza é a digitalização da amplitude de cada elemento (GONZALEZ, 1992:31).

Uma imagem contínua $f(x, y)$ é aproximada por uma matriz de dimensões $N \times M$ na qual cada elemento é um valor discreto da amplitude igualmente espaçados:

$$f(x,y) \approx \begin{bmatrix} f(0, 0) & f(0, 1) & \dots & f(0, M-1) \\ f(1, 0) & f(1, 1) & \dots & f(1, M-1) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ f(N-1, 0) & f(N-1, 1) & \dots & f(N-1, M-1) \end{bmatrix}$$

Esta matriz de aproximação de $f(x, y)$ é chamada de imagem digital. A amostragem da imagem pode ser entendida como a divisão do plano xy em uma grade (FIG. 2.5). As coordenadas do centro de cada elemento são pares de elementos de Z^2 , onde Z é conjunto dos números inteiros. Assim, $f(x, y)$ é uma imagem digital se (x, y) são inteiros de Z^2 e f é uma função que atribui valores de níveis de cinza a cada par distinto de coordenadas (GONZALEZ, 1992). A quantificação é a representação de um valor de amplitude por um inteiro (CASTLEMAN, 1979:8).

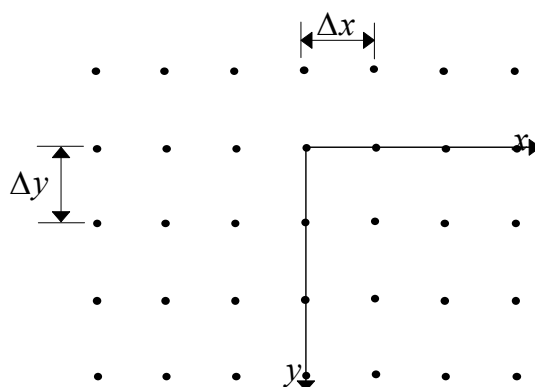


FIGURA 2.5 - Grade de amostragem e seus intervalos.

Para esse tipo de imagem, deve-se decidir a escala de valores discretos de níveis de cinza e as dimensões N e M . No método de detecção automática de lineamentos aqui proposto, estes parâmetros de aquisição devem ser ajustados para a amostragem da carta de estruturas rúpteis.

2.4.2 - Frequência espacial

Para determinar a resolução espacial a ser utilizada é preciso entender o conceito de frequência espacial. Se $f(x, y)$ é a intensidade e x e y são as coordenadas espaciais, então, ε_1 e ε_2 são *frequências espaciais* que representam as mudanças de intensidades dos sinais luminosos em relação às distâncias espaciais. As frequências espaciais podem ser entendidas como a velocidade de variação de brilho, dada uma distância constante (JAIN, 1989).

O que se deseja saber são quais as frequências espaciais ε_{xe} e ε_{ye} de amostragem a serem usadas para que as informações de uma carta, com larguras de banda ou frequências espaciais ε_{x0} e ε_{y0} , não sejam perdidas. Se as frequências de amostragem de x e y são maiores que duas vezes a frequência espacial de uma imagem limitada por banda, ou seja, se $\varepsilon_{xe} > 2\varepsilon_{x0}$ e $\varepsilon_{ye} > 2\varepsilon_{y0}$, ou, equivalentemente, se os intervalos de amostragem são menores que metade do período da largura de banda original, ou seja, se $\Delta x < \frac{1}{2\varepsilon_{x0}}$ e $\Delta y < \frac{1}{2\varepsilon_{y0}}$, então, esta imagem pode ser reconstruída sem

erros a partir da imagem amostrada (JAIN, 1989, CASTLEMAN, 1979). Essa frequência é chamada de frequência de Nyquist (FIG. 2.6).

Se as frequências de amostragem são menores que a frequência de Nyquist, ou $\varepsilon_{xe} < 2\varepsilon_{x0}$ e $\varepsilon_{ye} < 2\varepsilon_{y0}$, então, a imagem amostrada terá um espectro distorcido e informações irreversivelmente perdidas (JAIN, 1989; CASTLEMAN, 1979; GONZALEZ, 1992).

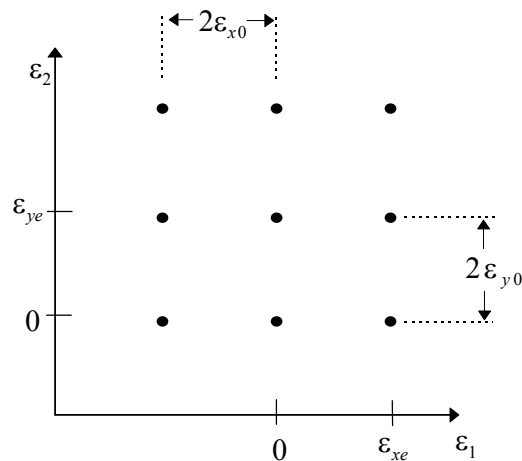


FIGURA 2.6 - A frequência de Nyquist.

As imagens comuns, geralmente, não são limitadas por bandas, mas podem ser aproximadas arbitrariamente por funções limitadas por bandas. Imagens de cartas possuem transições de intensidades bem definidas. Assim, pode-se determinar os valores de Δx e Δy observando-se a maior variação espacial de intensidades por distância.

Os intervalos de amostragem devem ser menores que a metade da menor largura de linha (FIG. 2.7a) ou distância entre elas (FIG. 2.7b) verificadas na carta. Por exemplo, se as linhas desenhadas de uma carta de estruturas rúpteis têm, como menor distância, 0,5 milímetro de espessura de linha, ou distância entre linhas, então, uma amostra deve ser tomada a cada 0,25 milímetro ou menos em cada eixo, para não perder informação da imagem, ou seja, Δx e Δy menores que 0,25mm. Neste caso a menor razão de amostragem é 100ppp⁵. Os valores de N e M serão determinados pelas dimensões da carta.

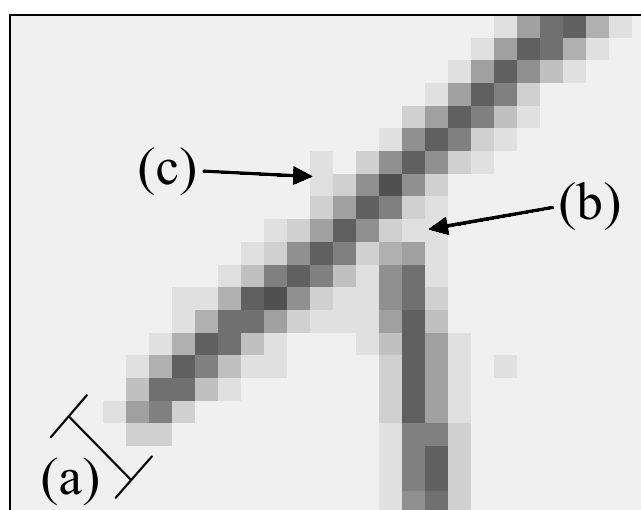


FIGURA 2.7 - Exemplos de distâncias a serem consideradas e *aliasing*

(a) Espessura da linha (b) Menor distância entre linhas: neste caso a amostragem foi feita com frequência menor do que a de Nyquist o que resultou na união das linhas (c) Exemplo do efeito de *aliasing* ou suavização da borda.

Na prática, um melhor resultado pode ser obtido com resoluções de amostragem maiores que as consideradas acima. Porém, deve-se observar o tamanho da imagem já que as cartas podem teoricamente preencher o formato A0, ou 1.188 x 840mm. Além disso, intervalos menores não significam maior acuidade e podem gerar redundâncias que prejudiquem a fase de representação linear. Isto porque no processo de afinamento a informação descartada pode ser importante para a precisão do método.

Recomenda-se utilizar a razão de três ou quatro amostras para a menor espessura ou distância entre linhas, a menos que a imagem fique muito grande ou que seus lineamentos fiquem muito espessos.

Para o nível máximo de cinza, ou a amplitude máxima da imagem, recomenda-se 16 níveis no mínimo. Na digitalização pode ocorrer o efeito de *aliasing* (FIG. 2.7c) que gera uma suavização das bordas do objeto. Esse efeito ocorre nos casos em que a

⁵ Pontos por polegada.

freqüência é menor que a freqüência de recumbência (*foldover*) ($\varepsilon_{xe}/2$ e $\varepsilon_{ye}/2$). Uma escala de cinza pequena pode desfavorecer um eventual processamento para esse caso. Neste trabalho são utilizados 256 níveis de cinza na aquisição das imagens de cartas.

2.4.3 - A carta de estruturas rúpteis

Pela observação de alguns aspectos práticos para a confecção da carta de lineamentos, pode-se diminuir os processos digitais a serem aplicados na sua imagem.

Os dados dos sensores da região piloto são transcritos para uma carta, geralmente em papel vegetal, poliéster e transparência. Como é a partir dessa carta que o processo de vetorização se viabiliza, é necessário fazer algumas considerações sobre seus atributos. As considerações são apresentadas no sentido de se obter uma *imagem binária* a qual será processada para a obtenção dos vetores das estruturas rúpteis.

2.4.3.1 - O meio de transcrição

Primeiramente, deve-se considerar o papel ou o meio de transcrição a ser utilizado. Se o papel utilizado não oferecer um bom contraste de fundo, pode ser necessário um pré-processamento da carta para aumentar a nitidez dos objetos. Para que isso seja evitado, deve-se dar preferência a papéis mais claros, menos texturizados e menos suscetíveis a deformações.

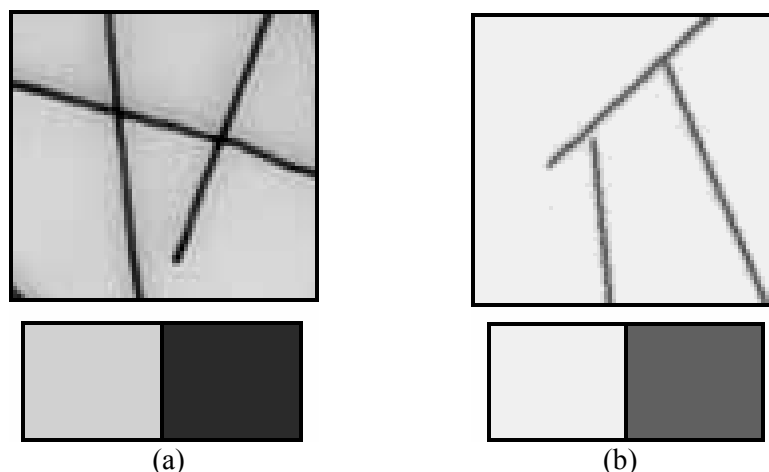


FIGURA 2.8 - Exemplos de cartas digitalizadas e de seus contrastes a 200ppp e com caneta preta de 0,5mm de espessura.

(a) Papel vegetal: (1) Nível de cinza do fundo = 209 (2) Nível de cinza do lineamento = 42. Diferença = 167 (b) Papel branco: (1) Nível de cinza do fundo = 240 (2) Nível de cinza do lineamento = 63. Diferença = 177.

O papel vegetal, por exemplo, oferece uma cor de fundo satisfatória, mas sua

textura resulta em níveis de cinza de fundo mais escuros (FIG. 2.8a). Além disso, deforma-se com facilidade, gerando distorções na imagem.

O poliéster, por ser transparente e mais liso, oferece menos problemas com a cor de fundo, mas como a transparência, dificulta traços de caneta mais finos. A qualidade da carta em poliéster e de transparência dependerá do processo de digitalização no qual a cor de fundo será adicionada (FIG. 2.9).

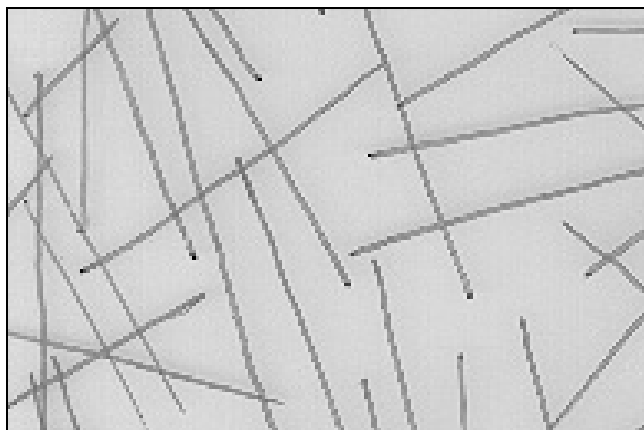


FIGURA 2.9 - Imagem de estruturas em poliéster com caneta azul de 1mm a 100ppp

Nível de cinza do fundo = 214 e nível de cinza do lineamento = 119. Diferença = 95.

2.4.3.2 - A caneta e o traçado dos lineamentos

Um outro aspecto a ser observado é a caneta para o traçado das linhas. Quanto a cor, esta deve ser escolhida de forma a ampliar o contraste, considerando a cor de fundo e a textura básica do papel. Outra decisão recai sobre a largura do traço. Essa largura depende principalmente do detalhe dos objetos e do papel utilizado. Se os objetos forem bem detalhados ou estiverem muito próximos, uma caneta fina é mais adequada. Se o meio de transcrição não permitir traços finos, uma caneta de largura maior será necessária. Este problema é bem visível na utilização de transparências para confecção de cartas.

A largura do traço pode afetar diretamente a fase de representação linear. A resolução da aquisição será determinada pelos atributos dos objetos traçados. Por exemplo, quanto maior a largura dos objetos menor poderá ser a resolução de amostragem, o que resulta em uma menor imagem (JAIN, 1989; PRATT, 1978). O traço, portanto, determinará a largura do objeto digitalizado e as dimensões da imagem, que são fatores importantes para a vetorização.

2.4.3.3 - O contraste entre fundo e objeto

A cor e a textura do papel definem a cor de fundo e a cor da caneta define a cor dos objetos. A fim de se ampliar o contraste, deve-se observar se a cor de fundo e a cor do objeto estão bem espaçadas na escala de cinza após a digitalização. É esta diferença que irá determinar o grau de nitidez da imagem. Quanto maior a diferença dos níveis de cinza médios dos objetos melhor o contraste.

Na FIGURA 2.8, a diferença dos níveis de cinza médios do objeto e do fundo na carta de papel vegetal é 167 e na carta com papel branco é 177. Na imagem de poliéster da FIGURA 2.9, a cor de fundo é mais clara que a do papel vegetal. Entretanto, pelo fato de se utilizar caneta azul o contraste é bem pior: 95 contra 167 do papel vegetal e 177 do papel branco. Obviamente, esta diferença depende também do processo de digitalização já que existem parâmetros do leitor óptico que podem ser ajustados para se obter uma melhor imagem.

Sugere-se utilizar a cor preta para o traçado dos objetos e o papel vegetal como meio de transcrição. Mesmo com textura, o papel vegetal tem bom resultado de contraste se a cor da caneta for preta. Além disso, nesse papel pode-se utilizar traços mais finos o que é importante para conjuntos complexos de estruturas rúpteis.

É recomendada a confecção da carta somente com as estruturas rúpteis. Qualquer outro objeto desenhado interferirá no processo, a menos que o formato da imagem seja favorável à separação dos objetos distintos como, por exemplo, imagens com mais de uma faixa do espectro.

2.5 - Adequação da Imagem

Uma ferramenta de processamento digital de imagens tem como objetivo representar uma imagem de outra forma a fim de se evidenciar algumas de suas características. Para a imagem das cartas, o objetivo do processamento digital é diferenciar os lineamentos e o fundo.

Um atributo favorável da imagem da carta de estruturas rúpteis é a sua simplicidade. Se as recomendações dadas para a aquisição forem seguidas, como no exemplo da FIGURA 2.10, somente um tipo de informação estará presente: as estruturas rúpteis. Sendo assim, não há necessidade de se utilizar, por exemplo, imagens com várias faixas de espectro.

O processamento digital poderá ocorrer na imagem em níveis de cinza e, após a segmentação, na imagem binária.

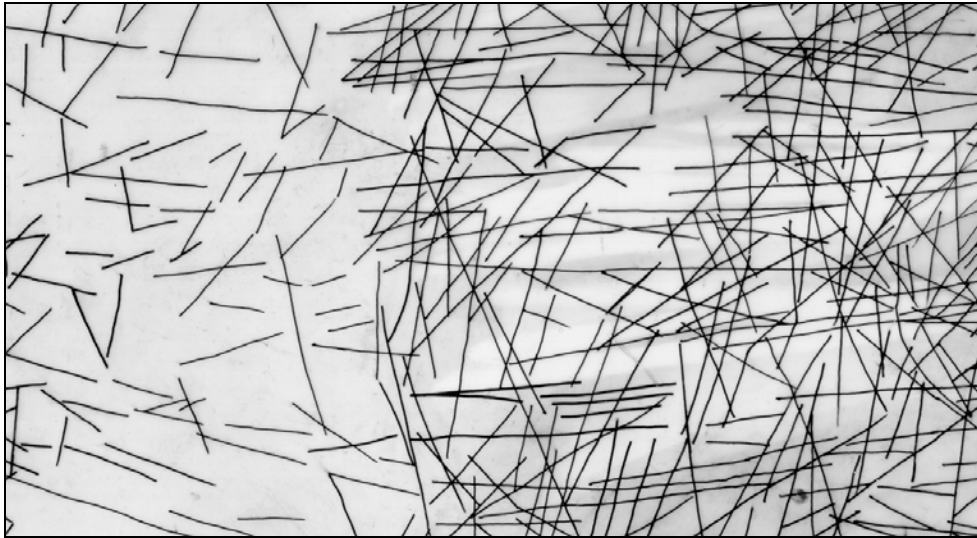


FIGURA 2.10 - Imagem de carta de estruturas rúpteis em papel vegetal a 200ppp

Trecho da bacia do Rio das Velhas. Escala 1:50000.

2.5.1 - Propriedades da imagem

Como na FIGURA 2.10, as transições das imagens de cartas de estruturas rúpteis são bem definidas nas bordas dos objetos e o contraste entre lineamento e fundo são favoráveis a sua binarização. Assim, constata-se que a distribuição de frequência no *histograma dos níveis de cinza da imagem tende a ser bimodal* (FIG. 2.12). Esta afirmação também é verdadeira para suas sub-regiões que contêm lineamentos.

No histograma bimodal (FIG. 2.11), os dois picos N_f e N_l correspondem aos níveis de cinza que possuem a maior quantidade de pontos dentro e fora do objeto. Os picos representam a moda de níveis de cinza (os que mais ocorrem) entre o objeto e o fundo. A depressão entre eles corresponde aos pontos ao redor das bordas dos objetos. Geralmente, o limiar L de separação de um objeto é escolhido nessa área (CASTLEMAN, 1979).

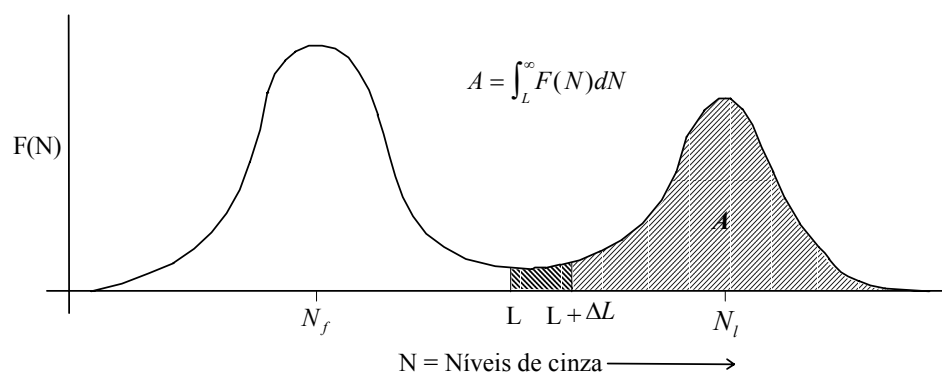


FIGURA 2.11 - Histograma bimodal.

Dado um limiar L , a área ocupada pelo objeto pode ser calculada por $A = \int_L^\infty F(N)dN$ (CASTLEMAN, 1979; JAIN, 1989). Na imagem de lineamentos, há maior frequência de pontos de fundo. Dessa forma, a *moda do fundo da imagem tende a ser maior que a dos lineamentos*, porque ocupa uma área maior da imagem, como mostrado na FIGURA 2.12. Esta característica pode ser útil para uma eventual avaliação automática de limiar em processos de separação de objeto e fundo adaptativos.

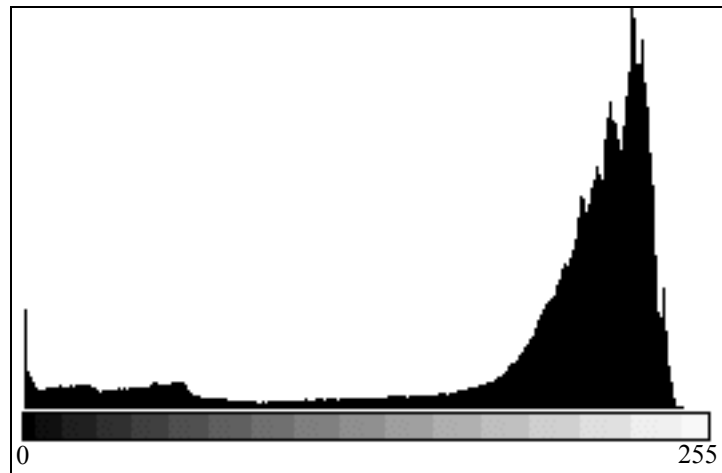


FIGURA 2.12 - Histograma da imagem da FIGURA 2.10

Frequência na imagem de cada nível de cinza. O pico do fundo corresponde a 38514 pontos com nível 227 e pico dos lineamentos corresponde a 5009 pontos com nível 0.

A imagem digitalizada, a partir do leitor óptico, é uma quantificação espacial da carta de lineamentos representada de forma matricial. Como essa quantificação é iso-espaçada em cada eixo cartesiano, ou seja, Δx e Δy constantes, pode-se afirmar que *a imagem digital mantém a geo-referenciação da carta original* embora ocorra pequenas distorções locais.

Com essa característica, tem-se uma premissa básica para a etapa de pré-processamento da imagem: a estrutura original dos objetos formais pertencentes à imagem devem ser mantidos. Ou seja, deve-se garantir que nenhuma informação estrutural dos objetos será perdida ou criada para não comprometer a geo-referenciação das atitudes pretendidas.

Por dificuldades práticas no manuseio da carta na digitalização, *geralmente a imagem adquirida está rotada*. Na imagem rotacionada, os eixos de referência não coincidem com a carta original alinhada na horizontal. Esta característica é importante se a atitude pretendida depender da posição da carta como, por exemplo, o azimute.

Através da transformação geométrica de rotação pode-se solucionar esse problema. Na rotação da imagem, podem ocorrer erros que precisam ser corrigidos através de uma interpolação de pontos que, por sua vez, pode comprometer a referenciação dos objetos (JAIN, 1989; ROSENFELD & KAK, 1982).

Mesmo esse erro sendo pequeno, recomenda-se simplesmente a indicação de dois pontos da imagem que correspondam ao eixo desejado para o cálculo de atributos. Assim, pode-se modificar o eixo de referência com extrema facilidade sem a necessidade de correção da imagem. Como as imagens podem ter grandes dimensões, somente a imagem binarizada pode ser armazenada.

2.5.2 - Segmentação da imagem

A fase de segmentação subdivide a imagem em suas partes ou objetos constituintes. O nível até o qual essa subdivisão ocorre depende do problema a ser resolvido (GONZALEZ, 1992).

Este passo do processo determina o sucesso ou a falha da análise topológica. Algoritmos para imagens monocromáticas são baseados em uma das duas propriedades dos valores de níveis de cinza: descontinuidade ou similaridade. A primeira é baseada na mudança entre os níveis e a segunda em agrupamentos de pontos (GONZALEZ, 1992).

2.5.2.1 - Limiarização

Pelas características da imagem de lineamentos, este trabalho utiliza a limiarização (*thresholding*) que faz parte da segunda propriedade. O objetivo da fase de segmentação é a divisão das duas modas dominantes da imagem. Pode-se realizar isso determinando um limiar L que separa essas modas. Assim, um ponto pertence ao objeto se $f(x, y) < L$, senão é um ponto pertencente ao fundo (ou o contrário, se for o caso). A imagem de $f(x, y)$ binarizada é definida como:

$$g(x,y) = \begin{cases} 1 & \text{se } f(x, y) > L \\ 0 & \text{se } f(x, y) \leq L. \end{cases}$$

A limiarização será global se for determinado um limiar L para toda imagem. Todo ponto da imagem é comparado com o mesmo limiar L . Se seu valor for maior que L então esse ponto é do fundo e passa a ser branco. Senão, faz parte do objeto e é mapeado para preto. Este é o método mais simples de limiarização e seu resultado é extremamente satisfatório em ambientes controlados, como no caso da metodologia apresentada neste trabalho (CASTLEMAN, 1979; GONZALEZ, 1992).

A limiarização global aplicada na imagem de lineamentos resulta em uma imagem com alta qualidade (FIG. 2.13). Isso porque a distribuição de frequência de pontos na escala de cinza da imagem é bimodal. Esta tendência das imagens de cartas de estruturas rúpteis viabiliza a binarização através da aplicação de apenas um limiar.



FIGURA 2.13 - Imagem binarizada com limiar = 130.

A imagem original, na FIGURA 2.10, possui duas áreas de brilhos diferentes. O lado direito da imagem é mais escuro que o esquerdo. Diferenças de brilho na digitalização, marcas de erros manuais corrigidos na transcrição e irregularidades do papel são fatores que causam essa diferença. A moda do fundo, nesse caso, se apresenta com mais níveis de cinza e, portanto, é mais larga.

Irregularidades podem ocorrer em várias partes de uma imagem de carta. O risco para a limiarização está na sobreposição das modas causada por esse fator. A consequência é a dificuldade em se estabelecer um limiar global, ou seja, aquele a ser aplicado em toda a imagem.

Este problema está diretamente relacionado a cartas de baixa qualidade. Se esse for o caso, uma alternativa é utilizar limiares diferentes para cada região. Na limiarização adaptativa, a imagem é subdividida em regiões nas quais são aplicados limiares locais definidos como ótimos por processos específicos (PARKER, 1997:116; CASTLEMAN, 1979:304; GONZALEZ, 1992:447; JAIN, 1989). A probabilidade de uso desse método mais avançado é pequena, já que as imagens, mesmo com problemas na transcrição da carta, têm boa qualidade.

2.5.2.2 - Seleção interativa

Para imagens com escala de cinza pequena, como 16 níveis, pode-se fazer a seleção de quais intensidades são do objeto diretamente na tabela de cores. Uma forma de se fazer essa seleção é pela análise do histograma.

A imagem da FIGURA 2.14a é uma região onde houve erro na transcrição. Na sua escala de cinza de 16 cores, observa-se uma distribuição irregular de níveis de cinza que dificulta o estabelecimento de um limiar L para toda a imagem sem que informações sejam perdidas. Interativamente, cada nível é mudado para classificá-lo como fundo ou objeto através da análise do histograma.

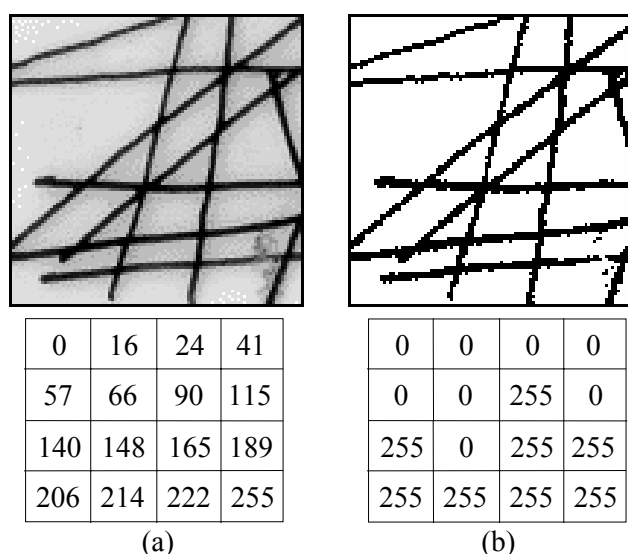


FIGURA 2.14 - Segmentação da imagem pela seleção do objeto na tabela de cores

(a) Imagem antes da modificação da tabela de cores
(b) Imagem segmentada a partir da nova tabela de cores.

Na FIGURA 2.14b tem-se o melhor resultado, obtido a partir deste processo. Na nova tabela de cores, as populações de cada nível de cinza foram remapeadas para objeto=preto=0 ou fundo=branco=255. Não há nenhuma possibilidade de se estabelecer um limiar que obtenha esse resultado, sendo a seleção dos níveis a única saída.

2.5.3 - A imagem binária

Após a segmentação, tem-se a imagem binarizada da carta com as populações de pontos pertencentes ao objeto separadas do fundo. Mesmo se a segmentação for otimizada e seu resultado for o melhor possível, ainda assim, pode haver erros na imagem binária que comprometam a representação linear.

A imagem binária é afinada na etapa de representação linear por métodos iterativos de eliminação de bordas. Se um ponto do objeto for marcado como sendo de fundo e não estiver na sua borda (FIG. 2.15a), o processo de afinamento pode gerar redundâncias de cruzamento de linhas (FIG. 2.15c).

Outro problema são descontinuidades que podem ocorrer nos lineamentos (FIG. 2.15b). Linhas descontinuadas afetam principalmente a junção dos lineamentos e, obviamente, diminui a precisão do processamento métrico (FIG. 2.15d).

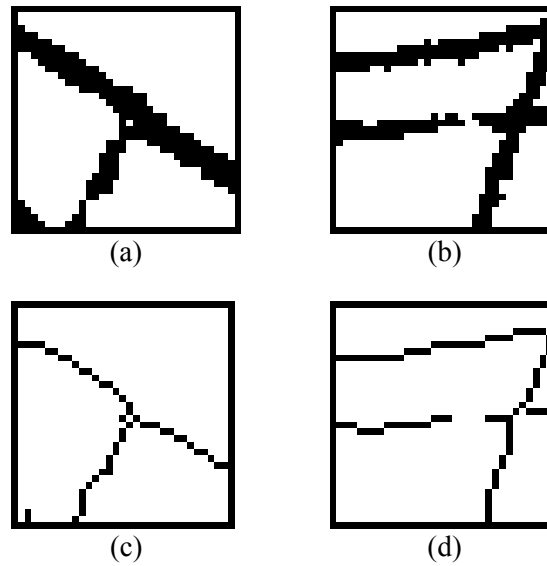


FIGURA 2.15 - Problemas da segmentação e seus reflexos na imagem afinada

(a) Ruído dentro do objeto (b) Linha descontinuada (c) Esqueleto com redundância na conexão (d) Esqueleto descontinuado.

Estes problemas acarretam falhas locais e geralmente surgem em pequeno número. Ainda assim, a chance de sucesso da fase de representação linear pode ser aumentada através do processamento da imagem binária. Uma solução simples para essa questão pode ser o fechamento morfológico.

2.5.3.1 - Fechamento morfológico

A linguagem da morfologia matemática é a teoria de conjuntos (GONZALEZ, 1992:518). Uma imagem A é entendida como um conjunto no qual os elementos são os pontos do objeto. Assim, o elemento (x_1, x_2) pertence a A dando forma ao objeto.

A operação morfológica proposta para a imagem binária das cartas de estruturas rúpteis é baseada nas duas operações básicas da morfologia matemática: dilatação e erosão (ROSENFELD & KAK, 1982). O preenchimento de ruídos dentro dos objetos e a união de linhas podem ser realizados a partir dessas duas operações.

Sendo A e B conjuntos de pontos em Z^2 , $\hat{B}$ o complemento de B dado por $\hat{B} = \{x | x \in B^c\}$, para $b \in B$ e $(C)_x$ a translação de C dada por $(C)_x = \{d | d = c + x, \text{ para } c \in C\}$, a dilatação de A por B é definida por $A \oplus B = \{x | (\hat{B})_x \cap A \neq \emptyset\}$.

O conjunto B é chamado de *elemento estruturante*. A dilatação de A por B é o conjunto de todos os deslocamentos de x tal que $\hat{B}$ e A possuam pelo menos um elemento não zero em comum. A erosão de A por B é dada por $A \ominus B = \{x | (B)_x \subseteq A\}$.

A erosão de A por B é o conjunto de todos os deslocamentos de x tal que B está

completamente contido em A .

Para as imagens das cartas, é utilizado o operador morfológico de *fechamento* que é definido por $(A \oplus B) \ominus B$. Este operador tende a suavizar seções de contornos, funde quebras finas, elimina pequenos buracos e preenche falhas de contornos (GONZALEZ, 1992). Exatamente o que é necessário para aumentar a chance de sucesso da representação linear.

A FIGURA 2.16 ilustra as imagens mostradas na FIGURA 2.15 após a operação de fechamento. Com a dilatação, as imagens originais têm suas falhas preenchidas (FIG. 2.16a). A erosão aplicada a essa imagem resulta na imagem original sem as falhas (FIG. 2.16b). Após o afinamento esta imagem não possui redundâncias nem linhas descontinuadas (FIG. 2.16c). Um fator importante para o sucesso dessa operação é o elemento estruturante usado (FIG. 2.16d) que deve ser maior que as falhas da imagem e menor que a menor distância entre os objetos, para não criar falsas ligações.

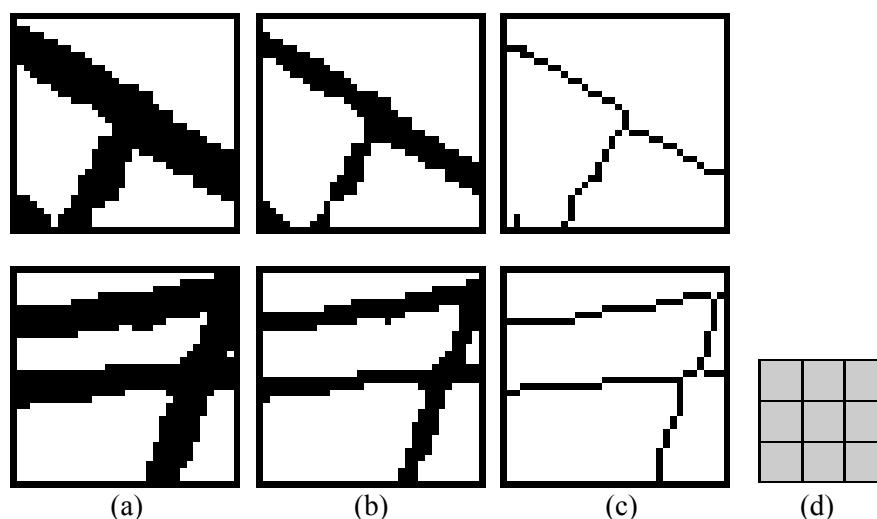


FIGURA 2.16 - Resultado do afinamento após a operação de fechamento

(a) Objeto original dilatado $A \oplus B$ (b) Objeto dilatado após erosão $(A \oplus B) \ominus B$ (c) Afinamento após o fechamento da imagem original (d) Elemento estruturante utilizado.

2.6 - Síntese e conclusão

O processo de análise de tendência topológica possui três objetos distintos: o objeto real, o objeto formal e o objeto operacional (MARTINS, 1997b). O objeto real são as estruturas rúpteis em escala de grandeza atual. Após a análise das fontes de diversos sensores remotos, é confeccionada uma carta com lineamentos, que são chamados de objetos formais, representando as estruturas rúpteis. A partir do processo

de vetorização aplicado à imagem da carta de lineamentos, obtêm-se os objetos operacionais que constituem a entrada para o processamento métrico.

O processo de vetorização divide-se em três fases: a amostragem e quantificação da carta, a sua adequação para vetorização e a representação linear. Os objetos operacionais são dados como vetores representativos dos lineamentos.

A carta com os objetos formais é aproximada por uma matriz onde as coordenadas e os elementos são inteiros. Esta aproximação é realizada pela amostragem espacial e pela quantificação. A escolha de parâmetros corretos é essencial para o processo de vetorização. Baseado na frequência de Nyquist, sugere-se a amostragem com frequência espacial duas vezes maior que a frequência da imagem original. O intervalo espacial de amostragem deve ser pelo menos duas vezes a menor largura de linha ou a menor distância entre duas linhas. Apesar das restrições pelo tamanho da imagem, sugere-se a quantificação na escala de 256 níveis de cinza.

O formato de confecção da carta é fundamental para a aquisição. Os atributos principais a serem observados são o tipo de papel, a cor e a largura da caneta para o traçado dos lineamentos. O fator principal é o contraste entre o fundo e o objeto. A cor e a textura do papel definem a cor de fundo, e a cor da caneta define a cor do objeto. Um contraste maior entre essas cores facilita as etapas de adequação da imagem. Canetas finas necessitam de maiores resoluções, resultando em maiores imagens. Papel vegetal e caneta preta, que geralmente são usados na confecção, resultam em contrastes satisfatórios após a aquisição.

A adequação da imagem objetiva a separação de fundo e objeto e a eliminação de erros do processo de aquisição e segmentação. Se somente há lineamentos na imagem, então o histograma da imagem tende a ser bimodal. Essa característica facilita a segmentação através da limiarização. Iluminação e problemas de confecção podem diferenciar diversas regiões da imagem, dificultando o estabelecimento de um limiar global. Todas as regiões da imagem, que contêm lineamentos, possuem histograma bimodal. Isto facilita a determinação de limiares ótimos, favorecendo a limiarização adaptativa que resulta em melhores resultados. Outra forma de segmentação é a seleção das populações de níveis que pertencem ao objeto.

Com as etapas de aquisição e segmentação, os lineamentos podem apresentar falhas como pontos de fundo internos e linhas descontinuas. Gerando distorções e falsas quebras, essas falhas podem diminuir a precisão da detecção automática. Uma forma de amenizar esse efeito é aplicar operadores morfológicos. O operador de fechamento morfológico é eficaz na redução de falhas.

Geralmente, a qualidade das imagens é satisfatória e viabiliza o seu processamento para a detecção automática dos lineamentos através da fase de representação linear.

3 - REPRESENTAÇÃO LINEAR

3.1 - Introdução

No modelo de passos fundamentais do processamento digital de imagens mostrado por GONZALEZ (1992:8) a fase de representação/ descrição está situada antes da fase de análise/ reconhecimento/ interpretação, fornecendo um modelo lógico dos objetos reais. Dessa forma, pode-se caracterizar a fase de detecção de lineamentos como uma fase de *representação* na qual os objetos reais são estruturas rúpteis e sua modelagem é feita por segmentos de linhas.

A metodologia adotada para a detecção de linhas segue o princípio de vetorização guiada pelo eixo medial (PARKER, 1997:316). Obtém-se esta linha pela aplicação de algoritmos de afinamento. Na imagem afinada, por ter menos pontos na trajetória das linhas, pode-se determinar com maior facilidade quais são os extremos de cada segmento e os pontos médios que formam sua trajetória.

Um problema dessa metodologia são as distorções geradas pela aplicação dos algoritmos de afinamento. Sendo este um problema grave, o algoritmo de detecção deve solucioná-lo e aproximar-se ao máximo da estrutura original da imagem. Outro problema é o excesso de pontos identificados como extremos em interseções de segmentos.

Nas estruturas em que se observa estes problemas, as chances de perda de precisão são maiores. As causas destas distorções são interseções de várias linhas em um único ponto, ruídos provenientes da amostragem da imagem e a própria limitação dos algoritmos de afinamento. A eliminação ou a atenuação dos efeitos gerados por estes problemas, ou das suas causas, torna-se pressuposto para o aumento da precisão do algoritmo.

Uma vantagem da utilização da imagem afinada, como consequência da fácil determinação da trajetória média das estruturas, é a possibilidade de linearizar estruturas curvilíneas que não são raras em estudos geomorfológicos. Para a determinação de segmentos que melhor descrevam a curva é utilizada a aproximação poligonal (BALLARD & BROWN, 1982:235).

O estágio final do processo de representação linear constitui-se na junção de segmentos consecutivos e colineares. O resultado desse último processo é a representação da imagem de entrada por seus maiores segmentos.

3.2 - Aspectos gerais da representação linear

As estruturas rúpteis são representadas cartograficamente por segmentos de linhas. A fase de representação linear tem por objetivo o reconhecimento e a medição de atributos inerentes a essas estruturas após a amostragem espacial e o pré-processamento da imagem de lineamentos.

Dentro do processo de vetorização, a representação linear concentra a ação de transformação da informação das estruturas contidas na imagem binarizada, ou objeto formal, do formato matricial para o formato vetorial.

Um problema importante para a detecção automática dos lineamentos é o volume necessário de dados para o armazenamento de uma carta. Se uma caneta com traço de um milímetro for utilizada para o desenho dos lineamentos e admitindo que apenas a largura de linha de quatro pontos é suficiente para a detecção automática, deve-se digitalizar, no mínimo, quatro pontos por milímetro. Tomando-se como referência o formato A0 (1.188 x 840mm), as dimensões de uma imagem que usa sua totalidade seria 4.752 x 3.360 pontos. Assim, a técnica a ser utilizada para a detecção automática dos lineamentos deve prever os seguintes problemas:

- a grande dimensão das imagens digitalizadas;
- o grande número de lineamentos e a complexidade de seus cruzamentos (FIG. 3.1);
- a imagem digitalizada pode conter linhas de grande largura.

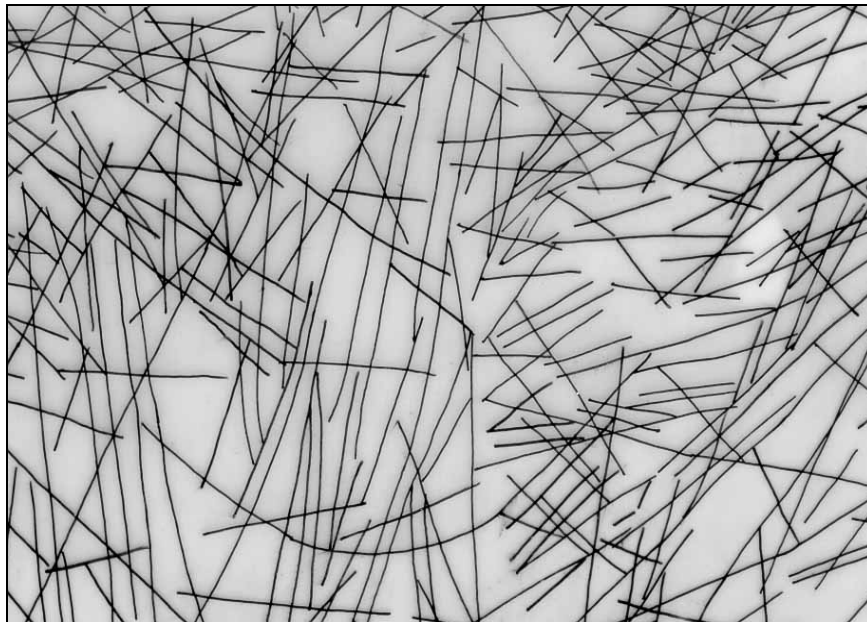


FIGURA 3.1 - Parte de uma carta com lineamentos.

Em LAM & SUEN⁶, citado por PARKER (1997:317), é apresentada uma técnica de vetorização de imagens de caracteres para seu reconhecimento. Esta técnica consiste na aplicação de algoritmos de afinamento no objeto a ser identificado e no rastreamento do esqueleto para identificar os menores vetores que representam o objeto. Alguns caracteres, como o dígito “6”, têm estruturas curvilíneas que exigem algoritmos de linearização de segmentos. Para a vetorização de imagens pequenas, a técnica tem bom resultado (FIG. 3.2).

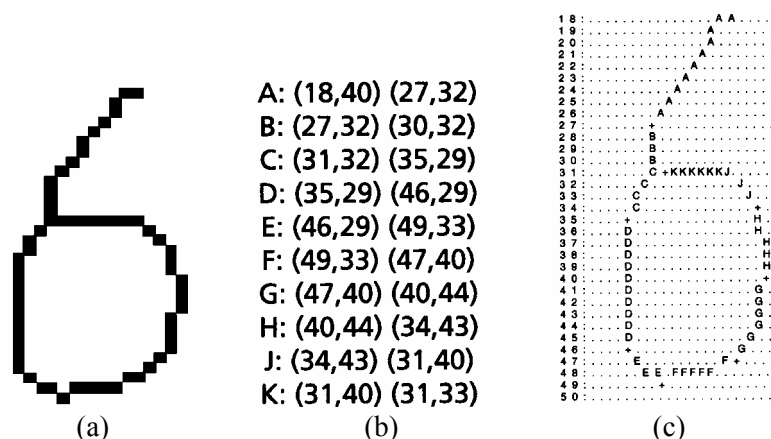


FIGURA 3.2 - Resultado da vetorização da imagem do dígito “6”

(a) As curvas encontradas (b) Coordenadas dos vetores (c) Vetores marcados na figura

FONTE - PARKER, 1997. p.318.

O que se propõe neste trabalho é a aplicação dessa mesma técnica nas estruturas básicas dos lineamentos, observando-se os problemas listados anteriormente para a detecção em imagens de grande porte e objetos de grande complexidade, e a sua extensão para a solução da junção dos segmentos colineares e consecutivos.

3.2.1 - Etapas da representação linear

Para a detecção dos menores segmentos, como exemplificado na FIGURA 3.2, é necessária a imagem de lineamentos afinada. Com isso, o primeiro processamento a ser realizado é o afinamento da imagem de entrada.

Com a redução das estruturas ao menor conjunto de pontos que descreve suas trajetórias, segue o rastreamento das linhas médias para a determinação dos segmentos. Nesse rastreamento, trajetórias curvilíneas são divididas em segmentos de retas que melhor as descrevem através de aproximação poligonal.

Como o objetivo é a detecção dos maiores segmentos da imagem, é necessária

⁶ Não há referências bibliográficas a este trabalho em PARKER (1997).

uma etapa para a união dos segmentos que, por serem colineares e consecutivos, formam segmentos maiores. A partir destas observações, pode-se enumerar como sendo as principais etapas da representação linear:

- o afinamento dos lineamentos (FIG. 3.3b);
- a determinação dos segmentos (FIG. 3.3c) e linearização das curvas;
- a junção dos segmentos colineares e consecutivos (FIG. 3.3d).

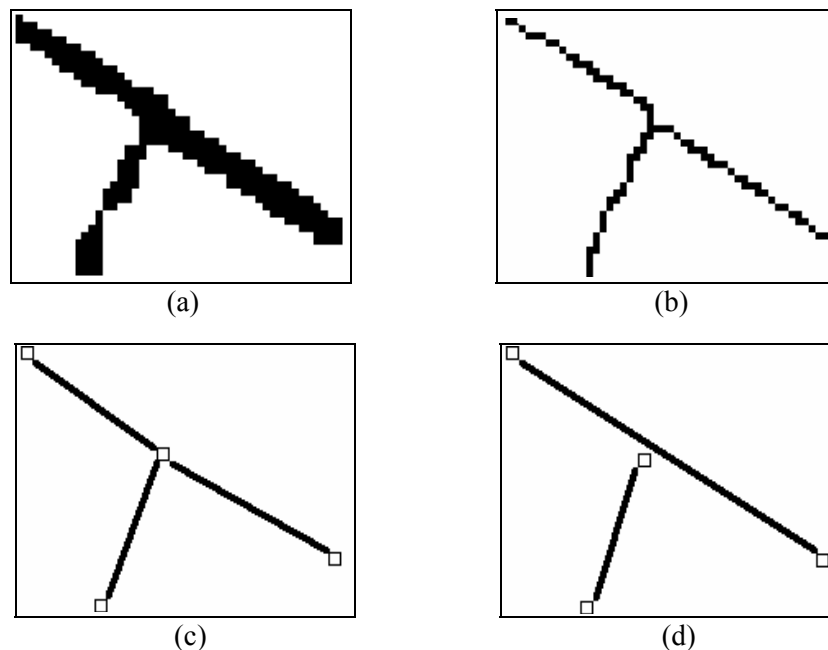


FIGURA 3.3 - O processo de representação linear

(a) Imagem original (b) Imagem afinada (c) Menores segmentos que representam sua estrutura (d) Junção dos segmentos colineares e consecutivos.

FONTE - MARTINS et al., 1997. p.87.

No processo de representação linear, os lineamentos pertencentes à imagem de entrada binarizada (FIG. 3.3a) são transcritos na forma de coordenadas cartesianas (FIG. 3.2b) as quais representam vetores.

Com vetores pode-se facilmente extrair características como o comprimento de cada elemento, seu azimuth em relação a um eixo dado, sua largura e suas interseções entre outros atributos.

Pode-se também realizar transformações vetoriais (como mudança de escala), reconhecer padrões de objetos, fornecer linhas contínuas (*edge linking*) e dar suporte a outras técnicas de processamento digital de imagens e visão computacional.

3.3 - Afinamento dos lineamentos

Métodos de afinamento, freqüentemente, são utilizados como uns dos primeiros processamentos em sistemas de visão computacional para extração de características. Afinamento é o processo realizado para se obter o esqueleto de um objeto (PARKER, 1997:176).

O esqueleto pode representar a forma do objeto com um número relativamente pequeno de pontos. Assim, atributos dos segmentos de linha de um esqueleto são representações das estruturas que os compõem na imagem original. Entretanto, é necessário observar alguns detalhes importantes (PARKER, 1997:177) :

- nem todos os objetos podem ou devem ser afinados. O afinamento é útil para objetos que consistem de linhas e praticamente inútil para aqueles que possuem uma forma com grande área;
- o esqueleto que funciona bem em uma situação pode falhar em outra. O afinamento, geralmente, é usado como um passo no preparo da imagem para posterior processamento. A natureza dos passos seguintes ditam as propriedades do esqueleto.

Como as estruturas rúpteis são representadas cartograficamente como linhas, conclui-se que sua estrutura pode ser satisfatoriamente afinada. Mesmo com pequenas distorções o esqueleto mantém os atributos necessários para posterior análise topológica (FIG. 3.3b): o comprimento e o azimuth. Por possuir menor número de pontos na largura, o esqueleto viabiliza a detecção dos lineamentos.

Métodos de afinamento baseados em contorno (LEE & WANG, 1994), em campo de força (PARKER, 1997), na transformação do eixo médio (ROSENFELD & KAK, 1982), na morfologia matemática (JI, 1992) e métodos iterativos (STENTIFORD & MORTIMER, 1983; ZHANG & SUEN, 1984; HOLT et al., 1987) foram aplicados nas imagens das cartas. Para este tipo de imagem, os métodos iterativos tiveram melhor resultado. Os principais pontos observados foram a qualidade da imagem (menor quantidade de distorções) e o tempo de processamento.

A etapa de afinamento, como observada anteriormente, é apenas um passo no preparo da imagem para posterior processamento. No contexto da representação linear a imagem afinada deve ter características que viabilizem a fácil detecção e propriedades que aumentem a eficiência do afinamento. Segundo os objetivos da representação linear de estruturas rúpteis, a fase de afinamento deve:

- garantir fácil determinação de pontos de interseção de linhas e seus pontos finais;
- garantir um, e somente um caminho entre os dois pontos extremos de um segmento;
- minimizar distorções morfológicas;
- diminuir as redundâncias de localização de pontos de interseção e pontos finais.

As características mais importantes da imagem afinada são a possibilidade de

diferenciação de cada ponto a partir de seus pontos vizinhos (de interseção ou intermediário) e a garantia de um, e somente um caminho entre dois extremos. As fases seguintes ao afinamento se baseiam nestas duas características.

3.3.1 - Métodos iterativos de afinamento

Métodos iterativos baseiam-se na eliminação repetida de camadas de pontos até que nenhuma outra camada possa ser removida. Há um conjunto de regras que define quais pontos podem ser removidos. Geralmente, essas regras estão associadas à identificação de pontos extremos, à determinação de pontos de interseção e a algum esquema de procura de máscaras para exclusão.

A cada iteração, os pontos que correspondem aos modelos dados para a exclusão são marcados para posterior eliminação. Um ponto não pode ser removido, evidentemente, se for identificado como sendo um extremo ou um ponto de interseção de linhas.

O atributo conexidade (FIG. 3.4) representa, de certa forma, o número de objetos que um ponto conecta, ou seja, o número de objetos aos quais o ponto pertence. A conexidade é utilizada para determinar quais pontos são de interseção.

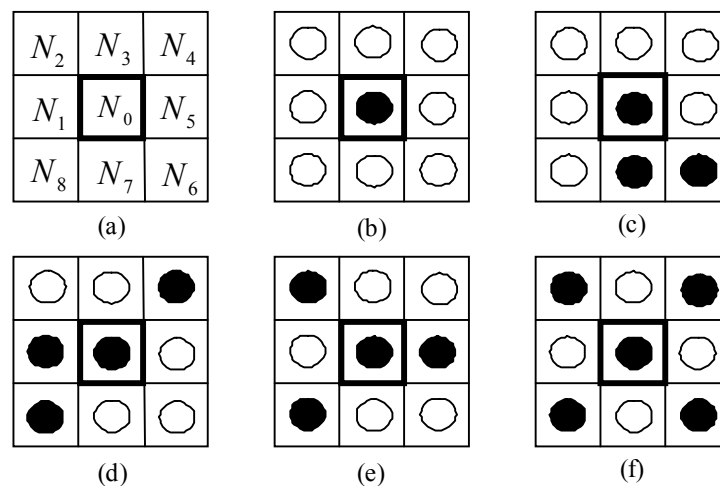


FIGURA 3.4 - Exemplos do número de conexidade

(a) Numeração dos pontos (b) Conexidade = 0 (c) Conexidade = 1 (d) Conexidade = 2 (e) Conexidade = 3 (f) Conexidade = 4, o máximo.

As regras para a determinação da conexidade, geralmente, não são bem claras pelo fato de que apenas pequenas partes da imagem são utilizadas para o seu cálculo. Na FIGURA 3.4 utiliza-se vizinhança 8-conectada (GONZALEZ, 1992:41). Uma forma de cálculo do atributo conexidade é dada por YOKOI et al. (1973):

$$C_n = \sum_{k \in S} N_k - (N_k \cdot N_{k+1} \cdot N_{k+2}).$$

Onde N_k é a cor de um dos oito vizinhos do ponto (FIG. 3.4a) e $S = \{1, 3, 5, 7\}$. O valor de N_k é um se o ponto é branco e zero se o ponto é preto (objeto). Se $N_k > 8$, $N_k = N_{k-8}$.

A conexidade pode ser calculada mais facilmente pela verificação dos vizinhos na ordem $N_1, N_2, \dots, N_8, N_1$. O número de objetos que o ponto conecta é igual ao número de transições preto-branco, ou vice-versa, na seqüência de vizinhos.

O ponto com número de conexidade maior que dois (FIG. 3.4e, f), ou seja, que conecta mais de dois objetos, é identificado como sendo de interseção. Se o número de conexidade é igual a dois (FIG. 3.4d), tem-se claramente um ponto intermediário que forma a trajetória de uma linha. Se o número de conexidade é igual a um (FIG. 3.4c), o ponto determina o final de um segmento de linha.

Métodos iterativos baseiam-se, geralmente, no número de conexidade, no número de vizinhos e em máscaras de eliminação. Como a decisão da eliminação do ponto central depende somente dos seus vizinhos, conclui-se facilmente que métodos iterativos podem ser executados em paralelo.

O método de Zhang-Suen obteve o melhor resultado na imagem das fraturas. Entretanto, métodos de pré-processamento (STENTIFORD & MORTIMER, 1983) e pós-processamento (HOLT et al., 1987) combinados com o método de Zhang-Suen diminuíram significativamente as distorções do esqueleto.

3.3.2 - O método de Zhang-Suen

Um método de afinamento rápido é proposto por ZHANG & SUEN (1984). Consiste em duas sub-iterações: uma para a eliminação de pontos da margem sul-leste e do canto norte-oeste, outra para a eliminação de pontos da margem norte-oeste e do canto sul-leste. Pontos finais e de conexão são preservados.

Na primeira sub-iteração, o ponto de contorno N_0 é excluído da imagem se satisfizer as seguintes condições:

- a) $2 \leq B(N_0) \leq 6$
- b) $C(N_0) = 1$
- c) $N_1 * N_3 * N_5 = 0$
- d) $N_3 * N_5 * N_7 = 0$

Onde $C(N_0)$ é o número de conexidade e $B(N_0)$ é o numero de vizinhos não zero de N_0 . As condições (c) e (d) podem ser sintetizadas por ($N_3 = 0$ ou $N_5 = 0$ ou

($N_1 = 0$ e $N_7 = 0$). Na FIGURA 3.4d, por exemplo, todas as condições são satisfeitas exceto a condição (b) onde $C(N_0) = 2$.

Dessa forma, o ponto central N_0 não é eliminado. Na segunda sub-iteração, as condições (c) e (d) são substituídas pelo seguinte:

$$c') N_1 * N_3 * N_7 = 0$$

$$d') N_3 * N_5 * N_7 = 0$$

As condições restantes são as mesmas. As iterações continuam até que nenhum ponto possa ser removido.

Pela condição (a), os pontos finais de um esqueleto são preservados. A condição (b) previne a eliminação dos pontos intermediários aos pontos finais. Pelas condições (c) e (d) da primeira sub-iteração, são eliminados os pontos pertencentes à borda sul-leste e aos cantos norte-oeste que não formam um bom esqueleto. Similarmente, pelas condições (c') e (d') da segunda sub-iteração, são eliminados os pontos que pertencem à borda norte-oeste e aos cantos sul-leste.

Na FIGURA 3.5 o algoritmo de Zhang-Suen foi aplicado em caracteres maiúsculos do alfabeto. Neste exemplo, a imagem afinada mantém sua estrutura básica.

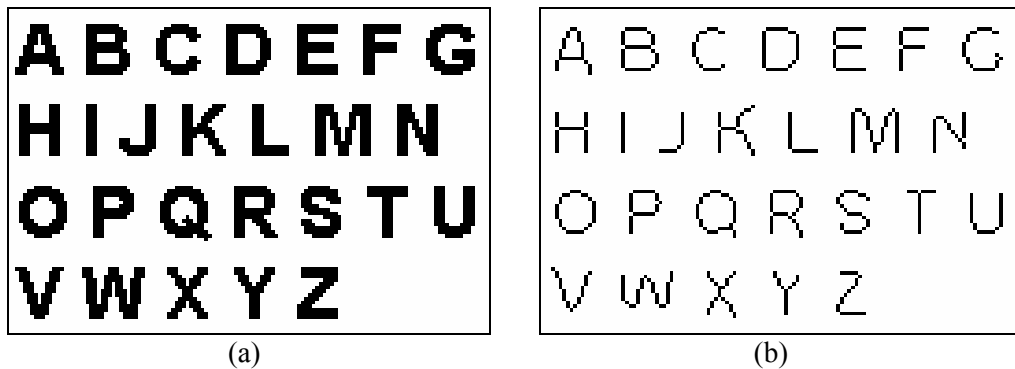


FIGURA 3.5 - Exemplos do método de afinamento de ZHANG & SUEN (1984)

(a) Imagem com as letras do alfabeto (b) Imagem do alfabeto afinada.

3.3.3 - Distorções na fase de afinamento

Existem problemas clássicos resultantes de métodos de afinamento iterativo. Esses problemas são gerados por características estruturais do objeto que, geralmente, ultrapassam os limites das máscaras do processo de afinamento. Os métodos iterativos promovem o afinamento pela verificação pontual a cada iteração e, por consequência, não é possível analisar e corrigir os problemas estruturais do objeto durante o processo.

A maioria dessas distorções (FIG. 3.6) são causadas pelo afinamento excessivo no cruzamento das linhas, criando um pequeno segmento onde deveria haver somente um ponto de interseção. Um exemplo é o efeito de estreitamento (*necking*) que pode ser identificado em cruzamentos de linhas largas ou com ângulo de cruzamento agudo. Da

mesma forma, o efeito de cauda (*tailing*) que ocorre em cruzamentos finais de linhas. Essas distorções são especialmente prejudiciais a representação linear

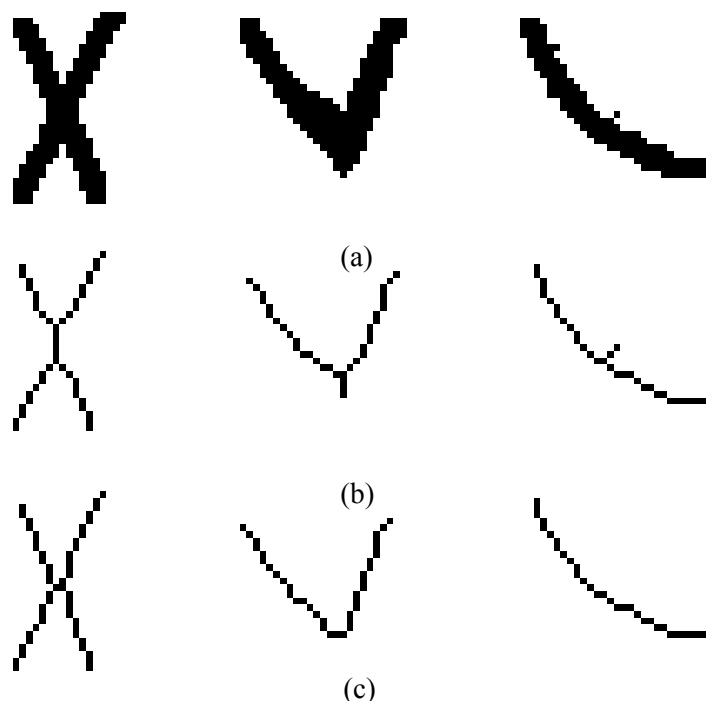


FIGURA 3.6 - Exemplos das distorções geradas no afinamento

(a) Possíveis objetos após binarização (b) Distorções no afinamento: estreitamento, cauda e projeção falsa, respectivamente (c) Resultado do afinamento com o estágio de suavização, ênfase de ângulos agudos e eliminação de pontos redundantes (pós-processamento).

Um outro tipo de distorção é a criação de segmentos de linhas extras em junção com segmentos de linhas reais de um esqueleto. Este efeito é chamado de projeção falsa (*spurious projection*) que é causada por irregularidades nas bordas dos objetos.

Para tratar projeções falsas, STENTIFORD & MORTIMER (1983) sugeriu um estágio de pré-processamento para minimizar as suas ocorrências através de suavização. Basicamente, todos os pontos com dois ou menos vizinhos pretos, $B(N_0) \leq 2$, e com o número de conexidade menor que dois, $C(N_0) < 2$, são eliminados em uma iteração.

O efeito de estreitamento e cauda pode ser minimizado por outro estágio de pré-processamento para a ênfase de ângulos agudos (*acute angle emphasis*) (STENTIFORD & MORTIMER, 1983). Esse processo consiste, primeiramente, em uma iteração para a procura de pontos próximos à interseção de duas linhas.

Nessa iteração todos os pontos são comparados com todas as máscaras ilustradas na FIGURA 3.7 e apagados caso seja casado com alguma. Se pelo menos um ponto foi eliminado nessa primeira iteração, uma nova iteração menos severa é realizada com

apenas as três primeiras máscaras de cada tipo. Se algum ponto for eliminado na segunda iteração, uma última iteração é realizada com somente a primeira máscara de cada tipo. Nesse pré-processamento os ângulos agudos entre linhas são enfatizados pela eliminação dos pontos redundantes das junções (FIG. 3.6).

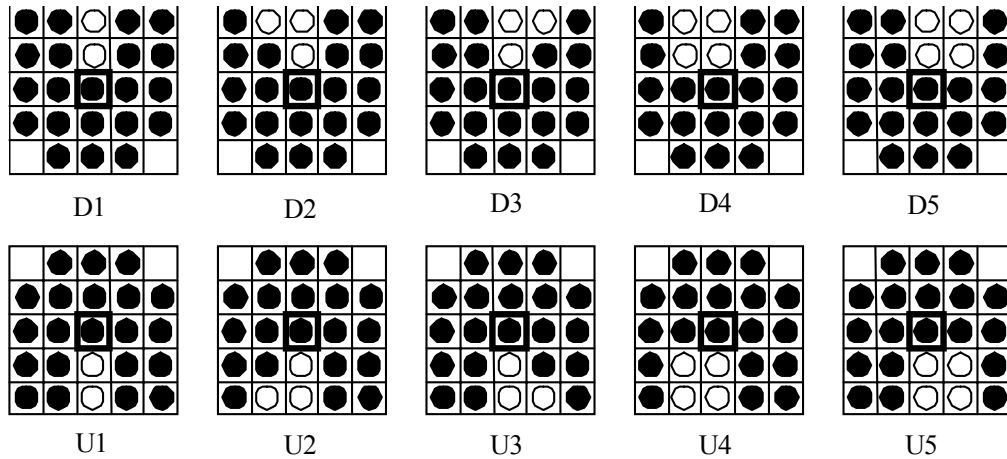
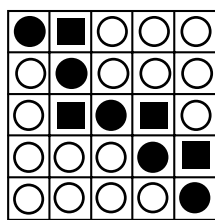


FIGURA 3.7 - Máscaras utilizadas para o estágio de pré-processamento de ênfase de ângulos agudos.

FONTE - STENTIFORD & MORTIMER, 1983.

Após o afinamento, alguns pontos ainda podem ser removidos (FIG. 3.8a). Esse pós-processamento pode ser realizado através da aplicação das regras (FIG. 3.8b) de sobrevivência de pontos (HOLT et al., 1987) em iterações separadas.



(a)

$$v(c) \wedge \sim(v(N) \wedge ((v(E) \wedge \sim v(NE) \wedge \sim v(SW) \wedge (\sim v(W) \vee \sim v(S)) \vee (v(W) \wedge \sim v(NW) \wedge \sim v(SE) \wedge (\sim v(E) \vee \sim v(S))))))$$

$$v(c) \wedge \sim(v(S) \wedge ((v(E) \wedge \sim v(SE) \wedge \sim v(NW) \wedge (\sim v(W) \vee \sim v(N)) \vee (v(W) \wedge \sim v(NW) \wedge \sim v(NE) \wedge (\sim v(E) \vee \sim v(N))))))$$

(b)

FIGURA 3.8 - Eliminação de pontos redundantes

(a) Pontos que podem ser eliminados sem alterar a trajetória da linha (quadrados) (b) Regras de sobrevivência de pontos na remoção de escadas nas direções norte e sul.

FONTE - HOLT et al., 1987.

Os pontos, nos quais essas regras são falsas, são eliminados por serem redundantes. Na função $v(n)$, v é verdadeiro se o ponto for preto ou falso se for branco e n é a sua coordenada em relação ao ponto central.

Os esqueletos com os pontos redundantes eliminados possuem linhas mais suaves e simétricas. Em consequência, reduz-se a chance de erros e o tempo de detecção dos segmentos, pois há menos pontos para serem analisados.

A suavização para minimizar as projeções falsas e as três fases da ênfase de ângulos agudos para reduzir o efeito de estreitamento/cauda, não identificam e não resolvem a maioria dos problemas da imagem. Entretanto, melhoram de forma significativa a qualidade do afinamento nas imagens de cartas digitalizadas.

Os estágios de pré-suavização e ênfase de ângulos agudos aplicados na imagem antes do afinamento pelo método de Zhang-Suen e o pós-processamento para remoção de pontos redundantes satisfazem plenamente os requisitos necessários para a detecção de linhas.

A FIGURA 3.9 ilustra a aplicação de todas as fases de afinamento na imagem mostrada na FIGURA 3.1. Neste exemplo nota-se que o esqueleto representa a estrutura básica do lineamento com qualidade suficiente para determiná-lo.

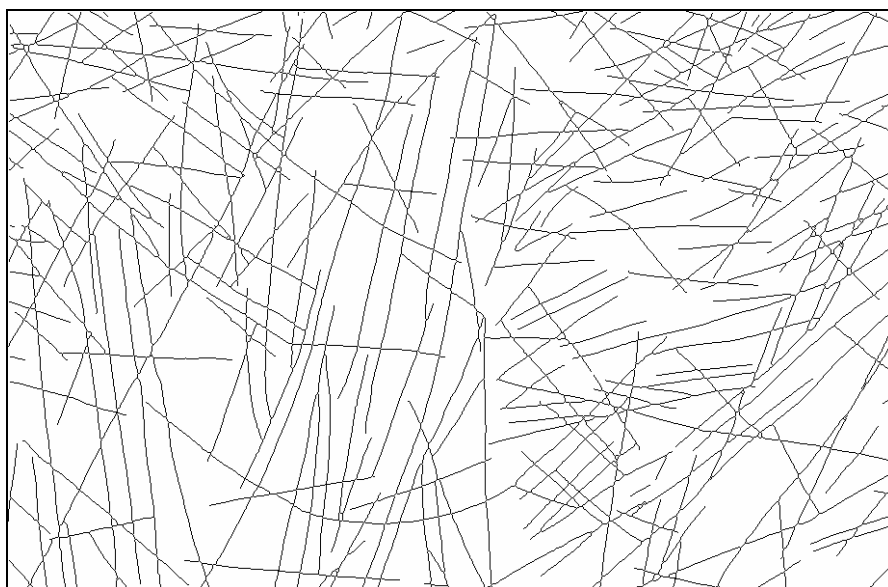


FIGURA 3.9 - Aplicação da pré-suavização, ênfase de ângulos agudos, afinamento de Zhang-Suen e eliminação de pontos redundantes na imagem da FIGURA 3.1.

3.4 - Determinação dos segmentos e segmentação das curvas

Após o afinamento, tem-se uma imagem que contém as linhas essenciais dos objetos. Em uma imagem contendo somente fraturas, essas linhas essenciais possuem algumas das características de seus objetos geradores como o comprimento e a direção. Como as linhas do esqueleto têm, em média, um ponto de largura, a determinação

dessas características é viabilizada.

Uma característica importante da imagem afinada é a fácil determinação de pontos finais e pontos de interseção de linhas. Isto é possível através da verificação do número de conexidade e do número de pontos vizinhos.

Um ponto do esqueleto é dito final se possui somente um ponto vizinho ($B(N_0)=1$) ou se possui o número de conexidade igual a um (FIG. 3.4c).

O ponto é de interseção se o número de conexidade é maior que dois (FIG. 3.4e, f) ou, em algumas interseções, se o número de conexidade é igual a dois e o número de pontos vizinhos é igual a cinco ou seis ($5 \leq B(N_0) \leq 6$).

Dessa forma, um ponto N_0 é o *extremo* de um segmento qualquer se satisfizer a expressão $B(N_0) = 1 \vee C(N_0) > 2 \vee (C(N_0) = 2 \wedge 5 \leq B(N_0) \leq 6)$, do contrário, é um ponto *intermediário* (FIG. 3.10a).

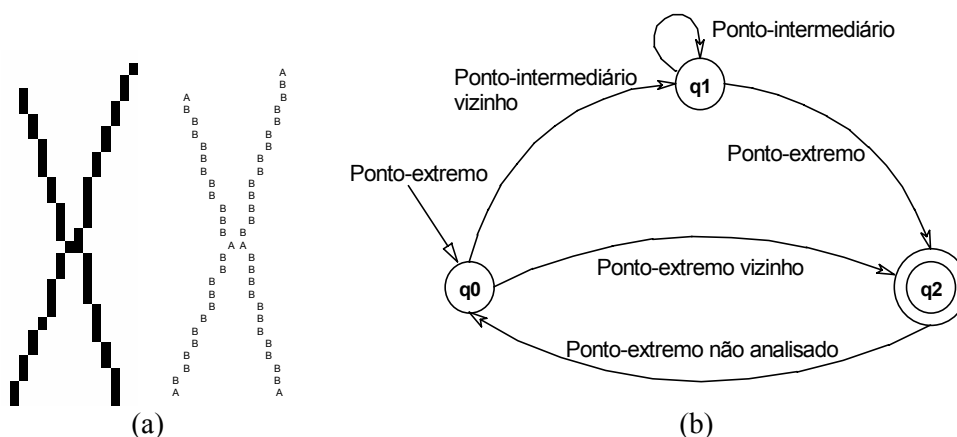


FIGURA 3.10 - Detecção dos segmentos a partir da imagem afinada

(a) Classificação dos pontos: A = ponto-extremo e B = ponto-intermediário (b) Autômato finito determinístico para o rastreamento do segmento.

Pela garantia que há um, e somente um caminho entre dois pontos-extremos, a determinação dos segmentos torna-se fácil. Basta rastrear, para cada ponto-intermediário vizinho ao ponto-extremo, o outro ponto-extremo a ele conectado (FIG. 3.10b). Este ponto é chamado de ponto *adjacente*. Repete-se esse processo até que todos os pontos extremos do esqueleto sejam avaliados e as linhas as quais pertencem sejam determinadas.

Dado um ponto extremo com os seus pontos adjacentes e com os pontos-intermediários entre eles, é preciso verificar a sua linearidade. Segmentos de linhas curvilíneos devem ser divididos em segmentos menores ao longo de sua trajetória como mostrado no exemplo da FIGURA 3.11.

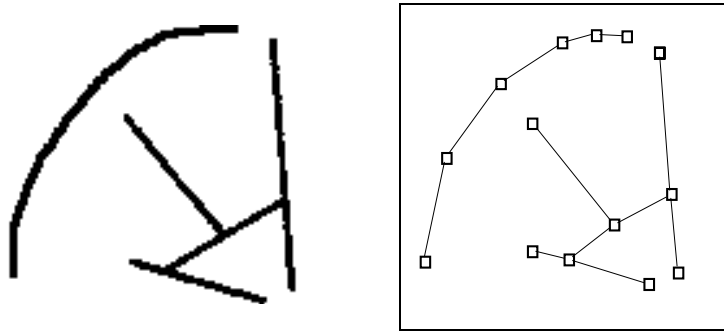


FIGURA 3.11 - Menores segmentos com linearização das curvas.

3.4.1 - Linearização das curvas

Durante o rastreamento dos pontos-intermediários, a trajetória do segmento também é determinada. Com isso, cria-se condições para solucionar outro requisito da detecção de linhas: a segmentação dos lineamentos curvilíneos. Utiliza-se o método de aproximação poligonal (BALLARD & BROWN, 1992:235) para a linearização das curvas (FIG. 3.12).

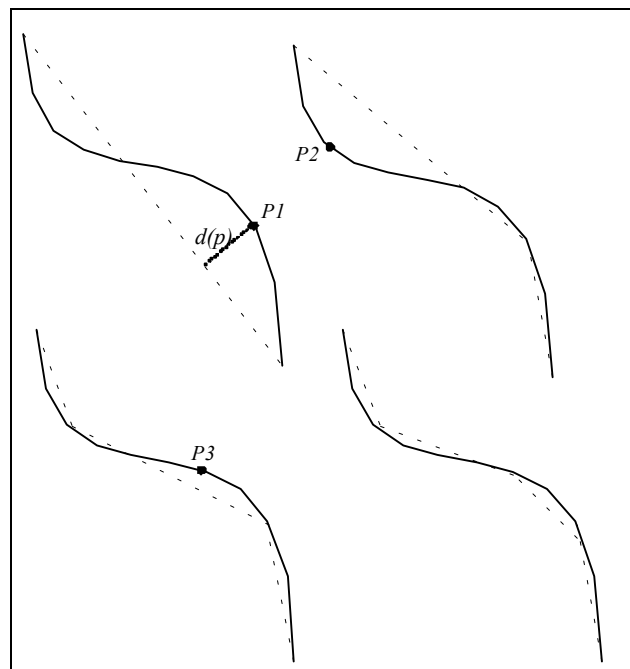


FIGURA 3.12 - Segmentação de um lineamento curvilíneo através de aproximação poligonal: $d(p1) > \alpha$, $d(p2) > \alpha$ e $d(p3) > \alpha$.

Esse método consiste, primeiramente, na determinação do ponto p da trajetória que está mais distante do segmento de reta definido pelos pontos-extremos. Se esta distância $d(p)$ é maior que um desvio máximo α atribuído aos pontos-intermediários,

então o ponto p deve ser ligado aos extremos originais. O processo se repete sucessivamente, para cada segmento criado, até que haja um conjunto de linhas ao longo da trajetória inicial de tal forma que nenhum ponto dessa trajetória tenha distância é maior que o desvio máximo em relação a linha mais próxima.

3.4.2 - Prolongamento dos extremos finais

Devido às sucessivas eliminações das bordas do objeto, pontos que fazem parte do fim de um lineamento podem ser removidos gerando um esqueleto menor que o objeto (FIG. 3.13).

Se a atitude a ser analisada for o comprimento das fraturas, essa distorção aumentará a chance de erros. Entretanto, pode-se corrigir este tipo de distorção rastreando o verdadeiro final do lineamento (FIG. 3.13b).

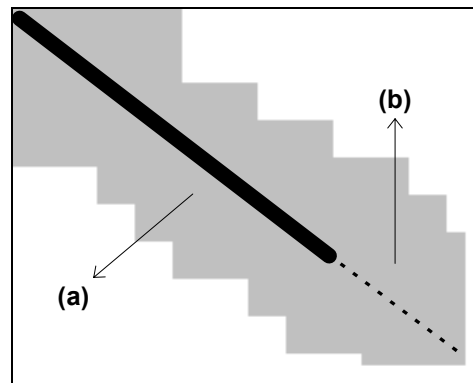


FIGURA 3.13 - Segmento detectado menor que o lineamento

(a) Segmento detectado (b) Diferença causada pelo afinamento.

Esse rastreamento deve ser aplicado em cada segmento detectado que possua um ponto final (extremo com conexidade igual a um).

Como o segmento é formado por um ponto inicial e um ponto final, que determinam sua posição e inclinação, basta traçar a linha que os determina até encontrar um ponto que esteja fora do objeto (ponto branco). O cálculo dos pontos a serem testados nesse rastreamento pode ser facilmente realizado pelo algoritmo para traçado de linha de Bresenham (HILL, 1987:428).

Como após a determinação dos segmentos de linha já se tem a tendência de cada segmento final de um lineamento, este processamento pode ser feito nesta fase. Outra alternativa é realizar este prolongamento após a junção dos menores segmentos.

3.5 - Junção dos segmentos colineares e consecutivos

Com a determinação dos menores segmentos de linha, têm-se condições de extrair as atitudes médias pretendidas para a análise de tendência. Entretanto, os menores segmentos da imagem não representam os lineamentos originais mas a sua tendência.

Lineamentos largos na imagem aumentam a possibilidade de distorções na imagem afinada. Uma forma de se aumentar a precisão da extração das atitudes é determinar quais são os maiores segmentos (os quais representam os próprios lineamentos da imagem original) a partir de junções sucessivas dos menores segmentos.

Para a junção dos segmentos menores, pode-se representar o resultado obtido pela determinação dos segmentos como um grafo (BOFFEY, 1982; WILSON & WATKINS, 1990). Dessa forma, os menores segmentos de uma imagem são representados por vértices (extremos de cada segmento) e por arcos (trajetória do segmento) (FIG. 3.14). Para tornar segmentos colineares e consecutivos uma única linha é necessário a eliminação de nós redundantes.

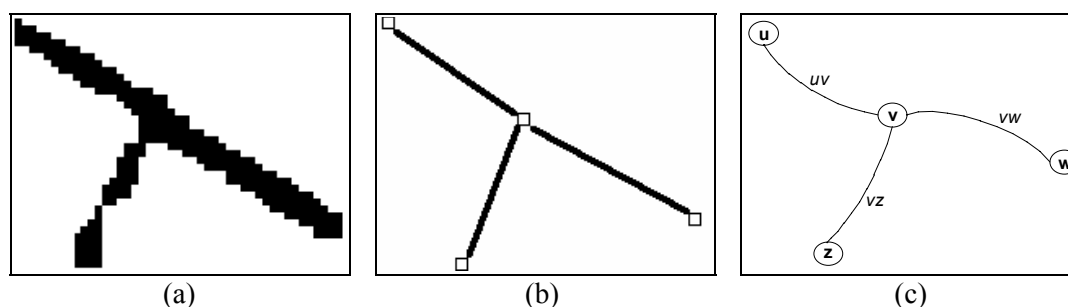


FIGURA 3.14 - Representação dos menores segmentos como um grafo

(a) Imagem original (b) Menores segmentos detectados (c) Representação do objeto como um grafo: vértices $V(G) = \{u, v, w, z\}$ e arcos $E(G) = (uv, vw, vz)$.

À medida que os vértices são detectados, os outros vértices participantes de seus arcos (vértices adjacentes) são verificados para se determinar a possibilidade da junção entre eles.

O esqueleto de um lineamento estará sempre inserido em seus limites, ou seja, dentro de suas bordas. A partir dessa afirmativa, *dois vértices não conectados diretamente poderão formar um novo arco se, e somente se o segmento de linha entre os dois está totalmente inserido no objeto original*. Se isso for verdadeiro, os arcos intermediários entre os dois vértices são redundantes e podem ser substituídos pelo arco único que esses vértices formam.

Vértices adjacentes, entretanto, podem formar um segmento inserido no objeto, mas não ter o vértice central v como um intermediário. Para solucionar este problema, basta testar se o segmento formado pelo vértice v e o ponto médio dos vértices adjacentes também está inserido no objeto (FIG. 3.15).

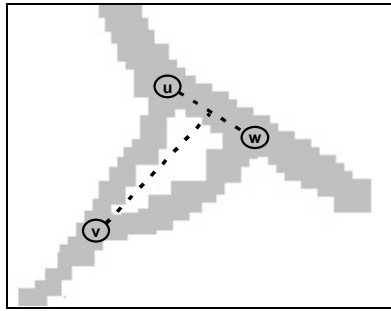


FIGURA 3.15 - Verificação do segmento formado por vértices adjacentes a v .

Como o exemplo da FIGURA 3.16, para cada vértice v determina-se quais os seus vértices adjacentes, ou seja, os vértices u , w e z .

Pelo teste de inserção no objeto (FIG. 3.16b, c, d), pode-se observar que o vértice central v é intermediário de um segmento maior (uw) sendo desnecessário e podendo ser eliminado. Ao mesmo tempo, esse vértice v é terminal de um segmento (vz) e, para mantê-lo, não deve ser eliminado.

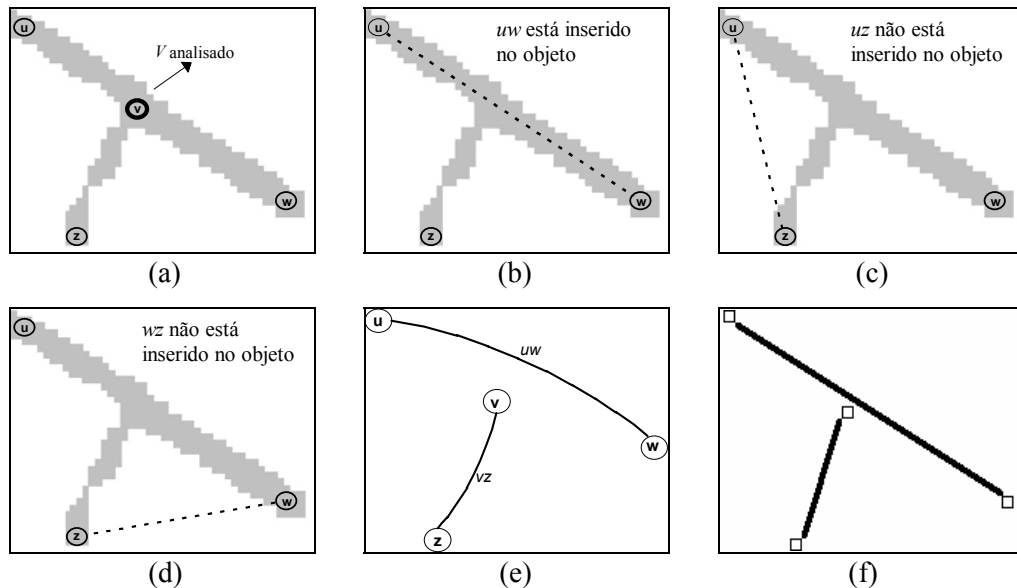


FIGURA 3.16 - Determinação dos maiores vetores pela verificação dos vértices pertencentes aos arcos do vértice a ser analisado

(a) Ponto v a ser analisado (b) Verificação do segmento uw : não depende de v porque está inserido no objeto (c) Verificação do segmento uz (d) Verificação do segmento wz : uz e wz dependem de v porque não estão inseridos no objeto (e) Grafo $P(G)$ resultante dos vértices dependentes $\{z\}$ e dos arcos independentes (uw): $P(G)=v \times vd+ai \Rightarrow P(G) = v \times \{z\} + \{uw\} = \{vz, uw\}$ (f) Maiores segmentos a partir do grafo $P(G)$.

Deduz-se facilmente que a imagem com os maiores segmentos é formada pelos

arcos definidos por v com os *vértices dependentes*, em união com os *arcos independentes* denotada pela expressão $P(G) = v \times vd + ai$ (FIG. 3.16e).

Há, entretanto, casos particulares em que apenas a determinação dos vértices dependentes e dos arcos independentes não é suficiente para promover a junção dos menores segmentos. Isto porque vértices podem ter vários vértices adjacentes, o que requer uma melhor análise das possibilidades de junção. Pela complexidade das imagens de entrada, deve-se estabelecer regras de junção específicas para as conexões mais complexas.

3.5.1 - Problemas com a junção dos menores segmentos

Se em cada interseção de linhas houver somente um extremo detectado, o processo descrito será suficiente para a junção dos menores segmentos.

Entretanto, devido às distorções da fase de afinamento, com frequência há, mais de um vértice nas interseções das linhas. Como a detecção dos vértices ocorre de forma aleatória, é importante se estabelecer regras para que a junção seja determinística.

Se, para um determinado vértice v , existir três ou mais vértices pertencentes aos seus arcos, que entre si formam um grafo completo, deve-se adotar uma política de junção que evite conexões destrutivas.

Esse tipo de conexão pode ser causado pela eliminação de arcos importantes para a continuação da junção ou a criação de falsos segmentos. Isto compromete a representação correta do objeto.

Um vértice v pode ter inúmeros vértices adjacentes. Esses, por sua vez, podem conectar-se de inúmeras formas. A heurística utilizada neste trabalho é baseada na formação de grupos, nos quais, dado um vértice v e um conjunto K de n vértices adjacentes, tem-se:

- grupos G são formados por vértices adjacentes a v que, combinados entre si, formam segmentos inseridos no objeto. Assim, formam um grafo completo de conexão (FIG. 3.17c);
- K pode ter vários subgrafos G que são completos e independentes (FIG. 3.17c, d);
- um vértice u pode pertencer a vários grupos G (FIG. 3.17e).

Uma vez formados os grupos, deve-se estabelecer regras para a ligação entre os vértices de cada grupo e para os próprios grupos:

- os vértices de um grupo G devem ser ligados formando um grafo linear (FIG. 3.18a);
- dois grupos sem vértices comuns devem se ligar através de apenas uma conexão, ou seja, mesmo que dois grupos possuam várias possibilidades de conexão, deve-se aplicar somente uma delas;
- grupos com vértices em comum não precisam ser unificados (FIG. 3.18);

- não pode haver conexões cíclicas, por exemplo, se $G1$ for conectado a $G2$, e se $G3$ pode se conectar a $G1$ e $G2$, então, deve-se conectar $G3$ a apenas um dos dois para não gerar conexões cíclicas.

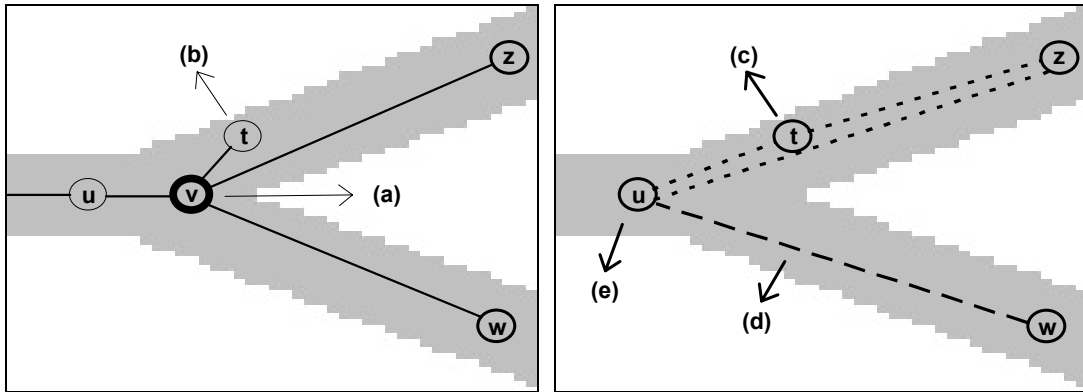


FIGURA 3.17 - Formação de grupos para conexão

(a) Vértice v sendo analisado (b) Vértice t gerado por ruído (c) Grupo formado pelos vértices $\{u, t, z\}$: todos conectam entre si formando um grafo completo (d) Grupo formado pelos vértices $\{u, w\}$ (e) Vértice u pertencente a mais de um grupo.

O critério utilizado para a ligação dos vértices de um grupo é baseado no menor caminho entre eles. Dessa forma, em um grupo G é escolhido, entre as diversas combinações de grafos lineares, o de menor caminho. Isso evita a ligação de pontos que estão posicionados em grandes distâncias em detrimento de um ponto mais próximo.

Na FIGURA 3.17c vê-se o exemplo de um grupo com mais de três vértices. Utilizando o critério do menor caminho para realizar a conexão dos vértices desse grupo, tem-se grafo linear $u-t-z$ (FIG. 3.18a). Verifica-se que a junção dos vértices nesta etapa do processamento ocorreu de forma correta.

Se a ligação entre eles for realizada de forma aleatória, pode-se realizar conexões destrutivas (FIG. 3.18c), que podem comprometer a continuação do processo de junção. Como todos os vértices são analisados e seus vértices adjacentes podem ser unidos inúmeras vezes, uma falha desta natureza pode resultar em uma representação equivocada.

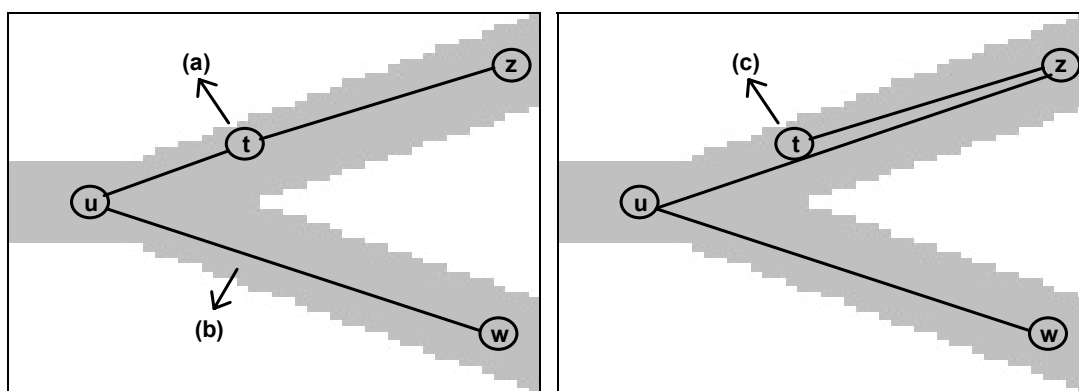


FIGURA 3.18 - Ligação dos vértices dos grupos e entre os grupos

(a) Ligação do grupo $\{u, t, z\}$: menor caminho = $u-t-z$ (b) Ligação do grupo $\{u, w\}$: dois grupos estão ligados pelo vértice comum u (c) Exemplo de uma ligação destrutiva realizada de forma aleatória.

A heurística para a junção dos menores segmentos se resume em aplicar para cada vértice de um objeto o seguinte:

- estabelecer os grupos de conexão dado um vértice v ;
- conectar os vértices de cada grupo;
- conectar os grupos;
- repetir o processo novamente para cada vértice que sofreu alterações.

3.6 - Síntese e conclusão

Para a detecção automática de estruturas rúpteis deve-se observar os seguintes aspectos: as imagens digitalizadas das cartas podem ter grande dimensão, grande número de lineamentos, alta complexidade de cruzamentos e lineamentos largos. A metodologia a ser aplicada deve, então, levar em consideração estes aspectos.

Por essas características das imagens de cartas de estruturas rúpteis, neste trabalho utilizou-se o método de vetorização guiada por esqueleto. Este método consiste basicamente em: afinar a imagem, determinar os segmentos e suas trajetórias, segmentar lineamentos curvilíneos e juntar os menores segmentos.

Observam-se alguns aspectos do afinamento: nem todos os objetos podem ou devem ser afinados; o afinamento é útil para objetos que consistem de linhas e praticamente inútil para objetos que possuem uma forma com grande área; o esqueleto que funciona bem em uma situação pode falhar em outra. A natureza dos passos seguintes ditam as propriedades necessárias para o esqueleto.

No caso das cartas de lineamentos, o método de afinamento deve garantir: fácil

determinação de pontos de interseção de linhas e seus pontos finais, um e somente um caminho entre os dois pontos extremos de um segmento, baixa redundância de localização de pontos de interseção e pontos finais. Para essas características, entre os diversos métodos de afinamento, o método de Zhang-Suen, combinado com a pré-suavização e ênfase de ângulos agudos de Stentiford e o pós-processamento para remoção de pontos redundantes de Holt, resultou em um esqueleto com menores distorções.

Com a imagem afinada pode-se facilmente determinar quais os segmentos menores e a sua trajetória. A partir dos extremos dos segmento é possível encontrar os pontos adjacentes pelo rastreamento dos pontos intermediários entre eles. Para a segmentação das linhas curvilíneas aplica-se a aproximação poligonal nos pontos intermediários. Com isso, detectam-se os menores segmentos que compõem os lineamentos.

Para diminuir a chance de erros no cálculo dos azimutes é necessário a determinação dos maiores segmentos que compõem os lineamentos. Representando-se os menores segmentos como um grafo, pode-se realizar a junção destes apenas com a eliminação de nós redundantes.

O esqueleto, assim como a representação dos menores segmentos, está totalmente inserido no objeto. Se um ponto central, comum a dois segmentos, for redundante, a linha definida pelos outros dois extremos dos segmentos deverá estar completamente inserida no objeto. Sendo as imagens muito complexas, é necessário um critério de eliminação de grupos de pontos, que entre si, formam segmentos inseridos no lineamento.

Esta metodologia foi desenvolvida de acordo com as características da imagem das cartas de estruturas rúpteis. Métodos de afinamento por processamento global demandam muito tempo e são mais sensíveis às grandes dimensões e distorções dos lineamentos. Métodos iterativos de afinamento combinados com heurísticas para detecção foram utilizados objetivando uma baixa ocorrência de erros, combinado com o bom desempenho na representação de grandes imagens.

4 - PROCESSAMENTO MÉTRICO E ANÁLISE DE ERRO

4.1 - Introdução

No processo de vetorização todos os lineamentos da imagem foram detectados. Um eventual isolamento e agrupamento em unidades menores, antes da representação linear, poderia resultar em perda de informação já que estruturas contínuas seriam fracionadas ainda no formato matricial.

Para a análise topológica as informações inerentes aos lineamentos, já no formato vetorial, devem ser agrupadas e relacionadas. Esse agrupamento dá-se primeiramente em regiões de interesse da imagem. Região de interesse é a área, que pode ser apenas um trecho da imagem original, cuja tendência topológica deseja-se evidenciar. Pode-se representar essa área como um polígono. Os vetores que cortam esse polígono são ainda agrupados em unidades de malha cujos valores são usados para o cálculo da topologia desejada, formando uma matriz representante da superfície topológica.

O processamento métrico diz respeito aos métodos de isolamento dos vetores, à medição de seus atributos e ao cálculo de suas relações. As relações do conjunto de vetores de cada grupo correspondem ao valor topológico daquela região cuja representação é dada no centro da unidade de malha. Portanto, essas relações definem a topologia que será o objeto da análise de tendência.

Obviamente, o método proposto para a aquisição de atitudes neste trabalho está sujeito a erros nas suas diversas etapas. Após o processamento métrico, pode-se finalmente avaliar a eficácia da detecção automática.

Essa avaliação dá-se pelo cruzamento entre os valores da matriz topológica real e da matriz topológica medida para o cálculo do coeficiente de correlação entre elas. Pode-se estabelecer valores ótimos para as etapas do processo de aquisição de atitudes que dependam de parâmetros com a comparação dos coeficientes resultantes de seus valores.

A análise de erro tem como objetivo evidenciar o comportamento do método de aquisição automática com diversos parâmetros e resultados. A identificação desse comportamento pode dar respostas sobre os parâmetros básicos do método que devem ser usados para aumentar a chance de sucesso da detecção de lineamentos.

4.2 - Processamento métrico

O processamento métrico é dividido em três etapas básicas. Primeiramente, deve-se entender que nem sempre a análise topológica ocorrerá na imagem inteira da carta. Isso fica claro pela necessidade de se fazer análises em regiões diferenciadas pelas suas características ou simplesmente por interesse local (FIG. 4.1a) de uma classe de informação específica. Assim, deve-se prover meios de isolar essas regiões mesmo com todas as informações da imagem presentes. Esta etapa do processamento métrico é chamada de isolamento regional (FIG. 4.1b).

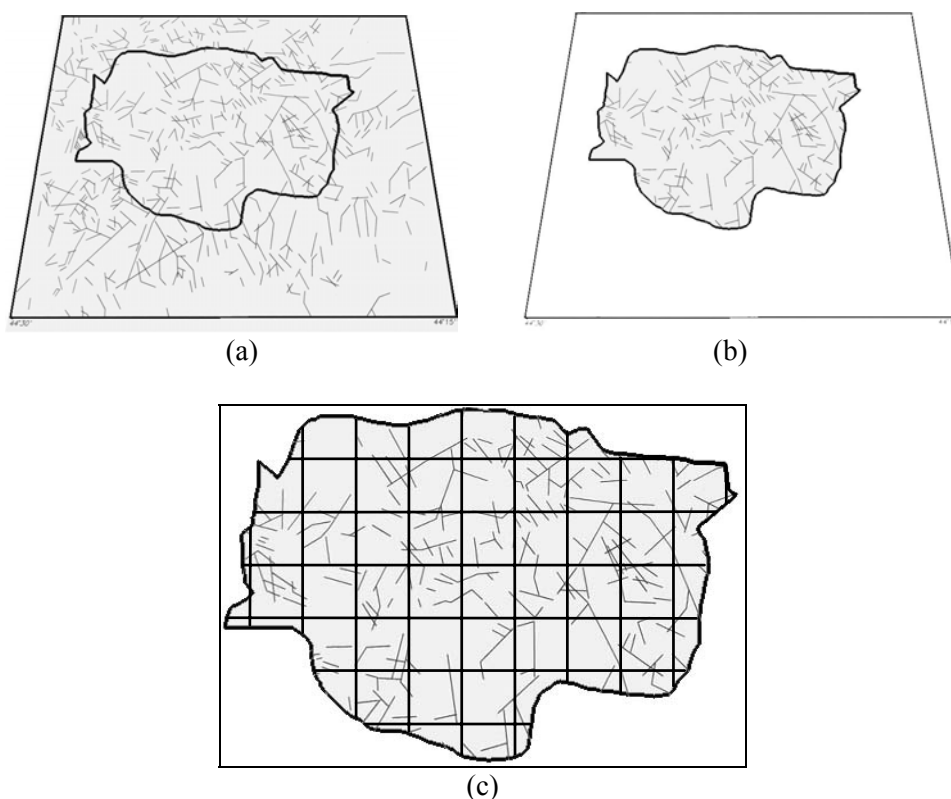


FIGURA 4.1 - Isolamento da área de interesse e agrupamento dos lineamentos em unidades de malha

(a) Carta original com a área de interesse indicada (b) Carta após o isolamento da área de interesse (c) Agrupamento dos lineamentos da imagem em unidades de malha.

A análise topológica tem como objetivo a identificação de uma tendência. Neste contexto, as informações dos objetos devem ser agrupadas em unidades que espacialmente favoreçam essa análise de tendência. A imagem, então, é dividida em várias sub-regiões, iso-espaçadas em cada eixo formando uma malha, na qual os atributos são agrupados e levantados por relações matemáticas constituintes da topologia alvo.

O conjunto de lineamentos pertencentes a uma unidade de malha são usados no

cálculo da topologia. Dessa forma, há necessidade de se isolar os lineamentos pertencentes a cada grupo. Esta etapa do processamento métrico é chamada de agrupamento (FIG. 4.1c).

4.2.1 - Isolamento e agrupamento dos vetores

A região de interesse e o espaçamento da malha em cada eixo devem ser informados. Os limites da região podem ser desenhados em uma carta diferenciada com a mesma escala da carta de estruturas rúpteis. O mesmo processo de detecção de estruturas rúpteis pode ser aplicado na imagem dessa carta para a extração dos lados do polígono correspondente à região. As arestas do polígono também podem ser informados interativamente.

O principal problema é o fato de que o polígono da região geralmente é convexo, o que dificulta o procedimento de isolamento.

Os vetores dos lineamentos podem ser isolados desse polígono através de métodos de recorte ou *clipping* (GILOI, 1978; HILL, 1990; HEARN & BAKER, 1986; FOLEY & VAN DAM, 1983) combinados com uma etapa simplificada de algoritmos de remoção de linhas escondidas (*Hidden Line Removal*) (HILL, 1990; HEARN & BAKER, 1986; FOLEY & VAN DAM, 1983) que consiste na quebra da linha em pedaços sobreviventes da oclusão de uma face. Obviamente, o polígono da região indica a área de sobrevivência de linhas.

Na etapa em questão, identificam-se todas as arestas do polígono que o segmento de linha a ser recortado cruza. As interseções entre uma reta com a equação paramétrica $x_1(t) = a_x + (b_x - a_x) \times t$ e as retas das arestas do polígono podem ser calculadas pela variação de t no intervalo $[0, 1]$ e a verificação do seu cruzamento (HILL, 1990:612). A FIGURA 4.2 ilustra os segmentos encontrados pela variação de t .

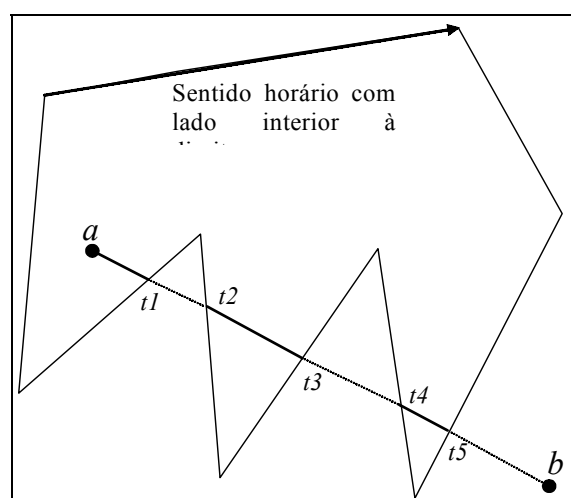


FIGURA 4.2 - Elementos para o recorte de retas.

Para cada segmento encontrado na variação de t verifica-se se o segmento está

entrando (segmento está fora) ou saindo (segmento está dentro) do polígono. Para facilitar o teste de entrada e saída, as arestas do polígono devem estar ordenadas em um sentido único no qual um dos lados do fluxo é o lado interior (HILL, 1990:718). Por exemplo, um polígono ordenado no sentido horário terá como lado interior a direita de cada aresta como no caso da FIGURA 4.2.

Cada unidade de malha pode ser um quadrado ou um retângulo dependendo do espaçamento em cada eixo. Como estas unidades são calculadas separadamente, a região de recorte é a interseção entre o polígono da região e o polígono da unidade a ser calculada. Obtém-se essa interseção recortando-se o conjunto de lineamentos pelo polígono da região e, em seguida, recortando-se seu resultado pelas unidades de malha como ilustrado na FIGURA 4.3.



FIGURA 4.3 - Recorte dos lineamentos na região de interesse e na malha.

4.2.2 - Medição de atitudes e cálculo da topologia nas unidades

Após o agrupamento de vetores, calculam-se as relações entre eles em cada grupo. Há dois atributos dos lineamentos utilizados no processamento métrico: o comprimento e o azimuth. Com os vetores isolados e agrupados, o cálculo das atitudes e de suas relações se torna simples. Os dados medidos e calculados são chamados dados observados.

4.2.2.1 - O comprimento

O comprimento é calculado pela distância euclidiana entre os pontos de cada segmento. Pode ser entendido como o módulo do vetor correspondente ao lineamento. Esse atributo não depende de rotações espaciais da imagem, ou seja, rotações não interferem no seu cálculo. Já o atributo azimuth depende da orientação da imagem porque seu cálculo é realizado em relação ao norte geográfico.

A distância euclidiana entre dois pontos $P=(x, y)$ e $Q=(u, v)$ é dada por $d_e = \sqrt{(x-u)^2 + (y-v)^2}$ (ROSENFELD & KAK, 1982:209) que é aplicada em cada vetor de uma unidade. Obviamente, esta distância está medida em número de pontos da imagem. Para se obter o comprimento em escala real d_r , deve-se apenas multiplicar o valor d_e pela escala da carta e_c e dividi-lo pelo número de pontos por centímetro p_c .

usados na aquisição da imagem. Assim, o comprimento real é dado por $d_r = \frac{d_e \times e_c}{p_c}$.

Por exemplo, em uma carta com escala 1:50000 digitalizada com 300 pontos por centímetro, um lineamento de 460 pontos de comprimento representa uma estrutura rúptil de $460 \times 50000/300 = 766,7$ metros.

Entre as várias possibilidades de relações topológicas com os comprimentos, pode-se citar como exemplos o seu somatório (FIG. 4.4c) e a sua média.

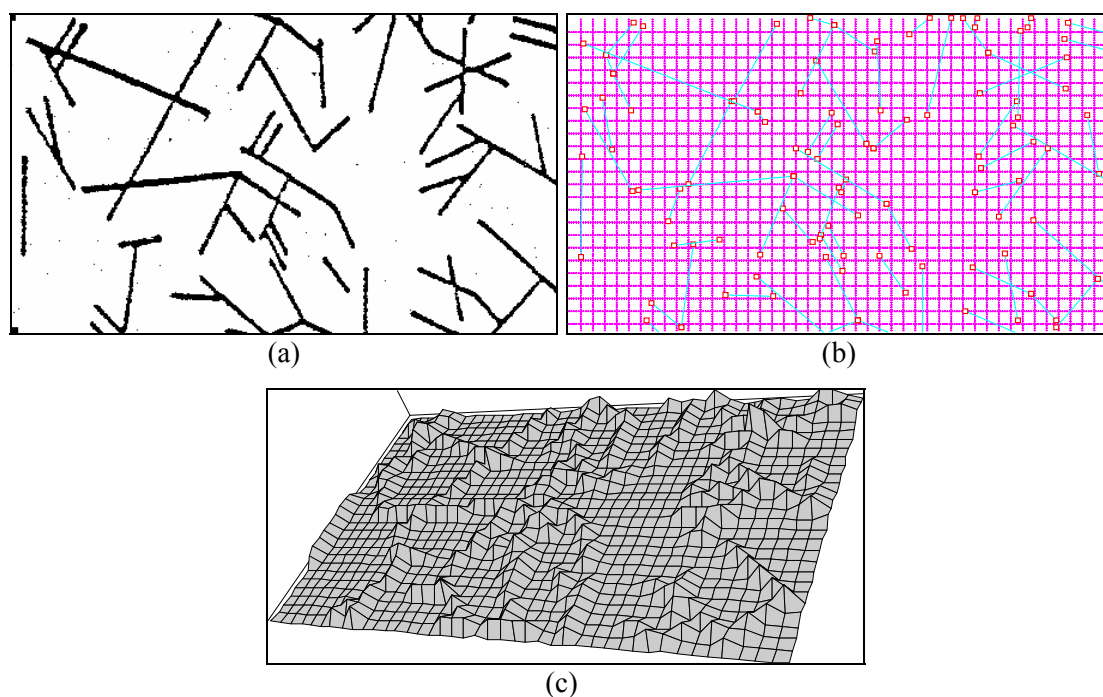


FIGURA 4.4 - Exemplo de observação de topologia

(a) Imagem de 455 por 271 pontos (b) Lineamentos detectados divididos por uma malha de 10 por 10 pontos (c) Representação do somatório dos comprimentos nas unidades de malha.

No exemplo dado na FIGURA 4.4 é mostrado a representação gráfica do somatório dos lineamentos. A área relativamente pequena da unidade de malha resulta em uma representação graficamente parecida com a imagem original.

4.2.2.2 - O azimuth

Uma forma de se evitar a transformação geométrica da imagem na medição de azimuthes é indicar dois pontos que formam o vetor referente ao eixo desejado. Esse vetor atende à necessidade de medição dos ângulos com flexibilidade de escolha da direção.

O ângulo entre um vetor de lineamento $\vec{a}$ e um vetor de referência de eixo $b = \vec{RS}$, previamente informado, é dado pelo produto $\cos\theta = \frac{\vec{a} \cdot \vec{b}}{|\vec{a}| |\vec{b}|}$ onde ua e ub são os

vetores unitários de a e b respectivamente (HILL, 1990:233; HEARN & BAKER, 1986). Sendo $a=(u, v)$ e $b=(q, r)$ tem-se a equação expandida para:

$$\cos\theta = \left(\frac{u}{|a|} \cdot \frac{q}{|b|} \right) + \left(\frac{v}{|a|} \cdot \frac{r}{|b|} \right).$$

A média dos azimutes de cada unidade de malha é um exemplo de relação cuja tendência pode ser analisada.

4.3 - Aquisição de atitudes e análise de erro

A aquisição de atitudes pode ser resumida pelo diagrama de blocos da FIGURA 4.5 que retrata todas as fases do processo de vetorização e do processamento métrico.

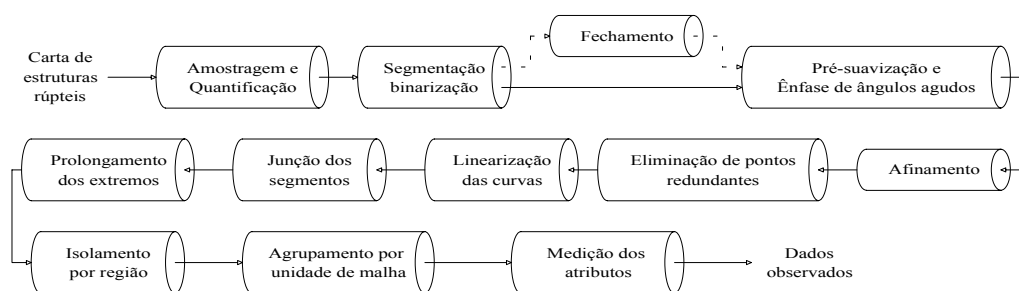


FIGURA 4.5 - Diagrama de blocos da aquisição de atitudes.

Assim, as fases deste diagrama são agrupadas nos dois processos básicos apresentados neste trabalho:

- processo de vetorização:
 - a) *amostragem e quantificação*;
 - b) *adequação da imagem*: segmentação/ binarização, fechamento morfológico opcional;
 - c) *representação linear*: pré-suavização e ênfase de ângulos agudos, afinamento, eliminação de pontos redundantes, linearização das curvas, junção dos segmentos, prolongamento dos extremos;
- processamento métrico:
 - a) *isolamento por região*;
 - b) *agrupamento por unidade de malha*;
 - c) *medição de atitudes*.

A eficácia desse conjunto de processos é o alvo da análise de erros apresentada neste tópico.

4.3.1 - A análise de erro

Pela comparação entre os dados observados e os dados reais de uma topologia, pode-se realizar a análise de erro. Para isso são necessárias imagens cujos lineamentos sejam conhecidos com precisão.

Os dados observados e utilizados neste capítulo foram extraídos da imagem da FIGURA 4.6 em diversas resoluções e os dados medidos foram manualmente identificados na imagem. Esta imagem possui características, como a sua concentração e distribuição, comuns a várias cartas de lineamentos.

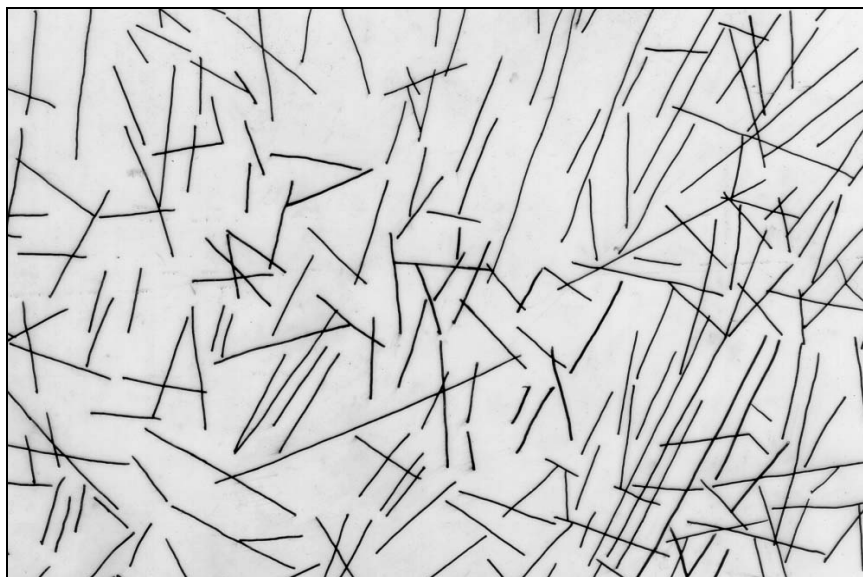


FIGURA 4.6 - Trecho de carta usada na análise de erro em tamanho real.

A menor largura de linha ou distância entre linhas nesta imagem é 0,3mm que necessita de, no mínimo, 170ppp para amostragem pelo cálculo da frequência de Nyquist. Nas imagens originais de cada resolução foi adicionado ruído gaussiano para a comparação do comportamento do método de detecção automática nesse caso.

A mesma divisão de malha de quatro por cento da imagem foi utilizada para todas as resoluções. As relações topológicas comparadas com os dados reais são a densidade (somatório dos comprimentos), a média de azimutes e a quantidade de lineamentos. A análise desse conjunto reflete o comportamento da detecção na maioria das variações possíveis de relações entre atributos de lineamentos.

4.3.1.1 - Variação do processo de aquisição

Na análise de erro, o processo da aquisição é modificado para se isolar processos chaves da detecção automática. Dessa forma, em cada conjunto de dados observados, uma etapa é excluída ou adicionada para contrastá-la com o procedimento geral.

Nos resultados apresentados (GRAF. 4.1, 4.2, 4.3 e 4.4), as legendas se referem às seguintes variações da aquisição de atitudes:

- detecção normal: aplicação de todos os processos da FIGURA 4.5 com exceção do fechamento topológico;
- detecção sem pré e pós processamento: afeta principalmente o algoritmo de afinamento. Nesta variação não é aplicado a pré-suavização, a ênfase de ângulos agudos e a eliminação de pontos redundantes;
- detecção sem prolongamento de linhas: não é aplicada a última fase da representação linear para prolongar linhas encurtadas no algoritmo de afinamento;
- detecção com fechamento: o fechamento topológico é opcional no diagrama da FIGURA 4.5. Nesta variação, essa fase é aplicada na imagem binária;
- detecção sem a junção de segmentos: Nesta variação os segmentos colineares e consecutivos não são unidos.

4.3.1.2 - Medida de aderência dos dados

A comparação dá-se entre os valores das unidades de malha medidas e reais. O interesse é estudar a maneira como essas duas variáveis estão relacionadas e medir o seu grau de associação. Isso pode ser resolvido pela teoria da correlação (SOARES et al., 1991).

Porém, deve-se observar que não há relação causal entre as coordenadas do centro de cada unidade com seu valor topológico calculado. Dessa forma, a correlação entre essas entidades se traduz em *grau de aderência* entre as curvas definidas pelas matrizes calculada e real.

Pode-se calcular a variação total como a soma dos quadrados das variáveis dependentes reais:

$$SS_T = \sum P^2 - \frac{(\sum P)^2}{n}.$$

Onde P são os valores reais e n o número de amostras observadas. Para os valores calculados $\hat{P}$ calcula-se:

$$SS_R = \sum \hat{P}^2 - \frac{(\sum \hat{P})^2}{n}.$$

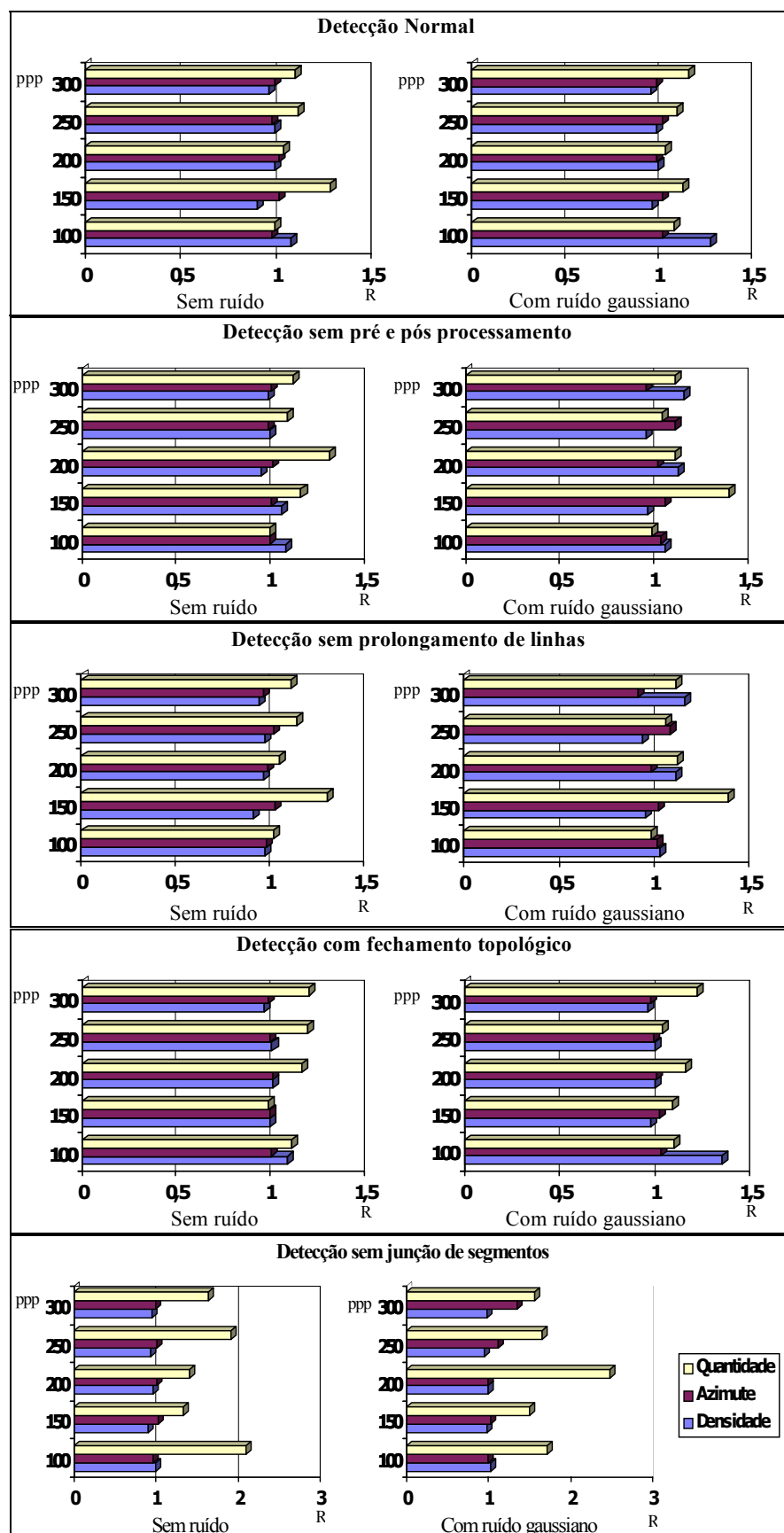


GRÁFICO 4.1 - Resultado das variações do algoritmo de detecção.

A porcentagem de aderência é dada por $100\% \cdot R^2 = \frac{SS_R}{SS_T}$, e o coeficiente de correlação múltipla é dado por $R = \sqrt{R^2}$. O coeficiente R indica quanto os valores calculados correspondem aos valores reais (DAVIS, 1973). Se $R=1$, então, há cem por cento de acerto. Assim, quanto mais R for próximo de um, melhor a aderência e maior o acerto da detecção.

Valores de R foram calculados com variações do algoritmo de detecção para cada resolução usada. O resultado é apresentado no GRÁFICO 4.1.

A comparação dos resultados obtidos com cada variação permite uma análise simplificada da contribuição de cada etapa na diminuição ou aumento do erro geral do método de detecção de linhas que se apresenta. É importante salientar que essa comparação não identifica um comportamento geral, mas apenas uma aproximação.

A análise individual de cada topologia é feita basicamente na curva de detecção normal, sendo as outras curvas indicadores do aumento ou diminuição de erros. Isso porque, no contexto geral, a detecção normal resulta em melhores resultados nas diversas situações analisadas.

4.3.2 - Somatório dos comprimentos

No GRÁFICO 4.2 tem-se a variação de aderência do somatório dos comprimentos em função das resoluções de amostragem. É importante notar que na imagem sem ruído esta topologia obedece à amostragem espacial mínima de 170ppp. Antes dessa resolução, observa-se uma flutuação da aderência da superfície calculada sobre a superfície real causada pelo baixo detalhe das imagens.

Na imagem com ruído, observa-se que a detecção normal teve desempenho insatisfatório nas resoluções abaixo de 170ppp. Isso indica que os parâmetros apresentados para a detecção automática otimizam o resultado.

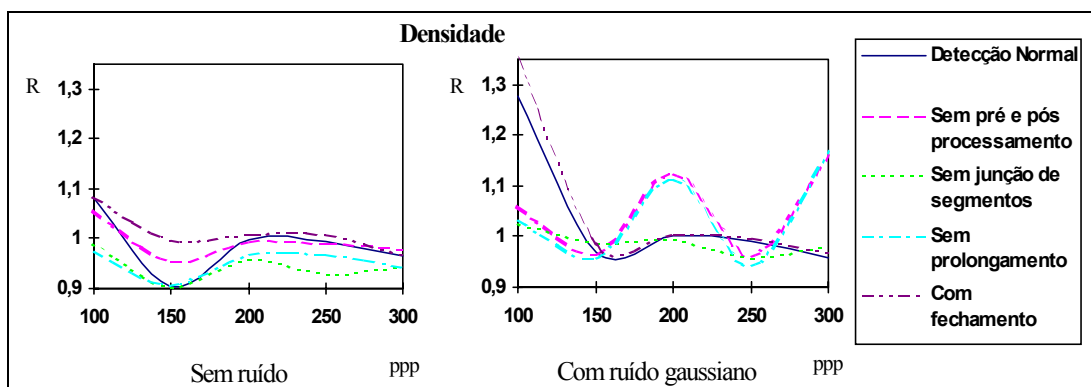


GRÁFICO 4.2 - Aderência do somatório dos comprimentos.

O prolongamento de linhas, como esperado, afeta diretamente esta topologia,

principalmente nas maiores resoluções nas quais os lineamentos são espacialmente maiores. Se as linhas não são completadas aumenta-se o erro de topologias dependentes do comprimento.

As fases de pré e pós processamento e a fase de prolongamento de linhas são os fatores determinantes de eficiência do algoritmo nas imagens com ruído. Nota-se que a ausência de uma dessas fases implica em baixo desempenho da detecção nessas imagens.

O fechamento topológico afeta negativamente imagens com baixa resolução. Nessas imagens, o fechamento ocorre não somente nas falhas dos lineamentos, mas entre os lineamentos que estão muito próximos entre si. Nas resoluções mais apropriadas à imagem analisada observa-se uma maior aproximação da linha de total aderência.

Esta topologia não depende da junção de linhas cuja aplicação não implica em melhora significativa do resultado.

4.3.3 - Média dos azimutes

O atributo azimuth é o menos afetado pela variação do algoritmo. No gráfico da imagem sem ruído do GRÁFICO 4.3, as diferenças médias das variações, mesmo nas imagens de menor resolução, estão próximas de um, refletindo o mesmo comportamento.

Os maiores erros estão nas imagens com ruído de maior resolução. O aumento do detalhe das imagens combinado com o ruído diminui a eficiência das etapas pertencentes à representação linear.

As etapas que mais diminuem os erros de detecção para esse atributo é a junção de linhas, o pré e pós processamento e o prolongamento de linhas que estão diretamente relacionadas entre si. Uma melhor aderência também é obtida com o fechamento topológico.

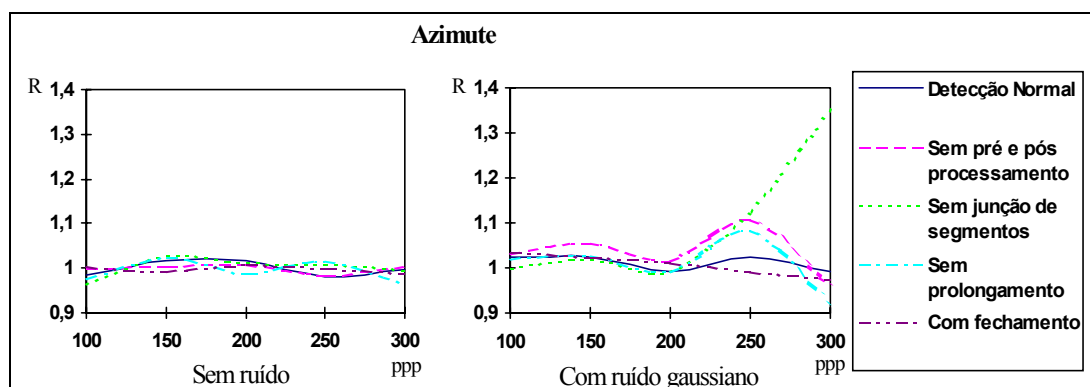


GRÁFICO 4.3 - Aderência da média de azimutes.

Nota-se que as resoluções abaixo de 170ppp mantêm resultados satisfatórios

mesmo sendo o método de detecção aplicado a esta topologia bastante sensível a ruídos.

4.3.4 - Quantidade de lineamentos

O maior problema da detecção é determinar o número real de atributos. Mesmo com todas as estruturas da imagem detectadas pode-se eventualmente manter divididos segmentos colineares e consecutivos. Por isso, verifica-se que o erro da aderência tende a ser maior que um. A quantidade depende fortemente da junção de segmentos ao contrário das outras topologias (GRAF. 4.4).

Nas imagens com ruído, o processamento da detecção normal é a melhor opção. Como no caso dos azimutes, o fechamento topológico pode aumentar a precisão.

Com exceção das imagens com resolução menor do que 170ppp, a detecção normal obtém um resultado satisfatório. Entretanto, é importante notar que a melhor faixa de amostragem espacial para o atributo quantidade de lineamentos é pequena e está próxima de 170ppp. As outras topologias oferecem um grau de liberdade maior na escolha da resolução.

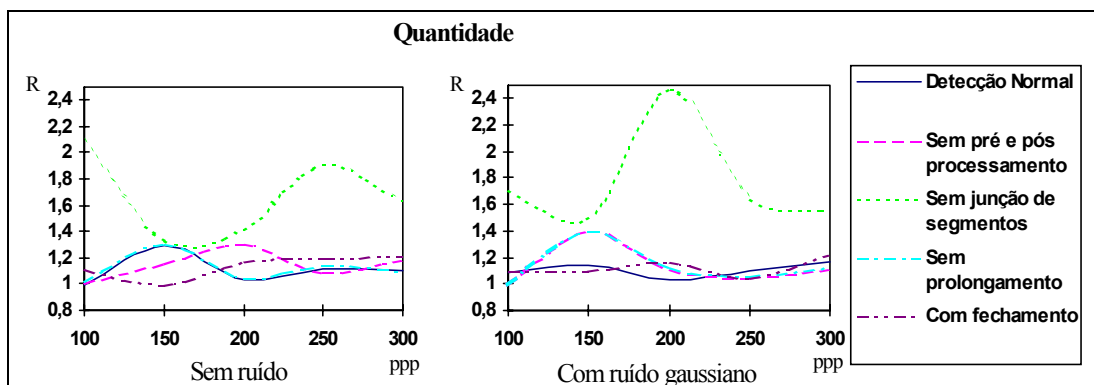


GRÁFICO 4.4 - Aderência da quantidade de lineamentos.

4.4 - Síntese e conclusão

O processamento métrico divide-se em isolamento, agrupamento e medição dos vetores detectados. O isolamento de um vetor é feito em relação a uma sub-região de interesse da imagem previamente informada na qual se deseja analisar a tendência de topologias. O agrupamento resume-se na divisão dos vetores de acordo com uma malha cujos elementos são usados no cálculo da topologia. As dimensões dessa malha definem as dimensões da matriz de valores observados. A medição ocorre em cada vetor de uma unidade de malha. Os valores levantados são a entrada para o cálculo da topologia.

A região de interesse definida para o isolamento de vetores pode ser representada como um polígono. Geralmente, esse polígono é convexo, dificultando o processo de isolamento. Algoritmos de recorte e variações de algoritmos de oclusão de linhas geralmente utilizados em computação gráfica podem ser usados para isolar vetores em relação ao polígono de região.

O mesmo método usado no isolamento pode ser aplicado no agrupamento de vetores. Os algoritmos podem ser simplificados já que o polígono das unidades de malha resumem-se em um quadrado ou retângulo. No isolamento e agrupamento, os vetores são recortados a partir da interseção de cada unidade da malha com a região de interesse.

A medição do atributo comprimento de um vetor pode ser feita pela distância euclidiana entre seus pontos extremos. O cosseno do ângulo entre um vetor cujo sentido define o eixo de referência de azimuth e o vetor de lineamento pode ser calculado pela multiplicação de seus vetores unitários.

A análise de erro é feita pela comparação dos resultados medidos com o conjunto de dados reais da mesma área. Essa comparação pode ser feita pela estimativa de aderência entre os dois resultados. O coeficiente resultante dessa estimativa indica quanto a superfície topológica medida se adere à superfície real.

Pela análise dos coeficientes de aderência obtidos através da variação dos algoritmos conclui-se que o conjunto de etapas da metodologia de detecção fornecem melhores resultados nas diversas situações apresentadas, embora a inclusão ou exclusão de etapas possa aumentar a aderência em imagens com problemas específicos.

SEÇÃO II

A ANÁLISE TOPOLÓGICA

5 - ANÁLISE DE TENDÊNCIA

5.1 - Introdução

O processamento métrico fornece as atitudes devidamente agrupadas e relacionadas por alguma topologia. Com regressão estatística aplicada nos dados observados, têm-se os dados estimados que compõem a tendência da topologia em questão. Esses dados representam uma superfície topológica. Quanto melhor ajustada for a superfície estimada sobre a superfície observada, melhor a representação da tendência topológica.

Neste capítulo, apresenta-se um modelo matemático para regressão dos dados obtidos a partir do método de aquisição de atitudes. Aponta-se, portanto, para a modelagem dos dados adquiridos no contexto geológico.

O problema é definir critérios de melhor ajuste entre as superfícies e, principalmente, determinar uma função de tendência descrita por equações a partir dos dados observados. Neste trabalho são abordadas as equações polinomiais.

Pela regressão estatística, determina-se os coeficientes do polinômio de tal forma que, dentro do limite do seu grau, sua superfície aproxima-se da superfície observada de acordo com algum critério de minimização de erro (OSSERMAN, 1969).

A determinação da equação para a estimativa de dados constitui o primeiro passo para a análise de tendência da topologia representada. A confiabilidade da interpretação da superfície depende do seu ajuste aos dados.

Análise de tendência é o nome dado, em geologia, para um método matemático de separação de dados de um mapa em dois componentes: os de natureza regional e as flutuações locais (DAVIS, 1973). Uma superfície de tendência pode ser usada para interpolar entre pontos de dados, extrapolar a seqüência de dados, inferir sobre a presença de tendências ou estimar características de interesse sobre os dados.

Em resumo, trata com reconhecimento, isolamento e medição de tendências que podem ser representadas por linhas, superfícies e outros objetos. Dessa forma, a análise de tendência consiste na separação de variações de grande escala, ou tendências, de variações locais (HARBAUGH & MERRIAN, 1968).

5.2 - Análise de tendência polinomial

Uma tendência é definida como uma função linear de coordenadas geográficas de um conjunto de observações construída de tal forma que os desvios quadráticos da tendência são minimizados. Assim, uma tendência tem os seguintes aspectos (DAVIS, 1973):

- é baseada em coordenadas geográficas. Isso significa que a observação é considerada como sendo, em parte, uma função de sua localização qualquer que seja o seu tipo;
- a tendência é uma função linear, ou seja, tem a forma $Y = b_1 X_1 + b_2 X_2 + \dots$, onde b são coeficientes e X representa combinações de coordenadas geográficas. Esta equação resulta valores de $\hat{Y}$ que são os componentes de tendência de uma observação;
- a função específica escolhida deve minimizar os desvios quadráticos da tendência.

É importante entender que a análise de tendência constitui apenas um segmento de um campo mais amplo de regressão estatística (FRÖBERG, 1985; MONTGOMERY & PECK, 1992; COOK & WEISBERG, 1994; MANDEL, 1991). Sua prática, na geologia, está diretamente envolvida no ajuste de superfícies de tendência para satisfazer o critério dos mínimos quadrados. Isso resulta na superfície de tendência passando através, acima ou abaixo de cada dado verdadeiro. A diferença entre o valor estimado e o real é chamada de valor residual ou valor de desvio.

As superfícies de tendência são aplicáveis em superfícies de qualquer dimensão. Em um mapa de tendência, duas das dimensões são geográficas, representado o comprimento e a largura do mapa. Uma terceira dimensão é a elevação da superfície que representa a topologia. Dessa forma, uma superfície está inserida no espaço tridimensional. Essa superfície representa uma função matemática que envolve uma variável dependente (topologia) e duas independentes (coordenadas geográficas) (HARBAUGH & MERRIAN, 1968).

5.2.1 - Critério dos mínimos quadrados

O critério dos mínimos quadrados pode ser ilustrado pelo problema de ajuste de uma linha reta a valores observados de duas variáveis (SOARES et al., 1991). O problema é obter o melhor ajuste da linha aos pontos usando os mínimos quadrados como um critério arbitrário de melhor ajuste.

Se certas características forem assumidas e devidamente justificadas sobre a distribuição das populações das quais os exemplos são coletados, então, a análise de regressão pode ser aplicada. Pelas características da distribuição de pontos mostrados na FIGURA 5.1 assume-se, por exemplo, que sua tendência pode ser representada por uma reta.

Deve-se também assumir o critério de minimização de desvios. No exemplo dado são mostradas três possibilidades. É possível construir linhas com qualquer um desses critérios de desvios usados. Entretanto, deve-se examinar as implicações das possibilidades de desvios a partir do problema específico em análise.

O critério de mínimos quadrados também se aplica ao ajuste de linhas curvilíneas descrita por equações e ao ajuste de superfícies e hipersuperfícies.

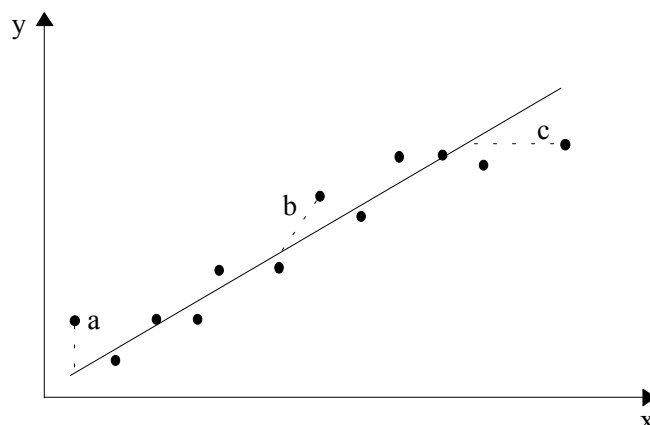


FIGURA 5.1 - Ajuste de linha reta a um conjunto de pontos e possíveis critérios para minimização de desvios quadráticos

(a) Minimização de desvios a partir de y (b) Minimização pela combinação dos valores de x e y (c) Minimização pelos valores de x .

A variável a ser examinada é a variável dependente designada Y_i . A outra é a variável independente e é denotada por X_i . A função de valores estimados é então dada por $\hat{Y} = f(X_i)$. Considerando o critério para minimização dos desvios quadráticos como sendo $\hat{Y}_i - Y_i$, o problema torna-se a determinação de um método tal que $\sum \hat{Y}_i - Y_i = \text{mínimo}$ (HARBAUGH & MERRIAN, 1968; DAVIS, 1973; MONTGOMERY & PECK, 1992).

5.2.2 - Classificação de funções de tendência

Funções de tendência são descritas por equações classificadas de acordo com o número de variáveis e com o grau máximo das variáveis independentes. O número de variáveis é composto pelas variáveis dependentes e independentes.

O grau de uma equação polinomial contendo uma variável independente e uma dependente, por exemplo, é o maior dos valores dos expoentes. Assim, um polinômio de segundo grau tem a seguinte forma $\hat{Y} = A + Bx + Cx^2$.

A FIGURA 5.2 apresenta uma série de polinômios com sua classificação geral e sua representação geométrica. A linha indica o número de variáveis e a coluna indica o grau. Equações do primeiro grau, por exemplo, com duas variáveis geram uma linha reta, três variáveis um plano e quatro variáveis uma hipersuperfície de primeiro grau.

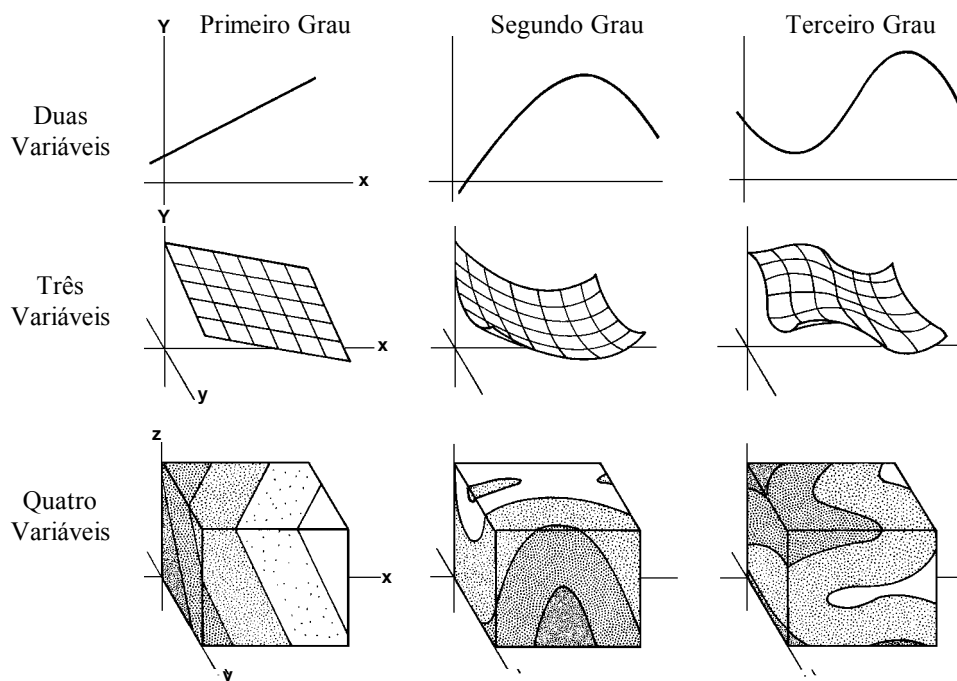


FIGURA 5.2 - Classificação de polinômios em relação ao número de variáveis e ao grau e sua representação geométrica.

FONTE - DAVIS, 1973. p.357.

Os termos das equações da FIGURA 5.2 determinam sua classificação dependendo se formam a base ou termo constante, ou se são lineares, quadráticos ou cúbicos (HARBAUGH & MERRIAN, 1968).

Obviamente, a classificação mostrada na FIGURA 5.2 pode ser estendida para incluir polinômios contendo mais variáveis ou maiores graus. As equações polinomiais utilizadas neste trabalho possuem três variáveis (coordenadas cartesianas no plano e o valor topológico correspondente) e até oito graus.

5.2.3 - Cálculo dos coeficientes

O método para estimar os coeficientes de uma função polinomial de tendência ajustada pelos mínimos quadrados é o mesmo para qualquer variante do modelo. Considere a equação para uma superfície de primeiro grau $\hat{Y} = A + Bx + Cy$. Os coeficientes A , B e C dessa equação devem ser computados de tal forma que as somas dos quadrados dos desvios seja mínima (HARBAUGH & MERRIAN, 1968).

Sendo $desvio = \hat{Y} - Y$, podemos rescrevê-lo como $desvio = Y - A - Bx - Cy$. Combinando essa equação com a função $F(A, B, C)$ que denota a soma dos desvios quadráticos obtém-se $F(A, B, C) = \sum (Y_i - A - Bx - Cy)^2$. Se $F(A, B, C)$ deve ser minimizada, então, é necessário que $\delta F / \delta A = \delta F / \delta B = \delta F / \delta C = 0$.

Assim, as derivadas parciais são (HARBAUGH & MERRIAN, 1968):

$$\begin{aligned}\frac{\delta F}{\delta A} &= \sum 2(Y_i - A - Bx - Cy)(-1) = 0, \\ \frac{\delta F}{\delta B} &= \sum 2(Y_i - A - Bx - Cy)(-x) = 0, \\ \frac{\delta F}{\delta C} &= \sum 2(Y_i - A - Bx - Cy)(-y) = 0,\end{aligned}$$

que produzem as seguintes equações:

$$\begin{aligned}- \sum Y_i + An + B \sum x + C \sum y &= 0, \\ - \sum Y_i x + A \sum x + B \sum x^2 + C \sum xy &= 0, \\ - \sum Y_i y + A \sum y + B \sum xy + C \sum y^2 &= 0,\end{aligned}$$

onde n é o número de dados. Movendo os termos que contêm Y_i para o outro lado da equação e reorganizando essas equações, obtemos as três *equações normais* cuja solução nos permite obter os três coeficientes desconhecidos A , B e C :

$$\begin{aligned}An + B \sum x + C \sum y &= \sum Y_i, \\ A \sum x + B \sum x^2 + C \sum xy &= \sum Y_i x, \\ A \sum y + B \sum xy + C \sum y^2 &= \sum Y_i y.\end{aligned}$$

Essas equações lineares podem ser resolvidas através de álgebra de matrizes. Assim, as equações normais podem ser escritas como:

$$\begin{bmatrix} n & \sum x & \sum y \\ \sum x & \sum x^2 & \sum xy \\ \sum y & \sum xy & \sum y^2 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} A \\ B \\ C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum Y_i \\ \sum Y_i x \\ \sum Y_i y \end{bmatrix}.$$

Os dados observados provêm a matriz xy e o vetor Y_i dando condições para que o vetor ABC seja determinado. Esta operação pode ser feita pela multiplicação do vetor Y_i com o inverso da matriz xy :

$$\begin{bmatrix} A \\ B \\ C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} n & \sum x & \sum y \\ \sum x & \sum x^2 & \sum xy \\ \sum y & \sum xy & \sum y^2 \end{bmatrix}^{-1} \times \begin{bmatrix} \sum Y_i \\ \sum Y_i x \\ \sum Y_i y \end{bmatrix}.$$

Com equações normais adicionais obtém-se, da mesma forma, as matrizes para superfícies com maiores graus.

5.2.3.1 - Coeficientes do polinômio até o oitavo grau

Polinômios com variações do primeiro ao oitavo grau são estudados e aplicados neste trabalho. Estes polinômios possuem a seguinte forma:

$$\begin{aligned}
\text{grau 0:} & \quad \hat{Y} = b_0 \\
1^\circ \text{ grau:} & \quad + b_1x + b_2y \\
2^\circ \text{ grau:} & \quad + b_3x^2 + b_4xy + b_5y^2 \\
3^\circ \text{ grau:} & \quad + b_6x^3 + b_7x^2y + b_8xy^2 + b_9y^3 \\
4^\circ \text{ grau:} & \quad + b_{10}x^4 + b_{11}x^3y + b_{12}x^2y^2 + b_{13}xy^3 + b_{14}y^4 \\
5^\circ \text{ grau:} & \quad + b_{15}x^5 + b_{16}x^4y + b_{17}x^3y^2 + b_{18}x^2y^3 + b_{19}xy^4 + b_{20}y^5 \\
6^\circ \text{ grau:} & \quad + b_{21}x^6 + b_{22}x^5y + b_{23}x^4y^2 + b_{24}x^3y^3 + b_{25}x^2y^4 + b_{26}xy^5 + b_{27}y^6 \\
7^\circ \text{ grau:} & \quad + b_{28}x^7 + b_{29}x^6y + b_{30}x^5y^2 + b_{31}x^4y^3 + b_{32}x^3y^4 + b_{33}x^2y^5 \\
& \quad + b_{34}xy^6 + b_{35}y^7 \\
8^\circ \text{ grau:} & \quad + b_{36}x^8 + b_{37}x^7y + b_{38}x^6y^2 + b_{39}x^5y^3 + b_{40}x^4y^4 + b_{41}x^3y^5 \\
& \quad + b_{42}x^2y^6 + b_{43}xy^7 + b_{44}y^8
\end{aligned}$$

O grau máximo de oito possui, portanto, 45 coeficientes, sendo que a matriz normal correspondente tem ordem 45 e o vetor normal 1 x 45 elementos. O cálculo de seus elementos pode ser realizado iterativamente por algoritmos descritos por DAVIS (1973) e HARBAUGH & MERRIAN (1968) nos quais uma série de somatórios com os dados observados e com as coordenadas elevadas às potências de cada termo são agrupados e relacionados.

As altas potências desse polinômio podem demandar formatos específicos de números reais. As ordens de grandeza dos elementos estimados da matriz e vetor normais serão sempre maiores que as das coordenadas x e y . Como esses dados ainda são multiplicados matricialmente, conclui-se que os coeficientes resultantes podem demandar grande precisão numérica.

5.2.4 - Medida estatística de aderência do polinômio

A medida de aderência aqui apresentada é a mesma utilizada para a análise de erro do algoritmo de detecção. Pode-se definir três termos que expressam a variação da variável dependente (DAVIS, 1973). A primeira é a soma total dos quadrados SS_T de Y :

$$SS_T = \sum_{i=1}^n Y_i^2 - \frac{(\sum_{i=1}^n Y_i)^2}{n} = \sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2.$$

Este valor dividido por $(n-1)$ resulta na variância de Y :

$$s_2 = \frac{SS_T}{n-1} = \frac{n \sum_{i=1}^n Y_i^2 - (\sum_{i=1}^n Y_i)^2}{n(n-1)}.$$

A segunda medida de variação é a soma dos quadrados devido à regressão SS_R :

$$SS_R = \sum_{i=1}^n \hat{Y}_i^2 - \frac{(\sum_{i=1}^n \hat{Y}_i)^2}{n} = \sum_{i=1}^n (\hat{Y}_i - \bar{Y})^2.$$

Se $\hat{Y}_i$ e Y_i se correspondem em todas as observações, então, as somas dos quadrados em SS_T e SS_R são as mesmas, senão, haverá uma variação chamada de soma dos quadrados devido aos desvios:

$$SS_D = \sum_{i=1}^n (\hat{Y}_i - Y_i)^2 = SS_T - SS_R.$$

Essa é a medida de falha dos mínimos quadrados no ajuste dos pontos estimados. A aderência da superfície aos pontos pode ser calculada por $R^2 = \frac{SS_T}{SS_R}$. Se a

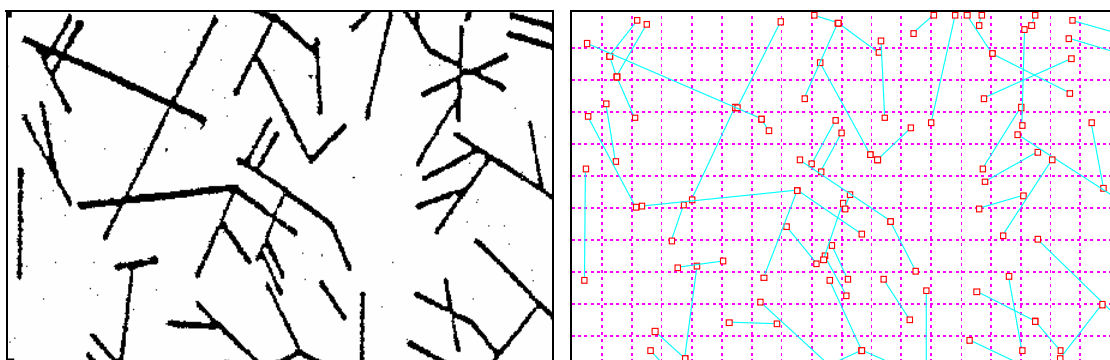
equação em questão estima bem os dados observados, essa razão será próxima de um. A relação mais útil e a utilizada neste trabalho é o coeficiente de correlação múltipla definida pela raiz quadrada da aderência $R = \sqrt{R^2} = \sqrt{SS_T/SS_R}$ (DAVIS, 1973).

O ajuste perfeito terá R próximo de um, indicando cem por cento de aderência. Nesse caso não há nenhum desvio dos dados em relação à função de tendência. Um ajuste perfeito poderá ser obtido se o número de termos for igual ao número de pontos de dados (HARBAUGH & MERRIAN, 1968).

Quando a aderência é baixa, por exemplo 15 a 30 por cento, é um sinal de que a maioria da variação presente nos dados não está presente na função de tendência. Mesmo assim, os desvios ou os resíduos podem ser significantes geologicamente (HARBAUGH & BONHAM-PARKER, 1970; HARBAUGH & MERRIAN, 1968).

5.3 - Regressão polinomial de dados observados

A imagem de lineamentos usada como exemplo é a mesma do capítulo de processamento métrico e análise de erro. Entretanto, para facilitar a apresentação dos resultados, a unidade de malha usada foi aumentada para 25 por 25 pontos. Com esse tamanho, as dimensões da matriz observada é de 19 por 11 unidades (FIG. 5.3).



v \ x	12,5	37,5	62,5	87,5	112,5	137,5	162,5	187,5	212,5	237,5	262,5	287,5	312,5	337,5	362,5	387,5	412,5	437,5	462,5
12,5	9,85	23,43	28,12	0	0	0	24,19	0	43,68	29,68	8,23	19,84	25,70	37,87	0	22,31	17,26	45,88	5,38
37,5	4,12	79,94	26,92	8,94	0	2,23	25,94	0	43,85	0	30,85	0	25,70	2,82	28,63	73,38	18,38	6,08	5,38
62,5	0	33,90	1	18,02	26,92	50,11	0	14,31	19,86	9,84	25,01	0	25,70	6,70	32,31	31,38	17,88	0	0
87,5	24,18	26,31	44,7	0	8,06	25,22	19,76	0	33,28	23,15	13,34	10,63	8,06	0	33,39	22,20	0	17,26	0
112,5	6,08	41,99	0	0	27,73	0	0	11,66	52,91	10,43	24,09	0	13,08	35,37	46,65	30,56	27,73	0	0
137,5	25	21,09	23,82	28,68	45,30	25,07	25,07	42,16	31,98	31,39	1	0	0	16,27	29,61	30,84	0	36,51	6,40
162,5	25	0	0	26,24	0	0	8,94	32,59	44,06	20,24	35,86	0	0	0	25,23	1,41	0	0	0
187,5	25	0	0	12,16	30,27	1	26,92	17,69	54,86	5,38	1,41	25,94	0	0	0	13,45	23,34	0	0
212,5	6	0	0	2,23	23,19	0	6,95	0	34,06	13,89	23,85	11	0	13	32,65	0	10	27,58	0
237,5	0	0	5,65	23,17	0	19	41,63	17,69	1,41	26,40	2,23	38,08	0	0	42,78	29,08	5	34,06	7,07
262,5	0	0	2,23	41,95	0	0	0	35,02	25,30	39,45	18,38	21	0	19,31	30,88	9,63	34,06	0	0

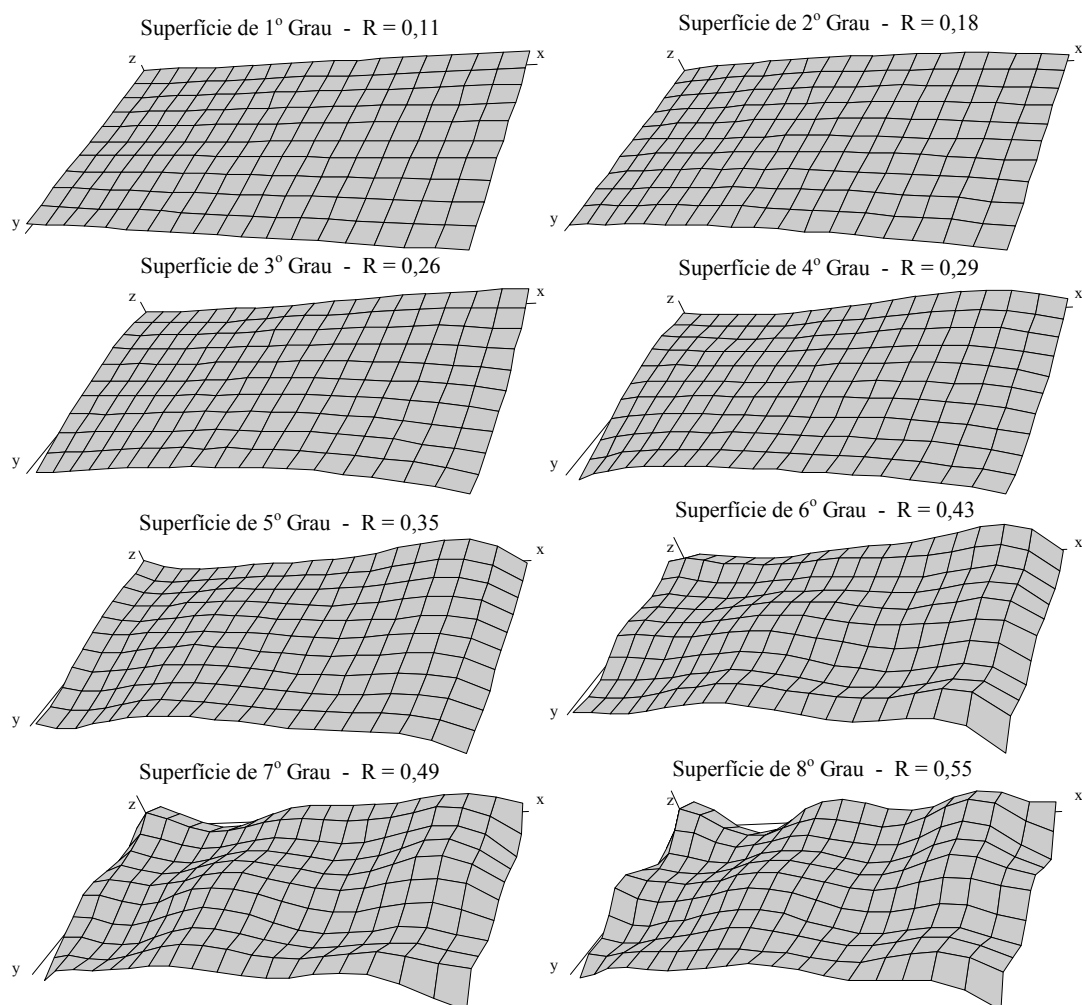
FIGURA 5.3 - Imagem de lineamentos, os segmentos divididos em unidades de 25 por 25 pontos e os dados observados sobre o somatório dos comprimentos (em pontos) com x e y centrados na unidade de malha.

A matriz de dados observados da FIGURA 5.3 compõe a superfície que a equação polinomial deve estimar. Com o cálculo da matriz e vetor normais para esse conjunto de dados, obtêm-se os seguintes coeficientes para as equações polinomiais de até oitavo grau:

$b_0=18,86$	$b_1=9,91E-5$	$b_2=0,02$	$b_3=1,95E-306$	$b_4=8,45E-307$	$b_5=3,39E-302$	$b_6=1,09E-311$	$b_7=1,72$	$b_8=1$
$b_9=8,45E-307$	$b_{10}=4,10E-306$	$b_{11}=8,45E-307$	$b_{12}=4,10E-306$	$b_{13}=2,37E-307$	$b_{14}=1,95E-306$	$b_{15}=1,95E-306$	$b_{16}=2,05E-306$	$b_{17}=2,37E-307$
$b_{18}=1,95E-306$	$b_{19}=8,45E-307$	$b_{20}=4,10E-306$	$b_{21}=2,05E-306$	$b_{22}=1,90E-307$	$b_{23}=1,95E-306$	$b_{24}=8,45E-307$	$b_{25}=4,10E-306$	$b_{26}=8,45E-307$
$b_{27}=1,95E-306$	$b_{28}=8,45E-307$	$b_{29}=2,05E-306$	$b_{30}=2,05E-306$	$b_{31}=2,68E-307$	$b_{32}=8,45E-307$	$b_{33}=2,05E-306$	$b_{34}=2,68E-307$	$b_{35}=8,45E-307$
$b_{36}=4,24E-314$	$b_{37}=1,95E-306$	$b_{38}=1,95E-306$	$b_{39}=1,95E-306$	$b_{40}=1,95E-306$	$b_{41}=1,95E-306$	$b_{42}=1,95E-306$	$b_{43}=2,63E-307$	$b_{44}=3,55E-307$

Os coeficientes iguais desta equação se diferenciam a partir da quarta casa decimal. É importante notar a ordem de grandeza dos coeficientes neste exemplo.

Polinômios com graus maiores que o oitavo somente podem ser utilizados com formatos especiais de números reais ou com normalização sistemática das coordenadas x e y e dos dados a fim de diminuir sua ordem de grandeza. As superfícies geradas pelo polinômio com esses coeficientes estão ilustradas na FIGURA 5.4.



y \ x	125	37,5	62,5	87,5	112,5	137,5	162,5	187,5	212,5	237,5	262,5	287,5	312,5	337,5	362,5	387,5	412,5	437,5	462,5
125	4,86	35,11	23,37	4,98	-4,04	-0,87	9,96	21,66	28,73	28,98	23,90	17,56	14,46	17,11	24,10	29,90	27,70	16,65	16,78
37,5	16,12	41,98	33,20	17,57	8,26	8,04	13,70	20,11	23,22	21,70	17,25	13,49	14,08	20,46	30,14	36,61	32,10	14,88	2,50
62,5	11,16	31,47	26,61	16,43	10,68	11,35	15,83	20,07	21,02	17,97	12,76	8,85	9,51	15,73	25,01	30,03	25,02	6,26	-9,03
87,5	7,75	19,41	16,40	10,90	9,09	11,88	16,90	20,77	21,06	17,45	11,87	7,66	7,95	13,78	22,74	28,83	25,02	9,65	-1,51
112,5	17,17	18,33	14,97	12,16	12,92	17,13	22,50	26,09	25,90	21,78	15,64	10,67	9,93	14,63	22,84	23,28	27,68	16,63	10,76
137,5	28,23	20,53	16,40	15,16	17,31	22,04	27,19	30,25	29,45	24,69	17,73	11,53	9,09	11,80	18,23	23,83	23,13	14,51	11,01
162,5	26,94	14,93	11,67	12,23	15,53	20,53	25,52	28,30	27,37	22,55	15,32	8,34	4,46	5,24	9,72	14,07	13,11	4,97	0,30
187,5	14,01	3,14	2,98	5,96	10,28	15,42	20,32	23,38	23,24	19,54	13,36	6,96	2,98	3,10	6,78	10,76	10,15	2,30	-5,11
212,5	4,02	-2,26	1,03	5,38	9,34	13,44	17,62	20,86	21,91	20,03	15,93	11,35	8,55	9,35	13,66	18,73	20,02	13,71	4,03
237,5	4,71	3,58	8,68	11,71	12,73	13,71	15,71	18,24	20	19,83	17,59	14,45	12,45	13,47	17,97	23,93	26,96	22,41	10,88
262,5	-3,60	3,14	11,28	13,93	13,27	12,74	14,46	18,23	22,34	24,80	24,51	21,85	18,52	16,63	17,33	19,78	20,07	12,94	-4,37

FIGURA 5.4 - Superfícies geradas pela função polinomial calculada e os dados estimados da superfície de oitavo grau com $R=0,55$.

Comparando os dados estimados da FIGURA 5.4 com os dados observados, nota-se que a função polinomial indica a tendência da superfície topológica, ou seja, mesmo não apresentando exatidão numérica a tendência está representada satisfatoriamente.

É importante notar que, neste caso, à medida que se aumenta o grau do

polinômio maior é a aderência da curva. Obviamente, uma superfície de primeiro grau não pode se ajustar com boa aderência ($R=0,11$) aos dados observados (FIG. 5.3). Há casos, entretanto, em que representações de superfícies mais simples se aderem melhor aos dados observados.

5.4 - Síntese e conclusão

Na análise topológica, uma tendência é definida como uma função de coordenadas geográficas construída a partir de dados observados. É também uma função linear que deve minimizar algum critério de erro sobre os dados observados. O tipo da função a ser usada em uma determinada amostra depende do tipo de distribuição dos dados.

Além da escolha do tipo de regressão, para se determinar uma função de tendência, algum critério para maximizar a representação dos dados observados deve ser escolhido. Neste trabalho, utilizam-se funções polinomiais com o critério dos mínimos quadrados dos desvios entre o dado observado e o dado estimado.

As funções de tendência podem ser classificadas de acordo com seu número de variáveis e com o seu grau. Não há limite de número de variáveis e de graus na regressão polinomial. O problema é a ordem de grandeza dos coeficientes estimados das superfícies mais complexas.

Com a multiplicação do inverso da matriz normal com o vetor normal dos dados observados, obtêm-se os coeficientes de uma equação polinomial. Através de cálculo diferencial, obtêm-se o conjunto de relações entre os dados observados e suas coordenadas para o cálculo dos elementos dessa matriz e desse vetor. Dependendo do número de amostras e da sua grandeza essa matriz pode ter números com ordem de grandeza elevada.

Para se medir o grau de precisão da função de tendência estimada, pode-se utilizar o coeficiente de múltiplas correlações, que pode ser entendido como a aderência entre a superfície estimada e os dados observados. Quanto mais esse coeficiente for próximo de um, melhor será a aderência da superfície. Uma aderência baixa, menor que 30% por exemplo, significa que as variações da superfície não demonstram as variações das amostras observadas. Mesmo assim, essas superfícies podem conter informações relevantes do ponto de vista geológico.

Na análise topológica das estruturas rúpteis, o grau de melhor aderência dependerá da distribuição das amostras e do seu teor. Nem sempre o grau maior obterá o melhor resultado. Estes parâmetros devem ser analisados através do coeficiente de múltiplas correlações.

6 - REPRESENTAÇÃO TOPOLÓGICA: UM ESTUDO COMPARATIVO

6.1 - Introdução

No relatório final do projeto intitulado “Desenvolvimento de Modelo Estatístico de Interpretação de Dados Geológicos Morfo-Estruturais Aplicados à Hidrologia de Rochas Fraturadas”⁷ realizado na Fundação Centro Tecnológico de Minas Gerais - CETEC, com recursos do Programa de Apoio ao Desenvolvimento Científico e Tecnológico - PADCT, foi estabelecida uma metodologia de prospecção de água subterrânea em rochas fraturadas utilizando análise geo-estrutural e técnicas geo-estatísticas com dados regionais.

Neste estudo de caso, são apresentados os resultados obtidos sobre a mesma área estudada no projeto com a aplicação da detecção automática. O objetivo é aplicar a metodologia aqui apresentada em dados reais a fim de comparar seus resultados com dados obtidos via processo clássico de representação topológica.

Procura-se, com este estudo comparativo, evidenciar as questões práticas relacionadas com a análise topológica abordada neste trabalho, apresentando as interpretações pertinentes ao estudo geológico dos dados analisados.

6.2 - O estudo realizado na área de serra Azul-Mateus Leme

Os dados apresentados neste tópico, bem como as interpretações dadas sobre os resultados foram extraídos do projeto realizado em SILVA et al. (1989) e MARTINS (1997a).

A área de estudo está compreendida entre os paralelos 19° 55' e 20° 10' de latitude sul e os meridianos 40° 15' e 40° 30' de longitude oeste. Situa-se na porção centro-sul do Estado de Minas Gerais, distante aproximadamente 50km de Belo Horizonte abrangendo parte dos municípios de Mateus Leme, Igarapé e Itaúna com uma superfície de aproximadamente 500km².

No limite sul da região está a serra Azul. No limite norte está o divisor da bacia do ribeirão Mateus Leme composto pelas serras de Mato Dentro, Sesmaria e Santo

⁷ SILVA et al., 1989. 97p.

Antônio. A oeste, o limite da área é a serra do Fundão. O limite ocidental da área de estudo é formado pelos divisores dos afluentes do ribeirão do Diogo.

A FIGURA 6.1 apresenta a distribuição espacial do conjunto de estruturas rúpteis na área em questão. Esta área foi dividida em unidades de malha em número de 18 x 14, nos quais as medidas foram tomadas manualmente. Embora o projeto tenha como resultado vários mapas de tendência e sua interpretação, somente a topologia relacionada aos comprimentos foi comparada.

O estudo das diáclases, fraturas e falhas, de relevância para a comparação de resultados, foi realizado com a aplicação da técnica de análise de tendência aplicada à avaliação de sua distribuição espacial, tomando como parâmetros os comprimentos das estruturas.



FIGURA 6.1 - Estruturas rúpteis da região de serra Azul - Mateus Leme.

FONTE: SILVA et al., 1989. p.59.

Nos procedimentos matemáticos utilizados, inclui-se o programa de computador TRENDSUP (LANDIM et al., 1978) modificado por SILVA (1984), usado nos processamentos estatísticos dos dados morfo-estruturais e na aplicação de métodos polinomiais não ortogonais para o cálculo das superfícies de tendência.

Nos diversos graus gerados pela função matemática, escolheu-se, no projeto, o grau três (FIG. 6.2). Isso porque a função trata os dados, no caso em questão o comprimento das fraturas, como se fosse uma cota. É assim gerada uma superfície curva

análoga àquela que descreve uma topografia. Trata-se de uma curva topológica já que a mesma não tem realidade no terreno. A superfície gerada é, então, a tendência topológica de localização e distribuição da propriedade ou atributo em questão.

Dado a complexidade de distribuição areal das fraturas, conforme visto na FIGURA 6.1, fica patente que superfícies de maiores graus descreverão melhor a tendência topológica.

Escolheu-se trabalhar com a superfície de grau três em virtude de poder-se obter dessa o que seria a mais geral manifestação da tendência do atributo estudado. Assim, a FIGURA 6.2 apresenta o resultado de modo a indicar a tendência para toda a área, com as seguintes características:

- para o conjunto da área as zonas de máxima tendência são contíguas e encontram-se no centro, ligeiramente deslocadas para o 3º quadrante;
- a tendência é predominante de oeste para leste com uma subtendência para o norte.

Os somatórios dos comprimentos por unidade de malha estimados pelo polinômio de terceiro grau são os seguintes (SILVA et al., 1989):

1,098	1,147	1,198	1,231	1,262	1,284	1,298	1,305	1,305	1,297	1,280	1,246	1,224	1,181	1,131	1,083	1,002	0,920
1,146	1,192	1,234	1,265	1,297	1,318	1,330	1,337	1,336	1,329	1,313	1,280	1,230	1,219	1,173	1,115	1,052	0,975
1,195	1,234	1,272	1,303	1,329	1,346	1,358	1,364	1,363	1,356	1,340	1,310	1,291	1,252	1,209	1,154	1,095	1,023
1,237	1,273	1,307	1,335	1,358	1,374	1,384	1,388	1,387	1,379	1,365	1,336	1,318	1,272	1,241	1,189	1,134	1,066
1,276	1,308	1,338	1,363	1,382	1,397	1,404	1,408	1,406	1,398	1,384	1,356	1,336	1,305	1,267	1,219	1,167	1,103
1,313	1,340	1,365	1,386	1,403	1,414	1,420	1,422	1,419	1,411	1,397	1,370	1,354	1,322	1,287	1,242	1,193	1,135
1,341	1,364	1,401	1,414	1,423	1,427	1,423	1,415	1,401	1,379	1,360	1,330	1,296	1,296	1,254	1,209	1,154	1,095
1,362	1,379	1,395	1,408	1,419	1,423	1,425	1,418	1,409	1,395	1,370	1,356	1,327	1,296	1,256	1,215	1,164	1,104
1,372	1,384	1,395	1,404	1,409	1,412	1,409	1,392	1,378	1,354	1,340	1,313	1,288	1,283	1,247	1,208	1,161	1,102
1,370	1,377	1,383	1,389	1,388	1,386	1,380	1,372	1,361	1,346	1,323	1,309	1,283	1,256	1,222	1,186	1,142	1,092
1,356	1,358	1,359	1,358	1,356	1,352	1,347	1,339	1,330	1,318	1,303	1,279	1,266	1,241	1,215	1,183	1,150	1,110
1,329	1,325	1,321	1,315	1,309	1,302	1,294	1,284	1,273	1,260	1,244	1,220	1,207	1,183	1,159	1,129	1,098	1,061
1,288	1,273	1,263	1,253	1,242	1,231	1,220	1,207	1,194	1,179	1,162	1,138	1,126	1,103	1,079	1,052	1,023	0,990
1,223	1,208	1,192	1,176	1,161	1,146	1,133	1,117	1,102	1,086	1,068	1,043	1,031	1,008	0,986	0,960	0,934	0,903

O sistema de fraturas está diretamente relacionado com a rede de drenagem. As regiões abaixo das áreas de maior densidade de fraturas da FIGURA 6.2 são as que possuem maior probabilidade de se encontrar zonas de recarga de aquíferos ou maior abundância de águas subterrâneas.

O tipo de interpretação utilizada não é a convencional própria à geologia, mas agrega a essa algumas informações a mais, que permitem aumentar a segurança de decisões na área de hidrogeologia, particularmente à escolha de áreas mais propícias a se atingir um reservatório de água subterrânea.

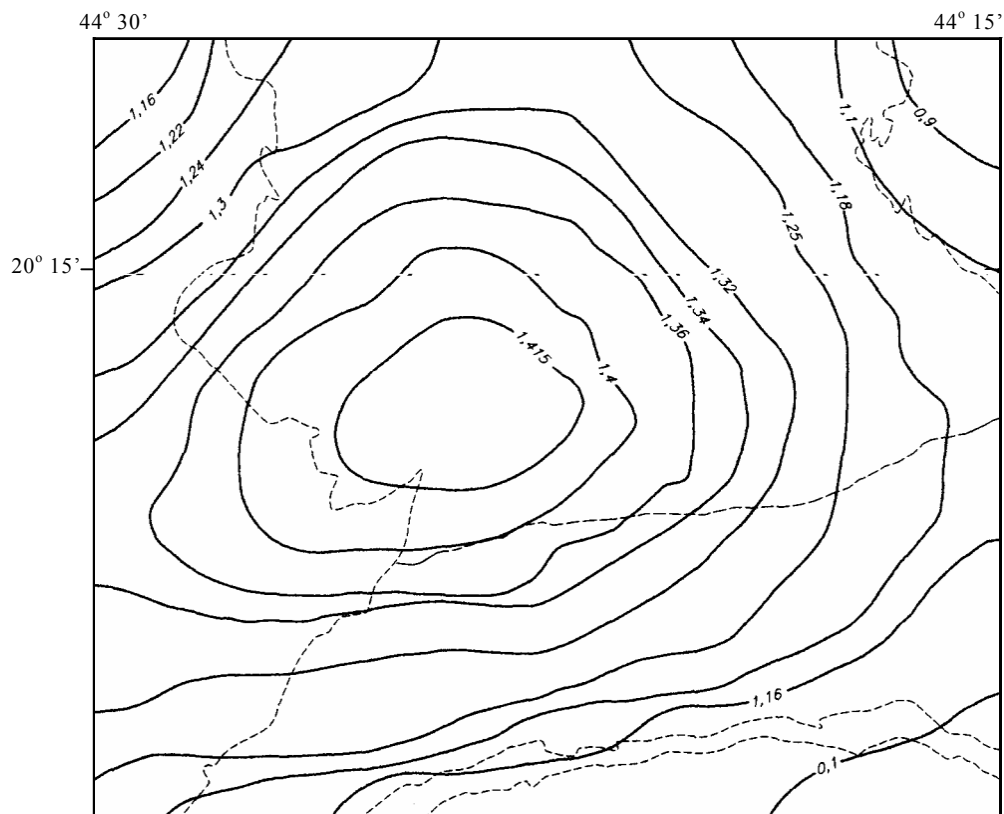


FIGURA 6.2 - Mapa de tendência dos valores calculados para o somatório dos comprimentos das fraturas por unidade de malha. A linha sólida indica as isolinhas e a pontilhada indica contatos geológicos.

FONTE: SILVA et al., 1989. p.62.

6.3 - Análise topológica automática da serra Azul-Mateus Leme

Os resultados apresentados a seguir referem-se aos dados extraídos do mapa de estruturas rúpteis (FIG. 6.1) da região de serra Azul, publicado em SILVA et al. (1989).

A malha usada no processo automático é a mesma do processo clássico com 18 por 14 unidades. A topologia usada é a de densidade, ou seja, do somatório dos comprimentos das fraturas.

As superfícies resultantes e suas plantas baixas são ilustrativas. Sendo imagens com muito detalhe gráfico, as cotas das isolinhas não foram colocadas. Os valores da superfície de terceiro grau, que foi escolhida como a melhor representação da tendência pelos executores do projeto de análise da serra Azul, calculados sobre os dados observados automaticamente são dados a seguir:

Q653	Q715	Q780	Q844	Q905	Q959	1,003	1,033	1,047	1,041	1,013	Q957	Q872	Q755	Q601	Q408	Q172	Q109
Q734	Q792	Q854	Q917	Q977	1,033	1,075	1,107	1,124	1,121	1,096	1,045	Q965	Q853	Q706	Q521	Q293	Q020
Q822	Q877	Q936	Q996	1,054	1,107	1,151	1,184	1,202	1,201	1,179	1,132	1,056	Q950	Q809	Q630	Q410	1,145
Q913	Q863	1,018	1,075	1,131	1,182	1,225	1,258	1,276	1,277	1,257	1,212	1,141	1,039	Q903	Q730	Q516	Q255
1,001	1,045	1,095	1,149	1,201	1,250	1,292	1,323	1,341	1,343	1,324	1,282	1,213	1,115	Q868	Q815	Q628	Q358
1,080	1,118	1,163	1,211	1,260	1,306	1,345	1,375	1,392	1,393	1,375	1,334	1,267	1,172	1,044	Q880	Q678	Q434
1,146	1,177	1,215	1,258	1,302	1,343	1,379	1,407	1,422	1,422	1,404	1,364	1,298	1,205	1,060	Q920	Q722	Q463
1,191	1,215	1,246	1,282	1,321	1,357	1,390	1,414	1,427	1,425	1,406	1,365	1,300	1,208	1,085	Q928	Q734	Q469
1,212	1,227	1,250	1,280	1,312	1,343	1,370	1,390	1,400	1,396	1,374	1,333	1,263	1,177	1,055	Q900	Q709	Q477
1,202	1,207	1,222	1,244	1,266	1,294	1,315	1,331	1,336	1,329	1,305	1,262	1,196	1,104	Q863	Q830	Q640	Q412
1,156	1,151	1,157	1,170	1,187	1,205	1,220	1,230	1,230	1,219	1,192	1,146	1,079	Q886	Q864	Q711	Q523	Q297
1,069	1,053	1,048	1,052	1,060	1,070	1,078	1,082	1,077	1,060	1,029	Q960	Q910	Q816	Q628	Q540	Q352	Q127
Q934	Q907	Q891	Q884	Q883	Q884	Q885	Q881	Q870	Q848	Q812	Q759	Q635	Q586	Q464	Q310	Q122	-Q102
Q747	Q707	Q680	Q662	Q651	Q642	Q634	Q622	Q604	Q576	Q534	Q476	Q399	Q298	Q171	Q015	-Q176	-Q396

Os dados desta tabela foram normalizados para facilitar a comparação com os dados estimados sobre a topologia medida manualmente do tópico anterior. Obviamente, não há diferenças significativas nas duas malhas porque, mesmo com a detecção automática, o processo de regressão dos dados é o mesmo. O resultado pode ser melhor comparado pela ilustração das isolinhas da superfície (FIG. 6.3, 6.4 e 6.5). Os resultados idênticos aos da superfície de terceiro grau indicam o sucesso da metodologia apresentada.

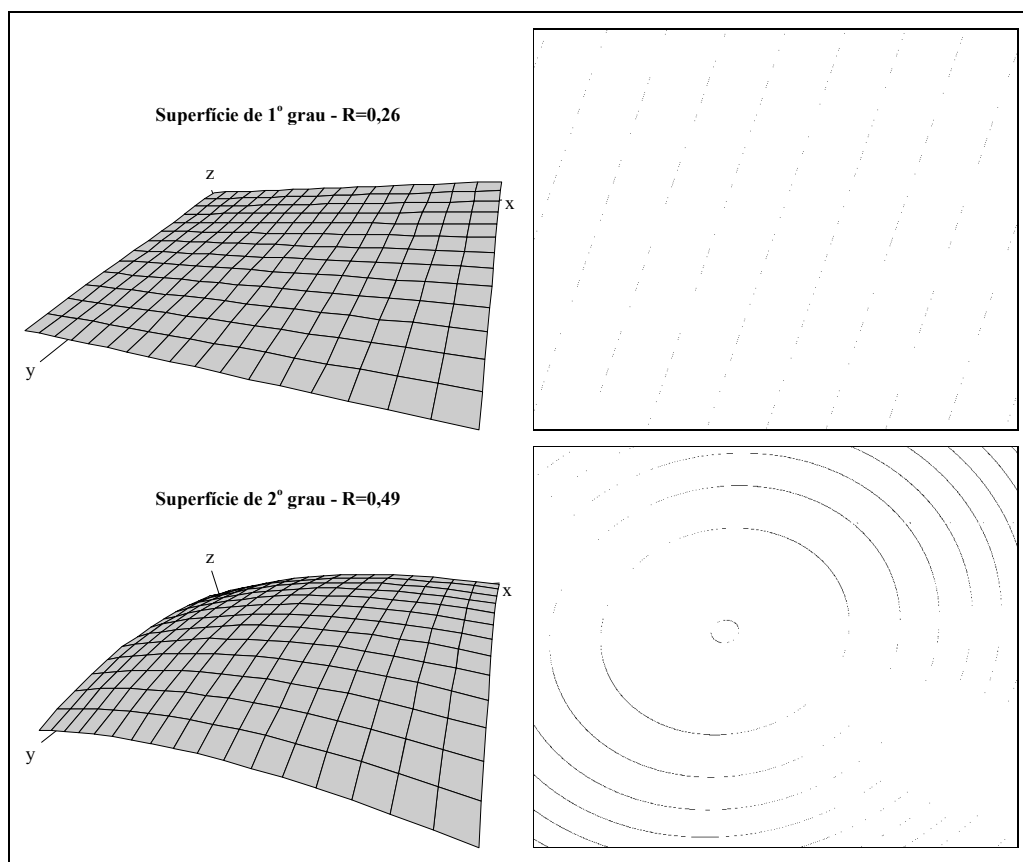


FIGURA 6.3 - Superfícies de tendência dos dados observados automaticamente na área de serra Azul e as respectivas isolinhas do primeiro e segundo graus.

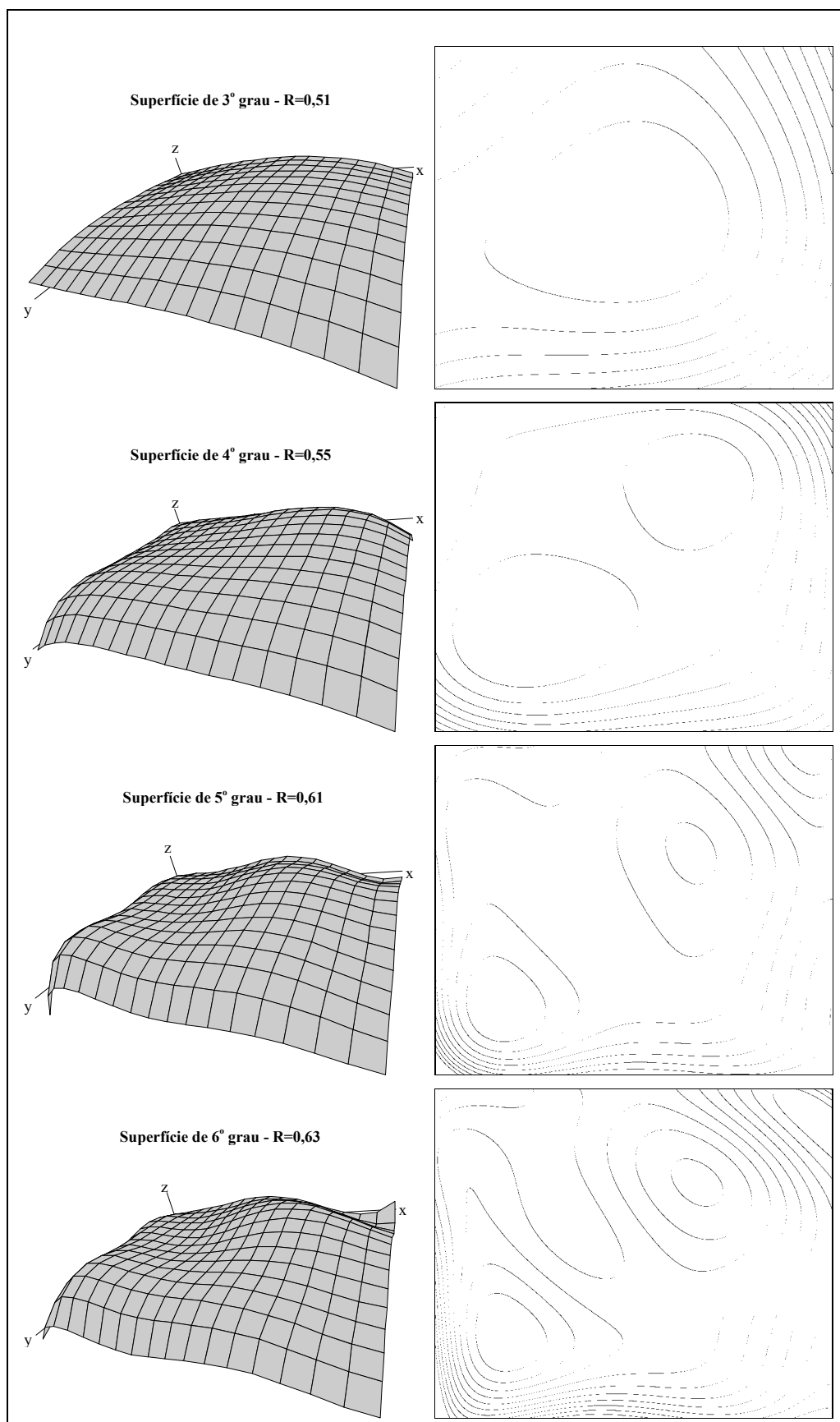


FIGURA 6.4 - Superfícies de tendência dos dados observados automaticamente na área de serra Azul e as respectivas isolinhas do terceiro ao sexto graus.

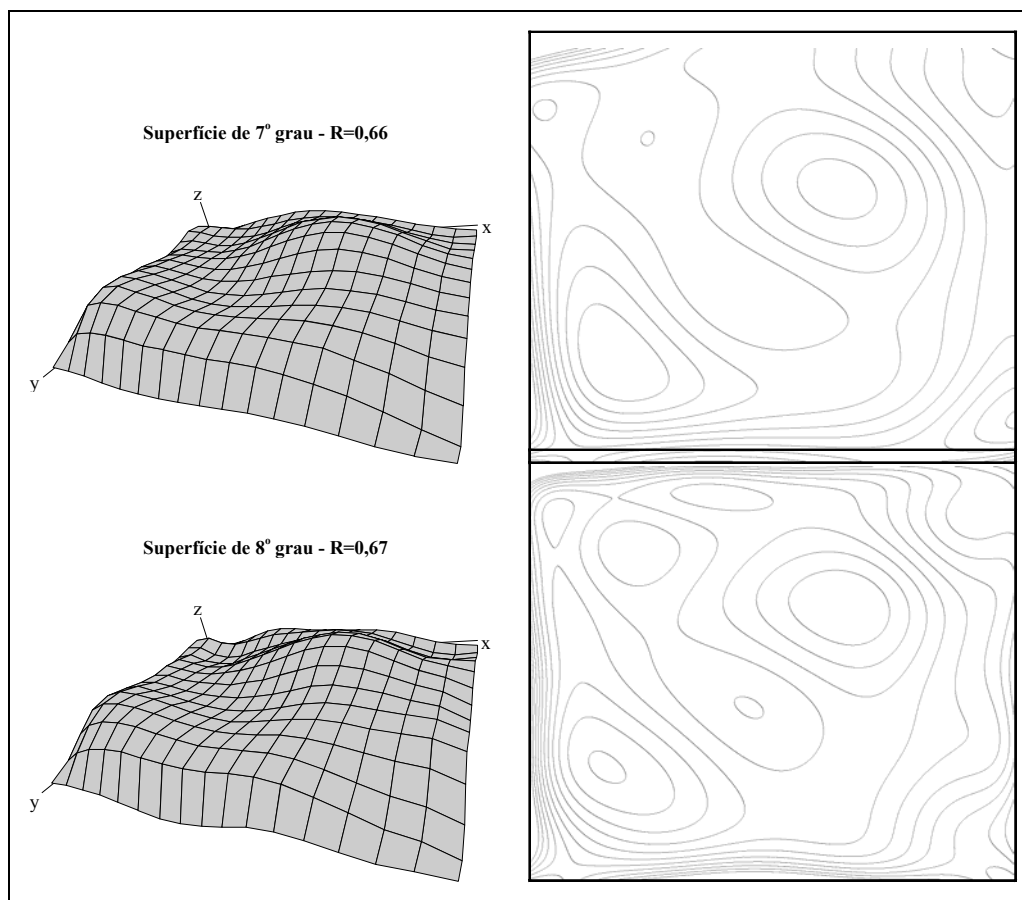


FIGURA 6.5 - Superfícies de tendência dos dados observados automaticamente na área de serra Azul e as respectivas isolinhas do sétimo e oitavo graus.

Os resultados obtidos da FIGURA 6.5 demonstram a mesma tendência dos resultados do processo clássico, portanto, estão compatíveis com a interpretação dada em SILVA et al. (1989).

É importante evidenciar, pelas plantas baixas dos vários graus, que realmente a densidade tende de oeste para leste com uma ligeira subtendência para o norte, como foi interpretado em SILVA et al. (1989). Essa característica pode ser melhor observada na superfície de terceiro grau. A superfície de quarto grau evidencia essa tendência para o nordeste com a identificação de dois grupos mais densos em contraposição com a superfície de terceiro grau.

Resultados com graus maiores (FIG. 6.5), evidentemente, têm maior aderência aos dados observados. Dessa forma, observa-se que à medida que se aumenta o grau da superfície, o nível de detalhamento local da topologia é aumentado. No exemplo dado, observa-se que, mesmo com a maior aderência dos graus maiores, o eixo de tendência permanece nítido.

6.4 - Conclusão geral

Os processos envolvidos na automação da aquisição e medição de atitudes e da produção geo-estatística são sintetizados, na FIGURA 6.6, na forma de diagrama.

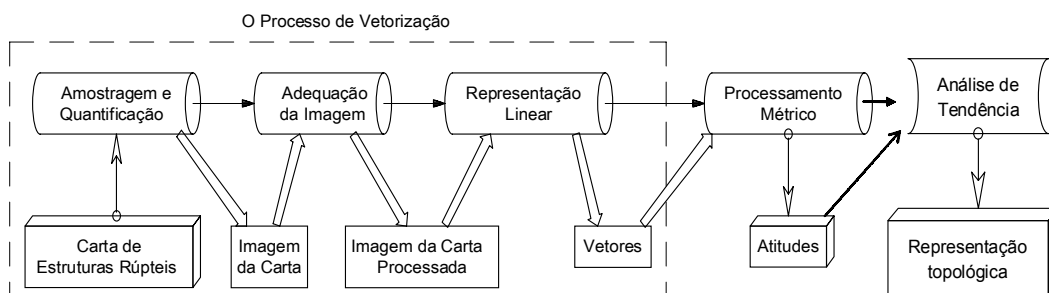


FIGURA 6.6 - Diagrama de blocos da detecção automática e análise topológica de estruturas rúpteis.

Na amostragem e quantificação, a carta com os objetos formais é representada por uma imagem digital. A escolha de parâmetros corretos para essa fase é essencial para o processo de vetorização.

Baseado na frequência de Nyquist, o intervalo espacial de amostragem deve ser pelo menos duas vezes a menor largura de linha ou a menor distância entre duas linhas. Apesar das restrições pelo tamanho da imagem, sugere-se a quantificação na escala de 256 níveis de cinza.

É necessário observar alguns aspectos na confecção da carta. O fator principal é o contraste entre o fundo e o objeto. Um contraste maior entre suas cores facilita as etapas de adequação da imagem. Papel vegetal e caneta preta, que geralmente são usados na confecção, resultam em contrastes satisfatórios após a aquisição.

A adequação da imagem objetiva a separação de fundo e objeto e a eliminação de erros do processo de aquisição e segmentação.

Com as etapas de aquisição e adequação, os lineamentos podem apresentar falhas como pontos de fundo internos aos objetos e linhas descontínuas. O operador de fechamento morfológico é um processo eficaz na redução de falhas.

Para a detecção automática de estruturas rúpteis, deve-se observar os seguintes aspectos: as imagens digitalizadas das cartas podem ter grande dimensão, grande número de lineamentos, alta complexidade de cruzamentos e lineamentos largos. Por essas características, neste trabalho utiliza-se o método de vetorização guiada por esqueleto. Esse método consiste basicamente em: afinar a imagem, determinar os segmentos e suas trajetórias, segmentar lineamentos curvilíneos e juntar os menores segmentos.

O processamento métrico divide-se em isolamento, agrupamento e medição dos vetores detectados. O isolamento de um vetor é feito em relação a uma sub-região de interesse da imagem previamente informada, na qual se deseja analisar a tendência de

topologias. O agrupamento resume-se na divisão dos vetores de acordo com uma malha cujos elementos são usados no cálculo da topologia. As dimensões dessa malha definem as dimensões da matriz de valores observados. Os valores levantados são a entrada para o cálculo da topologia.

Na análise topológica, uma tendência é definida como uma função de coordenadas geográficas construída a partir de dados observados. É também uma função linear que deve minimizar algum critério de erro sobre os dados observados. O tipo da função a ser usada em uma determinada amostra depende do tipo da sua distribuição. É a partir dessa função que se gera cartas de tendências topológicas.

Tendo em vista que essa metodologia de análise topológica está inserida em um contexto de alto controle em cada fase, conclui-se, em relação aos objetivos do trabalho, que:

- as questões levantadas nas fases de amostragem, quantificação e adequação da imagem são pertinentes no sentido de se diminuir os possíveis erros causados pela aquisição via leitor óptico;
- as etapas da representação linear constituem um método eficaz de vetorização dos lineamentos para a análise topológica. Pelos resultados obtidos na análise de erro, observa-se que a porcentagem de acertos tende para cem por cento em condições normais de trabalho;
- as estruturas representadas por vetores favorecem a determinação das atitudes e vários níveis de isolamento, principalmente por sub-regiões e unidades de malha;
- a modelagem matemática mostrou-se favorecida pela detecção automática, conforme mostrado na FIGURA 6.3, 6.4 e 6.5. A produção de isolinhas de tendência é obtida com precisão pela interseção de planos de observação com a superfície topológica estimada;
- os métodos apresentados viabilizam a implantação de um sistema integrado para estudos geo-estruturais.

Os resultados obtidos contribuem efetivamente para o Sistema de Informação Geo-referenciada Ambiental - SIGAM ® (MARTINS et al., 1994a). Essa solução vem resolver estudos sistemáticos para pesquisa de águas subterrâneas, identificação de metalotectes para prospecção mineral e estudos geotectônicos, tendo sido reconhecida pela comunidade científica como uma solução eficaz (MARTINS & VIEIRA, 1997; MARTINS et al., 1997).

6.4.1 - Encaminhamentos prospectivos

O tema em questão é extenso e pode ser objeto de estudo de várias linhas de pesquisa. O processo automatizado amplia a capacidade de cálculo de valores observados pela diminuição das unidades de malha. Somente essa característica implica na necessidade de pesquisas sobre métodos de representação de superfícies que melhor

se aderem à nuvem de dados que, por sua vez, demanda o estudo de novas relações entre os resultados estimados.

Expansões, no que diz respeito aos graus de liberdade do processo, também são cabíveis. O aumento das variáveis independentes e dos graus dos polinômios pode ser necessário em estudos mais complexos. Essa expansão requer estudos sobre formas de representação gráfica dos dados estimados como, por exemplo, isolinhas tridimensionais que determinam espaços isotrópicos, com especial interesse para a análise de bacia sedimentar e prospecção de petróleo. Outros complementos que devem ser feitos são as análises por rosáceas, espectral e de resíduos, tanto no conjunto da área como em frações.

7 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BADGLEY, P.C. *Structural and Tectonic Principles*. New York: Harper International, 1965. 531p.
- BALLARD, D.H., BROWN, C.M. *Computer Vision*. Englewood Cliffs: Prentice-Hall, 1982. 523p.
- BLANCHET, P.H. Photogeophysics in Oil and Gas Exploration. *Annual Western Meeting*. Canada Institute of Mining and Metalurgy, 1956.
- BLYTH, T.S., ROBERTSON, E.F. *Matrices and Vector Spaces*. Cambridge: Cambridge University, 1984. 99p.
- BOFFEY, T.B. *Graph Theory in Operations Research*. London: The Macmillan Press, 1982. 301p.
- CAIRE, A. Les Règles de la Fracturation Continentale et le Rôle des Géofractures dans l'Évolution de l'Écorce Terrestre. *Revue de Géographie Physique et de Géologie Dynamique*, v. XVII, n.2, f. 4, p.319-354, 1975.
- CASTLEMAN, K.E. *Digital Image Processing*. Englewood Cliffs: Prentice-Hall, 1979. 429p.
- COOK, R.D., WEISBERG, S. *An Introduction to Regression Analysis*. New York: John Wiley & Sons, 1994. 253p.
- DAVIS, J.C. *Statistics and Data Analysis in Geology*. New York: John Wiley & Sons, 1973. 550p.
- FOLEY, J.D., VAN DAM, A. *Fundamentals of Interactive Computer Graphics*. Reading: Addison-Wesley Publishing, 1983. 664p.
- FRANÇA, J.L. *Manual para Normalização de Publicações Técnico-Científicas*. 3.ed. Belo Horizonte: Editora UFMG, 1996. 191p.
- FRÖBERG, C.L. *Numerical Mathematics*. 2.ed. Menlo Park: Benjamin/Cummings, 1985. 436p.
- GILOI, W.K. *Interactive Computer Graphics*. Englewood Cliffs: Prentice-Hall, 1978. 354p.

- GONZALEZ, R.F., WOODS, R.E. *Digital Image Processing*. Reading: Addison-Wesley Publishing Company, 1992. 716p.
- GREEN, W.B. *Digital Image Processing. A systems Approach*. New York: Van Nostrand Reinhold Company, 1983. 192p.
- HAIL, E.L. *Computer Image Processing and Recognition*. New York: Academic Press, 1979. 584p.
- HAMAN, P.J. *Geomechanics Applied to Fracture Analysis on Aerial Photographs*. North Campus Library, 1964. 87p.
- HARBAUGH, J.W., MERRIAN, D.F. *Computer Applications in Stratigraphic Analysis*. New York: John Wiley & Sons, 1968. 282p.
- HARBAUGH, J.W., BONHAM-CARTER, G. *Computer Simulation in Geology*. New York: John Wiley & Sons, 1970. 575p.
- HEARN, D., BAKER, M.P. *Computer Graphics*. Englewood Cliffs: Prentice-Hall, 1986. 352p.
- HILL, F.S. *Computer Graphics*. New York: Macmillan Publishing Company, 1990. 754p.
- HOLT, C. M., STEWART, A., CLINT, M., PERROT, R. An Improved Parallel Thinning Algorithm. *Communications of ACM*, v.30, n.2, p.156-160, fev. 1987.
- JAIN, A.K. *Fundamentals of Digital Image Processing*. Englewood Cliffs: Prentice-Hall, 1989. 569p.
- JI, L., PIPER, J. Fast Homotopy - Preserving Skeletons Using Mathematical Morphology. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*. v.14, n.6, p.653-664, jun. 1992.
- LANDIM, P.B.M., BOGAERT, M.O., SILVA, A.P., SZULMAN, S. *Análise da Superfície de Tendência*. São Paulo: Secretaria de Obras e Meio Ambiente do Estado de São Paulo/Departamento de Águas e Energia Elétrica, 1978. 53p.
- LEE, C.L., WANG, P.S.P. A New Thinning Algorithm. *IEEE*, p.546-548, 1994.
- LOCZY, L., LADEIRA, E.A. *Geologia Estrutural e Introdução à Geotectônica*. Rio de Janeiro: Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico - CNPQ, 1980. 528p.
- MANDEL, J. *Evaluation and Control of Measurements*. New York: Marcel Dekker, 1991. 249p.
- MARTINS JR., P.P., GASTELOIS, C.R.J., ROSA, S.A.G. *Conceitos e Metodologia*

para Mapeamento da Capacidade Assimilativa e da Qualidade de Água em Bacia Hidrográfica, Anais do VII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 1993.

MARTINS JR., P.P., Rosa, S.A.G. *Das Variáveis Significativas para um Geoprocessamento Geográfico das Bacias Hidrográficas. Conceitos de Produtos Funcionais*, X Congresso Brasileiro de Hidrologia, 1993.

MARTINS JR., P.P., ROSA, S.A.G., CHAVES, M.B. *Arquitetura Sistêmica de Produção da Informação Científica para o Enquadramento de Cursos d'Água em um contexto Gerencial de Bacia Hidrográfica*. Belo Horizonte: FAPEMIG/CETEC projeto NT-MDBV 01 / 94, 1994a. (Relatório).

MARTINS JR., P.P., ROSA, S.A.G., FERREIRA, E.N. *Zoneamentos em Áreas Homogêneas da Alta Bacia do Rio das Velhas com Base nas Características dos Geo-sistemas e da Morfometria das Sub-bacias*. Belo Horizonte: FAPEMIG/CETEC projeto NT-MDBV 01 / 94, 1994b. (Relatório).

MARTINS JR., P.P. *Produção da Informação Científica Ambiental para o Gerenciamento de Bacias Hidrográficas e Municipalidades*. Belo Horizonte: Fundação Centro Tecnológico de Minas Gerais - CETEC, 1997a. 64p. (Relatório).

MARTINS JR., P.P. *Perspectivas Epistemológicas, Cosmológicas e Histórica da Evolução da Terra e da Vida*. Ouro Preto: Escola de Minas/Curso de Graduação, 1997b. (Apostila de Geologia Histórica).

MARTINS JR., P.P., VIEIRA, M.B. *Quantificação de Meso-Fraturas para Estudos Morfo-Estruturais. VII Simpósio Brasileiro de Quantificação em Geociências*, Rio Claro, p.78-81, ago. 1997.

MARTINS JR., P.P., VIEIRA, M.B., ARAÚJO, A.A. *Sistema Computacional Automático para Análise de Estruturas Rúpteis, Análise Geomatemática e Representações Cartográficas. VII Simpósio Brasileiro de Quantificação em Geociências*, Rio Claro, p.82-84, ago. 1997.

MILLMAN, R.S., PARKER, G.D. *Geometry: A Metric Approach with Models*. Heidelberg: Springer-Verlag, 1981. 353p.

MOLLARD, J.D. *Photogeophysics - Its Application in Petroleum Exploration Over Glaciated Plains of Western Canada, 2nd. Williston Basin Conf. Sask. Soc. Petrol. Geol.*, 1959.

MONTGOMERY, D.C., PECK, E.A. *Introduction to Linear Regression Analysis*. New York: John Wiley & Sons, 1992. 527p.

MORTENSON, M.E. *Geometric Modeling*. New York: John Wiley & Sons, 1985. 763p.

OSSERMAN, R.A. *Survey of Minimal Surfaces*. New York: Van Nostrand, 1969. 159p.

- PARKER, J.R. *Algorithms for Image Processing and Computing Vision*. New York: John Wiley and Sons, 1997. 417p.
- PRATT, W.K. *Digital Image Processing*. New York: John Wiley & Sons, 1978. 750p.
- ROSENFELD, A., KAK, A.C. *Digital Picture Processing*. 2.ed. Orlando: Academic Press, 1982. v.1-2. 349p.
- SILVA, A.B. *Análise Morfoestrutural Hidrogeológica e Hidroquímica no Estudo do Aquífero Kárstico da Jaíba, Norte de Minas Gerais*. São Paulo: Universidade de São Paulo, 1984. (Tese, Doutorado).
- SILVA, A.B., MARTINS JR., P.P. *Desenvolvimento de Modelo Estatístico de Interpretação de Dados Geológicos Morfo-Estruturais Aplicados à Hidrologia de Rochas Fraturadas*. Belo Horizonte: Fundação Centro Tecnológico de Minas Gerais - CETEC, 1989. FINEP/PADCT no 42.86.0524.00. 97p. (Relatório).
- SIMONS, G.F. *Cálculo com Geometria Analítica*. Trad. Seiji Hariki. São Paulo: McGraw-Hill, 1987, v.2. 807p. (Original inglês).
- SOARES, J.F., FARIAS, A.A., CESAR, C.C. *Introdução à Estatística*. Rio de Janeiro: Guanabara Koogan, 1991. 378p.
- STENTIFORD, F.W.M., MORTIMER, R.G. Some New Heuristics for Thinning Binary Handprinted Characters for OCR. *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetic*, v.13, n.1, p.81-84, jan. 1983.
- VALLADARES, R.J.C. *Álgebra Linear e Geometria Analítica*. Rio de Janeiro: Campus, 1982. 353p.
- WILSON, R.J., WATKINS, J.J. *Graphs; An Introductory Approach*. New York: John Wiley & Sons, 1990. 340p.
- YOKOI, S., TORIWAKI, J., FUKUMURA, T. Topological Properties in Digitalized Binary Pictures. *System Computer Controls*, v.4, p.32-39.
- ZHANG, T.Y., SUEN, C.Y. A Fast Parallel Algorithm for Thinning Digital Patterns. *Communications of the ACM*, v.27, n.3, p.236-239, mar. 1984.