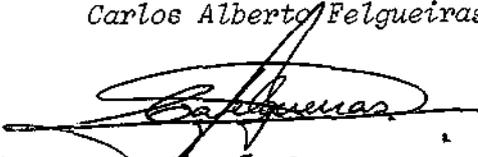
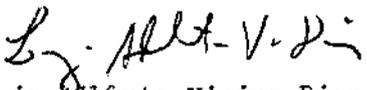
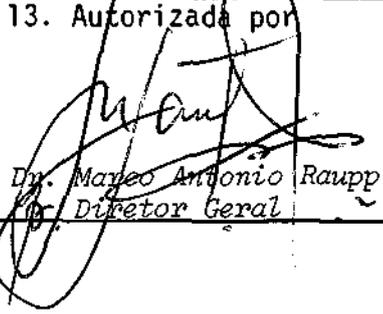
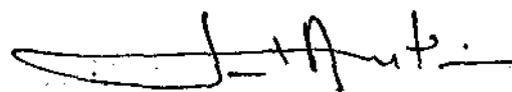


1. Publicação nº INPE-4406-TDL/303	2. Versão	3. Data Outubro 1987	5. Distribuição <input checked="" type="checkbox"/> Interna <input checked="" type="checkbox"/> Externa <input type="checkbox"/> Restrita
4. Origem PG/DPI	Programa FRH/CAP		
6. Palavras chaves - selecionadas pelo(s) autor(es) MODELOS DIGITAIS DE TERRENO                      PROJEÇÕES PLANARES SISTEMA GEOGRÁFICO DE INFORMAÇÕES              MAPAS DE ISOLINHAS INTERPOLAÇÕES			
7. C.D.U.: 681.322:621.38			
8. Título INPE-4406-TDL/303  "DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA DE MODELAGEM DIGITAL DE TERRENO PARA MICROCOMPUTADORES"		10. Páginas: 243	
		11. Última página: A.22	
		12. Revisada por	
9. Autoria  Carlos Alberto Felgueiras   Assinatura responsável		 Luiz Alberto Vieira Dias 13. Autorizada por  Dr. Mapeo Antonio Raupp Dir. Diretor Geral	
14. Resumo/Notas  Este trabalho descreve os aspectos teóricos e de implementação de um sistema de Modelagem Digital de Terreno, MDT, para ser executado em microcomputadores. Esse sistema está integrado a um Sistema Geográfico de Informações que permite combinar os dados de MDT's com mapas temáticos, imagens de satélite e outras informações pictóricas, para obter mapeamentos derivados.			
15. Observações Dissertação de Mestrado em Computação Aplicada Aprovado em 27/08/87			

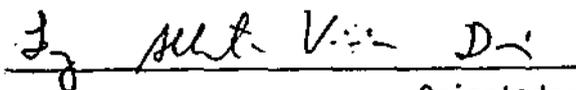
Aprovada pela Banca Examinadora  
em cumprimento a requisito exigido  
para a obtenção do Título de Mestre  
em Computação Aplicada

Dr. José Antonio Gonçalves Pereira



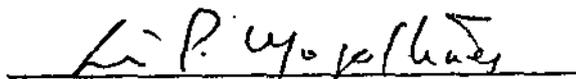
Presidente

Dr. Luiz Alberto Vieira Dias



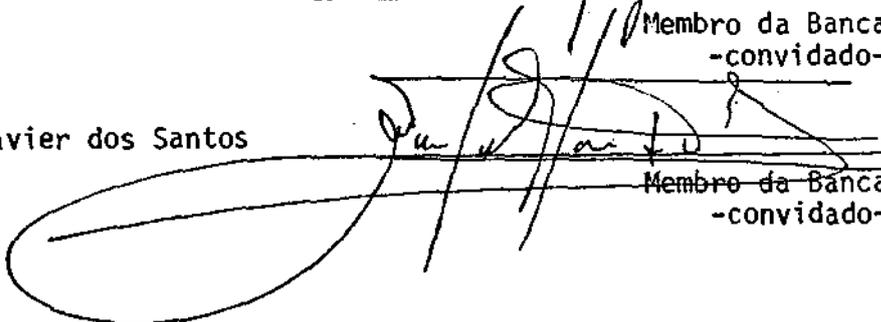
Orientador

Dr. Leo Pini Magalhães



Membro da Banca  
-convidado-

Dr. Marcio Lourival Xavier dos Santos



Membro da Banca  
-convidado-

Candidato: Carlos Alberto Felgueiras

São José dos Campos, 24 de agosto de 1987

• •

À DÉBORA,

pelo incentivo sempre presente



### AGRADECIMENTOS

A todos que contribuíram , direta ou indiretamente, para que este trabalho pudesse ser realizado, em especial a GUARACI JOSÉ ERTAL pelo acompanhamento e pelo auxílio e paciência sempre presentes nos momentos mais críticos . A todos os responsáveis pelo desenvolvimento do Sistema Geográfico de Informações do Inpe sem os quais este trabalho não seria possível.



### ABSTRACT

This work describes theoretical and implementation features of a Digital Terrain Modeling System, DTM. This system runs in a microcomputer and is integrated with a Geographic Information System which allows the combination of DTM data with thematic maps, satellite images, etc..., to obtain new derived maps.



## SUMÁRIO

	<u>Pág.</u>
LISTA DE FIGURAS .....	xiii
LISTA DE TABELAS .....	xvii
<u>CAPÍTULO - INTRODUÇÃO</u> .....	1
<u>CAPITULO 2 - O PROCESSO DE MODELAGEM DIGITAL DE TERRENO</u>	5
2.1 - Definições .....	5
2.2 - Aquisição .....	11
2.3 - Preprocessamento .....	21
2.3.1 - Edição dos dados .....	22
2.3.2 - Transformação de coordenadas .....	23
2.3.3 - Interpolação .....	24
2.3.3.1 - Definições .....	24
2.3.3.2 - Definição da região de interesse .....	28
2.3.3.3 - Comparação entre os métodos de interpolação..	29
2.3.3.4 - Métodos de Interpolação .....	33
2.3.4 - Geração de modelos de grades polinomiais .....	52
2.3.4.1 - Grades regulares .....	53
2.3.4.2 - Grades irregulares .....	54
2.3.5 - Conversão de formato .....	55
2.4 - Gerenciamento .....	56
2.4.1 - Introdução .....	56
2.4.2 - Estruturas de pontos e redes .....	58
2.4.2.1 - Distribuição regular .....	58
2.4.2.2 - Distribuição irregular .....	60
2.4.3 - Estruturas de linhas .....	62

	<u>Pág.</u>
2.4.4 - Estruturas celulares .....	64
2.4.5 - Conclusão .....	65
2.5 - Aplicações .....	66
2.5.1 - Introdução .....	66
2.5.2 - Determinação das linhas de contorno .....	67
2.5.3 - Projeções geométricas planares .....	75
2.5.3.1 - Conceitos gerais .....	75
2.5.3.2 - Matemática das projeções perspectivas .....	80
2.5.3.3 - Remoção de linhas escondidas .....	88
2.5.4 - Simulação de terreno .....	91
2.5.5 - Outras aplicações .....	95
2.5.5.1 - Geração do mapa de perfis .....	96
2.5.5.2 - Determinação da intervisibilidade de pontos .	96
2.5.5.3 - Cálculo de trabalhos em terrenos .....	97
2.5.5.4 - Sistemas de controle de navegação .....	97
<u>CAPÍTULO 3 - METODOLOGIA PROPOSTA</u> .....	99
3.1 - Introdução .....	99
3.2 - O sistema de informações geográficas do INPE ....	100
3.2.1 - Definição e aplicações .....	100
3.2.2 - Estrutura geral do sistema .....	101
3.2.3 - Suporte físico .....	104
3.2.4 - Suporte lógico .....	104
3.2.5 - Estrutura dos arquivos utilizados .....	105
3.3 - Aquisição .....	105
3.3.1 - Definições e objetivos .....	105
3.3.2 - Características de implementação .....	106
3.4 - Geração do modelo .....	108
3.4.1 - Definição da região de interesse .....	108
3.4.1.1 - Definições e objetivos .....	108

3.4.1.2 - Características de implementação .....	109
3.4.2 - Organização dos pontos amostrados .....	116
3.4.2.1 - Definição e objetivos .....	116
3.4.2.2 - Características de implementação .....	119
3.4.3 - Geração da grade regular .....	124
3.4.3.1 - Definição e objetivos .....	124
3.4.3.2 - Características de implementação .....	124
3.4.4 - Refinamento da grade .....	131
3.4.4.1 - Definições e objetivos .....	131
3.4.4.2 - Características de implementação .....	131
3.5 - Projeção geométrica planar .....	133
3.5.1 - Definições e objetivos .....	133
3.5.2 - Características de implementação .....	134
3.5.2.1 - Inicialização .....	134
3.5.2.2 - Cálculos preliminares .....	135
3.5.2.3 - Traçado da projeção .....	136
3.6 - Mapa de contornos .....	142
3.6.1 - Geração e armazenamento das isolinhas .....	142
3.6.1.1 - Definições e objetivos .....	142
3.6.1.2 - Características de implementação .....	143
3.6.2 - Plotagem das isolinhas .....	145
3.6.2.1 - Definições e objetivos .....	145
3.6.2.2 - Características de implementação .....	145
<u>CAPÍTULO 4 - RESULTADOS OBTIDOS</u> .....	147
4.1 - Introdução .....	147
4.2 - Aquisição .....	148
4.3 - Geração do mode .....	149
4.3.1 - Região de interesse .....	149
4.3.2 - Organização das amostras .....	151

4.3.3 - Geração da grade regular .....	157
4.3.4 - Refinamento da grade .....	176
4.4 - Aplicações .....	178
4.4.1 - Projeção planar .....	178
4.4.2 - Mapa de contornos .....	182
<u>CAPÍTULO 5 - CONCLUSÃO</u> .....	195
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	199
APÊNDICE A - DESCRIÇÃO DOS ARQUIVOS DA BD E ROTINAS DE ACESSO	

## LISTA DE FIGURAS

	<u>Pág.</u>
2.1 - Interrelação entre os elementos de um MDT .....	9
2.2 - O processo de modelagem de uma superfície segundo Petinatti.....	10
2.3 - Distribuição dos pontos amostrados em levantamentos em campo .....	19
2.4 - Distribuição dos pontos amostrados por digitalização de contornos .....	20
2.5 - Interpolação pelo método da propagação .....	34
2.6 - Distribuição dos vizinhos mais próximos .....	37
2.7 - Controle dos pontos amostrados sobre a curva ....	47
2.8 - Interpolação bilinear numa célula retangular ....	51
2.9 - Representação das isolinhas da superfície .....	68
2.10 - Casos ambíguos na determinação das isolinhas numa célula retangular .....	72
2.11 - Mapas de contorno para aproximação de superfícies	75
2.12 - Interpolação para os "pixels" da imagem de saída	79
2.13 - Sistemas de coordenadas usados na projeção perspectiva .....	81
2.14 - Transformações geométricas para geração da projeção perspectiva .....	82
2.15 - Projeção perspectiva de um ponto .....	87
3.1 - Esquema geral do SGI .....	103
3.2 - Pontos extremos para definição do polígono convexo .....	110
3.3 - Casos especiais de intersecção com o polígono ...	112

3.4 - Determinação da convexidade do polígono após a intersecção de um novo ponto vértice .....	115
3.5 - Organização dos pontos segundo uma árvore (2d-A).	119
3.6 - Definição da região de influência em torno do ponto da grade .....	130
3.7 - Escondimento de um segmento projetado .....	138
3.8 - Soluções para visibilidade de microsegmento parcialmente visível .....	138
3.9 - Escolha da primeira linha a ser projetada .....	139
3.10 - Distância entre os pontos de projeção para definição do par estereoscópico .....	141
4.1 - Tempo de geração da região de interesse x quantidade de amostras .....	151
4.2 - Processo de geração da região de interesse sobre o conjunto de amostras .....	152
4.3 - Fronteira convexa do conjunto de amostras £3 ....	153
4.4 - Fronteira convexa do conjunto de amostras £5 ....	154
4.5 - Tempo de organização das amostras x número de amostras .....	155
4.6 - Tempo de organização das amostras (100 amostras) x número de pontos por partição.....	156
4.7 - Tempo de organização das amostras (500 amostras) x número de pontos por partição .....	156
4.8 - Tempo de geração da grade x número de vizinhos mais próximos .....	160
4.9 - Tempo de geração da grade x número de amostras ..	162
4.10 - Tempo de geração da grade x número de pontos por partição (amostras £1) .....	162
4.11 - Tempo de geração da grade x número de pontos por partição (amostras £3) .....	163

4.12 - Tempo de organização das amostras mais tempo de geração da grade x número de pontos por partição (amostras f1) .....	164
4.13 - Tempo de organização das amostras mais tempo de geração da grade x número de pontos por partição (amostras f3) .....	164
4.14 - Tempo de refinamento da grade x porcentagem de refinamento (grade 15x15) .....	177
4.15 - Tempo de refinamento da grade x porcentagem de refinamento (grade 30x30) .....	177
4.16 - Projeção paralela da grade padrão .....	184
4.17 - Projeção perspectiva da grade padrão (azimute = -10 e elevação = -40) .....	185
4.18 - Projeção perspectiva da grade padrão (azimute = -40 e elevação = -20) .....	185
4.19 - Par estéreo da grade padrão .....	186
4.20 - Projeção paralela do modelo gerado a partir do conjunto de amostras f1 e interpolador 1 .....	186
4.21 - Projeção paralela do modelo gerado a partir do conjunto de amostras f2 e interpolador 1 .....	187
4.22 - Projeção paralela do modelo gerado a partir do conjunto de amostras f3 e interpolador 1 .....	187
4.23 - Projeção paralela do modelo gerado a partir do conjunto de amostras f4 e interpolador 1 .....	188
4.24 - Projeção paralela do modelo gerado pelo interpolador 2 .....	188
4.25 - Projeção paralela do modelo gerado pelo interpolador 3 .....	189
4.26 - Projeção paralela do modelo gerado pelo interpolador 4 .....	189
4.27 - Projeção paralela de uma grade refinada .....	190

4.28 -	Projeção perspectiva da grade gerada a partir do conjunto de amostras f5 .....	190
4.29 -	Projeção perspectiva da grade gerada a partir do conjunto de amostras f5 (fator de escala = 7 e azimute = -10) .....	191
4.30 -	Projeção paralela da grade gerada a partir do conjunto de amostras f5 com região de interesse.	191
4.31 -	Par estéreo da grade gerada a partir do conjunto de amostras f5 .....	192
4.32 -	Mapa de contornos com traçado linear das linhas.	192
4.33 -	Mapa de contornos com traçado das linhas interpoladas pelo interpolador Akima 2d (5 intervalos) .....	193
4.34 -	Mapa de contornos com traçado das linhas interpoladas pelo interpolador Akima 2d (10 intervalos) .....	193
4.35 -	Mapa de contornos com plotagem automática das cotas associadas as linhas .....	194
4.36 -	Mapa de contornos com espaçamento entre cotas igual a 8 .....	194

LISTA DE TABELAS

	<u>Pág.</u>
4.1 - Tempo de geração da grade em função do interpolador .....	158
4.2 - Porcentagem do erro RMS de geração da grade a partir de cada conjunto de amostras .....	167

.

♦ ♦  
♦ ♦

## CAPÍTULO 1

### INTRODUÇÃO

Um Modelo Digital de Terreno, MDT, também denominado modelo digital de superfície, é uma representação matemática, tratável computacionalmente, que representa a distribuição espacial de uma determinada característica vinculada a uma superfície real. O modelo digital é gerado a partir de um conjunto de pontos,  $((x_i, y_i, z_i), i=1, 2, \dots, n)$ , amostrados da superfície real, sendo que as coordenadas  $x$  e  $y$  dos pontos estão relacionadas as posições de amostragem na superfície e a coordenada  $z$  está relacionada a característica da superfície que se quer modelar.

As características associadas as superfícies podem ser de naturezas diversas tais como : temperatura, relevo, população, vegetação, hidrologia, mineralogia, tipo de solo, etc.... Os modelos digitais são utilizados para se obter informações relevantes da superfície sem a necessidade de se trabalhar diretamente com a superfície real. Essas informações podem ser de caráter qualitativo, como por exemplo a visualização da superfície através de uma projeção geométrica planar do modelo, ou quantitativo, que podem englobar cálculos de áreas, volumes, etc....

A geração e utilização de modelos digitais de superfícies tiveram grande impulso com o advento dos computadores digitais, que incorporaram as características de rapidez e precisão aos processos envolvidos em sistemas de modelagem digital de terreno.

Os dados de MDT's podem ser combinados com outros tipos de informações digitais como mapas topográfico, imagens de satélites, cartas pontuais e dados não gráficos na forma tabular. Isto, usualmente, é realizado por Sistemas Geográfico de Informações, SGI, cujas aplicações incluem cartografia temática, hidrografia, geologia, agricultura, recursos florestais e cadastramento e planejamento rural, urbano e regional.

O SGI, do INPE, foi desenvolvido para o equipamento de processamento de imagens SITIM, Sistema de Tratamento de Imagens, também desenvolvido no INPE, que se baseia num microcomputador de 16 bits tipo IBM-PC e está implementado em linguagem C, sob um sistema operacional compatível com o UNIX.

A motivação principal para o desenvolvimento desse sistema é a de prover o país com um equipamento com as características descritas acima, que permita a execução de tal sistema em ambientes computacionais de pequeno porte baseados em microcomputadores.

Dentro desse contexto os principais objetivos deste trabalho são:

1. Estudo das metodologias correntes da area de modelagem digital de superficies, especialmente aquelas mais apropriadas para implementações em computadores de pequeno porte tais como em microcomputadores.

2. Desenvolvimento e implementação de um sistema de modelagem digital de terreno para ser executado em microcomputadores. O sistema deverá conter funções que executem no mínimo as seguintes tarefas : aquisição de amostras da superfície real, geração de um modelo digital que represente essa superfície e uma ou mais aplicações sobre esse modelo.

3. Integração do modelo proposto ao Sistema Geográfico de Informações desenvolvido para o equipamento de processamento de imagens SITIM.

É importante salientar que o sistema de modelagem digital aqui proposto não estará restrito as características de "hardware" do SITIM. Isto significa que os algoritmos deste sistema poderão ser implementados em qualquer outro ambiente sem a necessidade de mudanças no modelo proposto. A única restrição é que a definição das estruturas de dados e das funções de manipulação das mesmas será realizada com a preocupação de otimizar os tempos de processamentos em microcomputadores. A independência do sistema em relação aos dispositivos de entrada e saída de dados, gráficos e não gráficos, é garantida pela utilização de um pacote gráfico básico baseado no padrão GKS.

Considerando-se esses objetivos, este trabalho está organizado da seguinte forma: O capítulo 1 apresenta uma visão geral do ambiente de trabalho e os objetivos a serem alcançados pelo mesmo. O capítulo 2 engloba um estudo teórico dos problemas envolvidos em sistemas de modelagem digital de terreno. Este capítulo é subdividido de acordo com os elementos que compoem um sistema desse tipo, quais sejam : a aquisição , o preprocessamento, o gerenciamento e armazenamento e as aplicações. No capítulo 3 é descrita uma metodologia de implementação de um sistema de MDT, dando ênfase as estruturas de manipulação dos dados e aos algoritmos de implementação dos métodos propostos. O capítulo 4 apresenta os resultados obtidos pelas metodologias propostas, com análises desses resultados e algumas considerações que se façam necessárias. O quinto e último capítulo relata as principais conclusões a respeito do trabalho desenvolvido e as sugestões para novos desenvolvimentos na área.

## CAPÍTULO 2

### O PROCESSO DE MODELAGEM DIGITAL DE TERRENO

#### 2.1. DEFINIÇÕES

Como definido no capítulo 1, um Modelo Digital de Terreno é uma representação matemática, tratável computacionalmente, que representa a distribuição espacial de uma determinada característica vinculada a uma superfície real. Dentre essas características podemos incluir itens tais como: temperatura, relevo, população, vegetação, hidrologia, tipos de solo, etc....

Comumente, a distribuição é representada por um sistema de coordenadas horizontal  $xy$  e a característica do terreno é a sua elevação,  $z$ . Quando se trabalha exclusivamente com características de elevação de terreno, ou seja relevo, a denominação modelo digital de terreno pode ser substituída por modelo digital de elevação, MDE. No contexto de modelagem digital de terreno é comum a utilização do termo superfície como sinônimo de terreno ambos com o significado de superfície terrestre. Neste trabalho esses termos também terão essa conotação sendo utilizados como sinônimos. O termo modelo será utilizado no texto com o sentido de modelo digital, a menos que se faça referência em contrário.

Um sistema de MODELAGEM DIGITAL DE TERRENO

incorpora, basicamente, os seguintes elementos (Doyle, 1978) :

- Aquisição
- Preprocessamento
- Gerenciamento e Armazenamento
- Aplicações

O processo de aquisição de dados consiste em amostrar um conjunto de dados  $(x,y,z)$  que representarão a superfície a ser modelada. Existem diversas formas de se adquirir esses dados, das quais podemos destacar :

- aquisição manual de mapas;
- aquisição automática de mapas;
- aquisição por levantamento em campo;
- aquisição por modelos estereoscópicos;
- aquisição por instrumentos transportados por aviões ou satélites.

Todas essas formas de aquisição serão descritas e estudadas no item 2.2. O processo de aquisição é determinante na qualidade do modelo final do terreno. Um modelo por mais sofisticado que seja não pode compensar os males causados por uma amostragem mal feita.

O preprocessamento inclui tarefas de "formatação" dos dados amostrados para que estes possam ser mais facilmente utilizados na geração de produtos na fase de aplicações. Nesta fase incluem-se algumas tarefas importantes, descritas com mais detalhes no item 2.3, tais como:

- edição dos dados amostrados;
- transformações de coordenadas;
- interpolação;
- geração de modelos de grades poligonais
- conversão de formatos.

O preprocessamento pode conter todas essas tarefas ou apenas um subconjunto delas. Dentre essas tarefas a interpolação é uma das mais importantes. Ela é usada na geração de modelos de grade regular, diretamente dos dados amostrados, no refinamento de uma grade já definida, na conversão de formatos e em várias aplicações do modelo. Cada uma dessas tarefas pode requerer interpoladores diferentes, dependendo das características dos dados de entrada e dos produtos de saída.

O gerenciamento e armazenamento de dados de MDT está diretamente ligado as formas de consulta, armazenamento, recuperação, delegação e demais operações necessárias para a manipulação de dados e estruturas do sistema. Fazem parte desta etapa as estruturas de armazenamento e os processos de manipulação dos dados amostrados, bem como dos produtos intermediários e finais gerados pelo sistema. Esta tem influência determinante na:

- eficiência temporal dos programas que compõem os demais elementos do sistema de MDT;
- versatilidade do sistema para aceitar novas aplicações;
- transportabilidade dos dados preprocessados e/ou produtos de aplicações para outros sistemas.

As aplicações são responsáveis pela produção de resultados úteis à sociedade. Os produtos gerados pelas aplicações utilizam diretamente os dados amostrados, ou um dos modelos digitais gerados no preprocessamento, e os dados e estruturas definidos no módulo de gerenciamento e armazenamento. A seguir são listadas algumas das aplicações mais frequentes em sistemas de modelagem digital de superfícies:

- determinação do Mapa de Contornos;
- projeções Geométricas Planares;
- geração de perfis;
- determinação da intervisibilidade entre pontos;
- simulação de Terrenos;
- sistemas de controle de navegação; etc....

Todas essas aplicações serão abordadas com maior profundidade no item 2.5.

A Figura 2.1 mostra de forma esquemática cada elemento de um sistema de modelagem digital de terreno e as interrelações entre os mesmos.

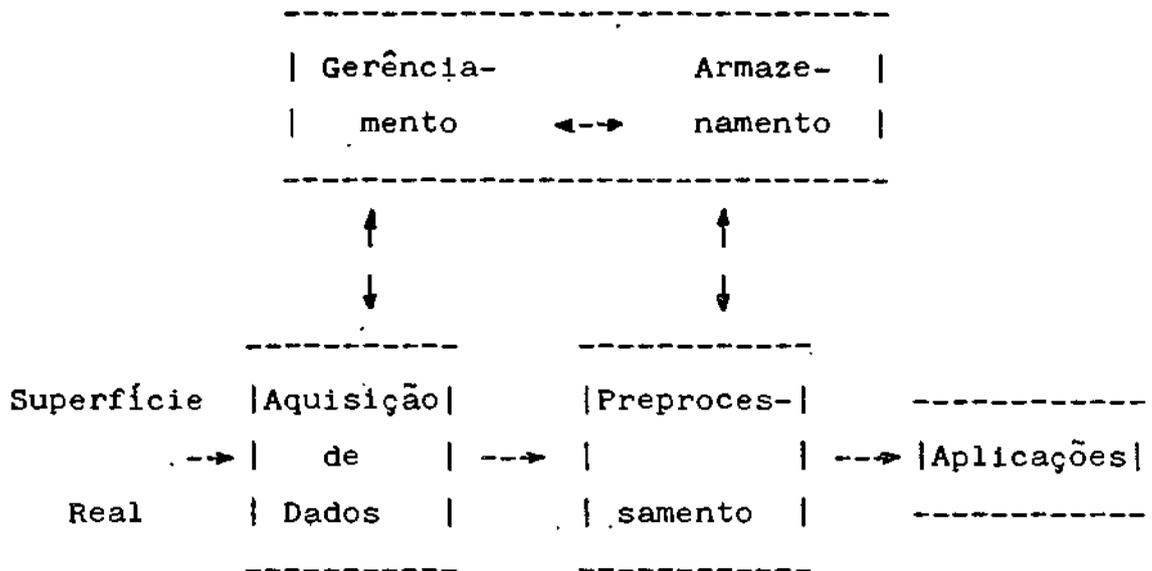


Fig. 2.1 - Interrelação entre os elementos de um MDT .

Outro enfoque, proposto por Pettinati(1983) e ilustrado na figura 2.2, define o processo de modelagem de uma superfície como composto por 3 etapas.

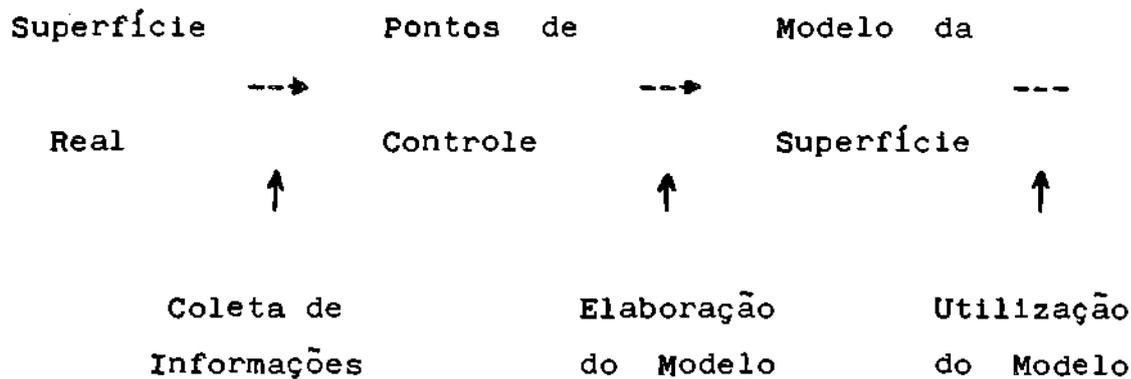


Fig. 2.2 - O processo de modelagem de uma superfície segundo Petinatti.

A primeira etapa é a AMOSTRAGEM ou coleta de dados da superfície e é equivalente a fase de AQUISIÇÃO descrita anteriormente.

A segunda é a fase de ELABORAÇÃO DO MODELO cujo objetivo é criar um modelo matemático, que represente a superfície real, partir do conjunto de pontos amostrados. Numa comparação com o sistema descrito por Doyle(1978), esta fase é equivalente ao preprocessamento e o gerenciamento e armazenamento dos dados amostrados.

A terceira e última etapa é a UTILIZAÇÃO DO MODELO elaborado em substituição a superfície original. Esta fase se equivale as APLICAÇÕES no sistema anterior.

Como vemos, as duas abordagens são equivalentes. Este trabalho seguirá a abordagem primeira por considerá-la mais detalhada, o que facilitará a descrição mais didática

dos diversos elementos pertencentes a um sistema de modelagem digital de terreno. A segunda abordagem, por exemplo, não faz referência específica as tarefas envolvidas na fase de gerenciamento e armazenamento dos dados de MDT. Essas tarefas são muito importantes quando se quer implementar um sistema de MDT em microcomputadores, onde a menor velocidade de processamento e a utilização frequente de memória secundária devem ser compensadas por estruturas de armazenamento e gerenciamento eficazes.

## 2.2 AQUISIÇÃO

A aquisição, ou amostragem, de dados para modelagem digital de superfícies é um processo de obtenção de triplas  $(x,y,z)$  que representarão a superfície real no processo de geração do modelo da superfície. A quantidade de dados amostrados e o cuidado na escolha dos pontos que devem ser amostrados estão diretamente relacionados com a qualidade do produto final de uma aplicação sobre o modelo. Para aplicações onde se requer um grau de precisão e/ou realismo maior, a quantidade de pontos amostrados, bem como o cuidado na escolha desses pontos, qualidade dos dados, são decisivos. Por outro lado, quanto maior a quantidade de pontos representantes da superfície real, maior será o esforço computacional para que estes sejam armazenados, recuperados, processados, etc., até que se alcance o produto final da aplicação.

A experiência mostra que os pontos amostrados, também conhecidos como pontos de controle, não devem ser aleatoriamente escolhidos. No processo de amostragem deve-se adquirir aqueles pontos que sejam mais representativos da topografia da superfície real. Assim a amostragem deve considerar as depressões, elevações, linhas de crista e drenagem, etc..., que caracterizam a superfície.

Para exemplificar, considere uma superfície plana com uma depressão ao centro. Uma amostragem dessa superfície sem pontos representativos da depressão e qualquer uma irá produzir um modelo de uma superfície plana. Uma visualização, por exemplo em perspectiva, do modelo mostrará a superfície como uma planície. Claramente, esta amostragem não é representativa da superfície real.

Existem diversas formas de classificação dos dados amostrados na fase de aquisição. Esses dados podem ser classificados, de acordo com a forma de obtenção dos mesmos, como dados obtidos por:

- levantamentos em campo;
- digitalização de mapas;
- medidas fotogramétricas em modelos estereoscópicos; e
- altímetros transportados por aviões ou satélites.

Os levantamentos em campo são trabalhos realizados sobre a superfície real e são também conhecidos por trabalhos de campo. Nestes os dados são adquiridos por profissionais da área, topógrafos, engenheiros e etc...,

com auxílio de aparelhos específicos tais como niveladores, taqueômetros e outros. Esses dados são então inseridos no computador numa forma tabular ou transcritos para um mapa para posterior digitalização.

A digitalização de mapas pode ser dividida em duas formas distintas, de acordo com o tipo de mapa a ser digitalizado: MAPA DE PONTOS ou MAPA DE CONTORNOS.

A digitalização de mapas de pontos é feita amostrando-se pontos do mapa sem qualquer preocupação com a posição absoluta ou relativa entre os mesmos. A digitalização de mapas de contornos, que podem ser mapas políticos, mapas de isolinhas, etc..., é realizada perseguindo-se os contornos definidos no mapa. Os contornos podem ser fechados ou abertos. Neste último caso, geralmente, os extremos dos contornos são pontos dos limites do mapa.

A digitalização de mapas de pontos, bem como a digitalização de mapas de contornos são realizadas por instrumentos conhecidos como digitalizadores. Os digitalizadores convertem dados gráficos em vetores de dados nas direções das coordenadas  $x$  e  $y$ . Nos digitalizadores é possível, ainda, incluir-se uma informação numérica extra, como por exemplo altura de terreno, temperatura, densidade populacional, etc..., para cada dado digitalizado.

Em geral os digitalizadores são formados por uma superfície de digitalização (mesa) onde os dados

gráficos são acomodados. Os dados da mesa são então varridos com um cursor, que lê as coordenadas x e y da mesa.

Podemos classificar os digitalizadores de acordo com o seu modo de ação:

- digitalizadores ponto a ponto;
- digitalizadores seguidores de linha;
- digitalizadores por varredura.

No primeiro caso, também conhecido como modo único, o cursor é aplicado manualmente a um ponto e suas coordenadas são registradas. Geralmente o comando é dado pelo operador que também auxilia na colocação da informação extra já mencionada. Este modo geralmente é utilizado na digitalização de segmentos longos através do registro dos seus pontos terminais. No caso de sistemas de modelagem digital de terreno a digitalização ponto a ponto é utilizada na digitalização de mapas de pontos.

No segundo modo, também conhecido como modo contínuo, o cursor é movimentado sobre a linha a ser digitalizada. Durante o movimento do cursor os pontos são registrados a intervalos de tempo ou distância, na forma de coordenadas retangulares incrementais absolutas. Este modo é mais rápido e versátil que o anterior. Os intervalos de amostragem são definidos pelo usuário e os registros ocorrem quando uma das condições é satisfeita : o intervalo de tempo se esgota ou o intervalo de distância é percorrido. Este modo de digitalização pode ser feito manual ou automaticamente. A aquisição manual através da

perseguição de contornos é bastante usual, porem este trabalho é bastante tedioso e cansativo, com alta probabilidade de erros e duplicação ou omissão de informações, quando executado em mapas com grande densidade de linhas de contorno.

O desenvolvimento de instrumentos seguidores automáticos de linha tornaram esses problemas menos críticos. Neste caso prepara-se uma cópia do mapa a ser digitalizado removendo-se todas as informações espúrias aos contornos, tais como números e textos, e preenchendo os vazios das linhas. O mapa cópia é então varrido automaticamente pelo instrumento que inicia na linha próxima a borda do mapa e segue-a até encontrar o ponto inicial de partida (contorno fechado) ou uma das bordas do mapa (contorno aberto).

Os digitalizadores classificados como varredores ou por varredura, são dispositivos predominantemente de aquisição automática. No varredor de tambor, por exemplo, um mapa cópia, igual ao descrito no paragrafo anterior, é fixado num tambor que, ou roda sob uma fonte de luz fixa ou tem a fonte de luz rodando em volta do tambor fixo. Cada vez que uma linha é cruzada a posição  $(x,y)$  é gravada. Esses dispositivos são excelentes para adquirir e recuperar dados digitais para simples visualização dos dados. Entretanto se o objetivo é adquirir linhas de contornos como vetores de pontos contínuos representando cada contorno, uma grande quantidade de processamento é necessária para vetorizar os dados e

atribuir uma identificação, por exemplo valor da elevação ou temperatura, para cada contorno digitalizado.

Outro tipo de digitalizador por varredura adquire os dados automaticamente varrendo, com um vetor linear de sensores, o mapa cópia. Neste caso numa simples varredura o dispositivo grava todos os pontos de intersecção de uma linha, faixa de alguns centímetros da folha, do mapa com as linhas de contorno. A varredura seguinte cobre a faixa adjacente a anterior até que o mapa inteiro tenha sido percorrido. As linhas de varredura podem, ou não, estar igualmente espaçadas. Como no caso anterior, este tipo de digitalização exige muito processamento para conectar-se segmentos de linhas individuais e atribuir as identificações correspondentes.

Na prática, para digitalização de contornos, somente seguidores de linhas e dispositivos de varredura são usados.

A terceira fonte de dados de modelos digitais de terreno são as medidas fotogramétricas realizadas por equipamentos estereoscópicos também conhecidos como aparelhos fotogramétricos restituidores ou estereomodelos fotogramétricos.

Segundo Doyle(1978), a mais recente geração de instrumentos fotogramétricos grava os dados digitalizados em fitas magnéticas ou de papel. Geralmente os pontos são adquiridos em coordenadas do estereomodelo, mas para algumas aplicações é necessário uma transformação para

coordenadas do terreno. Os dados de elevação podem ser formatados como linhas de contorno, perfis com elevações gravados a intervalos regulares ou em descontinuidades no declive do terreno, ou como pontos geomórficos ao longo das linhas de drenagem, linhas de cristas, etc....

A quarta e última fonte de dados de MDT são os altímetros transportados por aviões ou satélites. Estes são classificados como fontes diretas de obtenção de dados digitais de elevação na medida em que os dados adquiridos podem ser utilizados diretamente pelos computadores digitais sem necessidade do processo de digitalização. Os dados são adquiridos diretamente na forma digital. A maioria dos altímetros existente atualmente utilizam equipamentos baseados em radar ou instrumentos a laser.

Podemos ainda classificar os dados amostrados segundo a forma de distribuição em que eles são adquiridos :

- distribuição irregular ou dispersa;
- distribuição semi-ordenada ou semi-regular;
- distribuição ordenada ou regular.

A distribuição irregular caracteriza-se pela falta de regularidade ou ordenação entre os pontos amostrados. Neste tipo de aquisição a amostragem é realizada sem a preocupação com a distribuição dos pontos na superfície mas com a representatividade do ponto para modelagem mais realista da superfície.

Na distribuição semi-ordenada destingue-se uma certa regularidade na distribuição das amostras. Geralmente os pontos são ordenados em uma certa direção, por exemplo de ordenada x ou y, mas não se pode definir uma ordenação completa dos pontos.

A distribuição ordenada caracteriza-se pela completa ordenação dos pontos amostrados no plano cartesiano 2-d. Essas estruturas são também conhecidas como grades regulares pois cada ponto forma com seus vizinhos polígonos regulares no espaço 2-d. Assim podemos ter distribuições formando grades retangulares, triangulares, hexagonais, etc...

Apesar de parecerem distintas, as duas classificações do processo de aquisição apresentadas estão intimamente relacionadas. Os levantamentos em campo são geralmente caracterizados por uma distribuição irregular dos pontos amostrados. Não se deve confundir a distribuição irregular com uma distribuição aleatória. Esta última é característica de superfícies estatísticas. Em levantamentos de terreno executados por profissionais existe uma certa lógica na distribuição das amostras que é determinada pela necessidade de se amostrar pontos representativos da superfície como já foi explanado anteriormente. Apesar de não serem comuns, as distribuições semi-ordenadas e regulares podem ser usadas para aquisição por levantamentos em campo.

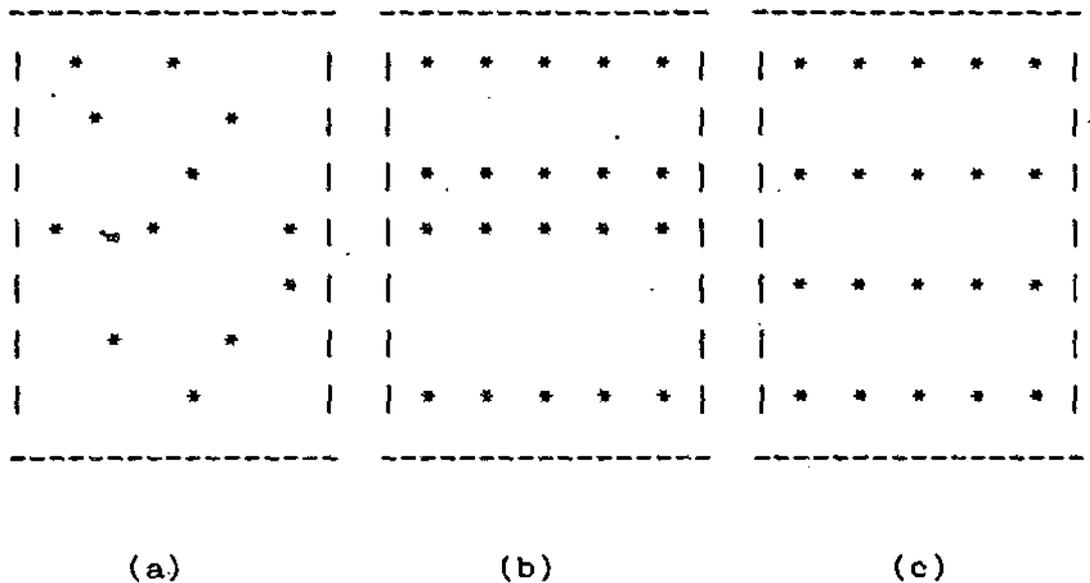


Fig. 2.3 - Distribuição dos pontos amostrados em levantamentos em campo : (a) irregular, (b) semi-regular e (c) regular.

A Figura 2.3 mostra as possíveis formas de distribuição das aquisições para dados obtidos por levantamentos em campo.

No caso da digitalização ser do tipo seguidora de linhas, a série de coordenadas  $(x,y)$  ao longo de um contorno definido, geralmente, corresponde ao mesmo valor de coordenada  $z$ .

Em digitalizadores do tipo por varredura, que se caracterizam pelas intersecções de contornos com linhas de perfis, os pontos digitalizados podem ter um grau de

variação de ordenamento dependendo da relação das linhas retas de perfis. A relação entre estas linhas pode ser : (a) paralelas umas as outras e equidistantes; (b) paralelas uma a outra mas não equidistantes e; (c) não paralelas com direções e distâncias aleatórias. As diferenças entre essas distribuições são apresentadas na Figura 2.4.

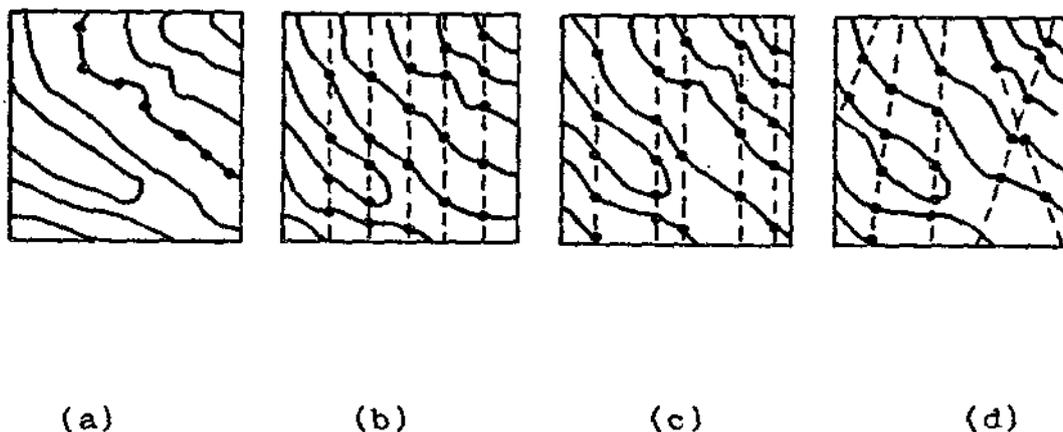


Fig. 2.4 - Distribuição dos pontos amostrados por digitalização de contornos : (a) seguidores de linhas, (b) varredura paralela e equidistante, (c) varredura paralela e não equidistante e (d) varredura não paralela e aleatória.

Quando os pontos são gerados a partir de medidas fotogramétricas de modelos estereoscópicos eles são, geralmente, semi\_ordenados ou totalmente ordenados. Se o modelo estereoscópico é varrido ao longo das linhas retas paralelas e equidistantes, os seguintes modos de amostragem são possíveis: (a) pontos notáveis; (b) pontos a intervalos verticais regulares e; (c) pontos a intervalos horizontais regulares. Dentre os 3 modos apresentados, somente o modo (c) fornece um modelo digital de terreno totalmente ordenado no formato de grade retangular na resolução que se deseja. Nos casos (a) e (b) é necessária a utilização de interpolação caso se deseje um modelo digital de terreno na forma de grade retangular com uma determinada densidade de pontos.

### 2.3 PREPROCESSAMENTO

Os dados de modelos digitais de terreno obtidos na etapa de aquisição raramente se encontram no formato adequado para ser usado diretamente pelas aplicações. Quando isto ocorre é necessário transformar os dados adquiridos de forma que eles possam ser mais facilmente usados pelos programas de aplicação. Isto é realizado na fase de preprocessamento. Os principais objetivos da fase de preprocessamento são: a edição dos dados amostrados; as transformações de coordenadas; a interpolação, a geração de modelos de grades e a conversão de formatos. Apesar de ter sido colocada separadamente como parte integrante do preprocessamento, a interpolação é

utilizada nas tarefas de geração de modelos de grades e conversão de formatos e em alguns aplicativos que utilizam os modelos digitais gerados nesta fase. Assim todas as considerações feitas neste ítem são igualmente válidas para os interpoladores utilizados nas aplicações.

### 2.3.1 EDIÇÃO DOS DADOS

A edição dos dados amostrados é a primeira tarefa que se deve realizar após a aquisição dos mesmos. É necessário que os dados, sobre os quais serão realizados todos os processamentos posteriores, estejam corretamente representados sob pena de se ter produtos finais de má qualidade.

Nesta fase, o usuário tem a possibilidade de consertar alguns erros que podem ocorrer durante a digitalização, tais como: superposições de dados, omissões de dados, dados mal digitalizados, etc....

Segundo Doyle(1978), a edição pode ser realizada sobre uma cópia dos dados digitalizados, obtida com uma plotadora de mesa, por exemplo. Neste caso a cópia é corrigida manualmente e é utilizada para redigitalização dos dados corrigidos. Esse procedimento se repete até que se tenha um produto final aceitável. Outra forma de edição, mais usual e mais automática, é realizada mostrando-se os dados digitalizados em uma unidade visualizadora tipo CRT. Neste caso a correção dos dados é realizada diretamente

,através de um programa interativo capaz de deletar, criar, substituir, mover, etc..., pontos e linhas no mapa visualizado.

Pode-se, ainda, ter uma forma de edição mista das duas anteriores. Pode-se, por exemplo, usar a unidade visualizadora apenas para deleção dos dados digitalizados erroneamente. Depois disso é feita uma cópia desse mapa. As demais alterações são feitas manualmente e o mapa volta para a fase de digitalização ate que se tenha o produto final desejado.

Alguns sistemas também incluem nesta fase a tarefa de compressão de dados que visa reduzir a quantidade de memória ocupada pelos dados amostrados.

### 2.3.2 TRANSFORMAÇÃO DE COORDENADAS

Como o próprio nome já diz esta tarefa compreende a transformação dos dados amostrados de um sistema de coordenadas para outro. Por exemplo, os dados adquiridos num sistema de coordenadas de um estereomodelo devem ser convertidos para outros sistemas de coordenadas tais como UTM ("Universal Transverse Mercator") ou SPCS("State Plane Coordinate System") ou para latitude e longitude. Essa tarefa geralmente é realizada antes do armazenamento dos dados e após a compressão.

O processo de transformação de coordenadas é auxiliado pela definição das coordenadas de alguns pontos de registro no sistema para o qual os dados serão convertidos. O conhecimento das coordenadas desses pontos nos dois sistemas de coordenadas define a função de mapeamento de um sistema para o outro.

### 2.3.3 INTERPOLAÇÃO

#### 2.3.3.1 DEFINIÇÕES

Mesmo após a transformação de coordenadas, o dado de MDT pode não estar na localização própria para o arquivo final a ser armazenado. Para que isso ocorra esses dados devem ser interpolados, considerando-se os dados amostrados já transformados para o novo sistema de coordenadas e então armazenados no arquivo final.

A interpolação é definida como um processo de estimação da cota - valor da coordenada  $z$  - num determinado ponto da superfície, considerando-se as cotas dos pontos amostrados da superfície. Se o ponto a ser interpolado coincide com um dos pontos amostrados então o seu valor de cota  $z$  é definido igual a cota  $z$  do ponto amostrado. Caso contrário o seu valor é estimado a partir do conjunto ou subconjunto dos  $n$  pontos amostrados. Assim o valor de cota  $z$  de um ponto  $(x,y)$  no espaço 2d é definido como:

$$z = \begin{cases} z_i & \text{se } x=x_i \text{ e } y=y_i \text{ para algum valor} \\ & \text{de } i=0,1,2,\dots,n-1; \\ f((x_j,y_j)) & \text{se } x \neq x_i \text{ ou } y \neq y_i \text{ p/ todo } i=0,\dots,n-1 \\ & \text{e } (x_j,y_j) \in ((x_k,y_k)) \text{ para } k=0,\dots,n-1. \end{cases}$$

São raros os casos nos quais a cota da superfície existe para toda localização desejada, isto é, a superfície é definida por uma função matemática contínua ou uma malha de dados densa o suficiente para cobrir todas as posições de interesse. Portanto, no caso mais geral, um processo de interpolação dos dados amostrados é necessário para se alcançar o formato final desejado.

Segundo Peucker(1980), a interpolação é utilizada para diferentes propósitos:

- para descrição matemática da superfície por valores discretos ou contínuos;
- para redução de dados;
- para análise de dados;
- e para uma combinação dos propósitos acima.

Considerando-se a relação entre os pontos amostrados e a superfície, pode-se distinguir entre os seguintes tipos de interpolação:

- uma função global para toda a região de interpolação (superfície de tendência);
- funções localmente definidas para aplicações em elementos de superfície;

- interpolação para uma grade de pontos;
- interpolação para uma malha densa de pontos.

As funções globais são usualmente polinomiais ou trigonométricas com a variável dependente  $z$  como função das variáveis independentes  $x$  e  $y$ . A função interpolante é dependente de todos os pontos amostrados e a adição ou deleção de um deles ou a mudança de uma das coordenadas de um deles propaga-se através do domínio da função (Franke, 1982).

É possível determinar-se uma função global para toda a região de definição dos dados. Essa função é conhecida como superfície de tendência. Porém raramente utilizam-se métodos globais para grandes quantidades de dados uma vez que esses métodos frequentemente envolvem a solução de um sistema de equações de grau igual ao número de pontos amostrados. Outro problema é que essas funções de superfícies oscilam muito dependendo do grau da função.

A idéia de um método local de interpolação é contestada por alguns autores. Tipicamente a utilização de uma interpolação local significa que a adição, a deleção ou movimentação de um ponto do domínio da função afetará apenas os pontos próximos ao local da mudança. Isto é o mesmo que considerar que apenas os pontos próximos ao ponto interpolado, dentro de um critério de proximidade, irão influenciar o valor estimado para esse ponto. As ponderações que se fazem aqui são de que apesar de a função interpolante depender apenas dos pontos amostrados mais próximos, uma inspeção global é necessária para se

determinar a vizinhança do ponto, e que muitos interpolantes considerados locais, segundo a definição anterior, fazem uso de parâmetros que são determinados também globalmente. Neste trabalho considerar-se-á o conceito de interpolante local definido acima, sem restrições quanto a busca da vizinhança e de como os parâmetros são escolhidos. Além disso, as funções globais definidas localmente, muitas vezes utilizadas na prática, também são consideradas locais.

Os métodos locais são muito usados para se definir uma função para elementos da superfície (células) que são polígonos convexos determinados a partir dos pontos amostrados. Esses métodos apresentam um bom desempenho na estimação das cotas dos pontos dentro da célula, mas deve-se ter cuidado com a continuidade das funções em células vizinhas.

A interpolação para uma grade de pontos geralmente utiliza um método local de interpolação. Neste caso o valor de cota de cada ponto da grade é estimado a partir das cotas dos pontos conhecidos que estiverem mais próximos, sem que se defina uma função de interpolação válida para uma região do espaço de pontos amostrados. Portanto, para cada ponto da grade determina-se uma função de interpolação diferente e a cota estimada será o valor da função definida no ponto em questão.

A interpolação para uma malha densa de pontos é realizada sobre uma malha de pontos que tem a mesma estrutura da primeira mas é menos densa. Este tipo de

interpolação tem o objetivo de refinar uma grade de pontos já existente, e muitas vezes é chamado de refinamento da grade. Esses interpoladores são muito mais rápidos que os anteriores visto que utilizam pontos vizinhos cujas posições são conhecidas e portanto a busca destes é imediata.

#### 2.3.3.2 DEFINIÇÃO DA REGIÃO DE INTERESSE

Como o nome já diz uma interpolação deve ser realizada entre pontos conhecidos. Mais formalmente uma interpolação deve sempre ser realizada dentro de um domínio de definição dos pontos amostrados. Esse domínio de definição é conhecido, na literatura de MDT, como região de interesse. A estimação de um ponto fora da região de interesse é conhecida como extrapolação e não deve ser usada quando se deseja um produto final confiável.

É fácil notar que, dado um conjunto de pontos de MDT, a definição da região de interesse não é única. Porém de todas as regiões possíveis apenas uma é um polígono convexo. A esta região chamamos fronteira convexa e as demais fronteiras restritas. Apesar da possibilidade de incluir em seu interior regiões bem pouco densas, ou até sem nenhuma amostra, a fronteira convexa é a única utilizada para delimitar a região de interesse (Pettinati, 1983).

Isto posto, tem-se mais dois problemas para se resolver que precedem o processo de interpolação que são : a definição do polígono convexo referente aos dados de MDT adquiridos e a determinação da posição do ponto interpolado em relação a região de interesse, que pode ser interna ou externa, se o ponto estiver dentro ou fora, respectivamente, dessa região. Um ponto sobre a região pode ser considerado como interno a região, sem grandes prejuízos do produto final.

Existem vários trabalhos de determinação da região de interesse (Pettinati, 1983; Yamamoto, 1986; e Handley, 1985). Pettinati(1983), descreve um método para a construção da fronteira convexa e um para a construção de uma fronteira restrita. Handley(1985), apresenta alguns algoritmos e propõe um método melhorado que, segundo o autor, esse método é tão bom em termos de espaço de memória ocupada e geralmente melhor em termos de tempo de execução quando comparado com os outros métodos existentes.

#### 2.3.3.3 COMPARAÇÃO ENTRE OS MÉTODOS DE INTERPOLAÇÃO

É muito grande a quantidade de métodos de interpolação atualmente existente. Alguns tem características bastante próprias e particulares, enquanto outros são apenas extensões ou otimizações dos primeiros. As características de comparação entre métodos diferentes e a ponderação dos itens de teste para uma análise final são as vezes subjetivas.

A característica comum a todos os métodos de interpolação refere-se a CONTINUIDADE da superfície gerada pelo interpolador. Uma superfície é dita ser da classe  $C_n$  se e somente se for continuamente derivável até a  $n$ -ésima ordem.

Franke(1982), propõe a consideração dos seguintes itens, em ordem decrescente de importância, na avaliação de um método de interpolação:

Precisão : A precisão pode ser avaliada ao reproduzir-se uma superfície cujas características são conhecidas. Para uma superfície real geralmente não se conhece a função  $z=f(x,y)$  que representa essa superfície. Porém se o método de interpolação aproximar fielmente o comportamento de uma variedade de funções de superfícies conhecidas, podemos esperar resultados razoáveis para superfícies reais. A performance ou exatidão de um método pode ser avaliada numericamente, e isso é uma prática bastante usual.

Aspectos visuais : A aparência do interpolante é muito importante. A plotagem perspectiva pode ser extensivamente usada nesta avaliação. Dinamicamente pode-se mudar as direções de visualização sendo possível a visualização de toda superfície. As classificações visuais estão estritamente relacionadas com a precisão com a qual um interpolante reproduz a superfície. Quando a precisão é alta as chances do interpolador comportar-se mau são pequenas. Diminuindo-se a precisão as chances de um mau interpolador ser não agradável visualmente são maiores. A

avaliação do interpolador pelo aspecto visual é totalmente subjetiva, mas sua importância é amplamente reconhecida. O problema maior é como integrar esta informação ao contexto geral da avaliação do interpolante. Quando se conhece a superfície que se está modelando pode-se ter uma idéia do comportamento do interpolador comparando visualmente a superfície gerada com a superfície conhecida. Por outro lado se a superfície real não é conhecida nada se pode afirmar quanto a qualidade do interpolador.

Sensibilidade à parâmetros : Muitos métodos requerem o cálculo de alguns parâmetros que são incorporados ao interpolador. Esses parâmetros podem ser, por exemplo, a distância máxima de influência dos pontos vizinhos no ponto interpolado, ou a posição dos vizinhos mais próximos, ou ainda, o cálculo de derivadas parciais de primeira e segunda ordem no ponto. Os parâmetros servem para ajustar o comportamento do interpolante com o conjunto de pontos amostrados. Os métodos que envolvem parâmetros devem sofrer testes informais para definição dos valores apropriados dos parâmetros. Para conjuntos de dados fixos variam-se esses valores até que uma faixa apropriada seja encontrada. Isto é necessário porque alguns métodos podem ter diferentes sensibilidades a um mesmo tipo de parâmetro. É desejável que um método seja estável em relação à perturbações nos seus parâmetros e os valores dos parâmetros não sejam altamente dependentes da função amostrada.

Tempo de processamento : Para computadores de grande porte, o tempo de processamento não tem grande interesse a menos que esse tempo seja muito alto. Em geral, devido as

características de alta velocidade e grande capacidade de armazenamento e recuperação de dados isto não deve acontecer. Em microcomputadores o tempo de processamento pode inviabilizar a escolha de um determinado interpolador. Nestes o tempo de processamento é limitado principalmente pelo grande número de acessos a memória secundária que podem ser necessários devido ao grande volume de dados característicos dos processamentos de dados de superfícies. Assim os métodos testados em computadores de pequeno porte devem ser implementados através de estruturas de dados eficientes que possam compensar a falta de memória principal para armazenamento dos dados envolvidos na interpolação.

Necessidades de memória : Quanto ao esforço computacional, as necessidades de memória não são cruciais, a menos que elas sejam muito grandes. As necessidades de memória são consideradas apenas em termos de vetores adicionais necessários para armazenar dados além dos pontos amostrados. Não está se considerando variáveis simples ou tamanho de programa.

Facilidades de implementação : O julgamento da facilidade de implementação de um método é também altamente subjetivo. A implementação pode depender da familiaridade do implementador com algumas estruturas exigidas pelo método, depende da filosofia de implementação e pode depender, ainda, do ambiente físico disponível para implementação. Porém essas características são difíceis de serem avaliadas. No caso mais geral, pode-se avaliar a facilidade de implementação considerando-se a complexidade

das idéias envolvidas no método e a quantidade de código necessário para implementá-los.

#### 2.3.3.4 MÉTODOS DE INTERPOLAÇÃO

Neste ítem, procurar-se-á definir e descrever alguns métodos de interpolação cujas filosofias podem ser aproveitadas nos diversos problemas relacionados a geração de modelos digitais de superfícies. Muitos dos métodos que serão aqui apresentados não terão uma definição formal das suas características, mas serão tratados de forma a fornecer ao leitor uma compreensão informal do seu funcionamento. Serão destacadas, também, algumas características vantajosas e desvantajosas de cada método a medida que se sentir essas necessidades. É importante salientar que a escolha de um método de interpolação é altamente dependente do tipo de aplicação que utilizará o interpolador.

Propagação : A forma mais simples para se determinar o valor de cota  $z$  não conhecida de um ponto é expandir a área de validade dos pontos amostrados até que ao ponto seja atribuído o valor de cota de um desses pontos. Esta operação expande a coordenada  $z$  de um ponto amostrado para os limites de um polígono que define a área de influência desse ponto. Um procedimento para realizar esta expansão começa com uma malha "raster" toda zerada. No passo seguinte todos os pontos amostrados são colocados nessa malha. O procedimento então, verifica, iterativamente para

todo ponto da malha ocupado, se os vizinhos estão ou não ocupados por um valor  $z=0$ . Em caso afirmativo o ponto se expande para o vizinho. A forma final da malha depende do tipo de varredura (por linha ou por coluna) feito sobre a mesma durante as iterações.

A propagação produz superfícies que são funções "degraus". Se se deseja uma superfície contínua, a propagação pode ser o primeiro passo para posterior complementação com, por exemplo, um interpolador de média local. A Figura 2.5 ilustra o método de interpolação por propagação.

Z1	Ø	Ø	Ø	Ø	Ø	Z1	Z1	Z2	Z2	Z2	Ø	Z1	Z1	Z2	Z2	Z2	Z2	Z1	Z1	Z2	Z2	Z2	Z2
Ø	Ø	Ø	Z2	Ø	Ø	Z1	Z1	Z2	Z2	Z2	Ø	Z1	Z1	Z2	Z2	Z2	Z2	Z1	Z1	Z2	Z2	Z2	Z2
Ø	Ø	Ø	Ø	Ø	Ø	Z3	Z3	Z2	Z2	Z2	Ø	Z3	Z3	Z2	Z2	Z2	Z2	Z3	Z3	Z2	Z2	Z2	Z2
Ø	Z3	Ø	Ø	Ø	Ø	Z3	Z3	Z3	Ø	Ø	Ø	Z3	Z3	Z3	Z2	Z2	Z2	Z3	Z3	Z3	Z2	Z2	Z2
Ø	Ø	Ø	Ø	Ø	Ø	Z3	Z3	Z3	Ø	Ø	Ø	Z3	Z3	Z3	Z3	Ø	Ø	Z3	Z3	Z3	Z3	Z2	Z2

Fig. 2.5 - Interpolação pelo método da propagação

Média Local : A interpolação por média local consiste em se atribuir um valor de cota  $z$ , para um ponto não conhecido, igual a média dos valores de cota dos pontos amostrados que pertencem a uma vizinhança predeterminada. Assim, seja  $n$  o número de pontos amostrados pertencentes a vizinhança de um ponto  $(x,y)$  qualquer, de cota desconhecida, então a função interpolante por média local é definida por :

$$f(x,y) = \left( \sum_{i=0}^n z_i \right) / n \quad (2.1)$$

onde :  $f(x,y)$  : função interpolante ;

$S$  simboliza uma somatoria ;

$z_i$  : valor de cota  $i$ -ésimo vizinho de  $(x,y)$ .

$i$

A vizinhança pode ser delimitada por um raio de influência definido em torno do ponto interpolado ou por uma quantidade de vizinhos mais próximos a esse ponto. A questão principal relacionada a esse método de interpolação é a determinação de quão largo deve ser o raio de influência ou a vizinhança em torno do ponto.

O raio de influência pode ser definido : empiricamente através de uma análise crítica da distribuição dos pontos amostrados; ou automaticamente de acordo com algum critério. Dentre os critérios existentes

pode-se destacar aquele que considera a distribuição das densidades de pontos sobre o espaço de definição dos pontos amostrados. Segundo esse critério o raio de influência R deve ser calculado por:

$$R = \left( \frac{7A}{\pi \cdot N} \right)^{1/2} \quad (2.2)$$

sendo: R : raio de influência de tal modo que, em média, sete pontos caem dentro do círculo definido por esse raio.

A : área do menor polígono inscrito nos dados.

$\pi = 3.1415927\dots$

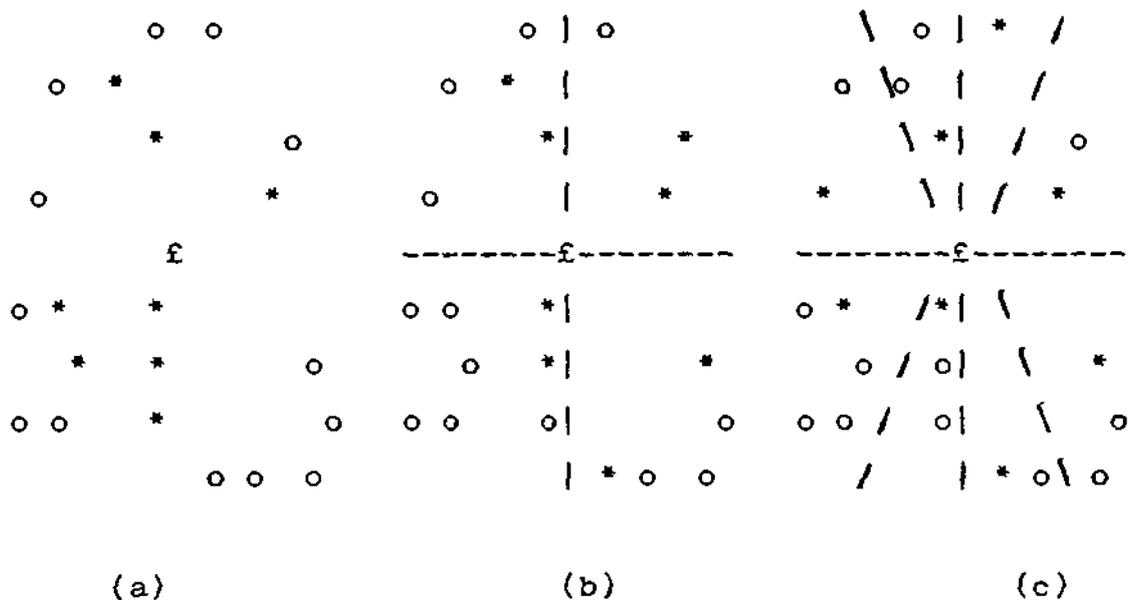
N : número total de pontos.

Outro método para determinação automática do raio de influência considera a correlação espacial dos pontos amostrados. Esse método atribui ao raio de influência o valor da amplitude definida sobre o variograma dos dados. A amplitude é a distância que define a vizinhança dentro da qual os pontos devem ser considerados vizinhos (Yamamoto, 1986).

O critério da vizinhança mais próxima deve ser usado quando (Yamamoto, 1986):

- se tem uma distribuição aproximadamente aleatória dos pontos amostrados;
- não se necessita de uma precisão muito grande, sendo suficiente uma aproximação da superfície no ponto interpolado.

A escolha do número pontos amostrados que comporão a vizinhança do ponto interpolado pode ser feita considerando-se ou não a posição dos pontos amostrados no espaço. Neste caso todos os n pontos mais próximos ao ponto interpolado são considerados na interpolação. Naquele caso, considera-se apenas uma determinada quantidade de pontos mais próximos para cada quadrante ou octante do espaço. A Figura 2.6 ilustra essas possibilidades.



f : ponto interpolado  
 \* : ponto amostrado considerado na interpolação  
 o : ponto amostrado não considerado na interpolação

Fig. 2.6 - Distribuição dos vizinhos mais próximos.

(a) 8 vizinhos mais próximos.

(b) 2 vizinhos mais próximos por quadrante.

(c) 1 vizinho mais próximo por octante.

Média local ponderada : A interpolação por média local ponderada é uma extensão da média local. A diferença é que na primeira atribuem-se pesos variados para cada ponto amostrado pertencente a vizinhança de interpolação. Portanto, considerando-se os  $n$  pontos amostrados da vizinhança de um ponto  $(x,y)$ , qualquer, a ser interpolado temos:

$$f(x,y) = \left( \sum_{i=0}^n w(x,y) \cdot z_i \right) / \sum_{i=0}^n w(x,y) \quad (2.3)$$

onde :  $f(x,y)$  : função interpolante ;  
 $S$  simboliza uma somatória ;  
 $w(x,y)$  : função de ponderação;  
 $z_i$  : valor de cota  $i$ -ésimo vizinho de  $(x,y)$ .  
 $i$

A função de ponderação mais frequentemente usada é:

$$w_i(x,y) = (1/d_i)^u \quad (2.4)$$

onde :  $d$  = distância euclidiana do ponto interpolante  
ao vizinho  $i$ , ou seja:

$$d = \left( (x-x_1)^2 + (y-y_1)^2 \right)^{1/2} ; \quad (2.5)$$

$u$  = expoente da função de ponderação.

Outras funções de ponderação podem ser usadas, tais como funções que variam exponencialmente com a distância euclidiana elevada a um expoente de ponderação:

$$w(x,y) = e^{-a * d^u} \quad (2.6)$$

onde :  $a$  = inverso da média aritmética das distâncias entre os pontos da vizinhança e o ponto interpolado.

$$a = \left( \sum_{i=1}^n d_i \right) / n \quad (2.7)$$

As mesmas considerações sobre a vizinhança do ponto interpolado feitas para o interpolador de média local valem também para o interpolador de média local ponderada. Para ser mais rigoroso dever-se-ia considerar o interpolador de média local um caso particular do ponderado quando a função de ponderação é constante e igual a 1.

Aproximação polinomial : A aproximação polinomial assume um pressuposto que é bastante frequente entre algoritmos de interpolação de superfícies: a superfície é sempre mais suave do que sugerida pela variação dos pontos amostrados (Peucker, 1980). Assume-se que os pontos de controle incluem medidas com erros na dimensão z. Já que a distribuição dos erros não é conhecida, emprega-se uma aproximação que minimize a soma dos desvios, ou resíduos, da nova superfície. O resíduo é definido como a diferença entre função computada no ponto  $(x_i, y_i)$ ,  $f(x_i, y_i)$ , e o valor amostrado  $z_i$  nesse mesmo ponto.

A minimização do erro de aproximação pode ser feito usando-se um dos critérios seguintes:

- minimização da soma dos quadrados dos resíduos (aproximação por mínimos quadrados), ou seja:

$$\min \left( \sum_{i=1}^n (f(x_i, y_i) - z_i)^2 \right); \quad (2.8)$$

- minimização da soma dos resíduos absolutos, ou seja:

$$\min \left( \sum_{i=1}^n |f(x_i, y_i) - z_i| \right); \quad (2.9)$$

- minimização do maior resíduo absoluto (aproximação de Tchebycheff), ou seja:

$$\min ( \max ( f(x_i, y_i) - z_i ) ) . \quad (2.10)$$

O primeiro método é o mais simples numericamente e portanto é o método mais frequentemente usado. Porém a superfície tende a apresentar grandes erros em áreas em que os pontos amostrados estão muito espaçados. O segundo evita esse tipo de defeito, mas tem, até então, sido implementado fazendo-se uso de programação linear, que é uma técnica muito custosa considerando-se a grande quantidade de pontos de controle e pontos da grade. A aproximação de Tchebycheff é usada para definir uma função matemática com um resíduo máximo dado. Ela tem sido usada em áreas de Modelos Digitais de Terreno para seleção adaptiva de pontos c/ triangulação (Peucker, 1980).

Usualmente utilizam-se polinômios bivariados para descrever aproximadamente o comportamento de uma superfície. A fórmula geral desses polinômios é:

$$f(x,y) = \sum_{i=0}^m \sum_{j=0}^{m-i} c_{ij} * x^i y^j \quad (2.11)$$

onde:

- $f(x,y)$  : função polinomial;
- $m$  : grau do polinômio;
- $c_{ij}$  : coeficientes do polinômio;
- $x,y$  : variáveis independentes

A determinação dos coeficientes do polinômio é feita através da resolução de um sistema de equações lineares, que satisfaz um dos critérios de ajuste, ou de aproximação, definidos anteriormente.

Seja  $Q$  a função que define a soma dos quadrados dos resíduos e  $f(x_i, y_i)$  uma função polinomial bivariada do segundo grau. Então:

$$Q = \left( \sum_{i=1}^n (f(x_i, y_i) - z_i)^2 \right); \quad (2.12)$$

e

$$f(x, y) = C_{00} + C_{10}x + C_{01}y + C_{11}xy + C_{20}x^2 + C_{02}y^2 \quad (2.13)$$

A condição que garante a minimização da função  $Q$  é dada por:

$$\frac{dQ}{dC_{00}} = 0, \quad \frac{dQ}{dC_{10}} = 0, \quad \dots \quad \frac{dQ}{dC_{02}} = 0. \quad (2.14)$$



Utilizando-se, por exemplo, o método de eliminação de Gauss, determinam-se os coeficientes do vetor C e a expressão do polinômio que melhor ajusta o conjunto de pontos  $(x_i, y_i)$ ,  $i=1, \dots, n$ , dado.

Uma possível variação deste método é a consideração de uma função de ponderação w na elaboração da função resíduo. Para a função de ponderação valem as considerações feitas no interpolador por média local ponderada. Neste caso, a função que define a soma dos quadrados dos resíduos terá a seguinte formulação :

$$Q = \sum_{i=1}^n (f(x_i, y_i) - z_i)^2 * w(x_i, y_i) \quad (2.15)$$

Interpolação por autocorrelação : Este tipo de interpolador é uma variação da ponderação por distância que usa o "comportamento típico de declive" da superfície (Peucker, 1980). Essa função de comportamento - derivada tipicamente de uma transformação em frequência da superfície - é conhecida em diferentes disciplinas como função de autocorrelação, função de covariância ou variograma e as técnicas são chamadas interpolação por autocorrelação, colocação e krigagem, respectivamente. A interpolação é geralmente feita por aproximação por mínimos quadrados, usando a função de comportamento como peso.

A Krigagem é um método estatístico de estimação baseado nos conceitos de variáveis

regionalizadas, que usa as informações dos pontos vizinhos, considerando não somente os valores de cota dos pontos amostrados, mas também, a posição relativa dos mesmos.

A krigagem é usada para estimar o valor de cota  $z = f(x,y)$ , a partir dos  $n$  pontos amostrados  $f(x_i, y_i)$ ,  $i=1 \dots n$ , vizinhos ao ponto  $(x,y)$  a ser interpolado. O estimador  $f^*(x,y)$  é calculado como uma combinação linear dos  $n$  pontos vizinhos conforme a equação abaixo:

$$f^*(x,y) = \sum_{i=1}^n l_i \cdot f(x_i, y_i) \quad (2.16)$$

O objetivo da krigagem é obter os ponderadores  $(l_1, l_2, l_3 \dots l_n)$  sujeitos a condição de não enviesamento, que minimizam a variância de estimação  $\sigma_E^2$ , ou seja:

$$E(f(x,y) - f^*(x,y)) = 0 \quad \rightarrow \quad \sum_{i=1}^n l_i = 1 \quad (2.17)$$

e

$$P = E((f(x,y) - f^*(x,y))^2) \text{ deve ser mínima} \quad (2.18)$$

Yamamoto(1986), apresenta o desenvolvimento completo das formulações acima.

Interpoladores do tipo "Splines" : As funções do tipo "Splines", ao invés de minimizarem uma função de resíduos, minimizam a curvatura da superfície (Peucker,1980). Essas funções são construídas como uma soma de termos e são parametricamente definidas como mostram as equações abaixo para o caso unidimensional.

$$f_x(u) = \sum_{i=1}^n x_i B_i(u) \quad (2.19)$$

$$f_y(u) = \sum_{i=1}^n y_i B_i(u) \quad (2.20)$$

$$f_z(u) = \sum_{i=1}^n z_i B_i(u) \quad (2.21)$$

A função  $B_i(u)$  é chamada função de mistura e tem a propriedade de definição de quanto o  $i$ -ésimo ponto amostrado afeta a posição da curva interpoladora. Se , para algum valor de  $i$ ,  $B_i(u)=1$  e para todo  $j \neq i$ ,  $B_j(u)=0$  , diz-se então que o  $i$ -ésimo ponto amostrado tem um controle completo da curva , e a curva passará pelo ponto  $i$ . Caso não haja controle completo dos pontos amostrados sobre a

curva, esta tenderá a aproximar-se dos pontos amostrados. A Figura 2.7 ilustra estes conceitos.



Fig. 2.7 - Controle dos pontos amostrados sobre a curva.

(a) Controle total

(b) Controle apenas dos pontos extremos

Dentre as funções que procuram minimizar a curvatura da superfície podemos citar as funções: "Spline" pura, "B-spline", "Nu-Spline", etc..., e as funções de Bezier e Coons.

Esses tipos de funções interpolantes são usadas quase que exclusivamente em sistemas de auxílio a projeto e produção, conhecidos por CAD-CAM. Estes tem grande utilização nas indústrias aeronáutica, automobilística, naval, etc..., para geração de curvas e

superfícies que simulam carrocerias de automóveis, carenagens, cabines de avião, etc...

Para modelos digitais de terrenos esse tipo de interpolador é pouco utilizado, pois uma suavização excessiva pode levar a superfícies que não representam a realidade do terreno. Apesar disso, as "splines" bicúbicas tem sido consideradas as mais apropriadas teoricamente e as mais usadas na prática (Peucker,1980).

Interpolação para elementos de superfície : Em geral, a complexidade das superfícies tende a crescer com o seu tamanho. Com isso, os algoritmos de interpolação, que tentam aproximar a superfície como um todo, crescem em complexidade para superfícies maiores, exigindo esforço computacional cada vez maior. Uma alternativa é particionar a superfície em elementos de superfície, ou células. Para cada célula pode-se definir funções que aproximam a superfície localmente. Essas funções são de menor ordem do que a função necessária para definir toda a superfície e portanto mais simples de serem definidas e utilizadas. O problema principal desta partição é garantir um determinado grau de continuidade entre as superfícies definidas para células vizinhas.

Dentro desse contexto, Akima(1974), propôs um método que define uma superfície polinomial bicúbica para cada elemento de uma superfície. Um polinômio bicúbico tem a seguinte fórmula:

$$f(x,y) = \sum_{i=0}^3 \sum_{j=0}^3 S_{ij} x^i y^j \quad (2.22)$$

Esse polinômio é aplicado a uma área retangular no plano  $xy$  limitado por quatro linhas retas  $x=x_i$ ,  $x=x_{i+1}$ ,  $y=y_j$ ,  $y=y_{j+1}$ . Cada polinômio é determinado pelos valores da função  $z(x,y)$  e das derivadas parciais  $z_x = dz/dx$ ,  $z_y = dz/dy$  e  $z_{xy} = d^2z/dxdy$  nos quatro pontos vértices do retângulo. Essas derivadas são determinadas localmente para cada ponto vertice da célula. Para isso são utilizadas as coordenadas de 13 pontos, com o ponto vértice ao centro, dois pontos de cada lado nas direções  $x$  e  $y$  e um ponto em cada direção diagonal. Quando a interpolação é feita em pontos nas, ou próximos das, bordas da grade retangular, são estimados alguns valores de cota para os pontos que se situarem fora da grade. Essa estimativa é baseada em três pontos conhecidos na direção  $x$  ou  $y$ , no ponto da borda e dois pontos adjacentes conhecidos. Uma aproximação para o cálculo das derivadas de primeira e segunda ordem, requeridas pelo método podem ser encontradas em Akima(1974).

Segundo o autor, a superfície resultante desse método é invariante em relação a uma transformação linear de escala do sistema de coordenadas. O método requer apenas procedimentos diretos, sem soluções iterativas de equações com erros de tolerância preestabelecidos e não existem problemas de estabilidade ou convergência computacional na aplicação desse método. A superfície

resultante é suave não apenas nos pontos da grade mas também ao longo dos segmentos que formam os retângulos.

Um outro método muito utilizado calcula uma superfície bilinear para cada elemento da superfície. Uma superfície bilinear tem a seguinte formulação:

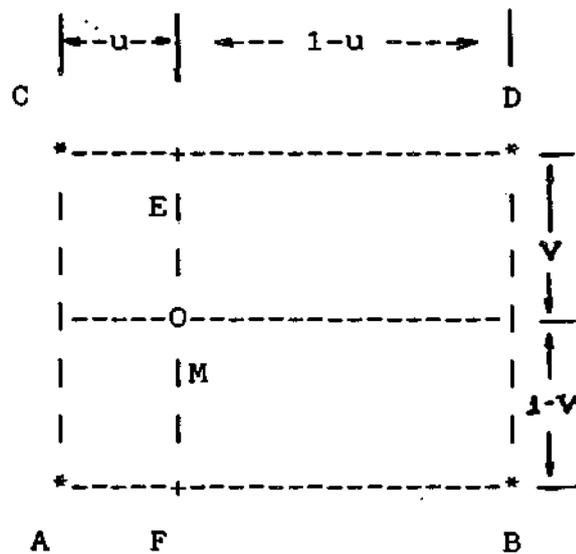
$$f(x,y) = \sum_{i=0}^1 \sum_{j=0}^1 S_{ij} x y \quad (2.23)$$

Para se calcular a superfície bilinear para uma célula da grade pode-se aproveitar as características de ordenação das posições dos elementos da célula e otimizar o procedimento que implementa esse interpolador. Assim, considere uma célula da grade formada pelos pontos vertices A, B, C e D, como mostra a Figura 2.8, e seja  $M = f(u,v)$ ,  $(u,v)$  em  $(0,1)$ , um ponto genérico situado no interior da célula.

Nesse esquema, a interpolação bilinear sobre a célula ABCD pode ser realizada pela seguinte sequência: inicialmente, interpola-se linearmente os pontos E e F a partir dos pontos C e D, e A e B, respectivamente; por último interpola-se o ponto M linearmente a partir dos pontos E e F. Assim, o valor de cota  $z_M$  calculada no ponto M é:

$$z_M = z_E (1-v) + z_F v =$$

$$\begin{aligned}
 &= (z_C * (1-u) + z_D * u) * (1-v) + (z_A * (1-u) + z_B * u) * v \\
 &= v * (u * z_B + (1-u) * z_A) + (1-v) * (u * z_D + (1-u) * z_C) \quad (2.24)
 \end{aligned}$$



2

$(u,v)$  em  $(0,1)$  .

Fig. 2.8 - Interpolação bilinear numa célula retangular

Este método é simples de implementar e muito rápido computacionalmente. Sua maior desvantagem é a produção de superfícies que tem continuidade apenas de grau 0 com as superfícies das células vizinhas. Portanto deve

ser usado quando não se precisa de uma aparência suave da superfície, ou quando a própria superfície apresenta alto grau de rugosidade.

#### 2.3.4 GERAÇÃO DOS MODELOS DE GRADES POLIGONAIS

Como já visto, os dados de MDT são usualmente adquiridos segundo uma distribuição irregular no plano xy, ou seja, não existem relações topológicas definidas entre as posições dos pontos amostrados. Porém a maioria das aplicações de MDT são desenvolvidas sobre dados no formato de grade poligonal triangular ou retangular. Esses formatos simplificam a implementação dos algoritmos de aplicação e os tornam mais rápido computacionalmente.

As grades poligonais podem ser classificadas, segundo a distribuição de seus pontos, em : grades regulares e grades irregulares. As grades regulares caracterizam-se por possuírem todos os polígonos da grade iguais. Isto é o mesmo que dizer que existe uma regularidade na distribuição dos pontos que formam a grade. Nas grades irregulares todos os polígonos da grade são do mesmo tipo, ou seja, possuem o mesmo número de lados, mas não são todos iguais. Nos itens seguintes as grades regulares e irregulares serão estudadas um pouco mais detalhadamente.

#### 2.3.4.1 GRADES REGULARES

Uma grade regular pode ser definida como um modelo digital que aproxima superfícies através de um poliedro de faces regulares(Pettinati,1983). Os vértices desses poliedros podem ser os próprios pontos amostrados caso estes tenham sido adquiridos nas mesmas localizações xy que definem a grade desejada. Porém, isto raramente ocorre. Quando os pontos amostrados não estão localizados sobre os pontos da grade regular, uma interpolação é necessária para se estimar os valores de cotas nesses pontos. Qualquer um dos interpoladores apresentados no item 2.3.3.4 pode ser usado para realizar essa tarefa. Os interpoladores que aproximam elementos de superfície são frequentemente usados na tarefa de refinamento da grade. O refinamento consiste na interpolação dos dados de uma grade já existente com o objetivo de densificar essa grade. Na prática, os sistemas de MDT, utilizam um interpolador mais caro computacionalmente para gerar uma grade grossa. Em seguida utiliza-se um interpolador mais simples e rápido para refinar essa grade.

A grade regular mais usada é a retangular por ser simples sua manipulação por algoritmos de aplicação e por apresentarem resultados qualitativos superiores para aplicações de visualização em perspectiva do modelo, por exemplo.

#### 2.3.4.2 GRADES IRREGULARES

As grades irregulares são geradas a partir dos próprios pontos amostrados sem a necessidade de qualquer tipo de interpolação sobre os mesmos. A grade irregular mais utilizada é aquela cujos polígonos são triângulos e o processo de modelar uma superfície através de poliedros de faces triangulares é conhecido como triangulação. Os vértices dos triângulos de uma grade irregular triangular são os pontos amostrados na fase de aquisição dos dados.

Os pontos amostrados pertencentes a triangulação dividem-se em duas classes distintas : pontos interiores, que são aqueles totalmente rodeados por triângulos, e pontos exteriores, que são rodeados apenas parcialmente. Os pontos exteriores estão sempre unidos dois a dois formando a região de interesse, descrita no item 2.3.3.2, no qual a modelagem será efetuada. Após a delimitação da região de interesse deve-se unir os pontos amostrados dois a dois para formar os triângulos da grade.

A união dos pontos amostrados para gerar a triangulação não é única e nem todas as triangulações são boas para a modelagem de uma superfície. Como o comportamento da superfície em um ponto depende do comportamento em pontos vizinhos, deve-se escolher uma triangulação na qual os segmentos unindo os diversos pontos amostrados não sejam excessivamente longos e finos. A triangulação de Delaunay é a única que satisfaz essa

exigência( Pettinati,1983). Este autor define a triangulação de Delaunay, apresenta um método de geração dessa triangulação e gera um modelo de grade regular retangular a partir da grade triangular. O valor de cota de cada ponto da grade retangular é obtido pela sequência : 1. descobre-se a qual triângulo pertence o ponto da grade em questão; 2. determina-se uma função polinomial que aproxima a superfície dentro desse triângulo; 3. calcula-se o valor de cota no ponto da grade pela função definida no item anterior.

#### 2.3.5 CONVERSÃO DE FORMATO

A conversão de formato compreende a transformação, dos dados ou produtos de modelos digitais de terreno, de um formato para outro. Assim pode-se definir transformações do formato de contornos para perfis ou vice-versa, do formato de perfis para grades regularmente espaçadas ou vice-versa, do formato de grades para o de contornos ou vice-versa, etc.... A maioria dos sistemas que tratam de modelos digitais de terreno fornecem programas que executam essas tarefas. Em geral a conversão de formato é feita utilizando-se alguns dos métodos de interpolação discutidos no item 2.3.3.4 anteriormente.

Para dados obtidos por dispositivos de varredura é usualmente necessário transformá-los para dados lineares por um processo de vetorização.

## 2.4 GERENCIAMENTO

### 2.4.1 INTRODUÇÃO

Uma das principais características dos sistemas de Modelagem Digital de Terreno é o grande volume de dados envolvidos nas diversas fases de processamento do sistema (Aquisição, Preprocessamento e Aplicações). Além disso, para que sejam utilizáveis, os dados devem carregar algumas informações adicionais que facilitam sua identificação por parte dos algoritmos de manipulação dos mesmos. Esse conjunto de informações adicionais deve ser completo, no sentido de ter todas as informações, mas não redundantes sob pena de se aumentar muito o volume total de informações. Grandes volumes de dados exigem utilização de grande quantidade de memória e rapidez no processamento dos dados. Em microcomputadores onde se tem limitação de velocidade do processador e de memória principal isto passa a ser um problema sério, sob risco de se ter um sistema extremamente ineficiente.

Em resumo, os dados de MDT devem ser organizados em estruturas e carregar informações colaterais, suficientes para que eles possam ser identificados, armazenados e recuperados de maneira eficiente.

Em muitos casos, os dados de MDT precisam ser trocados entre organizações diferentes. Por isso, o ideal

seria que existisse um padrão de armazenamento de dados MDT que fosse utilizado por todas as organizações que adquirem e processam esse tipo de dado. Isto, porém, não ocorre. Na prática cada organização tem desenvolvido seus próprios formatos de acordo com suas necessidades. Isto pode ser perigoso, na medida que os processos de manipulação dos dados estão intimamente relacionados com as estruturas de armazenamento. Sempre que se precisar utilizar dados de outras organizações deverá existir um processo de transformação de um formato em outro, o que nem sempre é possível. O formato de uma estrutura de armazenamento de uma organização pode não ter uma ou mais informações que seriam importantes para outras organizações e vice-versa.

Peucker (1980), discute e compara as diferentes estruturas de dados que são aplicadas no armazenamento e visualização das superfícies topográficas. Esses tipos de estruturas são discutidos em relação a sua precisão de representação da superfície, requisito de armazenamento e complexidade temporal, ou seja, tempo de computação para manipulação dos dados. A ênfase é dada para a discussão das diferenças conceituais.

Segundo esse autor as estruturas de dados de MDT são classificadas, com base na razão geométrica, em:

1. estruturas de pontos e redes;
2. estruturas de linhas, e
3. estruturas de célula;

Estas estruturas serão descritas nos itens posteriores.

Um segundo tipo de classificação das estruturas de dados de MDT é baseado na distribuição espacial dos elementos. A diferença principal, neste caso, é entre as distribuições REGULAR e IRREGULAR.

#### 2.4.2 ESTRUTURAS DE PONTOS E REDES

##### \$\$\$6.4.6.1 DISTRIBUIÇÃO REGULAR

A estrutura de dados mais frequentemente usada é a de grade regular. A vantagem desta distribuição é a definição implícita simples das relações topológicas. A grade de ponto é visualizada como uma matriz na qual cada ponto pode ser atribuído a uma linha e uma coluna. Assim os elementos das linhas e colunas vizinhas podem ser encontrados com pouco esforço computacional. Uma outra vantagem da grade regular é a declaração implícita das coordenadas  $x$  e  $y$ , e dos espaçamentos horizontal, deltax, e vertical, deltay, entre os pontos da grade vizinhos por linha e por coluna respectivamente.

Outra forma de definição de estrutura regular é a de grade triangular que teoricamente seria capaz de

anular algumas desvantagens da grade retangular. Apesar disso a estrutura regular triangular é pouco usada.

Uma desvantagem da distribuição em grade regular é a ênfase dada nas direções ao longo dos eixos da rede. A maior desvantagem é a inviabilidade dessas distribuições de se adaptarem as mudanças de rugosidade do terreno. A largura da malha deve ser adaptada a área de maior variação local do relevo e é redundante em áreas com menores frequências de mudanças.

Um método para reduzir a redundância das redes regulares sem perda da regularidade e da facilidade de programação sugere iniciar-se com uma grade grossa e, onde for necessário, densificar a grade por um fator de 2. Porém este método ainda não é muito utilizado.

Outro método procura densificar a grade nas regiões onde a diferença entre o valor de cota de um ponto da região estimado por (pelo interpolador usado) e o valor real da cota fica abaixo de um certo limiar. Assim os pontos são armazenados somente com a densidade local que é necessária para a representação da variação da inclinação do terreno. Esses métodos de densificação local são limitados as etapas de entrada e armazenamento. Essas variações retornam a grade regular, através de uma interpolação relativamente rápida para a malha mais densa, tão logo a grade deva ser usada para qualquer computação.

#### 2.4.2.2 DISTRIBUIÇÃO IRREGULAR

Uma distribuição irregular de pontos não possui relações topológicas implícitas. Para conseguir essas relações topológicas pode-se ou transformar a grade em outra estrutura com relações topológicas implícitas, por exemplo, em grade regular, ou adicionar as relações explicitamente, ou, ainda, determiná-las durante uma varredura.

A forma mais frequente de se adicionar relações explicitamente é conhecida por triangulação, como definida no item 2.3.3.5. As relações podem ser determinadas armazenando os triângulos ou as bordas dos triângulos resultantes.

O armazenamento das bordas dos triângulos tem algumas vantagens. Os nomes, "labels", de cada vizinho são armazenados com as coordenadas de um ponto. A ordem dos pontos é no sentido horário de tal forma que um triângulo é identificado por um ponto, o ponto de referência, e um vizinho. O terceiro ponto é dado implicitamente como o próximo vizinho na lista de vizinhança.

Embora as computações sobre redes triangulares irregulares sejam mais vagarosas que para grades regulares,

o tempo total de computação tende a ser uma fração comparada com a formação dessas grades, devido ao menor número de pontos necessários para a representação triangular da superfície.

A forma física das estruturas triangulares varia significativamente. Um método que ocupa o mínimo de espaço armazena, além do vetor de pontos, as bordas da grade triangular só uma vez. Assim todos os triângulos podem ser recuperados sem ambiguidade (usa ponteiro). Outro método também tem um vetor de coordenadas e um arquivo de ponteiros que armazena para todo ponto todas as bordas originadas naquele ponto. Neste método necessita-se apenas de buscas locais para construção dos triângulos. Outra forma de estrutura armazena todos os pontos  $(x,y,z)$  em um arquivo e, em outro arquivo, armazena ponteiros para os pontos dos vértices de cada triângulo e para os seus três triângulos vizinhos. Esta estrutura permite acesso direto aos triângulos individualmente. Outra forma alternativa consiste em montar uma estrutura de armazenamento de todos os triângulos guardando os seus vértices. Isto, porém, causa o armazenamento de cada ponto numa média de seis vezes. Aqui, é possível, ainda, além dos vértices de cada triângulo, adicionar-se ponteiros para os três vizinhos.

Existem alguns métodos que partem da estrutura irregular dos pontos amostrados e criam as relações topológicas durante o 'voo' sobre os dados. Isto pode ser feito, por exemplo, partindo-se de uma linha vertical na

bor da esquerda do mapa e avançando-se para a direita, conservando um número de pontos na memória. Durante esse movimento esse método triangulariza os pontos e calcula e plota todos os contornos desejados.

### 2.4.3 ESTRUTURAS DE LINHAS

As estruturas de linhas são similares a estruturas de pontos, uma vez que elas são definidas por uma série de pontos. Embora seja possível construir linhas por funções, ou grupos de funções matemáticas, o gasto é muito grande para tornar tal sistema viável para Modelos Digitais de Terreno. A diferença entre essas estruturas de pontos e de linhas não reside nos tipos de unidades de armazenamento, mas na organização de armazenagem. Primeiramente, as estruturas de linhas tem em comum que pontos subsequentes são ligados por linhas retas que podem ser linearmente interpolados em intervalos arbitrários. Somente no estágio de visualização os segmentos de reta serão suavizados para uma aparência mais agradável. As estruturas de linhas podem ser irregulares, em relação ao sistema de coordenadas, não necessariamente em relação a estrutura da superfície, ou regulares onde pelo menos uma coordenada é conservada constante ou incrementada em intervalos regulares.

As linhas de contornos geralmente são mostradas por digitalizadores automáticos. A quantidade de

características representadas pelas linhas de contorno é grande. Elas podem representar características de temperatura, pressão, elevação, etc.... Porém, qualquer que seja a característica, as estruturas de dados e os processos de manipulação dessas estruturas são os mesmos. Um sistema de linhas de contorno tem a vantagem de a densidade de contorno mudar com as dinâmicas da superfície. Isto conserva baixo o volume de dados redundantes, embora a densidade de pontos ao longo dos contornos seja, geralmente, alta. A maior desvantagem das estruturas de linhas é a perda de eficiência em relação a manipulação de dados. A razão é a forma relativamente complicada para se estabelecer relações topológicas entre os pontos.

Numa comparação das grades regulares de pontos com os sistemas de contorno pode-se dizer que o primeiro é mais eficiente para manipulação de dados, enquanto o segundo necessita menos espaço para armazenamento de dados. A manipulação de linhas é mais eficiente apenas na tarefa de replotagem das linhas.

Além de contornos, as linhas podem representar superfícies ao longo de perfis que tem pontos somente em falhas do terreno. Essas linhas são conceitualmente similares aos contornos, com a diferença de serem substancialmente menores porque eles são usados somente para propósitos computacionais e não para representação gráfica da superfície. Esses conjuntos são interpolados para grades regulares sempre que devam ser usados.

#### 2.4.4 ESTRUTURAS CELULARES

As superfícies podem ser representadas por funções matemáticas. As funções que conseguem representar toda a superfície são chamadas funções globais. Por outro lado, as superfícies podem ser particionadas e definidas por um conjunto de funções matemáticas, cada uma representando localmente a superfície. Neste caso, as funções locais são definidas para elementos de superfície, ou células, que representam as unidades de partição da superfície. Os elementos de superfície são polígonos, regulares ou não, mas usualmente convexos. As funções locais devem ter alta suavidade ou seja, devem ser matematicamente derivável de ordem maior ou igual a 2, para garantirem alto grau de continuidade entre as funções que aproximam células adjacentes. Essa suavidade é comumente requerida em projetos industriais, mas não necessária, e muitas vezes até indesejável, para trabalhos em cartografia. Uma discussão mais detalhada dos conceitos de funções globais e locais é feita no item 2.3.3.1.

Em aplicações cartográficas, é muito frequente a utilização de funções matemáticas locais que realizam aproximações em células regulares retangulares. Para cada célula da superfície, define-se uma função polinomial,

válida para a célula, usando-se os pontos vértices da célula e suas oito vizinhas. A inclusão de funções de ponderação, como apresentadas no item 2.3.3.4, assegura a continuidade das funções para células adjacentes.

Embora esses algoritmos, baseados em células da superfície, sejam inferiores em tempo de computação em relação a outros métodos alternativos, eles apresentam duas vantagens : Primeiro, o sistema parece ser o único que pode manipular as entradas de dados muito ruidosas. Segundo, eles tem indubitavelmente uma elegância matemática. A superioridade reivindicada por este método em termos de armazenamento, ainda não foi sujeita a um teste objetivo.

#### 2.4.5 CONCLUSÃO

Como foi visto, existem muitas formas de armazenar dados topográficos. Muitos sistemas conhecidos usam várias estruturas de dados em etapas diferentes. As maiores mudanças ocorrem entre as etapas de digitalização e armazenamento em sistemas de grande porte, e entre o armazenamento e a manipulação em sistemas menores. As estruturas mais usadas são as irregularmente distribuídas, com pontos não topologicamente conectados, na etapa de entrada, e estruturas regulares retangulares nas etapas de armazenamento e manipulação.

## 2.5 APLICAÇÕES

### 2.5.1 INTRODUÇÃO

As operações matemáticas envolvidas nas aplicações de dados de modelos digitais de terreno podem ser resumidas como (Doyle, 1978):

- Dada uma posição de coordenadas  $(x,y)$ , encontre a cota  $z$  relativa a esse ponto.
- Dada uma matriz de coordenadas  $(x,y,z)$ , defina uma superfície matemática que definirá  $z$  como função de  $(x,y)$ .
- Dados conjuntos de vetores de coordenadas  $(x,y,z)$  a intervalos fixados, interpole para encontrar o valor de  $z$  em qualquer outro valor de  $(x,y)$  desconhecido.
- Determine a intersecção de linhas retas ou linhas curvas com uma superfície matematicamente definida.
- Determine a intersecção dos planos horizontal, vertical ou inclinado com a superfície matematicamente definida.
- Determine o volume entre superfícies definidas.

Nos itens a seguir serão descritas algumas das aplicações mais diretas de modelos digitais de terreno.

### 2.5.2 DETERMINAÇÃO DAS LINHAS DE CONTORNOS

O mapa de contornos, ou mapa de isolinhas, é obtido por interpolação ou por intersecção de planos horizontais com uma superfície. Portanto o mapa de isolinhas é composto por curvas que unem entre si pontos da superfície que tenham um mesmo valor de "cota". Esse valor pode estar associado a diferentes fenômenos dependendo da representatividade da superfície. Assim para uma superfície representando temperaturas obtém-se as isotermas, para pressões atmosféricas, as isóbaras, para alturas de terreno, as curvas de nível, etc....

As isolinhas podem ser visualizadas como sendo a projeção no plano xy das intersecções entre a superfície e uma família de planos horizontais equidistantes como mostra a figura 2.9.

Neste trabalho, utilizar-se-ão somente dados de altura de relevo, porém, o método aqui proposto de geração automática das isolinhas pretende ser suficientemente geral para ser utilizado com outros tipos de dados.

Durante muitos anos, os mapas de isolinhas foram, e ainda são, construídos manualmente a partir de dados de levantamento de terreno ou por restituidores de pares estereoscópicos, um trabalho cansativo e moroso, d

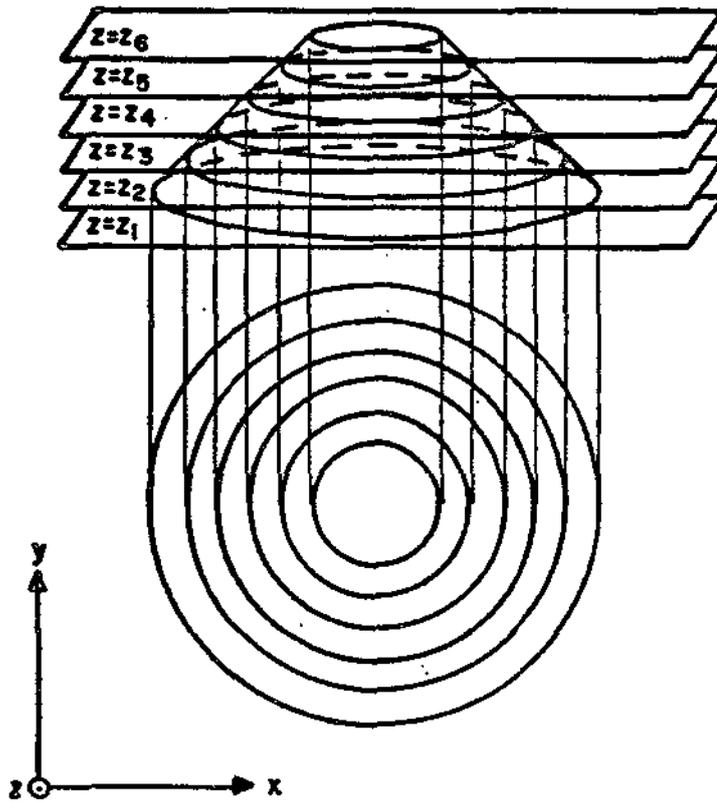


Fig. 2.9 - Representação das isolinhas da superfície

Fonte : Pettinati, 1983.

demandando grande habilidade e paciência dos especialistas. Com o advento dos computadores digitais desenvolveram-se métodos automáticos que geram isolinhas com maior rapidez e precisão. Um dos principais problemas com os contornos digitais é a obtenção de expressão cartográfica adequada particularmente para detalhes como cortes de rodovias e ferrovias, pontes, afluentes, desvios e corregos, etc...

As curvas de isovalores possuem algumas propriedades importantes:

- Todas as curvas são fechadas, a menos que interceptem as fronteiras de definição do mapa;
- As curvas de isovalores jamais se cruzam, isto é garantido pelos métodos de interpolação que aproximam superfícies por funções  $f(x,y)$  em que 2 pontos distintos e de mesma coordenada  $(x,y)$  apresentam obrigatoriamente o mesmo valor da função (Pettinatti 1983), ou seja:

$$(x_i, y_i) = (x_j, y_j), i \neq j \implies f(x_i, y_i) = f(x_j, y_j) \quad (2.25)$$

- O mapa de isolinhas fornece informações de caráter quantitativo. Pode-se efetuar medidas de inclinação e distância e cálculo de áreas e volumes diretamente do mapa de forma rápida e precisa.

O traçado automático das curvas de isovalores pode ser feita diretamente a partir do conjunto de pontos amostrados. Sacha (1982), apresenta um método que utiliza

técnica de interpolação baseada em estatística, e que fornece não só os valores corretos nos pontos amostrados, isto é, passa exatamente sobre esses pontos, como também "leva" a uma função de interpolação que é contínua em todas as suas derivadas e não gera características espúrias em regiões com baixa densidade de dados.

O mapa de isolinhas pode também ser obtido a partir de modelos de grade, triangular ou retangular. Estes são mais frequentemente utilizados, nos diversos sistemas comerciais existentes, por terem uma implementação mais simples e serem mais rápidos na geração das isolinhas. Eles são usados, principalmente, quando a precisão e suavidade das curvas não são fatores preponderantes.

Para modelos de grades, podemos distinguir 2 métodos diferentes de algoritmos para geração das isolinhas.

O primeiro é o método de rastreamento, que consiste numa busca sequencial nas células da grade até encontrar-se o início de uma determinada curva de isovalor. Após isso, a curva é perseguida célula a célula até que se encontre um limite do mapa ou se retorne ao ponto inicial da curva. Isto é realizado para todas as isolinhas desejadas.

O segundo é o método das células, que consiste na determinação de todos os segmentos das curvas de isovalor que atravessam a célula. Neste método percorre-se todas as células apenas uma vez. No final do processo,

todas as curvas de isovalores desejadas estarão determinadas.

Comparando-se os 2 métodos podemos concluir:

- O rastreamento utiliza recursos adicionais de memória para armazenar e gerenciar seu percurso através da grade.
- O rastreamento é mais lento computacionalmente pois cada célula é visitada uma quantidade de vezes igual ao número de curvas de isovalor que a atravessa.
- O traçado de cada isolinha individualmente é mais simples e rápido se as isolinhas tiverem sido obtidas pelo método de rastreamento. No método de células, tem-se somente uma grande quantidade de segmentos que devem ser "ligados" para se obter cada isolinha desejada.

Com qualquer um desses métodos, a obtenção da curva de isovalor, ou de um de seus trechos, é feita em duas etapas bem definidas: cálculo das intersecções da curva com uma célula do modelo, e interpolação da posição da curva dentro desta mesma célula (Pettinatti, 1983). Para essa interpolação deve-se utilizar uma função que aproxime o comportamento da superfície dentro da cada célula. Caso a interpolação seja feita apenas e tão somente usando-se os pontos de intersecção das curvas com as arestas da célula sem qualquer vínculo com a superfície, não é possível

garantir coerência no comportamento conjunto de todas as curvas de isovalor.

A determinação das intersecções com as células do modelo é simples e direta para modelos de grade triangular. Para as células da grade retangular podem ocorrer ambiguidades em alguns casos. A Figura 2.10 mostra os casos ambíguos e as soluções para estes casos. Nessa figura desenho os sinais + e - significam que o valor de cota do ponto é maior ou menor, respectivamente que a cota da isolinha. A solução para esses casos de ambiguidade é obtida pelo cálculo da cota do centro da célula retangular.

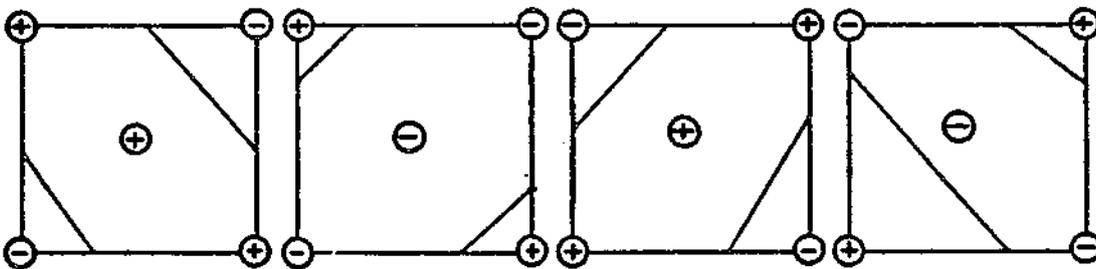


Fig. 2.10 - Casos ambíguos na determinação das isolinhas numa célula retangular

Rom and Bergman (1986), propõem um método de geração do mapa de contornos, a partir de uma grade retangular, que é dividido em duas etapas:

A primeira etapa do processamento é a computação de uma "spline" bi-cúbica representando a superfície do mapa, isto é, constroi-se uma superfície bi-cúbica, que tem a seguinte forma :

$$f(x,y) = \sum_{i=0}^3 \sum_{j=0}^3 A_{i,j} * x^i * y^j \quad (2.27)$$

em cada célula da grade a partir dos valores de cota nos vértices da célula. A suavidade da spline bi-cúbica fornece a suavidade das linhas de contorno construídas.

A segunda etapa consiste da construção das representações paramétricas celulares dos contornos - cada linha de contorno é aproximada e representada por uma sequência de curvas PC (curvas paramétricas cúbicas) que se ligam suavemente. O algoritmo para computar essas curvas baseia-se no fato de que a superfície do mapa esta representada por uma polinomial bi-cúbica, de forma que os pontos das linhas de contorno podem ser computados pela solução da equação de terceiro grau  $f(x,y) = H$ , enquanto mantem-se os valores de  $x$  ou  $y$  constantes. Inicialmente computam-se as coordenadas dos pontos das bordas da célula para uma "cota" especificada  $H$ . Então computa-se a representação cúbica paramétrica dos contornos que aproxima a linha de contorno real.

Segundo os autores a representação paramétrica cúbica das linhas de contornos fornece rápido acesso para especificar informação de contorno local. Essa organização dos dados de contorno permite execução eficiente de operações como: transformações geométricas no mapa, computação de perímetros de contornos áreas, volumes e cálculos complicados de propósito tais como cálculos necessários para projetos de estradas ou tuneis, etc...

Para definir a grade retangular a partir dos pontos amostrados, os autores propõem a utilização de um interpolador de média local ponderada, definido pelas equações (2.3), (2.4) e (2.5). O cálculo dos parâmetros do polinomio bicúbico definido na equação (2.27) pode ser efetuado segundo o método proposto por Akima (1974), que foi apresentado no item 2.3.3.4.

A Figura 2.11 ilustra um exemplo de traçado de contornos por 3 métodos diferentes:

As curvas do mapa de contornos podem sofrer uma serie de melhorias esteticas que visam facilitar a compreensão do comportamento da superfície. Dentre essas melhorias podemos destacar : diferentes espessuras ou cores para diferentes valores de cota, rotulação das curvas com o valor numerico da cota correspondente, etc...

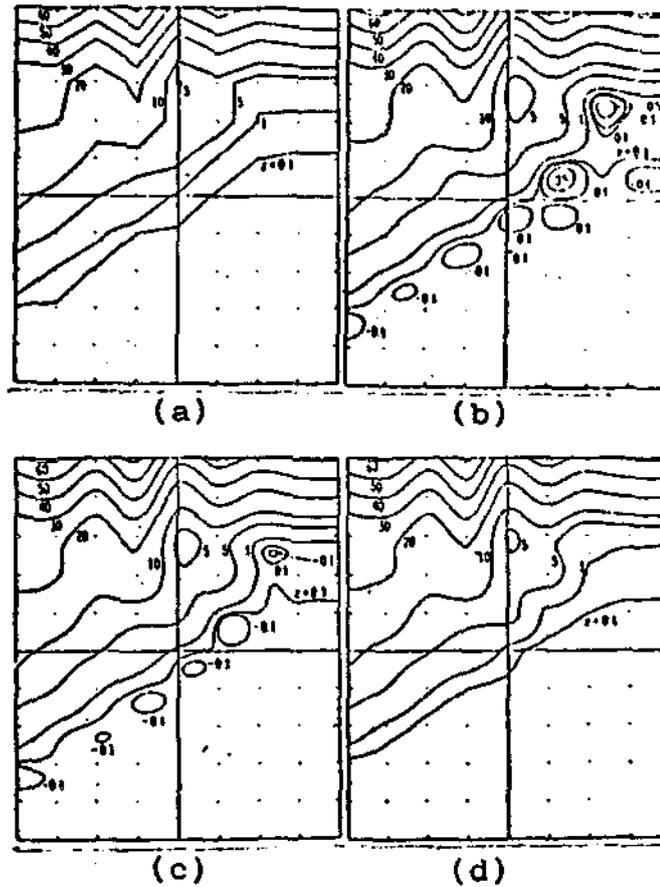


Fig. 2.11 - Mapas de contorno para aproximação de superfícies. (a) Dado original, (b) Interpolação "spline", (c) Interpolação "osculatory", (d) Método Akima.

Fonte: Akima (1974).

### 2.5.3 PROJEÇÕES GEOMÉTRICAS PLANARES

#### 2.5.3.1 CONCEITOS GERAIS

Em geral, as projeções transformam pontos de um sistema de coordenadas n-dimensional para pontos em um

sistema de coordenadas de dimensão menor que  $n$ . Neste trabalho utilizar-se-á apenas projeção do espaço 3-d (tridimensional) para o espaço 2-d (bidimensional). A projeção de um objeto 3-d no espaço 2-d é definida pelos raios de projeção, também chamados projetores, que emanam do centro de projeção e atravessam o plano de projeção.

A classe de projeções assim definida é conhecida como projeção geométrica planar porque a projeção é feita numa superfície planar (plano de projeção) ao invés de uma superfície curva e portanto usa raios projetores retos ao invés de curvos. Existem projeções cartográficas que não são nem planares e nem geométricas (Foley & VanDam, 1982).

As projeções geométricas planares podem ser divididas basicamente em 2 categorias: perspectivas e paralelas. A diferença está na relação entre o centro de projeção e o plano de projeção. Se a distância de um para outro é finita, então a projeção é perspectiva, enquanto se esta for infinita, a projeção é paralela.

A projeção paralela é assim chamada pois os raios projetores são paralelos entre si, uma vez que o centro de projeção está infinitamente distante. Na definição de projeção perspectiva especifica-se o centro de projeção, enquanto para projeção paralela deve-se fornecer a direção de projeção. A projeção perspectiva cria um efeito visual similar aos sistemas fotográficos e visual humano, e é usada quando se deseja maior grau de realismo do objeto projetado.

Vários programas tem sido criados para tratarem exclusivamente com projeções perspectivas e paralelas de superfícies. As técnicas usadas podem ser divididas em 2 categorias principais: aquelas que acompanham o traçado do raio ("ray tracing") e aquelas que usam a geometria projetiva direta ("forward projective geometry").

O "ray tracing" é um método no qual os raios projetores são traçados do centro de projeção, através do plano de projeção e alcançam o objeto real visualizado. Este método realiza um mapeamento do plano bi-dimensional (plano de projeção) para o objeto real que é definido no plano tri-dimensional. Para superfícies definidas não parametricamente, muitos algoritmos baseados em "ray tracing" envolvem uma forma de procedimento de busca pois este mapeamento de bi-dimensional para tri-dimensional não é único (Dubayah and Dozier, 1986).

Superfícies topográficas geralmente não são definidas parametricamente e, portanto, uma busca é quase sempre necessária. O problema aqui é que essa busca é geralmente demorada para grande volume de dados, tornando os algoritmos baseados nas técnicas de "ray tracing" morosos, a menos que sejam implementados em "hardware".

As técnicas que usam a geometria projetiva direta realizam um mapeamento do espaço 3-d do objeto para o espaço 2-d do plano de projeção. O objeto é primeiramente reorientado com base nas transformações geométricas e então projetado no plano de projeção. A maior desvantagem desta

técnica é que para MDT no formato "raster", os níveis de cinza devem ser interpolados no plano de visualização. Isto ocorre pois a transformação projetiva de uma imagem de entrada ("MDT raster") cujos valores são funções de inteiros  $f(l,s)$  produzem uma imagem de saída  $g(x,y)$  em coordenadas de dispositivo "raster", não inteiro. Assim,  $f(l,s)$  é mapeado entre os "pixels" em  $g(x,y)$ , e alguma forma de interpolação de níveis de cinza, ou reamostragem, é necessária para se obter valores de saída em posições inteiras.

Essa reamostragem dos níveis de cinza dispersos pode levar a outro problema conhecido por "aliasing". O efeito de "aliasing" ocorre toda vez que uma imagem possui frequências espaciais maiores que duas vezes a frequência de amostragem da unidade visualizadora. É impossível reconstruir corretamente uma imagem cujos níveis de cinza variam mais rápido que .5 ciclos/"pixel". Frequências mais altas do que esta são sobrepostas sobre as frequências mais baixas e produzem efeitos visuais como bordas com degraus.

Na interpolação dos níveis de cinza, espalhados, para os valores inteiros, da grade de saída, pode-se usar 2 técnicas bastante conhecidas: a técnica do vizinho mais próximo e o método da ponderação pelo inverso da distância. A primeira é mais rápida e resume-se em converter as coordenadas transformadas para "pixels" inteiros, por arredondamento ou truncamento. Porém esta apresenta 2 problemas: múltiplas atribuições para um mesmo "pixel" e, "pixels" sem atribuição alguma (buracos na

imagem de saída). Outro problema dessa técnica é a tendência de produzir imagens "blocadas". O método da ponderação pela distância reduz o efeito dos buracos e é capaz de produzir imagens mais suaves. Porém o método não é capaz de garantir a não presença desses buracos e é um método mais vagaroso computacionalmente. Esse método exige o acúmulo, em cada "pixel" da imagem de saída, das cotas dos pontos vizinhos ponderados pelo inverso de suas distâncias ao pixel. No final do processo, o valor de cota do pixel é dividido pela soma dos inversos das distâncias ao pixel. A Figura 2.12 (a) ilustra a influência de um ponto nos quatro "pixels" vizinhos.

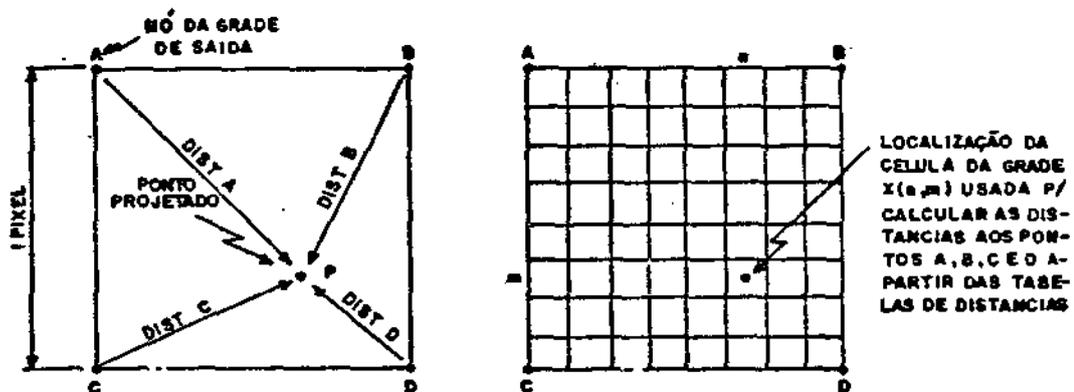


Fig. 2.12 - Interpolação para os "pixels" da imagem de saída. (a) - Contribuição de um ponto, projetado, para os 4 "pixels" vizinhos da imagem de saída. (b) - Divisão da célula em subregiões para o cálculo das distâncias inversas aos vértices da célula.

Dubayah e Dorien (1986), sugerem a subdivisão de cada célula formada por 4 "pixels" adjacentes, na imagem de saída, em subregiões, ou microcélulas, como mostra a Figura 2.12 (b). A distância de cada microcélula, a cada um dos 4 "pixel's", é então armazenada em 4 tabelas de distâncias inversas. Isto permite otimizar o tempo de cálculo da porcentagem de contribuição do nível de cinza mapeado para cada vértice da célula.

#### 2.5.3.2 MATEMÁTICA DAS PROJEÇÕES PERSPECTIVAS

Para o desenvolvimento deste tópico usamos os seguintes sistemas de coordenadas:

1.  $(x,y,z)$  : sistema de referência. Este é um sistema 3-d baseado na regra de mão direita. As coordenadas dos objetos assim como a coordenada do centro de projeção  $(x_0,y_0,z_0)$  são definidas neste sistema de coordenadas.
  
2.  $(x',y',z')$  : sistema de coordenadas de visualização ou do centro de projeção. É um sistema 3-d baseado na regra de mão esquerda. O centro de projeção é tomado como origem deste sistema e o eixo  $z'$  parte da origem desse sistema e cruza a origem do sistema de referência. O eixo X é paralelo ao plano  $xy$  do sistema de referência.

3.  $(x'',y'')$  : sistema do plano de projeção. É um sistema 2-d que representa o plano onde será realizada a projeção. Este plano passa pela origem do sistema de referência e é perpendicular ao eixo Z do sistema do centro de projeção.

A Figura 2.13 mostra esses sistemas de coordenadas e suas relações.

O processo de geração da perspectiva segue os passos seguintes:

- (1). O sistema de referência é transladado para o sistema de coordenadas do centro de projeção  $(x_0,y_0,z_0)$ .
- (2). As coordenadas do centro de projeção são rodadas por 2 ângulos para posicionar o eixo Z passando pelo centro do sistema de referência.
- (3). Uma transformação perspectiva é aplicada para se obter as coordenadas projetadas no plano projeção

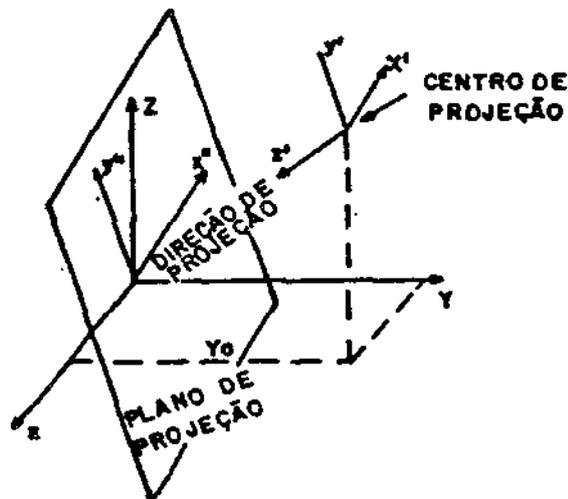


Fig. 2.13 - Sistemas de coordenadas usadas na projeção perspectiva.

A Figura 2.14 ilustra os passos (1) e (2) desse processo.

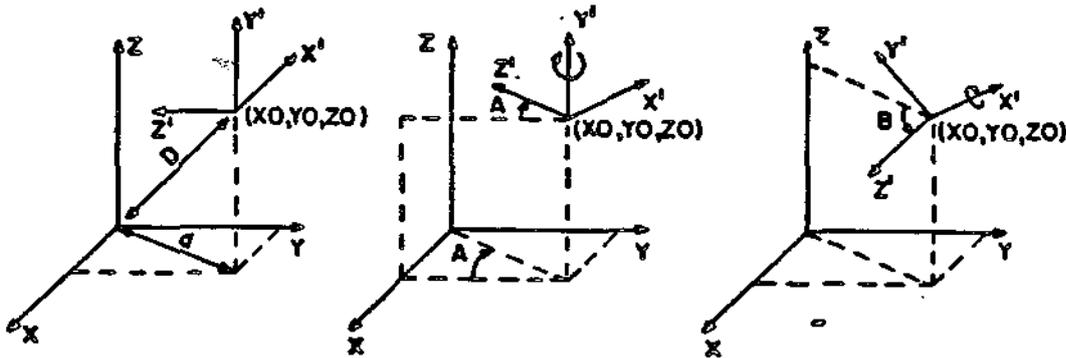


Fig. 2.14 - Transformações geométricas para geração da projeção perspectiva.

Os 2 primeiros itens são conhecidos como transformações geométricas, enquanto que o terceiro item é a transformação perspectiva propriamente dita.

As matrizes de transformação utilizadas nesse processo estão relacionadas abaixo. Usaremos representação em coordenadas homogêneas pois esta permite que as operações de translações, escalas, e rotações sejam tratadas uniformemente como multiplicações de matrizes.

1. Translação da origem para um ponto  $P_0 (x_0, y_0, z_0, 1)$  genérico:



$$\begin{array}{c}
 \text{Rx} = \\
 \text{B}
 \end{array}
 \begin{array}{c}
 - \qquad - \\
 | \ 1 \quad 0 \quad 0 \quad 0 | \\
 | \ 0 \ \cos B \ \sin B \ 0 | \\
 | \ 0 \ -\sin B \ \cos B \ 0 | \\
 | \ 0 \quad 0 \quad 0 \quad 1 | \\
 - \qquad -
 \end{array}
 \quad (2.31)$$

Para um sistema de coordenadas baseado na mão esquerda, o ângulo de rotação é medido positivo no sentido dos ponteiros do relógio quando olhamos de um ponto do eixo especificado para a origem. Para sistema baseado na mão direita o deslocamento angular é positivo no sentido anti-horário.

Assim as transformações (1) e (2) do processo de geração da perspectiva são descritas pela seguinte equação matricial.

$$\begin{array}{c}
 - \quad - \quad - \quad - \quad - \quad - \\
 X' = \text{Ry Rx Tinv Rx T X} \\
 \quad \quad \text{A B x 90 Po}
 \end{array}
 \quad (2.32)$$

onde:

$$\begin{array}{c}
 - \quad - \qquad \qquad \qquad - \quad - \\
 X = \begin{array}{c} | x | \\ | y | \\ | z | \\ | 1 | \end{array}
 \quad e \quad
 X' = \begin{array}{c} | x' | \\ | y' | \\ | z' | \\ | 1 | \end{array} \\
 - \quad - \qquad \qquad \qquad - \quad -
 \end{array}
 \quad (2.33)$$

Desenvolvendo (2.32) a partir de (2.28) a (2.31) e, (2.33), tem-se:

$$x' = - (x-x_0) * \cos A + (y-y_0) * \sin A \quad (2.34)$$

$$y' = - (x-x_0) * \sin B * \sin A - \\ (y-y_0) * \sin B * \cos A + (z-z_0) * \cos B \quad (2.35)$$

$$z' = - (x-x_0) * \cos B * \sin A - \\ (y-y_0) * \cos B * \cos A - (z-z_0) * \sin B \quad (2.36)$$

de onde, e da Figura 2.14 obtemos as relações trigonométricas:

$$\sin A = \frac{x_0}{d} \quad \cos A = \frac{y_0}{d} \quad (2.37)$$

$$\sin B = \frac{z_0}{D} \quad \cos B = \frac{d}{D} \quad (2.38)$$

$$\text{sendo: } d = \sqrt{(x_0^2 + y_0^2)} \quad (2.39)$$

$$e \quad D = \sqrt{(x_0^2 + y_0^2 + z_0^2)} \quad (2.40)$$

Uma vez que as coordenadas do objeto estão definidas em coordenadas de visualização, a transformação em perspectiva propriamente dita é obtida simplesmente projetando cada ponto do objeto no plano de projeção, como mostra a Figura 2.15 para a projeção do ponto P já em coordenadas de visualização.

Da Figura 2.15(a) temos:

$$\frac{x''}{x'} = \frac{D}{z'} \quad \text{-----)} \quad x'' = \frac{D}{z'} * x' \quad (2.41)$$

onde:

$x'$  e  $z'$  são dados pelas equações (2.34) e (2.36)

O mesmo raciocínio vale para o cálculo de  $y''$   
(Fig 2.15(b)):

$$\frac{y''}{y'} = \frac{D}{z'} \quad \text{-----)} \quad y'' = \frac{D}{z'} * y' \quad (2.42)$$

onde :

$y'$  e  $z'$  são dados pelas equações (2.35) e (2.36)

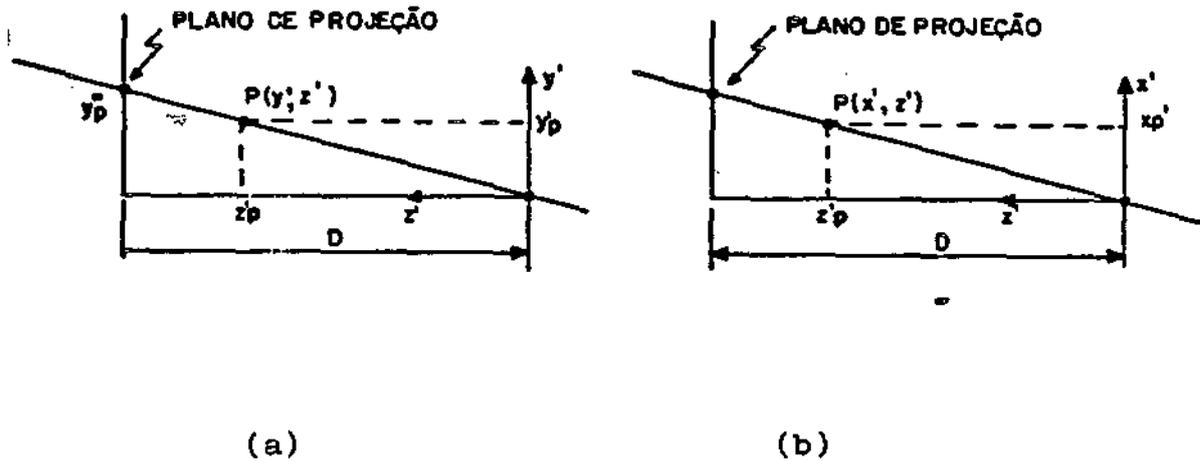


Fig. 2.15 - Projeção perspectiva de um ponto. (a) Detalhes da projeção no plano  $y'z'$ . (b) Detalhes da projeção no plano  $x'z'$ .

Um raciocínio semelhante a geração da projeção em perspectiva pode ser usado para definir uma projeção ortogonal (paralela). A principal diferença é que na projeção em perspectiva define-se o centro de projeção, o qual, basicamente, define as transformações geométricas necessárias para colocar os pontos no referencial de visualização. Na projeção perspectiva a direção de projeção

para cada ponto de um objeto é definida pelo ponto e pelo centro de projeção. Na projeção paralela a direção de projeção é sempre constante pois todos os raios de projeção são paralelos entre si. A formulação matemática da transformação geométrica, para a projeção paralela, segue a mesma sequência da formulação para a projeção perspectiva, excetuando-se a translação para o ponto  $P_o$ , já que este não existe. A direção de visualização é fornecida pelo usuário a partir da definição dos ângulos A e B de rotação sobre os eixos y e x respectivamente.

Na geração da projeção paralela propriamente dita deve-se simplesmente fazer :

$$x'' = x' \quad e \quad y'' = y' \quad (2.43)$$

pois, após a transformação geométrica ter sido realizada, todos os raios de projeção são perpendiculares ao plano de projeção.

### 2.5.3.3 REMOÇÃO DAS LINHAS ESCONDIDAS

Uma parte integrante do processo de visualização de projeções geométricas planas é a remoção das linhas escondidas ou seja, as linhas que estão do outro lado do objeto. A visibilidade ou não das linhas depende, logicamente, do ponto de visualização (centro de projeção) nas projeções perspectivas ou da direção de visualização quando se tratar de projeção paralela.

Junkin (1982), propõe um método para remover linhas escondidas em projeções perspectivas de superfícies. O método aplica-se a superfícies compostas de segmentos de linhas formando uma sequência de curvas. O objetivo é a eliminação de todos os segmentos de linha que estão atrás de outras superfícies e que não são visíveis na plotagem dos dados em 2 dimensões. Inicialmente define-se um vetor de horizonte que representa o horizonte de visibilidade corrente. Durante a projeção todo segmento que estiver abaixo desse horizonte é considerado não visível. São definidos ainda vetores de visibilidade. O processo começa pela análise dos pontos do segmento mais próximo ao observador. Todo ponto do segmento que for visível é colocado num vetor de visibilidade e torna-se ainda um ponto do vetor de horizonte. Isto é repetido até que o último ponto do segmento seja testado. O vetor de visibilidade possui então todos os pontos visíveis do primeiro segmento, que podem ser plotados ou armazenados. O passo seguinte é analisar o próximo segmento mais próximo do observador, e repetir o processo até que todos os segmentos tenham sido analisados. A cada passo o vetor de horizonte é usado para testar a visibilidade de um novo ponto e é atualizado caso o ponto seja visível. Uma desvantagem desse método é a necessidade de se analisar todos os pontos de cada segmento, pois, nem sempre é possível conhecer todos os pontos da unidade visualizadora que formam um determinado segmento, isto depende do algoritmo de traçado de segmento utilizado.

Dozier (1986), desenvolveu um método para escondimento de superfícies para projeções ortográficas de terreno que se baseia em ângulos de horizonte. O autor descreve, nesse trabalho, a produção de vistas ortográficas de terreno usando dados digitais de elevação e imagens co-registradas. Os ângulos de horizonte, utilizados para determinar a visibilidade da superfície, são determinados a partir do conjunto de dados de elevação. Assim, para cada ponto da grade de elevação o ângulo de horizonte  $hf$  do ponto é computado. O cálculo de  $hf$  depende da direção azimutal de projeção e dos valores de cota dos "pixels", posteriores ou anteriores, que estiverem sobre, ou muito próximos, do perfil de visualização ao qual o ponto pertence.

Uma vez computado o mapa de horizontes para toda a grade, este é usado para determinação da visibilidade de cada "pixel" antes da projeção ortogonal. Segundo o método, um ponto é visível, segundo uma direção azimutal de visualização estabelecida, se o ângulo de elevação  $B$  está acima do ângulo de horizonte  $hf$  do ponto, ou seja :

$$hf < 90 - B \quad (2.44)$$

Dozier et alli (1981), apresenta um estudo minucioso do cálculo de  $hf$ . Segundo os autores, as maiores vantagens do método de teste dos ângulos de horizonte são a velocidade e a eficiência. Cada ponto é testado apenas uma vez e somente pontos visíveis são transformados. O mapa de

horizontes pode ser utilizado, também, para a computação das radiâncias sobre o terreno.

A maior desvantagem do método é a utilização de memória adicional, igual ao tamanho da grade, para o armazenamento do mapa de horizontes. Em microcomputadores, onde se tem pouco espaço de memória principal, deve-se utilizar memória secundária para esse armazenamento, o que torna o processo mais lento computacionalmente. Outra desvantagem está em o método, como originalmente proposto pelos autores, tratar o problema de escondimento de linhas apenas para projeções ortogonais.

#### 2.5.4 SIMULAÇÃO DE TERRENO

A simulação de terreno consiste num 'realçamento' dos detalhes de representação, geralmente uma projeção perspectiva, da superfície com o objetivo de aumentar o realismo da apresentação da mesma. Uma das técnicas mais usadas é o sombreado, ou iluminação, da superfície. Através desta técnica pode-se produzir uma superfície sombreada, especificando-se uma direção de iluminação e alguns parâmetros que definem as características próprias da superfície, tais como : índice de reflexão e refração, porosidade, rugosidade etc...

Outra técnica utilizada para aumentar o realismo das representações das superfícies é a adição de textura a superfície. A textura pode ser gerada

sinteticamente através de técnicas de computação gráfica ou ser de procedência real, como por exemplo, de fotografias, imagens de satélite, etc...

Dentre os modelos de iluminação existentes podemos destacar aqueles que são baseados nos modelos de Phong, Whitted e Blinn. Talvez as primeiras imagens realísticas tenham sido modeladas por Phong, cujo modelo incluia termos difuso e especular para fontes de luz diretas e um termo global do ambiente (Hall and Greenberg, 1983). Segundo esse modelo, a intensidade de luz  $I$  que incide num ponto de uma superfície ou de um objeto é modelado por:

$$I = k_d \sum_{j=1}^n S_j (N \cdot L_j) (cor_j) + k_s \sum_{j=1}^n S_j (R \cdot V_j) * I_j + I_a \quad (2.45)$$

sendo :

$k_d$  : coeficiente de reflexão difusa do material;

$d$

-

$N$  : vetor normal a superfície;

-

$L$  : vetor unitário da fonte de luz ;

$k_s$  : coeficiente de reflexão especular ;

$s$

-

$R$  : vetor de reflexão unitário;

- V : vetor de visualização unitário;  
 I : intensidade da j-ésima fonte de luz;  
 j  
 I : intensidade da iluminação ambiente global.  
 a

O modelo de Whitted aumentou o de Phong usando uma interpretação diferente do termo especular direto e os termos adicionais de iluminação global. Esta aparece como uma soma das iluminações global difusa, global especular e global transmitida.

Esses modelos podem ainda ser aumentados, incluindo-se: as relações de Fresnell para o comprimento de onda e dependência da luz transmitida e refletida em relação ao ângulo de incidência, o espalhamento da luz transmitida de várias fontes e a atenuação de intensidades dos nos prévios como uma função das propriedades de filtragem do material que a luz atravessa.

Schachter (1980), apresenta um modelo de iluminação para geração, por computador, de mapas de relevo sombreado com as seguintes simplificações:

- A luz refletida de um elemento de superfície não ilumina outro elemento. Segundo o autor este efeito é difícil de ser modelado e levaria a cálculos globais;
- Os elementos da superfície não sombreiam uns aos outros.

Sob essas hipóteses, a aparência do elemento da superfície  $(x,y)$  sobre uma largura de banda visual  $l$  é dada por :

$$R_l(x,y) = P_l \max(0, n(x,y) \cdot n_p) \cdot r_l(x,y) + A_l \cdot r_{ll}(x,y) \quad (2.46)$$

onde :

$R_l(x,y)$  : aparência do elemento da superfície  $(x,y)$ ;

$l$

$P_l$  : quantidade de luz que alcança a superfície;

$l$

$r_l(x,y)$  : albedo do elemento da superfície;

$l$

$A_l$  : intensidade de luz ambiental de comprimento  $l$ ;

$l$

$n(x,y)$  : versor normal a superfície em  $(x,y)$ ;

-

$n_p$  : versor na direção da luz (solar).

$p$

O autor, além do modelo de iluminação, procura aumentar o realismo da projeção do relevo sombreado com a adição de textura de imagens de satélite.

Existem muitos outros modelos de iluminação, com algumas variações destes ou com novas hipóteses

inseridas ao modelo. Um estudo mais detalhado dos vários modelos atualmente em uso está fora dos propósitos deste trabalho. Porém é oportuno, ainda, salientar a existência de alguns estudos para a estimação do vetor normal em um elemento de superfície dado. Gordon (1985), calcula a normal a qualquer ponto da superfície,  $z = f(x,y)$ , através do vetor gradiente :

$$\nabla z = (dz/dx , dz/dy , 1) \quad (2.47)$$

Os valores das derivadas  $dz/dx$  e  $dz/dy$  podem ser calculados numericamente pelos métodos de aproximação, das diferenças para frente, diferença para trás ou média das duas. O autor apresenta, ainda, uma variação desses métodos com o objetivo de melhorar a estimação dessas derivadas..

#### 2.5.5 OUTRAS APLICAÇÕES

Neste item serão descritas outras aplicações, além daquelas já apresentadas, que não serão implementadas como parte deste trabalho. A descrição dessas aplicações tem o objetivo de defini-las e apresentar algumas características importantes relacionadas as mesmas, sem preocupação de um desenvolvimento teórico mais profundo de cada aplicação. Apesar disso, todas essas aplicações inspiram interesse do projeto do Sistema Geográfico de

Informações do INPE e serão implementadas e incorporadas ao sistema em versões futuras.

#### 2.5.5.1 GERAÇÃO DO MAPA DE PERFIS

As linhas de perfis são determinadas pela intersecção de planos verticais com a superfície. Os planos verticais de intersecção são definidos pela direção de visualização dos perfis e são perpendiculares ao plano base da superfície. Usualmente, os mapas de perfis são utilizados para controle de instrumentos de impressão de ortofotos.

#### 2.5.5.2 DETERMINAÇÃO DA INTERVISIBILIDADE DE PONTOS

A determinação da intervisibilidade consiste na determinação automática da visibilidade de um ou mais pontos da superfície em relação a um ponto de referência. Esta aplicação é usada para determinar a faixa de cobertura de radares terrestres e outros sistemas de rastreamento. É utilizada também na determinação de locais de instalação de torres de transmissão e problemas similares.

#### 2.5.5.3 CÁLCULO DE TRABALHOS EM TERRENOS

Historicamente, esta foi uma das primeiras aplicações de dados de MDT. Consiste em se realizar cálculos de propósitos gerais para auxiliar os trabalhos que serão realizados na superfície. Dentre estes podemos destacar os cálculos de declividades, alturas máximas e mínimas, distâncias, áreas e volumes do terreno. Esses cálculos são usualmente utilizados para monitoração e auxílio a projetos de pontes, estradas, parques, edifícios, represas, etc... e até na estimação de reservas minerais, florestais, agrícolas, etc....

#### 2.5.5.4 SISTEMAS DE CONTROLE DE NAVEGAÇÃO

Esta aplicação tem o objetivo de auxiliar o controle de sistemas de navegação aérea ou marítima. Um exemplo típico desta aplicação é o sistema MSAW, "Minimum Safe Altitude Warning System", que calcula a posição e elevação de todas as obstruções dentro de uma distância especificada (Doyle, 1978).

• •  
•

## CAPÍTULO 3

### METODOLOGIA PROPOSTA

#### 3.1 INTRODUÇÃO

Neste capítulo serão apresentados e discutidos os algoritmos e estruturas de dados, utilizados na implementação do sistema de modelagem digital de terreno do SGI do INPE. A ênfase será dada aos aspectos teóricos envolvidos nas implementações, sem preocupação com a descrição formal dos algoritmos. Não serão abordados os aspectos relacionados a consistência dos dados de entrada e gerados durante o processamento, que deverão ser considerados caso o leitor queira implementar qualquer dos algoritmos aqui apresentados. De modo geral a descrição dos algoritmos seguirá a sequência normal de execução das funções. Qualquer restrição importante, em algum dos passos do algoritmo, que possa comprometer a compreensão do mesmo, será tratada durante sua apresentação. A idéia é colocar o leitor a par dos principais problemas envolvidos na implementação deste sistema em microcomputadores e das soluções adotadas para esses problemas. Serão ainda enfocados os aspectos relacionados a integração do sistema ao SGI. Por este motivo o capítulo iniciará por uma descrição geral do SGI para facilitar a compreensão das tarefas de integração do MDT ao mesmo.

### 3.2 O SISTEMA DE INFORMAÇÕES GEOGRÁFICAS DO INPE

#### 3.2.1 DEFINIÇÃO E APLICAÇÕES

O sistema de Informações Geográficas, SGI, do INPE, é um banco de dados geográficos, baseado em microcomputador, que permite adquirir, armazenar, combinar, analisar, e recuperar informações codificadas espacialmente. O SGI é um banco de dados não convencional na medida que utiliza, além de tabelas, dados espaciais gráficos e não gráficos, bi ou tri-dimensionais, armazenados num determinado formato (Erthal et alii, 1986).

Os principais objetivos do SGI são:

- Integrar numa única base de dados informações espaciais provenientes de mapas temáticos e topográficos, imagens de satélite, dados geofísicos e geoquímicos.
- Combinar as várias informações, através de algoritmos de manipulação, para gerar mapeamentos derivados.
- Reproduzir e visualizar o conteúdo da base de dados geocodificados.

As aplicações do SGI estão relacionadas diretamente a área da região coberta pelo sistema, que pode ir de áreas municipais até áreas estaduais e nacionais. O sistema, quando atua sobre áreas municipais, é usado, principalmente, em tarefas de planejamento urbano, pesquisa sociológica, estudos de mercado e administração municipal. Quando o sistema abrange áreas maiores, ele tem aplicações, principalmente, nas áreas de monitoração de recursos naturais e planejamento, podendo-se citar setores específicos tais como: cartografia topográfica, hidrologia, geologia, agricultura, meteorologia e recurso florestais.

### 3.2.2 ESTRUTURA GERAL DO SISTEMA

O SGI é composto por um conjunto de funções orientadas para as várias fases de armazenamento e extração de informações codificadas espacialmente. O sistema permite que o usuário escolha uma região de trabalho e, nesta região, armazene diferentes planos de informação. A cada Plano de Informação, PI, está associado um tipo de informação distinta relacionada a uma determinada região. A um PI podem estar associados vários arquivos correspondentes as várias fases de processamento desse plano. A todo PI é, ainda, atribuído um arquivo descriptor do PI contendo todas as informações relativas aos atributos de mesmo. Para cada região de trabalho existe um arquivo diretório que contém o número de PI's e os nomes dos PI's referentes a essa região. A região de trabalho corrente é armazenada no arquivo contexto do SGI.

O SGI do INPE está subdividido, basicamente, em 5 módulos, que são:

1. Inicialização : este módulo permite ao usuário a criação e a escolha de uma região de trabalho, a definição de novos PI's e o conhecimento das regiões e planos de informações já existentes.
2. Entrada : este módulo é responsável pela aquisição de dados de entrada do sistema provenientes de dispositivos de entrada tais como: teclados, mesas digitalizadoras, "mouses", etc.... Esse módulo é responsável, também, pela integração desses dados ao sistema.
3. Manipulação : permite que as informações de diferentes PI's sejam combinadas para produzirem informações relevantes ou novos PI's para uma dada região.
4. Saída : este módulo é responsável pela impressão, visualização ou plotagem dos componentes da base de dados.
5. Gerenciamento : É o módulo responsável pelo armazenamento e recuperação das informações contidas na base de dados. A este módulo estão associadas tarefas tais como: abertura, fechamento, criação e deleção de arquivos, leitura e escrita de dados e registros de ou nos arquivos, etc...

A Figura 3.1 apresenta um esquema geral dos módulos componentes do SGI mostrando a interrelação entre os mesmos.

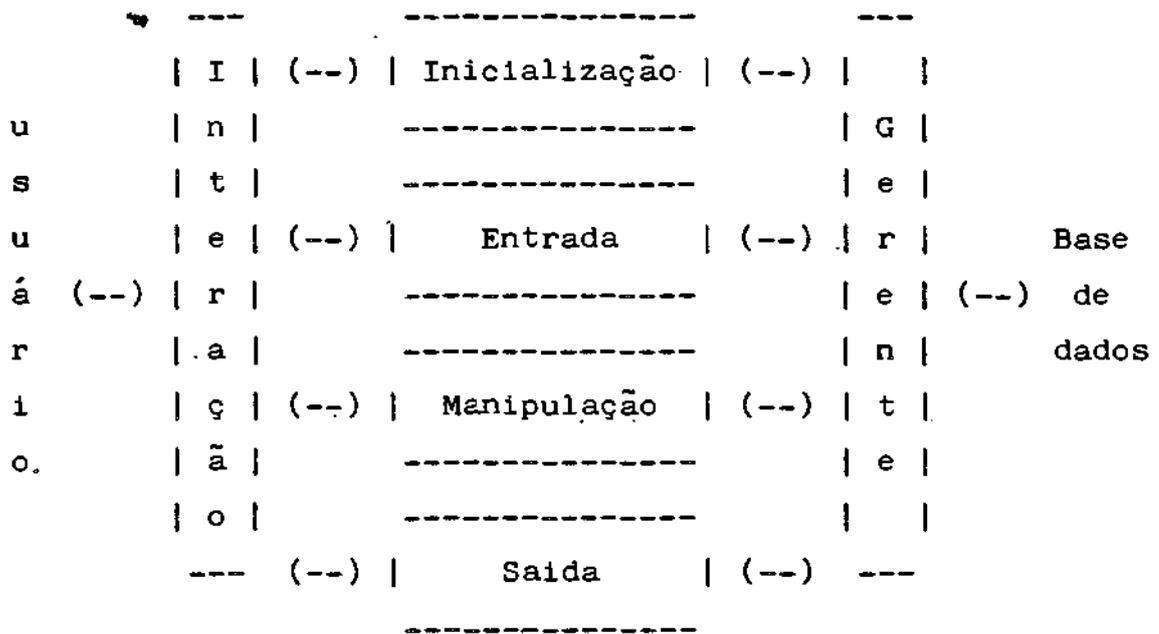


Fig 3.1 Esquema geral do SGI

Além desses 5 módulos básicos existe, ainda, um módulo de interação que é responsável pela comunicação com o usuário a nível de escolha do tipo de processamento desejado. Essa interação é realizada por um sistema do tipo "menu" que permite que se alcance o processamento desejado percorrendo-se uma estrutura de árvore onde cada nó está associado a uma nova tela do "menu". Os nós terminais

chamam diretamente as funções principais do sistema. O diálogo a nível do processamento é realizado por um sistema de perguntas e respostas com valores "defaults" para todas as respostas.

### 3.2.3 SUPORTE FÍSICO

A configuração básica do sistema possui as seguintes características:

- microcomputador : processador central 8088 (16 bits), co-processador de ponto flutuante 8087 e memória principal 256 "kbytes";
- periféricos : disco Winchester de 10 ou 55 "Mbytes", disco flexível de 5 1/4 e 8 polegadas, terminal de vídeo alfanumérico, terminal de vídeo colorido e semigráfico, impressora semigráfica, mesa digitalizadora, plotadora de mesa ou de tambor;
- terminal gráfico : unidade visualizadora de imagens, composta de 4 planos 1024x1024 pontos, em 256 níveis por ponto (8bits), com capacidade de tratar imagens e gráficos.

### 3.2.4 SUPORTE LÓGICO

O SGI está implementado em linguagem C sob um sistema operacional compatível com o UNIX da AT&T. Está previsto, para meados de 1987, o transporte desse software

também para o sistema operacional DOS. O SGI faz uso de um pacote gráfico básico baseado no padrão GKS para saídas gráficas utilizadas pelo sistema.

### 3.2.5 ESTRUTURA DOS ARQUIVOS UTILIZADOS

No Apêndice A são apresentadas as estruturas dos arquivos do SGI que são utilizados nas tarefas de modelagem digital de superfícies. São apresentadas, ainda, as funções de manipulação desses arquivos, que fazem parte do módulo de gerenciamento do SGI. Esta apresentação objetiva facilitar a compreensão, por parte do leitor, da descrição das funções que compõem o sistema de MDT.

## 3.3 AQUISIÇÃO

### 3.3.1 DEFINIÇÕES E OBJETIVOS

A aquisição dos dados, triplas  $(x,y,z)$ , que representarão a superfície real no sistema de MDT é feita pela função chamada pontual. Os objetivos desta função são : ler os dados amostrado por uma mesa digitalizadora, transformá-los para um sistema de coordenadas de trabalho, definido pelo usuário, e armazenar esses dados transformados no arquivo de pontos do SGI.

### 3.3.2 CARACTERÍSTICAS DE IMPLEMENTAÇÃO

A função pontual está dividida basicamente em 2 módulos : módulo de inicialização e módulo de leitura e armazenamento.

O módulo de inicialização destina-se a obtenção dos dados iniciais para que o módulo de leitura e armazenamento funcione adequadamente. O módulo de inicialização envolve os passos seguintes :

- a) Leitura da região de trabalho corrente, no arquivo contexto, e interação com o usuário para obter o nome do plano de informação desejado por este.
  
- b) Interação com o usuário para obtenção dos pontos de controle. Os pontos de controle são utilizados para definir o mapeamento do sistema de coordenadas  $(x,y)$  da mesa digitalizadora para o sistema de coordenadas  $(u,v)$  definido pelo usuário. Usualmente as coordenadas  $(u,v)$  estão relacionadas ao sistema de coordenadas do mapa que está sendo digitalizado. A função permite que o usuário defina os pontos de controle no momento da solicitação ou obtenha esses pontos de um arquivo de pontos de controle previamente definidos.

A equação de mapeamento de  $(x,y)$  para  $(u,v)$  é do tipo:

$$u = a_0 + a_1 x + a_2 y + a_3 xy \quad (3.1)$$

$$v = b_0 + b_1 x + b_2 y + b_3 xy \quad (3.2)$$

O mapeamento definido pelas equações 3.1 e 3.2 permite transformações de escala, rotação, translação, cizalhamento ("skew") e "keystoning". O cálculo dos coeficientes  $a$  e  $b$  dessas equações é feito substituindo as coordenadas  $(u,v)$  e  $(x,y)$  dos 4 pontos de controle nessas equações. Dessa forma obtém-se dois sistemas de 4 equações com 4 incógnitas que podem ser solucionados, por exemplo, pelo método de eliminação de Gauss para obtenção desses coeficientes.

- c) Apresentação, na visualizadora do microcomputador, das coordenadas dos pontos de controle nos dois sistemas de coordenadas.

O módulo de leitura e armazenamento é responsável pelas seguintes tarefas:

- a) leitura dos pontos digitalizados pelo usuário;
- b) transformação dos pontos amostrados para o sistema de coordenadas  $(u,v)$  utilizando as equações de mapeamento 3.1 e 3.2;

- c) Armazenamento dos pontos amostrados, já transformados, no arquivo de pontos do SGI.

### 3.4 GERAÇÃO DO MODELO

O modelo utilizado é o de grade regular retangular obtido diretamente do conjunto de pontos amostrados. Este modelo foi escolhido por ser de fácil tratamento na geração das aplicações e ser o modelo mais utilizado comercialmente. A função que gera esse modelo está dividida, basicamente, em 3 módulos: definição da região de interesse, organização dos pontos amostrados e geração da grade propriamente dita.

#### 3.4.1 DEFINIÇÃO DA REGIÃO DE INTERESSE

##### 3.4.1.1 DEFINIÇÕES E OBJETIVOS

Esta função define uma região de interesse sobre a projeção ortogonal, do conjunto de pontos amostrados, no plano xy. A região definida nesta função é o polígono convexo, ou fronteira convexa, que contém todas as projeções citadas acima. A região de interesse define a fronteira válida para a interpolação de um ponto qualquer a partir dos pontos amostrados. Não se pode garantir

consistência para o valor de cota estimado, a partir dos pontos amostrados, para um ponto fora da fronteira convexa. Neste caso essa estimativa é considerada uma extrapolação e não interpolação.

#### 3.4.1.2 CARACTERÍSTICAS DE IMPLEMENTAÇÃO

A implementação desta função está baseada no algoritmo "hull" apresentado em Handley (1985). Neste item será apresentado, de maneira informal, o algoritmo utilizado na implementação dessa função. Antes da descrição do algoritmo as seguintes considerações devem ser feitas:

Seja  $S = \{p_1, p_2, \dots, p_n\}$  o conjunto dos  $n$  pontos amostrados; podemos particionar o conjunto  $S$  em 2 subconjuntos,  $C$  e  $N$ , tal que:

- $C$  é o conjunto de pontos de  $S$  que podem pertencer ao polígono convexo, e
- $N$  é o conjunto de pontos de  $S$  que não podem pertencer a esse polígono.

Podemos definir, como mostrados na Figura 3.2, os seguintes pontos extremos:

minx e maxx os pontos extremos na direção da coordenada  $x$ ;

miny e maxy os pontos extremos na direção da coordenada y;

minypx e maxypx os pontos extremos na direção  $y+x$ ;

minymx e maxymx os pontos extremos na direção  $y-x$ ;

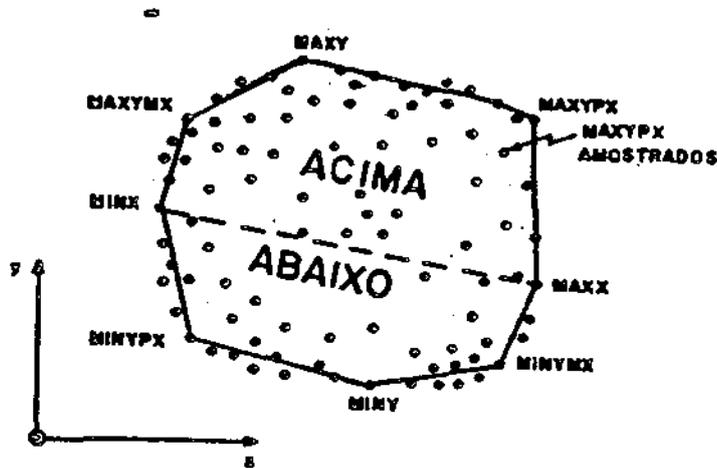


Fig 3.2 Pontos extremos para definição do polígono convexo.

Considerando-se as definições acima, o algoritmo utilizado para definir a fronteira convexa segue basicamente os seguintes passos:

- a) Determinam-se todos os 8 pontos extremos, definidos acima, percorrendo-se todos os dados amostrados. Observe que podemos ter um ponto associado a mais de um extremo. Isto não causa nenhum problema ao algoritmo.
- b) Seleciona-se, dentre todos os pontos amostrados, aqueles que são externos ao polígono definido pelos oito pontos extremos. Estes pontos, mais os oito extremos, são associados ao conjunto  $C$ . O problema maior neste momento é a definição da posição de cada ponto amostrado em relação ao polígono definido pelos extremos. O ponto será externo ao polígono se ele estiver fora dos limites definidos pelo mesmo. Caso contrário o ponto é interno ao polígono.

Um dos métodos mais utilizados para determinar a posição de um ponto  $P = (x_p, y_p)$  em relação a um polígono fechado qualquer é o método da contagem do número de intersecções da reta  $y=y_p$  com os lados do polígono. Se o número de intersecções for ímpar o ponto está dentro do polígono, caso contrário o ponto é externo ao polígono. Os pontos que estão sobre os lados do polígono podem ser considerados internos ao mesmo sem prejuízo para o algoritmo em questão. Para se contar o número de intersecções deve-se tomar cuidado com alguns casos especiais como mostrado na Figura 3.3.

- c) Os pontos de  $C$  são, então, divididos em dois sub-

conjuntos:

ACIMA - que contém os pontos que ficam acima do ou sobre o segmento que une os pontos  $\min x$  e  $\max x$  e;

ABAIXO - que contém os pontos que ficam abaixo desse segmento.

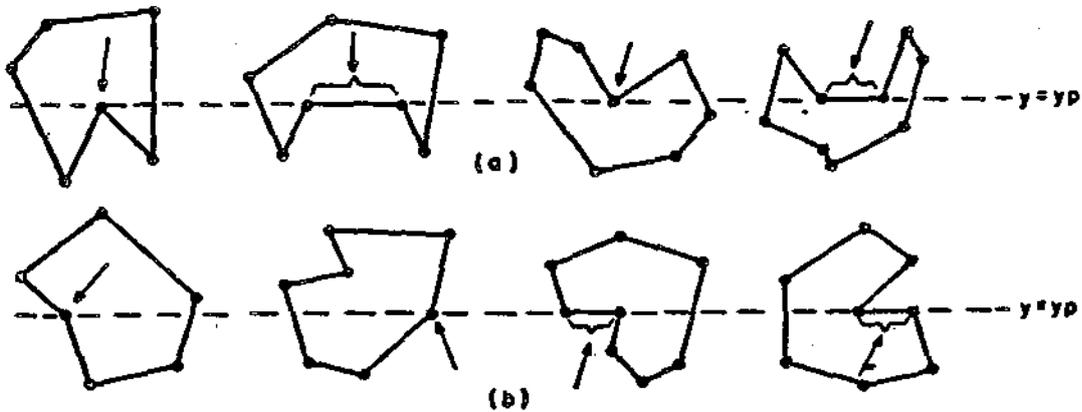


Fig 3.3 - Casos especiais de intersecção com o polígono

(a) os pontos indicados não são considerados intersecções com o polígono.

(b) os pontos indicados são considerados apenas uma intersecção com o polígono.

A localização de um ponto P em relação a esses subconjuntos é definida pelas condições :

Se  $m_p \geq m_s \rightarrow P$  pertence a ACIMA

Se  $m_p < m_s \rightarrow P$  pertence a ABAIXO

onde :

$m_r$  é a declividade do segmento formado pelos pontos P e  $m_{inx}$  ; e

$m_s$  : declividade do segmento formado por  $m_{inx}$  e  $m_{axx}$ .

- d) Ordena-se os pontos do conjunto ACIMA em ordem crescente de x, e os pontos do conjunto ABAIXO em ordem decrescente de x.
- e) Partindo-se do ponto  $x_{min}$  percorre-se os pontos do conjunto ACIMA e posteriormente os do conjunto ABAIXO, adicionando esses pontos ao polígono convexo. Para cada ponto adicionado testa-se a convexidade do polígono. Se a adição do ponto introduziu concavidade ao polígono, os pontos

precedentes, já incluídos nele, são removidos um a um, até que o polígono volte a ser convexo.

A convexidade é testada pela determinação do ângulo formado pelos dois últimos segmentos do polígono, que está sendo formado. Esse ângulo é determinado pelo produto vetorial entre os dois vetores, formados pelos segmentos citados, que partem do penúltimo ponto do polígono. A Figura 3.4 ilustra essa situação.

O produto vetorial entre os vetores AB e AC, mostrados na Figura 3.4, é obtido por:

$$\begin{aligned}
 \mathbf{AB} \times \mathbf{AC} &= |\mathbf{AB}| \cdot |\mathbf{AC}| \cdot \sin(M) = \\
 &= (x_B - x_A) \cdot (y_C - y_A) - (y_B - y_A) \cdot (x_C - x_A) \quad (3.3)
 \end{aligned}$$

o                      o

para  $0 \leq M < 360$

portanto :

$$\begin{aligned}
 \sin(M) &= \\
 &= \frac{(x_B - x_A) \cdot (y_C - y_A) - (y_B - y_A) \cdot (x_C - x_A)}{|\mathbf{AB}| \cdot |\mathbf{AC}|} \quad (3.4)
 \end{aligned}$$

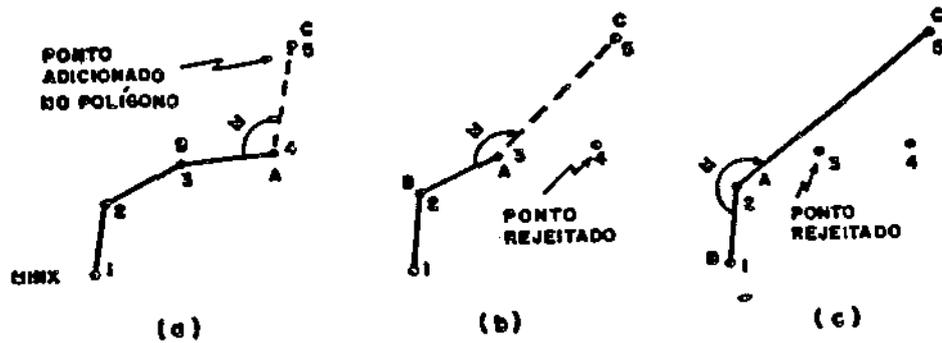


Fig 3.4 - Determinação da convexidade do polígono após a inserção de um novo ponto vértice.

O polígono continuara convexo quando o ângulo  $M$  da Figura 3.4 for maior ou igual a 180 graus, ou seja,  $\text{sen}(M)$  deve ser menor ou igual a zero. Como o denominador da divisão da equação 3.4 é sempre positivo, pois trata-se da multiplicação de módulos, então a condição para que o polígono continue convexo é:

$$(x_B - x_A) * (y_C - y_A) - (y_B - y_A) * (x_C - x_A) = 0 \quad (3.5)$$

### 3.4.2 ORGANIZAÇÃO DOS PONTOS AMOSTRADOS

#### 3.4.2.1 DEFINIÇÃO E OBJETIVOS

Em geral, os problemas de geração de modelos de grade requerem que se conheça o comportamento dos pontos amostrados situados numa vizinhança do ponto da grade. Uma forma direta de se determinar essa vizinhança é percorrer todos os pontos amostrados, calcular a distância de cada um deles ao ponto da grade e considerar somente os pontos que obedecem o critério de vizinhança adotado. Porém a medida que o número de pontos amostrados cresce, aumenta muito o tempo de computação para determinação dos vizinhos por esse método. Esse tempo aumenta ainda mais para a geração de grades mais densificadas. A solução para este problema é organizar os pontos amostrados em estruturas de dados que facilitem a busca de uma vizinhança do ponto interpolado.

O objetivo desta função é organizar os pontos amostrados segundo uma estrutura de árvore, conhecida como (2d-A), visando otimizar o tempo de busca dessa vizinhança.

A (2d-A) é uma estrutura de árvore binária onde cada nó pai possui no máximo 2 nós filhos. A

organização dos pontos amostrados é feita através do particionamento do espaço ocupado pela projeção horizontal, dos pontos amostrados, no plano xy. Dessa forma os pontos amostrados são divididos em grupos, ou nuvens de pontos, separados pelos limites de cada partição. A (2d-A) representa a maneira como foi realizada a partição e cada nó terminal dessa árvore está associado ao conjunto de pontos amostrados que são internos a uma dada partição.

O processo de geração da (2d-A) consiste na divisão da projeção ortogonal, no plano xy, de um conjunto de pontos  $P = \{ (x_i, y_i, z_i) ; i=1,2,\dots,n \}$ , em dois outros subconjuntos P1 e P2 que satisfazem as seguintes condições:

$$\text{Se } (\text{Max}(x_i) - \text{Min}(x_i)) \gg (\text{Max}(y_i) - \text{Min}(y_i)) \quad i = 1, 2, \dots, n$$

então :

$$P1 = \{ p_i = (x_i, y_i) , p_i \text{ pert. } P / x_i \leq x_p \} \quad (3.6)$$

$$P2 = \{ p_i = (x_i, y_i) , p_i \text{ pert. } P / x_i > x_p \} \quad (3.7)$$

$$\text{onde : } \text{Min}(x_i) \leq x_p \leq \text{Max}(x_i)$$

senão :

$$P1 = \{ p_i = (x_i, y_i) , p_i \text{ pert. } P / y_i \leq y_p \} \quad (3.8)$$

$$P_2 = \left\{ p_i = (x_i, y_i), p_i \text{ pert. } P / y_i > y_p \right\} \quad (3.9)$$

$$\text{onde : } \min(y_i) \leq y_p \leq \max(y_i)$$

A linha divisória  $x=x_p$  ou  $y=y_p$  é denominada particionador e, o indicador que mostra se a partição é horizontal ou vertical é o discriminante. O melhor particionador é a mediana vertical ou horizontal (Friedman, 1978). A mediana de um conjunto de pontos é a reta  $x=x_p$  ou  $y=y_p$ , do ponto  $(x_p, y_p)$ , que divide esse conjunto em dois outros com cardinalidades iguais ou a diferença entre suas cardinalidades é apenas 1.

O processo de subdivisão parte do conjunto total de pontos amostrados e é aplicado recursivamente a cada subconjunto gerado, parando apenas quando a cardinalidade do subconjunto for igual ou menor que um limiar pré-determinado, também conhecido como valor crítico.

Durante a subdivisão, os particionadores e discriminantes são armazenados nos nós não folhas da árvore juntamente com os apontadores para os nós filhos. Os nós terminais tem informações sobre o conteúdo dos subconjuntos com cardinalidade menor que o valor crítico. A Figura 3.5 ilustra esses conceitos.

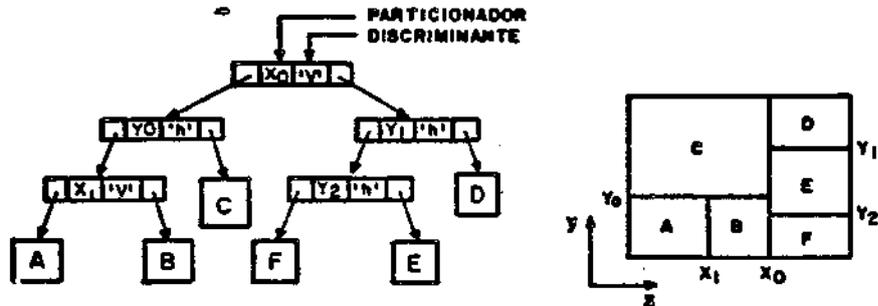


Fig. 3.5 - Organização dos pontos segundo uma árvore  
(2d-A)

### 3.4.2.2 CARACTERÍSTICAS DE IMPLEMENTAÇÃO

A função de organização dos pontos amostrados segue, basicamente, os passos seguintes:

- a) Interação com o usuário para obter o \_nome do plano de informação com o qual se quer trabalhar e o valor crítico que irá definir a cardinalidade máxima de cada subconjunto da partição.
- b) Abertura do arquivo de pontos amostrados.
- c) Criação e abertura dos arquivos árvore e pontos organizados. O primeiro conterà os nós da árvore que será gerada durante o particionamento. O segundo conterà os pontos amostrados divididos em registros sendo que em cada registro estarão os pontos pertencentes a uma das partições geradas. O arquivo de pontos organizados contém ainda um cabeçalho, vide Apêndice A, com os atributos relevantes para o arquivo.
- d) Transferência dos pontos do arquivo de pontos, sem o cabeçalho, para um arquivo auxiliar que representará a raiz da árvore.
- e) Chamada da função gera\_árvore, que funciona recursivamente até que todos os nós da árvore sejam criados e os registros do arquivo de pontos organizados estejam atualizados.

A função gera\_árvore tem apenas parâmetros de entrada que são: arquivo de pontos a ser particionado, valores inferiores,  $x_{min}$  e  $y_{min}$ , e valores superiores,  $x_{max}$  e  $y_{max}$ , dos pontos desse arquivo, o limite máximo de pontos por registro, valor crítico, e o número total de pontos

desse arquivo. Essa função é recursiva e contém 2 módulos distintos que são ativados de acordo com o número total de pontos do arquivo de entrada. O primeiro é o módulo de geração dos nós não terminais da (2d-A) e é ativado quando esse número de pontos excede o valor crítico. Este módulo executa as seguintes tarefas:

- Determina o valor do discriminante segundo as seguintes condições:

$$\text{Se } \underset{i}{\text{Max}(x)} - \underset{i}{\text{Min}(x)} \geq \underset{i}{\text{Max}(y)} - \underset{i}{\text{Min}(y)}, i = 1, 2, \dots, n$$

$$\text{então discriminante} = 'v' \text{ (vertical)} \quad (3.10)$$

$$\text{senão discriminante} = 'h' \text{ (horizontal)} \quad (3.11)$$

- Calcula o particionador pelo valor médio das coordenadas x ou y dos pontos a ser particionado, ou seja :

$$\text{valor médio} = \left( \sum_{i=1}^n \text{valor}_i \right) / n \quad (3.12)$$

onde

n = número de pontos dos arquivo a ser particionado, e

valor = x se discriminante = 'v' ou  
         i    i  
         = y se discriminante = 'h'  
         i

Utilizou-se o valor médio ao invés da mediana no cálculo do particionador pois o cálculo da mediana exige que se ordene os pontos a serem particionados. Porém esses pontos estão localizados num arquivo em disco e não podem ser carregados de uma só vez para memória principal devido as limitações desse tipo de memória em microcomputadores. A implementação exigiu que os pontos fossem lidos do arquivo em blocos de 500 pontos por vez. Isto significa que a ordenação desses pontos seria muito custosa computacionalmente por exigir muitos acessos a memória secundária.

- Cria um novo nó da árvore ao qual serão atribuídos o discriminante e o particionador, calculados nos ítems acima, e os ponteiros para dois novos nós filhos que serão criados nas próximas chamadas da função gera\_árvore.
- Distribui os pontos do arquivo de entrada para dois novos arquivos, ora criados, segundo os valores atribuídos para o discriminante e particionador desse conjuntos de pontos.
- Deleta o arquivo de pontos entrada.

- Chama a função gera\_árvore para o nó filho esquerdo.
- Chama a função gera\_árvore para o nó filho direito.

O segundo módulo da função gera\_árvore é o módulo de geração dos nós terminais da (2d-A) que representam um conjunto de pontos com cardinalidade menor do que o valor crítico definido pelo usuário. Este módulo executa, basicamente, os seguintes passos:

- preenche um novo registro do arquivo de pontos organizados com os pontos do arquivo de entrada da função;
  - deleta o arquivo de pontos de entrada;
  - cria um novo nó terminal da árvore com as seguintes características: no campo do particionador é colocado o número do novo registro do arquivo de pontos organizados; o campo do discriminante não é considerado ; e os ponteiros para os nós filhos são zerados identificando um nó terminal.
  - retorna da função com o número de nós correntes da árvore.
- f) Atualização do arquivo árvore com o número máximo de pontos por partição e os nós da árvore que acabou de ser gerada.

- g) Fechamento dos arquivos árvore e de pontos organizados.

### 3.4.3 GERAÇÃO DA GRADE REGULAR

#### 3.4.3.1 DEFINIÇÃO E OBJETIVOS

A função de geração da grade objetiva a criação de uma grade regular retangular a partir dos pontos amostrados e já organizados pela função de organização desses pontos. O valor de cota de cada ponto da grade é estimado a partir da interpolação de uma certa quantidade de pontos amostrados vizinhos do ponto da grade. A função fornece 6 tipos de interpoladores e permite que outras funções interpoladoras sejam facilmente adicionadas ao sistema.

#### 3.4.3.2 CARACTERÍSTICAS DE IMPLEMENTAÇÃO.

A função de geração da grade retangular está estruturada em 3 módulos distintos : inicialização, procura dos vizinhos e interpoladores.

A inicialização é responsável pela interação com o usuário para:

- a) Aquisição do nome do plano de informação.
- b) Definição dos limites inferior e superior das coordenadas vetoriais, x e y, da grade retangular.
- c) Definição das resoluções horizontal e vertical da grade. Os valores "defaults" para essas resoluções são calculados automaticamente pela função e dependem da densidade e da distribuição espacial dos pontos amostrados.
- d) Escolha do interpolador a ser usado na estimação da cota de cada ponto da grade. Dentre estes temos as seguintes opções :

1. média dos N pontos vizinhos mais próximos com peso:

$$w_i = \frac{1}{d_i^n} ; \quad i = 1, 2, \dots, N$$

onde:

d = distância euclidiana do i-ésimo ponto amostrado i ao ponto interpolado, e n = expoente da função distância.

2. média dos N pontos vizinhos mais próximos com peso:

$$w_i = \frac{\exp(-a \cdot d_i)}{d_i} ; \quad i = 1, 2, \dots, N$$

onde  $a$  está definido na equação (2.7)

3. média dos  $N$  pontos vizinhos mais próximos por quadrante com peso:

$$w_i = \frac{1}{d_i} ; \quad i = 1, 2, \dots, N$$

4. média dos  $N$  pontos vizinhos mais próximos por quadrante com peso:

$$w_i = \frac{\exp(-a \cdot d_i)}{d_i} ; \quad i = 1, 2, \dots, N$$

5. aproximação pelo critério dos mínimos quadrados, ponderados, sobre os  $N$  pontos vizinhos mais próximos com peso:

$$w_i = \frac{1}{d_i} ; \quad i = 1, 2, \dots, N$$

6. aproximação pelo critério dos mínimos quadrados, ponderados, sobre os  $N$  pontos vizinhos mais próximos com peso:

$$w_i = \frac{\exp(-a \cdot d_i)}{d_i^n} ; \quad i = 1, 2, \dots, N$$

Para as opções 1 e 3 a função solicita, ainda, o número de vizinhos mais próximos que deverão ser considerados na interpolação, e para as opções 2 e 4 o número de vizinhos mais próximos por quadrante.

- (e) Escolha do expoente  $n$  da função distância euclidiana  $d$

Este módulo realiza, ainda, as seguintes tarefas: lê os nós da árvore (2d-A) do arquivo árvore; abre o arquivo de pontos organizados; cria e abre o arquivo grade regular, e chama a função de procura dos vizinhos e a função interpoladora escolhida pelo usuário.

A busca dos vizinhos mais próximos para cada ponto da grade é realizada pela função `_procura vizinhos_` cujo algoritmo segue a sequência abaixo:

- a) Dado um ponto da grade, percorre-se a árvore até que um nó terminal seja encontrado. O percorrimento da árvore é baseado nas coordenadas do ponto da grade e nas informações de cada nó da árvore. Para

cada novo nó da árvore, começando pela raiz, a função verifica se os seus apontadores estão zerados. Neste caso encontrou-se um nó terminal e a busca termina. Caso contrário a coordenada  $x$  ou  $y$  do ponto é comparada com o particionador, dependendo de o valor do discriminante ser vertical ou horizontal respectivamente. Se a coordenada for menor que o particionador a busca continua pelo filho da esquerda desse nó, caso contrário, o filho da direita desse nó é considerado.

- b) Alcançado um nó terminal, lê os pontos do registro, do arquivo de pontos, que está sendo apontado pelo nó.
- c) Calcula a distância de cada ponto desse registro ao ponto da grade.
- d) Ordena os pontos desse registro em ordem crescente de distância, criando uma lista de vizinhos mais próximos ordenados em relação a distância de cada ponto ao ponto da grade.
- e) Define uma região de influência em torno do ponto da grade.

A região de influência é uma janela definida pela adição e subtração da distância,  $dm$ , das coordenadas  $x$  e  $y$  do ponto da grade como mostrado na Figura 3.6. A determinação de  $dm$  respeita o seguinte critério: Se o número de pontos da partição, a qual

pertence o ponto da grade, for menor ou igual ao número de vizinhos mais próximos definidos pelo usuário, então,  $dm$  será a maior distância calculada no passo (c) acima. Caso contrário utiliza-se a distância do ponto da grade ao  $k$ -ésimo ponto do registro, onde  $k$  é igual ao número de vizinhos mais próximos desejado. A distância  $dm$  é ainda multiplicada pelo número de vezes que a execução da função passa por este ítem. Isto é necessário para o caso em que a janela definida não é suficiente para se obter um número de pontos vizinhos igual ao desejado pelo usuário.

- f) Visita todos os nos terminais que representam partições que interceptam a janela de influência definida no ítem anterior.
- g) Calcula a distância de cada ponto desses registros ao ponto da grade e os insere na lista de vizinhos mais próximos de acordo com as respectivas distâncias calculadas.
- h) Verifica se o número de pontos da lista de vizinhos mais próximos é menor que o número de vizinhos mais próximos definido pelo usuário. Neste caso a função volta para o ítem (a) Caso contrário a função retorna com a lista dos vizinhos mais próximos desejados.

O módulo de interpoladores contém as funções que realizam as interpolações descritas no ítem (d) do

módulo de inicialização. Antes de chamar uma dessas funções de interpolação testa-se se o vizinho mais próximo está a uma distância, do ponto interpolado, menor que um limiar pré-definido. Caso isto ocorra o valor de cota atribuído ao ponto da grade será igual ao do vizinho mais próximo e a função de interpolação não é chamada. Caso contrário realiza-se uma chamada a função de interpolação escolhida pelo usuário. O limiar de proximidade de um vizinho ao ponto da grade é calculado pela relação:

$$\text{limiar} = (\text{resolx}^2 + \text{resoly}^2) / 100. \quad (3.13)$$

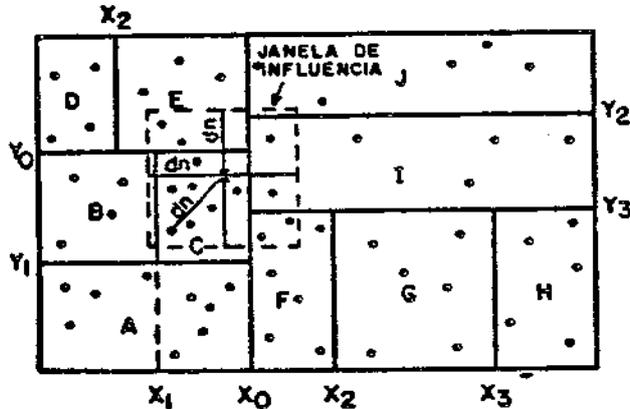


Fig. 3.6 - Definição da região de influência em torno do ponto da grade.

onde:  $resol_x$  e  $resol_y$  são as resoluções da grade nas direções das coordenadas  $x$  e  $y$  respectivamente.

#### 3.4.4 REFINAMENTO DA GRADE

##### 3.4.4.1 DEFINIÇÕES E OBJETIVOS

O objetivo desta função é o refinamento, ou densificação, de uma grade regular retangular gerada previamente pela função gera grade. O interpolador utilizado no refinamento da grade é do tipo bilinear, definido pela equação 2.23, aplicado a cada uma das células retangulares da grade. Essa função cria um arquivo imagem, gerado a partir da grade, com resoluções horizontal e vertical definidas pelo usuário.

##### 3.4.4.2 CARACTERÍSTICAS DE IMPLEMENTAÇÃO

A função de refinamento executa, basicamente, as seguintes tarefas:

- a) lê o arquivo contexto apresenta na tela do microcomputador o nome da região de trabalho corrente;

- b) interage com o usuário para obter o nome do plano de informação desejado;
- c) abre o arquivo grade e lista os seguintes atributos da grade de entrada: resoluções horizontal e vertical da grade; número de linhas e colunas da grade; e limites inferior e superior das coordenadas vetoriais x e y da grade;
- d) interage com o usuário para adquirir as resoluções horizontal e vertical da imagem de saída;
- e) lista os seguintes atributos da imagem de saída, calculados a partir das resoluções definidas no item (d) acima : número de linhas e colunas da imagem e limites inferior e superior das coordenadas vetoriais x e y da imagem de saída ;
- f) cria um arquivo tabela que mapeia a variação dos valores de cota da grade de entrada para a faixa de variação dos níveis de cinza que são associados a um arquivo imagem (os níveis de cinza da imagem variam entre 0 e 255).
- g) calcula a 'cota' de cada pixel da imagem através de uma interpolação bilinear sobre a célula que contém o pixel em questão. Essas 'cotas' são mapeadas para níveis de cinza e armazenadas no arquivo imagem .

### 3.5 PROJEÇÃO GEOMÉTRICA PLANAR

#### 3.5.1 DEFINIÇÕES E OBJETIVOS

Na versão atual do sistema é possível gerar projeções perspectivas, paralelas e pares estereoscópicos diretamente sobre os dados do arquivo grade ou arquivo imagem, resultante do refinamento de uma grade. A função que gera essas projeções a partir da grade regular retangular foi inicialmente desenvolvida como trabalho de graduação (Palludetti and Hayama, 1985). Posteriormente essa função foi adaptada para funcionar com rotinas básicas gráficas baseadas no padrão GKS e criou-se, também, uma nova função para projetar imagens geradas por refinamento de grades regulares. As estruturas dessas duas funções são exatamente iguais. A única diferença entre elas é a fonte de dados a serem projetados, arquivo grade regular ou arquivo imagem. Por essa razão todas as considerações feitas nos próximos itens serão válidas para as duas funções, a menos que se faça referência específica a uma delas.

#### 3.5.2 CARACTERÍSTICAS DE IMPLEMENTAÇÃO

A função de geração das projeções pode ser dividida, para maior facilidade de compreensão, em 3

modulos distintos : inicialização, cálculos preliminares e traçado da projeção.

### 3.5.2.1 INICIALIZAÇÃO

Além da leitura do arquivo contexto, para buscar a região de trabalho corrente, e da interação com o usuário, para obter o nome do plano de informação, o módulo de inicialização é responsável pela interação com o usuário para aquisição dos seguintes dados relativos a projeção:

- fator de escala : fator multiplicativo das cotas dos pontos a serem projetados;
- fator de amostragem : fator que define as linhas da grade ou imagem que serão projetadas;
- ângulos de visualização : ângulos azimutal e de elevação que definem a direção de projeção;
- periférico de saída : estação de trabalho associada ao periférico de saída que o usuário quer utilizar para a saída da projeção;
- tipo de projeção : projeção paralela, perspectiva ou par estereoscópico;

- cor de saída : cor de aparecimento da projeção no periférico de saída. No caso de se querer projetar o par estereoscópico o usuário deve escolher duas cores de saída, uma para cada projeção, de acordo com o filtro que será usado na visualização;
- janela de entrada : coordenadas vetoriais ,  $x_{min}, x_{max}, y_{min}$  e  $y_{max}$ , que limitam a janela da grade ou da imagem que se quer visualizar;
- janela normalizada de saída : coordenadas normalizadas, intervalo  $(0,1)$ , do periférico de saída que delimitam a janela do periférico que será usada na projeção.

Além dessas tarefas, este módulo é responsável também pelas inicializações do GKS e da estação de trabalho, pela ativação dessa estação e pelas definições das transformações de coordenadas e atributos das primitivas de saída do GKS.

### 3.5.2.2 CÁLCULOS PRELIMINARES

O objetivo deste módulo é o cálculo dos coeficientes da matriz de transformação geométrica de acordo com a direção de visualização e o tipo de projeção definidos pelo usuário.

Esse módulo define, também, um fator de escala e uma translação, de modo a colocar o centro da projeção no centro da janela normalizada de saída e para garantir uma visualização global da superfície no dispositivo de saída. Esse fator de escala e a translação são utilizados para o cálculo de uma janela de entrada cujos valores de coordenadas serão utilizados como "defaults" para a definição dessa janela. Isto significa que a escolha desses valores fornecerá ao usuário uma visualização total da superfície, qualquer que seja a direção de visualização e a projeção previamente definidas.

Outra característica importante deste módulo é a transformação da faixa de variação das coordenadas de projeção para o intervalo (0 - 1500). Isto irá facilitar sobremaneira a tarefa de escondimento de linhas ocultas que será tratada no ítem seguinte.

### 3.5.2.3 TRAÇADO DA PROJEÇÃO

A primeira tarefa deste módulo é a escolha da ordem de projeção das linhas da grade ou da imagem. Essa escolha é determinante para o bom funcionamento do algoritmo de escondimento de linhas aqui utilizado. Segundo esse algoritmo, as linhas mais próximas ao ponto de visualização devem ser projetadas antes das linhas mais distantes. Por isto, deve-se escolher entre projetar a grade da primeira para a última linha, como armazenada no arquivo, ou vice-versa.

O algoritmo de escondimento de linhas baseia-se na definição de 2 vetores de pontos representando uma máscara superior e uma máscara inferior que definem se um dado segmento de linha é, ou não, visível segundo os parâmetros de visualização definidos. A primeira linha projetada é considerada totalmente visível e as máscaras superior e inferior são atualizadas pelos pontos dessa linha. A quantidade de pontos dos vetores máscaras depende da variação das abscissas dos pontos da superfície projetada. Como já foi visto, a função de projeção delimita essa variação entre 0 e 1500. Definiram-se então esses vetores com 1500 posições associando cada uma dessas posições a uma abscissa diferente da janela de projeção.

O critério de escondimento ou de visibilidade é o seguinte: se um segmento está totalmente acima da máscara superior ou totalmente abaixo da máscara inferior, então ele é visível; se os extremos desse segmento estão entre essas duas máscaras então ele é invisível; e se um dos extremos do segmento está entre as máscaras e o outro não, então o segmento é parcialmente visível.

Para exemplificar o método usado, considere o segmento AB da Figura 3.7. Considera-se que esse segmento é formado por uma série de microsegmentos cujas abscissas estão relacionadas a duas abscissas consecutivas de AB, iniciando-se pelo ponto A até se alcançar o ponto B. O critério de visibilidade é aplicado a cada um desses microsegmentos. Quando o microsegmento não é totalmente

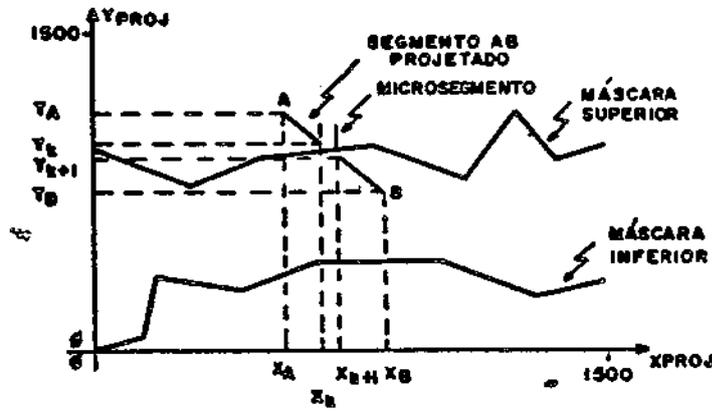


Fig. 3.7 - Escondimento de um segmento projetado

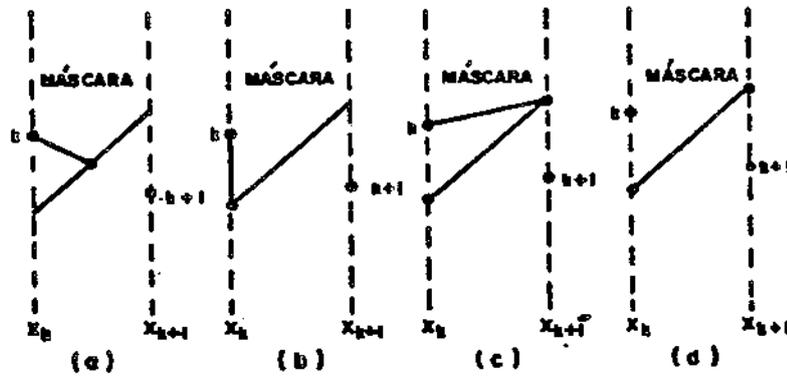


Fig. 3.8 - Soluções para visibilidade de microsegmento parcialmente visível. (a) solução rigorosa. (b) e (c) soluções não rigorosas com segmento visível. (d) solução não rigorosa com segmento invisível.

visível ou invisível, uma das soluções não rigorosas apresentadas na Figura 3.8 é adotada. A solução (d) dessa figura deve ser adotada sempre que o microssegmento for invisível à percepção do olho humano ou devido a resolução da tela.

A primeira linha, da grade ou imagem, a ser traçada depende do ângulo azimutal,  $\phi$ , de visualização escolhido pelo usuário. Se  $-90^\circ < \phi < 90^\circ$ , o traçado deve ser iniciado pelo lado A da Figura 3.9; caso contrário, o traçado deve ser iniciado pelo lado B.

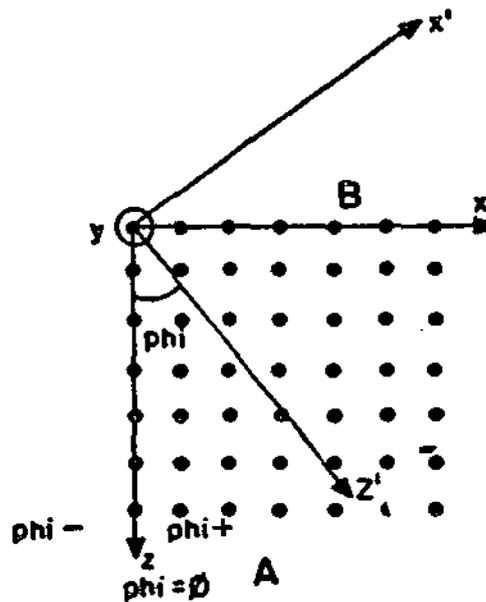


Fig. 3.9 - Escolha da primeira linha a ser projetada

Definida e traçada a linha inicial, para cada nova linha, a função responsável pelo traçado da projeção realiza, basicamente, as seguintes tarefas :

- a) Verifica se a linha deve ser traçada. Dependendo do fator de amostragem escolhido pelo usuário, essa linha deve, ou não, ser projetada. Caso a linha não deva ser projetada, uma nova linha será lida do arquivo e a função volta para (a).
- b) Aplica o fator de escala, definido pelo usuário, as cotas dos pontos da linha.
- c) Aplica as transformações geométricas e de projeção a cada microsegmento da linha e verifica a visibilidade do mesmo. Aqueles que são parcialmente visíveis são transformados em visíveis pela solução (c) da Figura 3.7. Apenas os segmentos visíveis são plotados no dispositivo gráfico de saída.

Para traçado do par estereoscópico a sequência acima é repetida 2 vezes, cada uma com um ponto de visada e uma cor de saída diferentes. As cores são aquelas definidas pelo usuário no módulo de inicialização. O problema maior é a definição dos pontos de visada utilizados para cada uma das projeções cônicas que formam o par estereoscópico. A Figura 3.10 ilustra a solução dessa questão.

Como visto na Figura 3.10, a distância entre os pontos de visada, na direção paralela ao plano xy, deve

ser aproximadamente igual a distância entre as pupilas,  $dip$ , dos olhos humanos. Assim cada ponto de visada é deslocado  $dip/2$  para a esquerda e para a direita em relação ao ponto central de visada,  $pcv$ . Isto torna possível a visualização da superfície, com um filtro adequado, como se o ponto de visada estivesse situado em  $pcv$ .

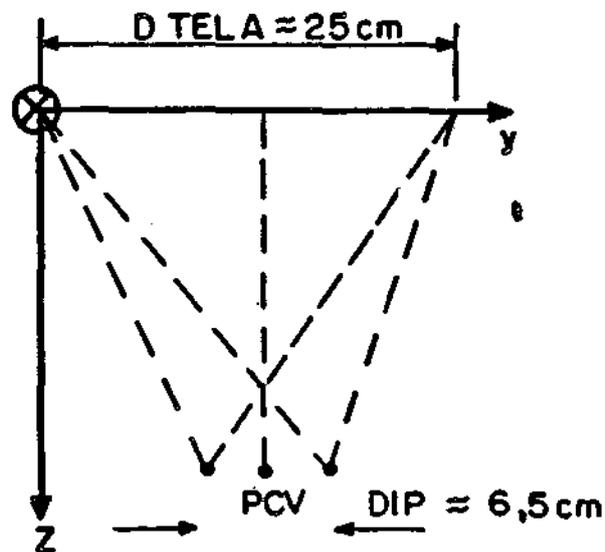


Fig. 3.10 - Distância entre os pontos de projeção para definição do par estereoscópico.

### 3.6 MAPA DE CONTORNOS

O processo de geração do mapa de isolinhas, ou mapa de contornos, está dividido em duas funções: geração e armazenamento das isolinhas e plotagem das isolinhas. A primeira é responsável pela determinação das isolinhas do mapa e armazenamento de cada isolinha separadamente num arquivo de linhas do SGI. A segunda função plota as isolinhas, armazenadas num arquivo de linhas, segundo alguns atributos definidos pelo usuário. Os aspectos de implementação dessas duas funções serão tema dos próximos itens.

#### 3.6.1 GERAÇÃO E ARMAZENAMENTO DAS ISOLINHAS

##### 3.6.1.1 DEFINIÇÕES E OBJETIVOS

A função de geração e armazenamento das isolinhas tem os seguintes objetivos:

- obter as isolinhas de um modelo digital de terreno a partir de um modelo de grade regular retangular, e
- armazenar as isolinhas obtidas num arquivo de linhas do SGI.

### 3.6.1.2 CARACTERÍSTICAS DE IMPLEMENTAÇÃO

Para aumentar a facilidade de compreensão desta função ela será dividida em 4 módulos distintos: módulo de inicialização; módulo de busca das isolinhas referentes a cada cota; módulo de separação e compressão de isolinhas distintas de mesma cota; e módulo de armazenamento dos pontos que compõem essas isolinhas.

O módulo de inicialização é responsável: pela interação com o usuário para obtenção dos dados necessários ao funcionamento da função, pela verificação da consistência dos dados de entrada, pela verificação da existência e abertura do arquivo grade regular e pela criação e abertura do arquivo de linhas que será utilizado para armazenamento das isolinhas. A interação com o usuário é necessária para a obtenção dos seguintes dados de entrada:

- nome do plano de informação;
- valor de cota mínimo desejado do mapa de contornos;
- valor de cota máximo desejado do mapa de contornos,
- e
- espaçamento entre as isolinhas.

Estas três últimas informações irão definir o número total de cotas de isolinhas que farão parte do mapa de contornos.

Os três módulos seguintes são chamados uma vez para cada valor de cota que foi definido usuário no módulo de inicialização.

O módulo de busca das isolinhas percorre, para cada cota, todas as células do arquivo grade regular procurando as possíveis intersecções de isolinhas, que possuam esse valor de cota, com cada célula. Os pontos de intersecção encontrados são armazenados temporariamente num vetor de pontos.

O módulo de separação e compressão de isolinhas distintas de mesma cota faz uma busca nesse vetor temporário de pontos para determinar as isolinhas distintas contidas nesse vetor. Para cada isolinha diferenciada faz-se uma redução de dados para eliminar os pontos redundantes dentro de um certo critério de inclinação dos segmentos formados pelos pontos que compõem essa isolinha.

Finalmente o módulo de armazenamento é chamado para que cada isolinha distinta e reduzida seja armazenada num registro do arquivo de linhas. Juntamente com os pontos que compõem a isolinha são armazenadas, ainda, algumas informações extras, tais como : retângulo envolvente da isolinha, natureza da isolinha, aberta ou fechada, etc.... que fazem parte do cabeçalho de cada linha do arquivo de linhas. Estas informações serão úteis quando da utilização dessas isolinhas por outras funções.

### 3.6.2 PLOTAGEM DAS ISOLINHAS

#### 3.6.2.1 DEFINIÇÕES E OBJETIVOS

O objetivo desta função é a plotagem das isolinhas previamente armazenadas num arquivo de linhas. Esta função permite que o usuário escolha, dentre outras características, o dispositivo de saída e o local desse dispositivo que as isolinhas irão aparecer, o tipo de interpolador que irá suavizar as isolinhas e a colocação automática, ou não dos valores de cota sobre as linhas mestras do mapa. Esta função faz uso das rotinas do pacote gráfico básico baseado no padrão GKS e a cada dispositivo de saída está associado a uma estação de trabalho diferente.

#### 3.6.2.2 CARACTERÍSTICAS DE IMPLEMENTAÇÃO

Esta função está dividida, basicamente em 2 módulos distintos: módulo de inicialização e módulo de plotagem.

O módulo de inicialização é responsável: pela interação com o usuário para obtenção dos dados necessários ao funcionamento da função, pela verificação da consistência dos dados de entrada, pela verificação da existência e abertura do arquivo de linhas e pela

inicialização do GKS. A interação com o usuário é necessária para a obtenção dos seguintes dados de entrada :

- nome do plano de informação;
- tipo de interpolador : a função atualmente permite que o usuário escolha entre não utilizar nenhum interpolador, que permitirá uma saída mais rápida do mapa, ou um interpolador do tipo Akima 2-d;
- dispositivo de saída : o usuário pode optar por uma unidade visualizadora do tipo crt ou uma plotter; .
- cor de saída;
- plotagem ou não dos valores das cotas sobre as linhas mestras;
- janela normalizada : valores máximos e mínimos normalizadas das coordenadas x e y de saída do mapa de contornos no dispositivo de saída.

O módulo de plotagem tem a incumbência de plotar o mapa de contornos conforme especificado pelo usuário no módulo anterior. Essa plotagem, basicamente, lê as isolinhas do arquivo de linhas, interpola os pontos , adiciona cotas as isolinhas mestras caso o usuário assim o queira e mostra esses dados no dispositivo de saída escolhido fazendo uso das funções de saída do GKS.

A quarta e última medida de erro foi feita nas mesmas condições anteriores com as seguintes modificações: o valor do número de vizinhos mais próximos considerado na estimação do valor de cada ponto da grade foi fixado igual a 4 para os interpoladores 1 e 2 e igual a 1 por quadrante (total igual a 4) para os interpoladores 3 e 4 e variou-se o interpolador. Os resultados obtidos foram os seguintes:

Para interpolador número 1

- erro RMS..... : 0.0416
- erro médio..... : 0.0007
- erro médio (modulo). : 0.0249
- variância do erro... : 0.0017
- desvio padrão..... : 0.0416
- erro mínimo..... : -0.4230
- erro máximo..... : 0.2578

Para interpolador número 2

- erro RMS..... : 0.0421
- erro médio..... : 0.0002
- erro médio (modulo). : 0.0248
- variância do erro... : 0.0018
- desvio padrão..... : 0.0421
- erro mínimo..... : -0.4148
- erro máximo..... : 0.2628

Para interpolador número 3

- erro RMS..... : 0.0422  
- erro médio..... : 0.0009  
- erro médio (modulo). : 0.0277  
- variância do erro... : 0.0018  
- desvio padrão..... : 0.0422  
- erro mínimo..... : -0.2722  
- erro máximo..... : 0.1904

A observação dos resultados apresentados acima leva a escolha do valor 6 como a quantidade ideal de amostras para formar a vizinhança de cada ponto a ser interpolado. Porém este não deve ser considerado o valor ótimo para ser usado para qualquer superfície e em quaisquer condições. É de se esperar que para superfícies mais rugosas esse valor deva ser diminuído sob pena de se considerar amostras que não represente a variação local correta da superfície. Observa-se ainda que existe uma relação inversa entre o expoente da função de ponderação e o número de amostras da vizinhança de cada ponto interpolado. O efeito de se escolher uma vizinhança muito numerosa pode ser destruído pela escolha de um expoente em valor absoluto maior. Como a variação no valor do expoente da função de ponderação não afeta o tempo de geração da grade (como visto anteriormente) deve-se escolher uma quantidade de amostras vizinhas não muito grande (pois do contrário aumentaria-se muito o tempo de geração da grade). Em seguida varia-se o valor do expoente de ponderação de acordo com as características inerentes a superfície. Isto pressupõe um sentimento a priori, por parte do usuário, do comportamento da superfície que se quer modelar.

## CAPÍTULO 4

### RESULTADOS OBTIDOS

#### 4.1 INTRODUÇÃO

Neste capítulo serão apresentados os resultados mais importantes referentes a funcionalidade do sistema de MDT implementado. Será ainda analisado o desempenho de algumas funções em relação ao tempo de processamento gasto e aos erros envolvidos no processamento.

9c

Para possibilitar a análise desses resultados foi utilizado um programa que gera amostras de uma função matemática conhecida. Essa função gera amostras aleatórias e a função matemática escolhida foi a função:

$$\begin{aligned} \text{sinc}(x) &= (\text{sen}(x))/x & -4\pi < x < 4\pi & \quad (4.1) \\ \pi &= 3.1415927\dots \end{aligned}$$

Relativos a esta função gerou-se 4 conjuntos de amostras que são:

amostras f1 - 100 pontos amostrados da função sinc(x);  
amostras f2 - 200 pontos amostrados da função sinc(x);  
amostras f3 - 500 pontos amostrados da função sinc(x);  
amostras f4 - 1000 pontos amostrados da função sinc(x);

Utilizou-se também um conjunto de amostras que será referenciado no texto como conjunto de amostras f5 e que representa uma amostragem de uma superfície real. Essas amostras foram obtidas de um par estereoscópico na escala de 1:10000, pertencente a uma cobertura aerofotogramétrica realizada especialmente para a construção de ortofotos na região de Agulhas Negras, no estado do Rio de Janeiro, Brasil (Destri, 1987). As coordenadas x e y dos pontos do conjunto de amostras f5 representam posições de uma faixa de terreno da região de Agulhas Negras. As coordenadas z desses pontos representam a altura relativa a cada uma das posições  $(x, y)_i$  desse terreno. A aquisição das coordenadas foi feita segundo perfis igualmente espaçados, paralelos ao eixo das ordenadas do instrumento restituidor fotogramétrico. O restituidor usado foi um Aviógrafo Wild B-8S, com registrador digital de coordenadas. Adquiriu-se também amostras ao longo das linhas características do terreno.

Na Figura 4.2 pode-se visualizar a distribuição da projeção ortogonal sobre o plano xy do conjunto de amostras f3. A Figura 4.3 ilustra essa mesmo tipo de distribuição para o conjunto de amostras f5.

#### 4.2 AQUISIÇÃO

Como visto no capítulo 3 a função de aquisição implementada adquire dados de mapas existentes

através de uma mesa digitalizadora. Essa função adquire inicialmente quatro pontos de controle que servem para gerar a função de mapeamento das coordenadas de mesa para as coordenadas de armazenamento dos dados digitalizados. Após isto a função adquire os pontos digitalizados pelo usuário, transforma-os em coordenadas de armazenamento e armazena-os no arquivo de pontos amostrados. Essa função adquire os pontos de controle e as amostras em tempo real e os testes realizados não indicaram nenhum tipo de problemas com a aquisição desses pontos desde que o sistema esteja sendo utilizado no modo monousuário do sistema operacional. No modo multiusuário observou-se perda de informação enviada pela mesa. Isto ocorre devido a forma de atendimento dos usuários característica do sistema operacional Analix. No modo multiusuário há uma perda de sincronismo entre o envio da amostra pela mesa digitalizadora e a aquisição dessa amostra pelo microcomputador. Portanto na versão atual do sistema implementado deve-se utilizar essa função de amostragem dados da mesa apenas no modo monousuário do sistema operacional Analix.

Os erros associados aos pontos digitalizados são praticamente de origem humana, ou seja, os erros de precisão da mesa são desprezíveis em relação aos erros causados por imprecisão da colocação do cursor sobre os pontos e de tremulação da mão do usuário no momento de mover o cursor sobre a mesa e de apertar a tecla de digitalização do cursor.

### 4.3 GERAÇÃO DO MODELO

#### 4.3.1 REGIÃO DE INTERESSE

A região de interesse implementada é a fronteira convexa que envolve o conjunto pontos amostrados pelo usuário. O algoritmo utilizado na definição da região de interesse sobre um conjunto de amostras mostrou-se muito eficiente em relação ao tempo gasto para a geração dessa região. A Figura 4.1 mostra o gráfico da variação do tempo gasto para a geração da região de interesse em função do número de amostras total. Observa-se que o tempo de geração cresce proporcionalmente ao número de amostras. Apesar disto esse tempo é considerado bastante pequeno se comparado com os tempos de organização dos dados e de geração do modelo de grade regular retangular que serão mostrados nos itens que seguem. Portanto a tarefa de geração da fronteira convexa não compromete o desempenho do sistema de MDT implementado.

A Figura 4.2 ilustra o processo de geração da fronteira convexa que delimita o conjunto de amostras  $\{3\}$ . Os pontos marcados com \* são os extremos que definem a primeira aproximação da fronteira que se está buscando (ver Figura 3.2). Os pontos marcados com + são os pontos externos a essa região e os candidatos a formarem a região convexa. Na Figura 4.3 pode-se visualizar mais nitidamente a fronteira convexa definida sobre esse conjunto de pontos.

A Figura 4.4 mostra a fronteira convexa gerada sobre o conjunto de amostras f5.

#### 4.3:2 ORGANIZAÇÃO DAS AMOSTRAS

Esta função é determinante no desempenho temporal do processo de geração do modelo. O tempo de organização dos pontos amostrados depende do número total de amostras e do número de pontos por partição escolhido pelo usuário. O primeiro parâmetro é dependente do processo de aquisição das amostras e uma vez definido não pode ser mudado pelo usuário. Já o número de pontos por partição pode ser escolhido livremente pelo usuário e deve ter um valor tal que otimize os tempos gastos na organização das amostras e na geração do modelo digital.

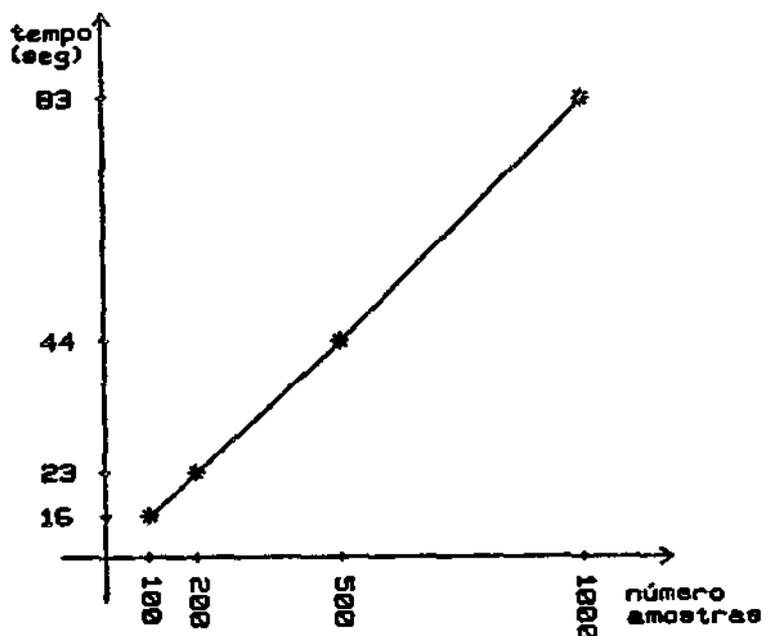


Fig. 4.1 - Tempo de geração da região de interesse x quantidade de amostras.

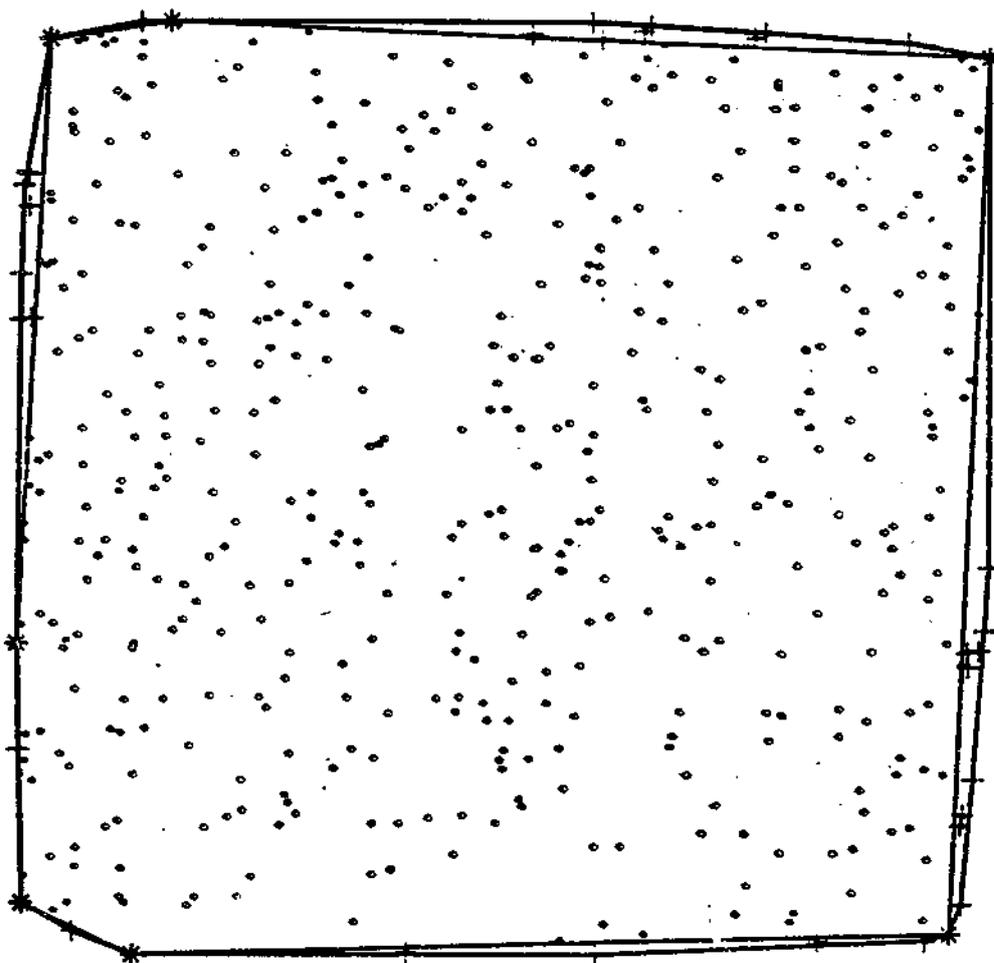


Fig. 4.2 - Processo de geração da região de interesse sobre o conjunto de amostras  $\mathcal{f}_3$

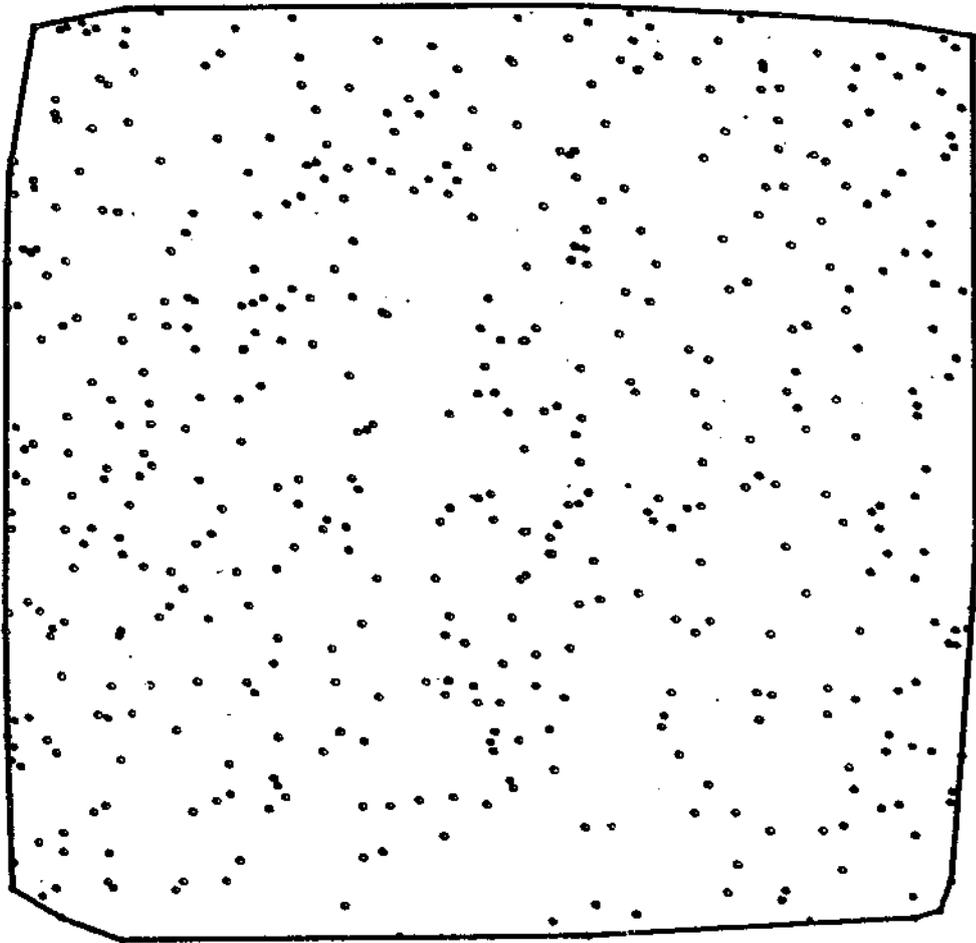


Fig. 4.3 - Fronteira convexa do conjunto de amostras f3.

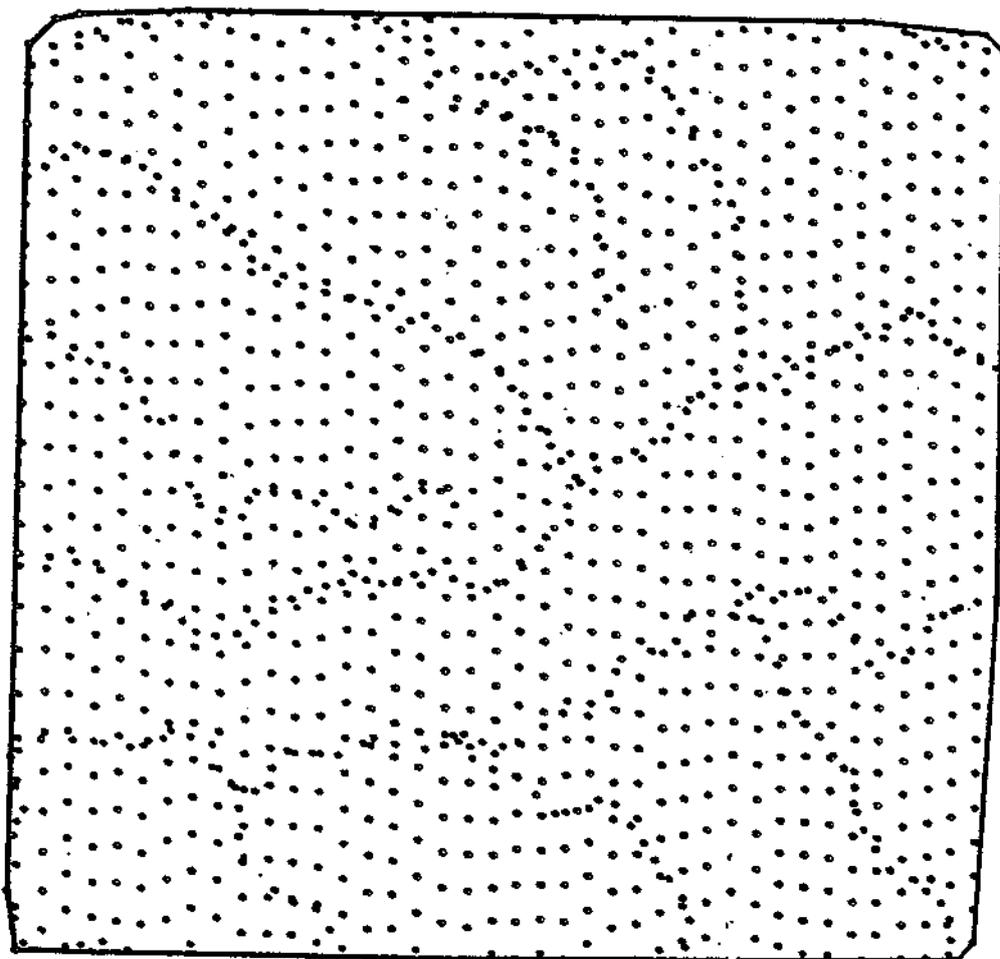


Fig. 4.4 - Fronteira convexa do conjunto de amostras  $\epsilon 5$ .

O gráfico da Figura 4.5 mostra uma variação crescente e aproximadamente linear do tempo de organização das amostras em função do número das amostras. O gráfico foi obtido a partir do conjunto de amostras f3 com uma organização das amostras com 32 pontos por partição.

Os gráficos das Figuras 4.6 e 4.7 mostram a variação do tempo de organização das amostras em função do número de pontos por partição. Os dados representados nesses gráficos foram obtidos respectivamente dos conjuntos de amostras f1 e f3. Observa-se que o tempo de organização das amostras diminui com o aumento do número de pontos por partição. Observa-se uma diminuição aproximadamente exponencial, que seria mais nítida caso fosse utilizada a mediana ao invés do valor médio no cálculo do valor do particionador durante o particionamento do conjunto de amostras.

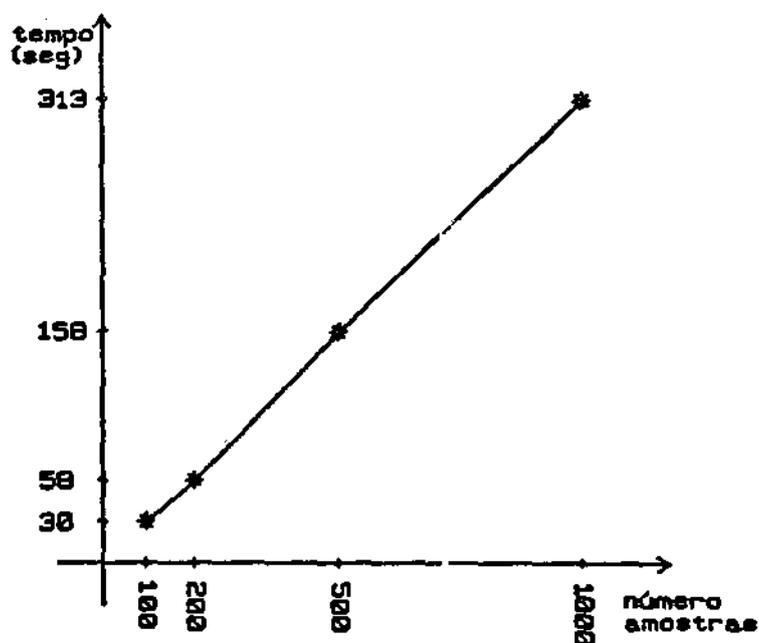


Fig. 4.5 - Tempo de organização das amostras x número de amostras.

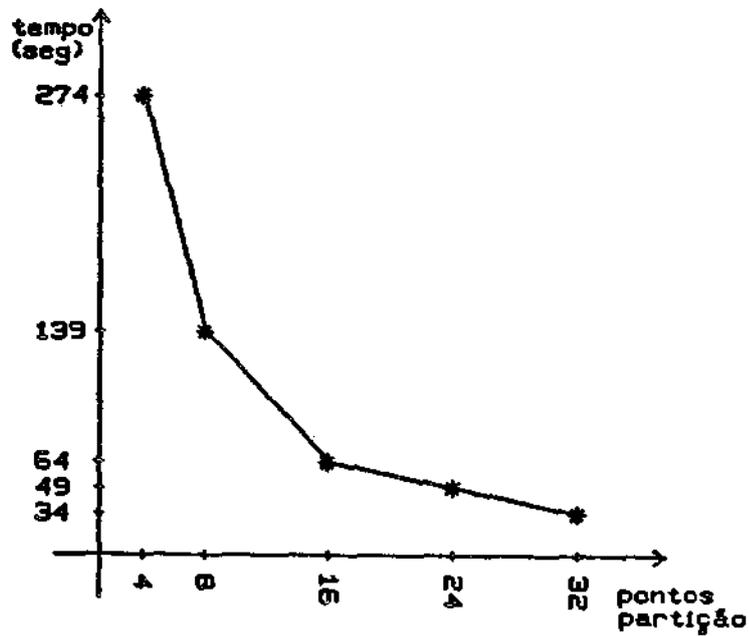


Fig. 4.6 - Tempo de organização das amostras (100 amostras) x número de pontos por partição.

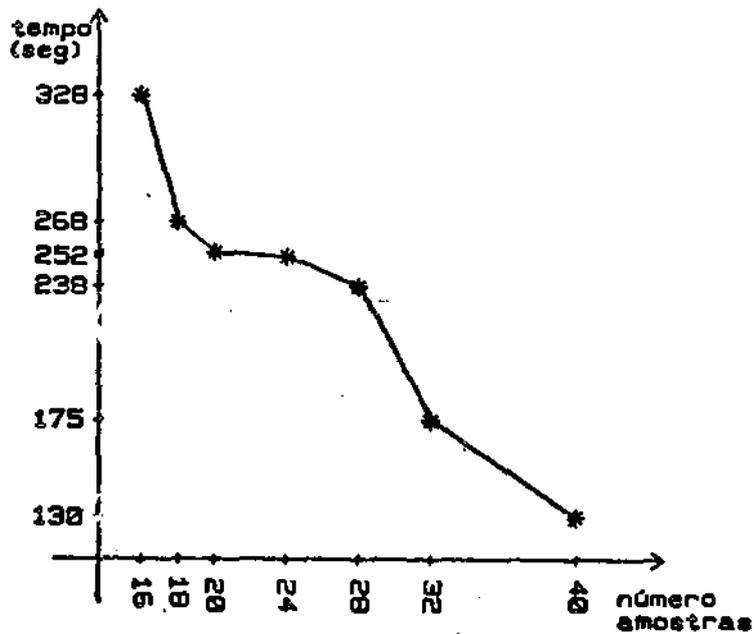


Fig. 4.7 - Tempo de organização das amostras (500 amostras) x número de pontos por partição.

#### 4.3.3 GERAÇÃO DA GRADE REGULAR

Neste ítem serão apresentados vários resultados obtidos com a função de geração da grade regular retangular utilizando-se apenas os interpoladores 1,2,3 e 4 como descritos no ítem 3.4.3.2d. Os interpoladores 5 e 6 não serão considerados nesta análise por apresentarem problemas durante a geração do modelo. Estes interpoladores deverão sofrer revisões e novos testes para que os erros que ainda persistem sejam detetados e corrigidos.

O tempo gasto para geração do modelo de grade regular retangular depende:

- do número de amostras;
- da organização dos pontos amostrados;
- do tipo de interpolador utilizado;
- da cardinalidade da vizinhança considerada na estimação de cada ponto da grade ;
- e do expoente da função de ponderação utilizado em cada interpolador.

A análise da influência de cada um desses parâmetros no tempo total de geração da grade foi realizada com a variação dos valores de cada um deles enquanto os demais permanecessem com um valor fixo. A dificuldade principal encontrada aqui foi a definição de qual parâmetro variar primeiro e quais valores fixar para os demais parâmetros. Essa escolha baseou-se mais na experiência

prática de utilização do sistema por parte do autor deste trabalho.

Isto posto definiu-se inicialmente os seguintes valores para os parâmetros apresentados:

- número de amostras : conjunto de amostras £3;
- organização dos pontos amostrados : 32 pontos por partição;
- tipo de interpolador utilizado : interpolador número 1;
- cardinalidade da vizinhança : 4 vizinhos mais próximos;
- expoente da função de ponderação : -2 .

A partir dessas definições variou-se o expoente da função de ponderação do interpolador 1 mantendo-se os demais parâmetros fixos. Observou-se que o tempo de geração da grade manteve-se constante com a variação desse expoente. Para as condições descritas acima o tempo de geração da grade foi de 224 segundos. Esse resultado era previsível visto que esse expoente é utilizado apenas no momento do cálculo do valor de cota de cada ponto da grade e serve como parâmetro para uma função da biblioteca matemática do sistema (  $\text{pow}(x,y)$  ). Essa função deve calcular todas as potências da mesma forma e portanto gastar o mesmo tempo de cálculo qualquer que seja o expoente da raiz. Assim as análises seguintes serão feitas com o valor do expoente da função de ponderação igual a -2.

A análise seguinte realizou-se com a variação do tipo de interpolador utilizado na estimação dos pontos da grade. Os resultados obtidos estão mostrados na tabela 4.1

TABELA 4.1

TEMPO DE GERAÇÃO DA GRADE EM FUNÇÃO DO INTERPOLADOR

interpolador	tempo de geração da grade
1	224 seg
2	227 seg
3	371 seg
4	375 seg

Da Tabela 4.1 observa-se que a diferença entre os tempos gastos para geração da grade com os interpoladores 1 e 2 é muito pequena (inferior a 2% nas condições definidas). O mesmo ocorre para os interpoladores 3 e 4. Desse fato conclui-se que a mudança da função de ponderação, que é a única diferença entre os interpoladores 1 e 2 e também entre os interpoladores 3 e 4, não implica em grande alteração no tempo de geração da grade. Já a

diferença entre os tempos dos dois primeiros interpoladores em relação aos dois últimos é bastante significativa, da ordem de 65%. Isto é explicável pois os dois últimos interpoladores tem que, além de procurar os vizinhos mais próximos, executar a tarefa de organiza-los por quadrante e buscar apenas a quantidade de vizinhos mais próximos por quadrante requerida pelo usuário. A partir destes dados escolheu-se o interpolador número 1 para os próximos testes.

Mantendo-se as condições anteriores e variando-se a quantidade de vizinhos escolhidos para participarem da estimação do valor de cota cada ponto da grade obteve-se o gráfico da figura 4.8. Esse gráfico mostra que o tempo gasto na geração do modelo de grade

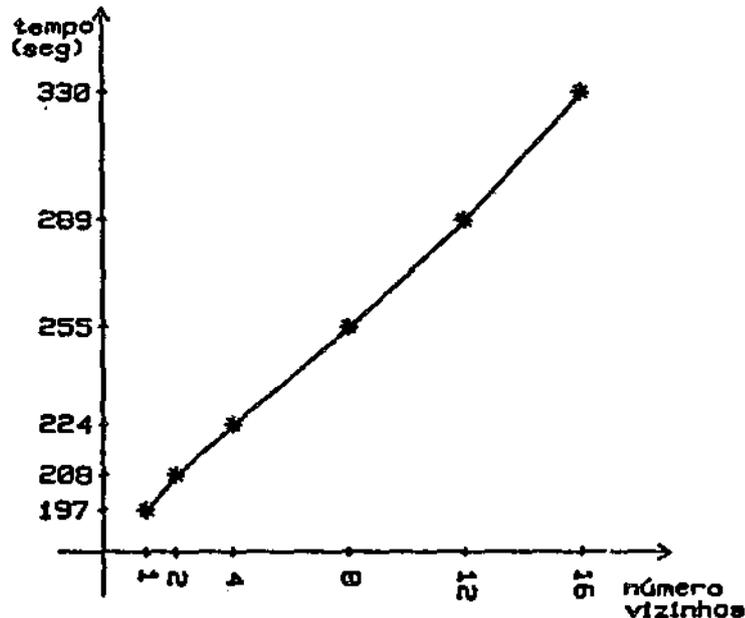


Fig. 4.8 - Tempo de geração da grade x número de vizinhos mais próximos.

crece, numa proporção aproximadamente linear, com o aumento dessa quantidade de vizinhos. Isto ocorre porque para um número de vizinhos maior a procura dessa vizinhança deve demandar um tempo maior de pesquisa nas partições do e próximas ao ponto interpolado.

Nas condições anteriores e variando-se a quantidade de amostras obteve-se o gráfico da Figura 4.9. Dessa figura observa-se que o tempo de geração da grade cresce numa proporção aproximadamente logarítmica com o aumento do número de amostras. Isto já era previsto uma vez que as amostras estão organizadas numa estrutura de árvore binária cuja característica do tempo de busca neste tipo de estrutura é logarítmica. Os possíveis desvios do comportamento logarítmico são devido a opção pelo cálculo do valor do particionador através do valor médio ao invés da mediana.

As figuras 4.10 e 4.11 mostram o gráfico da variação do tempo de geração da grade em função do número de pontos por partição para 100 e 500 amostras respectivamente. Observa-se, na Figura 4.10 que esse tempo cresce com o aumento do número de pontos por partição quando este é superior ao valor 2. Observa-se, como era de se esperar, que para quantidade de pontos por partição muito próxima ao número de vizinhos escolhido pelo usuário, que é igual a 4 neste caso, o procedimento de geração da grade deve ser mais lento devido ao aumento da probabilidade de se ter que analisar partições vizinhas para completar o número total de vizinhos mais próximos requeridos. A figura 4.11 apresenta uma tendência sempre

crecente do aumento do tempo de geração da grade em relação ao número de pontos por partição pois não foram medidos tempos para uma quantidade de pontos por partição próxima ao valor crítico 4.

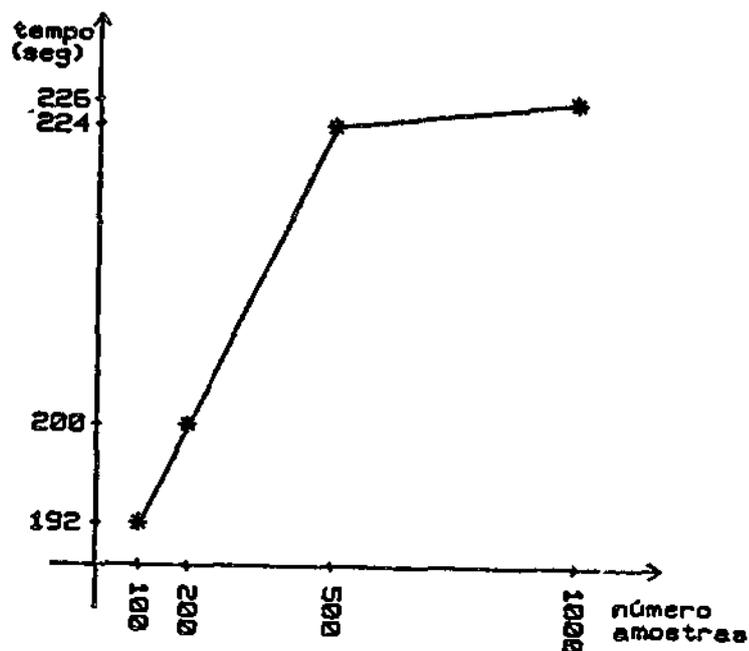


Fig. 4.9 - Tempo de geração da grade x quantidade de amostras.

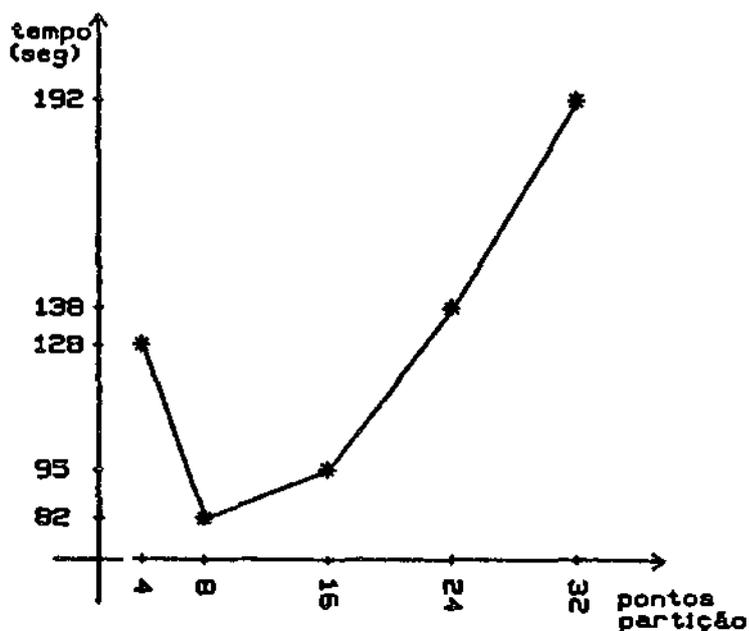


Fig 4.10 - Tempo de geração da grade x número de pontos por partição (amostras f1)

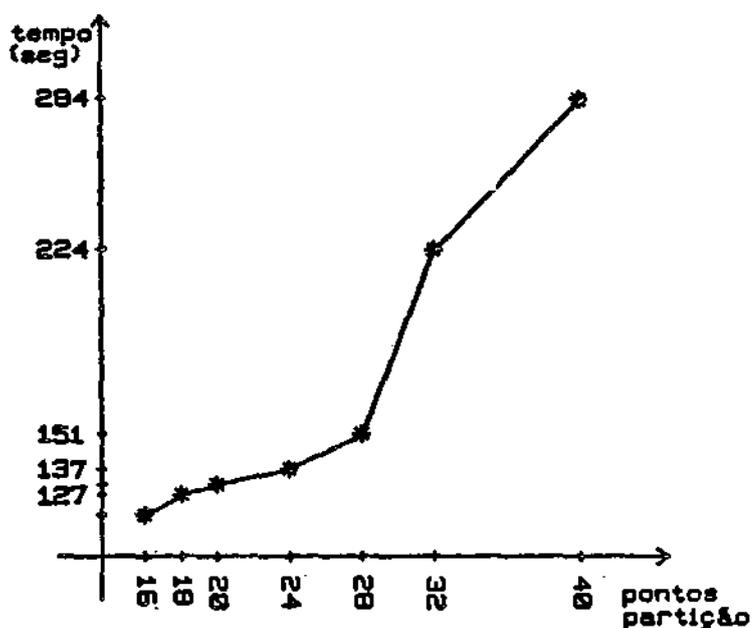


Fig 4.11 - Tempo de geração da grade x número de pontos por partição (amostras 3)

As Figuras 4.12 e 4.13 apresentam o comportamento da soma dos tempos de organização da árvore e de geração da grade em função do número de pontos por partição para 100 e 500 amostras respectivamente. Observa-se que existe um ponto de mínimo em cada uma das funções que correspondem a 16 e 20 pontos por partição para as figuras 4.12 e 4.13 respectivamente. Portanto esses deveriam ser os valores ótimos para serem utilizados no caso de se desejar gerar um modelo de grade nas condições apresentadas. Porém, o que acontece na prática é que se cria uma organização para as amostras apenas uma vez e sobre esta pode-se gerar vários modelos digitais de grades diferentes. Dessa forma deve-se ponderar mais o tempo de geração da grade pois o processo de organização das amostras é feito apenas uma vez. Assim, comparando-se a função da Figura 4.10 com a da Figura 4.12 é aconselhável que se escolha 8 pontos por

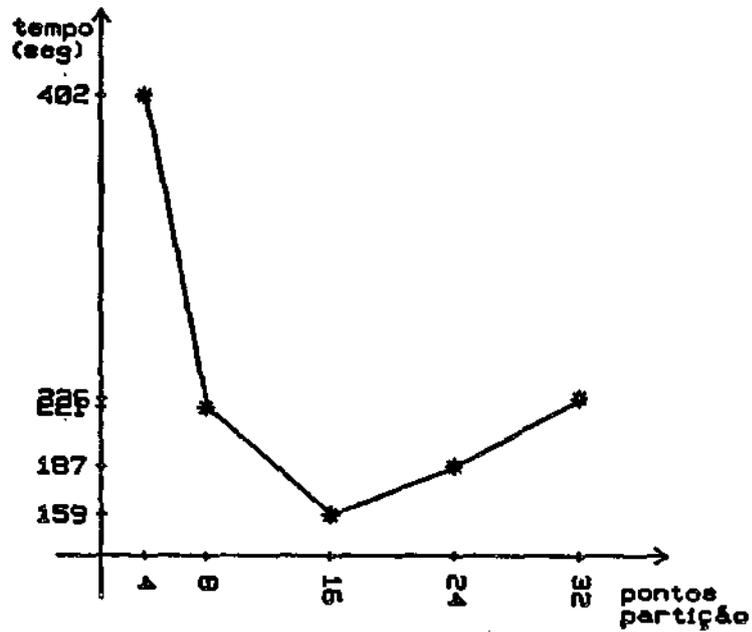


Fig. 4.12 - Tempo de organização das amostras + tempo de geração da grade x número de pontos por partição (amostras f1)

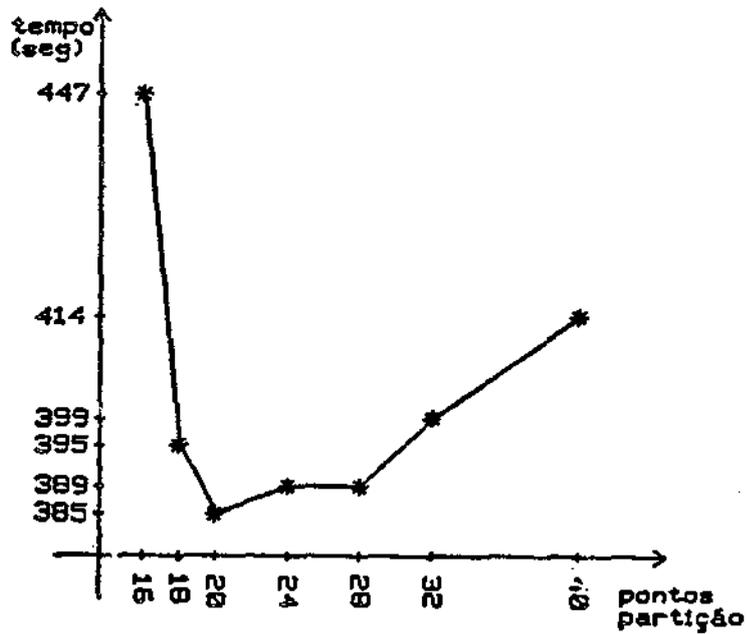


Fig. 4.13 - Tempo de organização das amostras + tempo de geração da grade x número de pontos por partição (amostras f3)

partição, que é o mínimo da primeira função, desde que não se pretenda utilizar sempre a mesma organização das amostras já gerada. Caso contrário deve-se escolher 16 pontos por partição.

Além das medidas de tempo em relação aos diversos parâmetros envolvidos no processo de geração do modelo digital foram realizadas medidas de erros de estimação das cotas dos modelos de grade gerados em relação aos valores exatos dessas cotas. Utilizou-se um programa teste que gera uma grade padrão sobre uma função matemática conhecida. Esta função permite que se escolha a resolução da grade que se quer obter. Os valores de cota desta grade padrão são calculados diretamente da função e portanto são valores exatos. As medidas foram feitas sobre grades com resolução de 30 linhas por 30 colunas e escolheu-se a função matemática da equação 4.1. Utilizaram-se os conjuntos de amostras  $\xi_1$  a  $\xi_4$  definidos no item 4.1 para a geração das grades pelo sistema em análise.

O erro (simples) associado a cada ponto da grade é definido como a diferença entre o valor de cota da grade padrão e o valor de cota da grade gerada pelo sistema. O programa que realiza o cálculo dos erros lê cada ponto das grades definidas pelo usuário, grade padrão e grade gerada pelo sistema, compara-os e acumula os seguintes erros associados a cada ponto: erro simples, erro ao quadrado e módulo do erro simples. Após isto, o programa calcula:

- erro RMS : erro médio quadrático definido como a raiz quadrada da média dos erros ao quadrado;

- erro médio : média dos erros simples;
- erro médio (modulo) : média dos módulos dos erros;
- variância do erro : diferença entre a média dos erros ao quadrado e o quadrado do erro médio;
- desvio padrão : raiz quadrada da variância.

Além desses erros o programa armazena ainda os erros máximo e mínimo da grade.

Os primeiros resultados de erros foram obtidos variando-se o número de amostras e fixando-se os demais parâmetros nos seguintes valores: interpolador número 1, 4 vizinhos mais próximos, expoente da função peso igual a -2, nro de pontos por partição igual a 32. Os resultados obtidos foram os seguintes:

Para o conjunto de amostras f1

- erro RMS..... : 0.0934
- erro médio..... : -0.0038
- erro médio (modulo). : 0.0647
- variância do erro... : 0.0087
- desvio padrão..... : 0.0933
- erro mínimo..... : -0.5166
- erro máximo..... : 0.3610

Para o conjunto de amostras f2

- erro RMS..... : 0.0690
- erro médio..... : 0.0091
- erro médio (modulo). : 0.0438

- variância do erro... : 0.0047
- desvio padrão..... : 0.0683
- erro mínimo..... : -0.2165
- erro máximo..... : 0.4410

Para o conjunto de amostras £3

- erro RMS..... : 0.0416
- erro médio..... : 0.0007
- erro médio (modulo). : 0.0249
- variância do erro... : 0.0017
- desvio padrão..... : 0.0416
- erro mínimo..... : -0.4230
- erro máximo..... : 0.2578

Para o conjunto de amostras £4

- erro RMS..... : 0.0242
- erro médio..... : 0.0003
- erro médio (modulo). : 0.0157
- variância do erro... : 0.0006
- desvio padrão..... : 0.0242
- erro mínimo..... : -0.1131
- erro máximo..... : 0.1805

Para se realizar uma comparação entre os dados acima, é necessário que se conheça a variação total dos valores de cota dos pontos da grade padrão. Os valores de cota mínimo e máximo dessa grade são: -0.217121 e 0.938575 respectivamente tendo-se assim uma variação total igual a 1.115696.

A tabela 4.2 mostra a porcentagem de variação do erro RMS em relação à variação total do valor de cota dos pontos da grade padrão.

TABELA 4.2

PORCENTAGEM DO ERRO RMS DE GERAÇÃO DA GRADE A PARTIR DE  
CADA CONJUNTO DE AMOSTRAS

amostras	erro RMS	var. total	porc. do erro
£1	0.0934	1.1157	8.37%
£2	0.0690	1.1157	6.18%
£3	0.0416	1.1157	3.72%
£4	0.0242	1.1157	2.17%

A partir dos resultados de erros apresentados acima observa-se que as medidas dos valores dos erros diminuí com o aumento do número de amostras. Isto era previsível uma vez que o aumento do número de amostras acarreta uma melhor representação das características da superfície.

A segunda medida de erro foi feita nas mesmas condições anteriores com as seguintes modificações: o número de amostras foi fixado em 500 e variou-se o valor do expoente da função de ponderação do interpolador. Os resultados obtidos foram :

Para o expoente igual a -1

- erro RMS..... : 0.0436  
 - erro médio..... : 0.0012  
 - erro médio (modulo). : 0.0271  
 - variância do erro... : 0.0019  
 - desvio padrão..... : 0.0435  
 - erro mínimo..... : -0.4249  
 - erro máximo..... : 0.2707

Para o expoente igual a -2

- erro RMS..... : 0.0416  
 - erro médio..... : 0.0007  
 - erro médio (modulo). : 0.0249  
 - variância do erro... : 0.0017  
 - desvio padrão..... : 0.00416  
 - erro mínimo..... : -0.4230  
 - erro máximo..... : 0.2578

Para o expoente igual a -3

- erro RMS..... : 0.0417  
 - erro médio..... : 0.0003  
 - erro médio (modulo). : 0.0248

- variância do erro... : 0.0017
- desvio padrão..... : 0.0417
- erro mínimo..... : -0.4211
- erro máximo..... : 0.2454

Para o expoente igual a -4

- erro RMS..... : 0.0424
- erro médio..... : 0.0001
- erro médio (modulo). : 0.0252
- variância do erro... : 0.0018
- desvio padrão..... : 0.0424
- erro mínimo..... : -0.4193
- erro máximo..... : 0.2675

Para o expoente igual a -6

- erro RMS..... : 0.0440
- erro médio..... : 0.0003
- erro médio (modulo). : 0.0262
- variância do erro... : 0.0019
- desvio padrão..... : 0.0440
- erro mínimo..... : -0.4159
- erro máximo..... : 0.2957

Dos resultados apresentados acima observa-se que o melhor valor de expoente da função de ponderação, nas condições especificadas, é -2 sendo que as diferenças de erro RMS e desvio padrão para o valor -2 e -3 foram mínimas. Apesar disso esse valor não pode ser considerado como padrão. O valor desse expoente depende muito de como

varia a superfície representada pelas amostras. A medida que se aumenta, em valor absoluto, esse expoente diminui muito a influência dos pontos, considerados na interpolação, que estão mais distantes da posição do ponto interpolado. Isto é desejável para superfícies muito "rugosas" (superfícies com muitas variações locais) pois amostras mais distantes não tem relação com o comportamento local da superfície. Para superfícies mais "suaves" (menor quantidade de variações locais), como é o caso da função  $\text{sinc}(x)$  utilizada, os expoentes menores, em valor absoluto, são mais representativos pois aumentam a influência de pontos amostras mais distantes do ponto interpolado.

A terceira medida de erro foi feita nas mesmas condições anteriores com as seguintes modificações: o valor do expoente da função de ponderação do interpolador foi fixado igual a -2 e variou-se o número de vizinhos mais próximos considerado na estimação do valor de cota de cada ponto da grade. Os resultados obtidos foram os seguintes:

Para o número de vizinhos igual a 2

- erro RMS.....	:	0.0458
- erro médio.....	:	0.0006
- erro médio (modulo)...	:	0.0263
- variância do erro...	:	0.0021
- desvio padrão.....	:	0.0458
- erro mínimo.....	:	-0.4027
- erro máximo.....	:	0.3700

Para o número de vizinhos igual a 5

- erro RMS..... : 0.0413  
- erro médio..... : 0.0006  
- erro médio (modulo). : 0.0254  
- variância do erro... : 0.0017  
- desvio padrão..... : 0.0413  
- erro mínimo..... : -0.4302  
- erro máximo..... : 0.2056

Para o número de vizinhos igual a 6

- erro RMS..... : 0.0409  
- erro médio..... : 0.0007  
- erro médio (modulo). : 0.0260  
- variância do erro... : 0.0017  
- desvio padrão..... : 0.0409  
- erro mínimo..... : -0.3603  
- erro máximo..... : 0.2120

Para o número de vizinhos igual a 7

- erro RMS..... : 0.0417  
- erro médio..... : 0.0008  
- erro médio (modulo). : 0.0271  
- variância do erro... : 0.0017  
- desvio padrão..... : 0.0417  
- erro mínimo..... : -0.3027  
- erro máximo..... : 0.2123

Para o número de vizinhos igual a 8

- erro RMS..... : 0.0355  
 - erro médio..... : 0.0001  
 - erro médio (modulo). : 0.0224  
 - variância do erro... : 0.0013  
 - desvio padrão..... : 0.0355  
 - erro mínimo..... : -0.2899  
 - erro máximo..... : 0.1697

Para interpolador número 4

- erro RMS..... : 0.0388  
 - erro médio..... : 0.0001  
 - erro médio (modulo). : 0.0235  
 - variância do erro... : 0.0015  
 - desvio padrão..... : 0.0388  
 - erro mínimo..... : -0.2799  
 - erro máximo..... : 0.2598

A análise dos resultados apresentados mostra que o interpolador que fornece menores valores de erro é o interpolador número 3 e em segundo lugar o interpolador 4. Isto significa que a consideração da posição relativa entre as amostras, que são utilizadas na interpolação de um ponto da grade, melhora a precisão do interpolador. Observa-se ainda que utilização da função de ponderação descrita pela equação 2.4 e utilizada nos interpoladores 1 e 3 prestou-se melhor a esse tipo de superfície do que a função de ponderação definida pela equação 2.6 e utilizada pelo interpoladores 2 e 4. Deve-se lembrar ainda que as análises de performance em termos de tempo indicam que os

interpoladores 3 e 4, que consideram a vizinhança por quadrante, são mais lentos que os interpoladores 1 e 2. Portanto se o usuário está interessado numa aproximação mais grotesca da superfície para, por exemplo, uma visualização rápida da superfície, ele deve optar pelo uso do interpolador 1 ou 2. Caso o modelo deva ser usado para fins que exijam maior precisão como, por exemplo, cálculos de engenharia então deve-se optar pela utilização dos interpoladores 3 e 4.

#### 4.3.4 REFINAMENTO DA GRADE

A função de refinamento do modelo de grade retangular mostrou-se extremamente rápida em relação ao tempo total de geração do modelo. O tipo de interpolador implementado para o refinamento (bilinear) e o fato de se explorar a distribuição geométrica dos pontos do modelo contribuíram para que esse tempo fosse minimizado.

O tempo demandado no processo de refinamento de uma grade depende exclusivamente do tamanho (número de linhas e colunas) da grade de entrada (não refinada) e da grade de saída refinada (imagem).

As Figuras 4.14 e 4.15 mostram os gráficos da variação do tempo de processamento em relação a porcentagem de refinamento da grade partindo-se das grades

de entrada de 15 linhas x 15 colunas e de 30 linhas x 30 colunas respectivamente. Observou-se uma variação muito

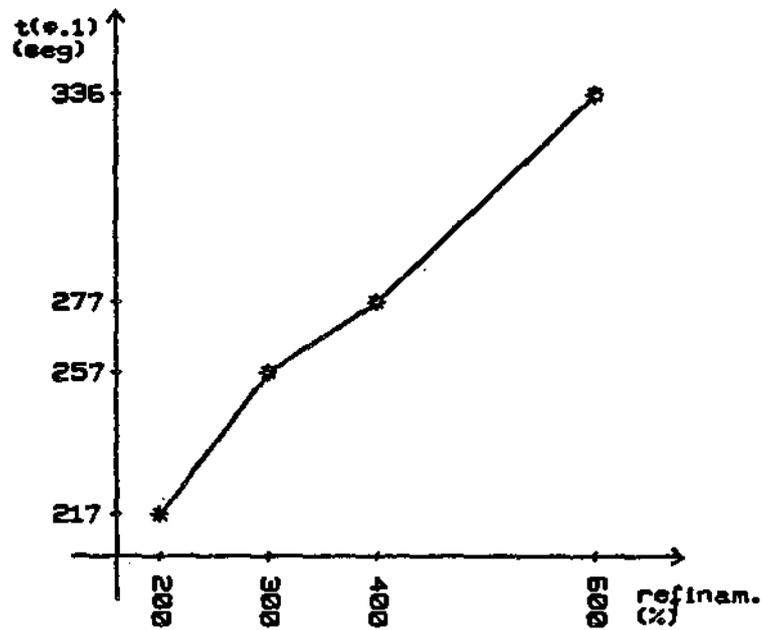


Fig. 4.14 - Tempo de refinamento da grade x porcentagem de refinamento (grade 15x15)

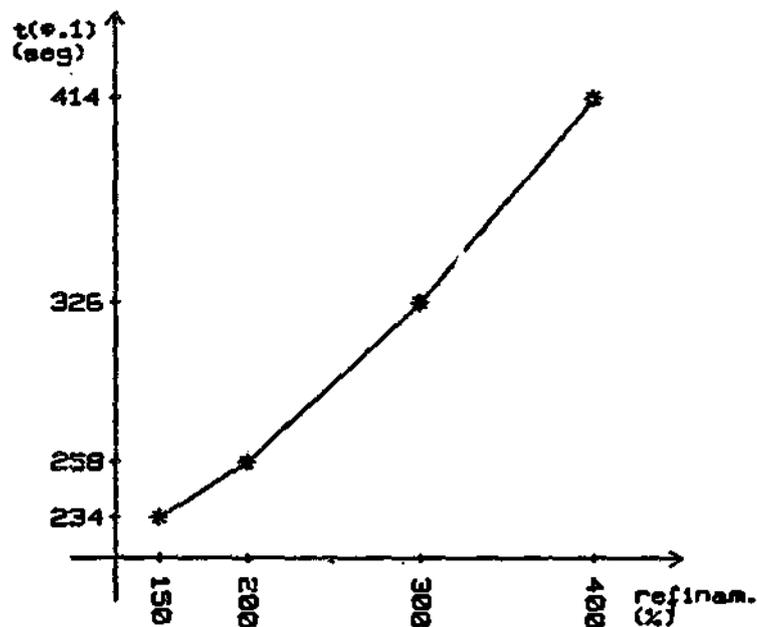


Fig. 4.15 - Tempo de refinamento da grade x porcentagem de refinamento (grade 30x30)

pequena no tempo de geração de uma mesma grade refinada mudando-se a grade de entrada. Observou-se ainda, em ambas as figuras, que o tempo cresce (linearmente) com o aumento da grade refinada de saída especificada pelo usuário.

#### 4.4 APLICAÇÕES

##### 4.4.1 PROJEÇÃO PLANAR

Como já foi visto anteriormente as projeções planares dos modelos digitais de terreno fornecem informações de caráter qualitativo da superfície em estudo. As projeções permitem que se tenha uma visão tridimensional dessa superfície, de qualquer posição de visualização do espaço 3-d, partindo-se do modelo gerado.

Para mostrar a funcionalidade da função de projeção plotaram-se uma série de projeções de alguns modelos de grade gerados variando-se os valores dos dados de entrada requeridos por essa função. Esses dados estão definidos no ítem 3.5.2.1 .

A Figura 4.16 mostra a plotagem em projeção paralela da grade padrão utilizada para medida dos erros dos modelos de grade gerada. A essa figura estão associados os seguintes dados de entrada:

- fator de escala .....: 70;
- fator de amostragem .....: 1;

- ângulo de azimute (em graus) : -10;
- ângulo de elevação (em graus) : -40;
- tipo de projeção .....: paralela;

A Figura 4.17 mostra essa mesma grade plotada em projeção perspectiva e com os demais dados de entrada iguais aos da figura 4.16.

A projeção da Figura 4.18 diferencia-se da figura anterior nos ângulos de azimute e de elevação escolhendo-se o valores -40 e -20 respectivamente.

A Figura 4.19 mostra a projeção do par estéreo da grade padrão nas mesmas condições de entrada da figura anterior. O par estéreo mostrado nessa figura deve ser visualizado com filtros adequados as cores de plotagem da figura. Tentou-se observá-lo através de um óculos com filtros verde e vermelho mas estes filtros não se mostraram muito adequados a essa tarefa.

A sequencia de Figuras 4.20 a 4.23 são todas elas projeções de modelos de grade gerados pelo sistema a partir dos conjuntos de amostras f1 a f4 respectivamente. Os modelos de grade foram gerados pelo interpolador 1 com 4 vizinhos mais próximos e expoente da função de ponderação igual a -2. Os modelos foram gerados considerando-se as regiões de interesse de cada conjunto de amostras. As características de projeção comuns a todas essas figuras são:

- fator de escala .....: 70;

- fator de amostragem .....: 1;
- ângulo de azimute (em graus) : -40;
- ângulo de elevação (em graus) : -40;
- tipo de projeção .....: paralela;

Comparando-se essas figuras pode-se ter uma percepção visual de que o modelo é mais representativo (compare essas figuras com a figura 4.16 desconsiderando os ângulos de visualização) para uma quantidade maior de amostras. Esta conclusão já havia sido alcançada nas análises de erros feitas no item 4.3.3 .

As Figuras 4.24 a 4.26 mostram projeções planares do modelo de grade gerado pelo sistema a partir do conjunto de amostras £3. As características de projeção idênticas a da figura 4.22. A diferença entre as Figuras 4.22, 4.24, 4.25 e 4.26 é o tipo de interpolador , 1 a 4 respectivamente, utilizado para estimar os pontos da grade gerada. Como já foi concluído anteriormente pode-se notar visualmente que os interpoladores 3 e 4 geram grades mais parecidas com a grade padrão para este tipo de superfície.

A Figura 4.27 ilustra a projeção planar de uma grade que passou pelo processo de refinamento. A grade de entrada é a mesma utilizada na projeção mostrada pela figura 4.21. Essa grade que originariamente foi gerada com 30 linhas e 30 colunas foi refinada gerando uma imagem de 68 linhas por 68 "pixels". Na projeção dessa imagem utilizou-se um fator de amostragem igual a 2.5. Observa-se que o refinamento não introduziu maiores distorções na

grade de entrada e que a projeção da imagem gerada tem um aspecto visual mais agradável aos olhos humanos.

As projeções das Figuras 4.28 a 4.31 foram realizadas sobre uma grade gerada a partir do conjunto de amostras f5. Utilizou-se o interpolador número 1 com 4 vizinhos mais próximos e o expoente da função de ponderação igual a -2. As características de projeção da Figura 4.28 são:

- fator de escala .....: 5;
- fator de amostragem .....: 1;
- ângulo de azimute (em graus) : -40;
- ângulo de elevação (em graus) : -40;
- tipo de projeção .....: perspectiva;

Na Figura 4.29 pode-se visualizar a grade gerada com as seguintes diferenças em relação a figura anterior : fator de escala igual a 7 e ângulo de azimute igual a -10.

A Figura 4.30 mostra o mesmo modelo plotado com as mesmas características de projeção da Figura 4.28 modificando-se a projeção para paralela e considerando-se a fronteira convexa que delimita as amostras.

A Figura 4.31 ilustra o par estereoscópico gerado a partir do modelo em estudo. As características de projeção são as mesmas das da Figura 4.28 a menos do tipo de projeção é claro.

#### 4.4.2 MAPA DE CONTORNOS

O processo de geração do mapa de contornos foi dividido em 2 funções: a primeira gera um arquivo de linhas com as isolinhas escolhidas pelo usuário e a segunda plota as linhas contidas nesse arquivo. Observou-se que o tempo de geração do arquivo de linhas a partir de uma grade qualquer, refinada ou não, aumenta com o aumento da quantidade de linhas desejada pelo usuário e com a densidade da grade escolhida. Já o tempo gasto na plotagem dos contornos depende do número de linhas do arquivo, do tipo de interpolador suavizador, da quantidade de intervalos de interpolação e do periférico de saída utilizado para a plotagem desses dados. Observou-se que o tempo de plotagem utilizando o interpolador linear foi a mais rápida e que o tempo de saída foi limitado exclusivamente pelo dispositivo de saída. Quando escolheu-se o interpolador Akima, a medida que se aumentou a quantidade de intervalos de interpolação escolhido também aumentou o tempo total de plotagem das isolinhas. Isto foi ocasionado também pelo número maior de acesso ao periférico de saída feito pela função. Pode-se observar, ainda, que a opção pela plotagem das cotas nas isolinhas mestras demandou um tempo extra de plotagem que pode ser desprezado se comparado com o tempo total da plotagem do mapa de contornos.

A Figura 4.32 mostra o traçado linear do mapa de contornos gerado a partir de um modelo de grade obtido

do conjunto de amostras  $\xi_5$ . O modelo possui 30 linhas x 30 colunas e foi obtido a utilizando-se o interpolador 1 com 4 vizinhos mais próximos e expoente da função de ponderação igual a  $-2$ . O espaçamento entre os valores de cota de linhas de contorno adjacentes é de 29.08 metros.

As Figuras 4.33 e 4.34 ilustram o traçado do mesmo mapa de contornos da figura anterior utilizando o interpolador Akima 2-d com 5 e 10 intervalos de interpolação respectivamente. Dessas figuras pode-se observar que o traçado das linhas ficou mais "suave" do que sem interpolador. As "pontas" (trechos das linhas que não foram suavizados) são decorrentes da existência de pontos da linha muito próximos uns aos outros nessa região. Como uma das características principais desse interpolador é que ele passa pelos pontos originários da curva, ele não consegue suavizar a curva nessas regiões. Observou-se ainda que o aumento do número de intervalos de interpolação de 5 para 10 não trouxe uma melhora significativa no traçado final no traçado dos contornos. Isto ocorre porque o grau de suavização da curva depende da densidade de pontos da curva. Curvas com densidade maior de pontos são menos suavizadas pois a curva interpolada deve passar por todos os pontos originários da curva. A densidade dos pontos da curva depende, por sua vez da densidade do modelo de grade gerado.

A Figura 4.35 mostra o mapa de contorno da figura 4.32 com a plotagem automática das cotas nas respectivas linhas. Plotou-se as cotas de todas as linhas apenas para aumentar a quantidade de cotas plotadas, mas

isto não é usual. Usualmente plotam-se apenas as cotas das linhas mestras que são aquelas que tem valor de cota múltiplo de 5 do espaçamento entre as cotas.

Finalmente a Figura 4.36 mostra o traçado do mapa de contornos do mesmo modelo utilizado até então com uma diferença entre valores de cotas adjacentes igual a 8. Observa-se um mapa de contorno muito mais densificado porém sem que haja intersecção entre as linhas de contornos que é uma das características principais desse tipo de aplicação sobre o modelo.

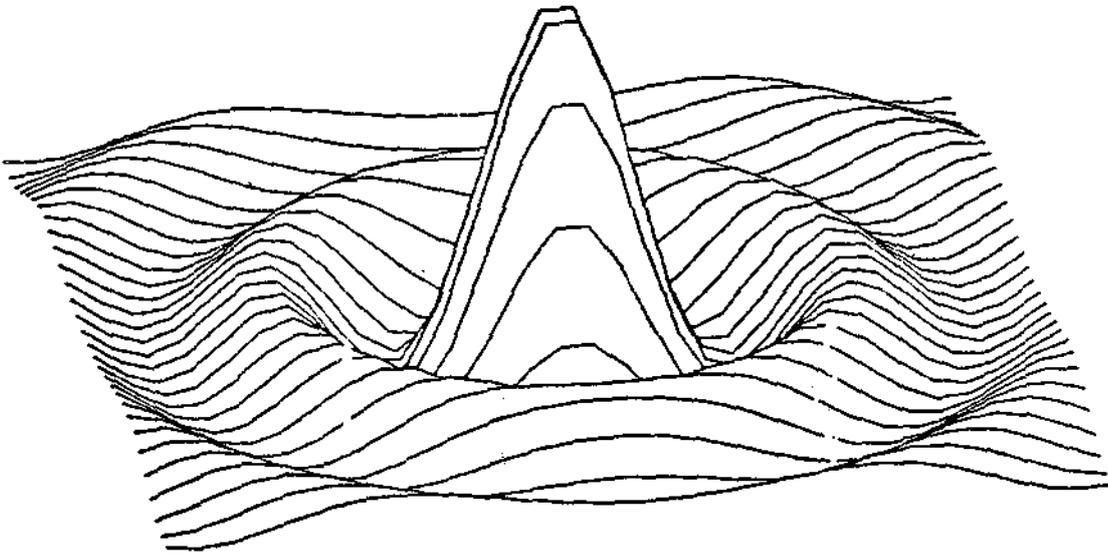


Fig. 4.16 - Projeção paralela da grade padrão.

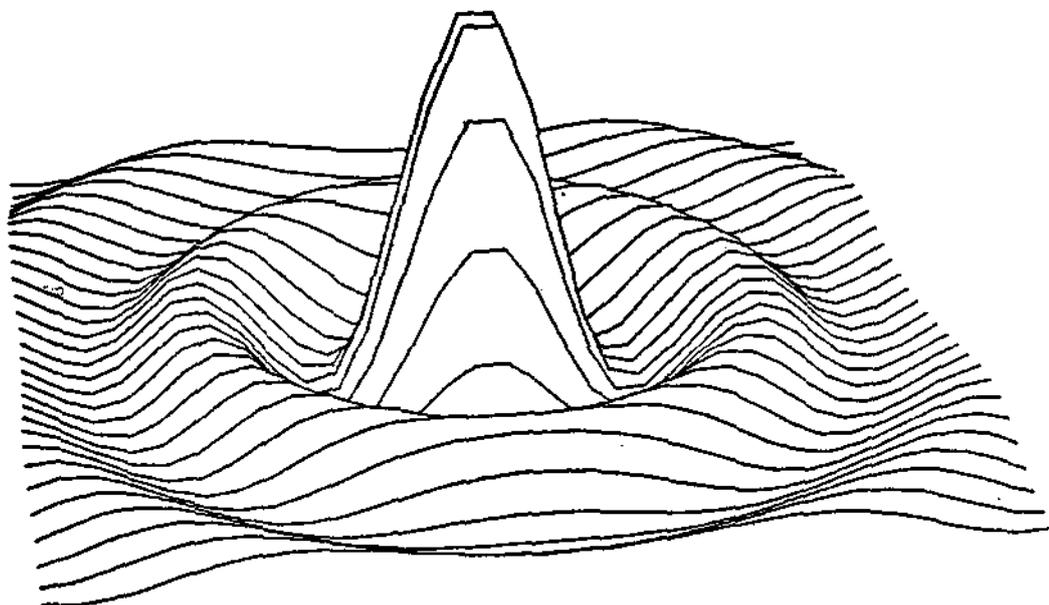


Fig. 4.17 - Projeção perspectiva da grade padrão (azimute = -10 e elevação = -40).

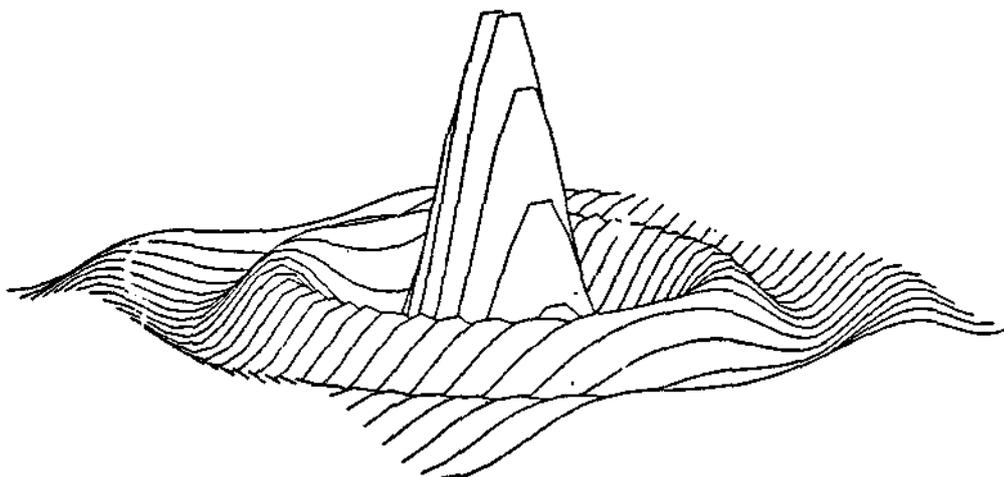


Fig. 4.18 - Projeção perspectiva da grade padrão (azimute = -40 e elevação = -20).

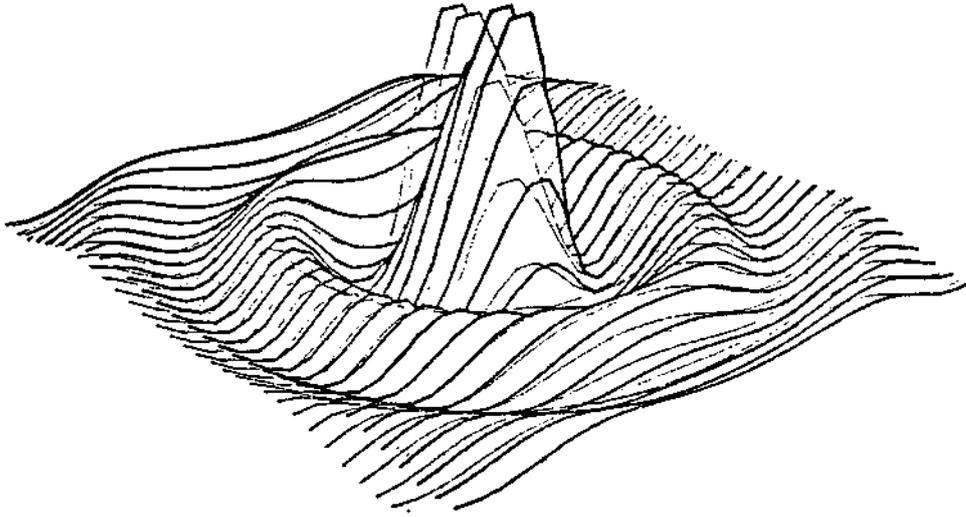


Fig. 4.19 - Par estéreo da grade padrão.

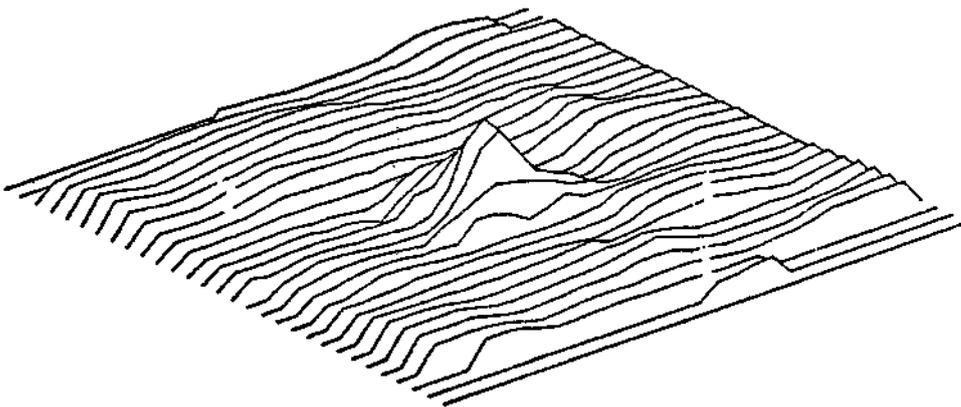


Fig. 4.20 - Projeção paralela do modelo gerado a partir do conjunto de amostras  $f_1$  e interpolador 1.

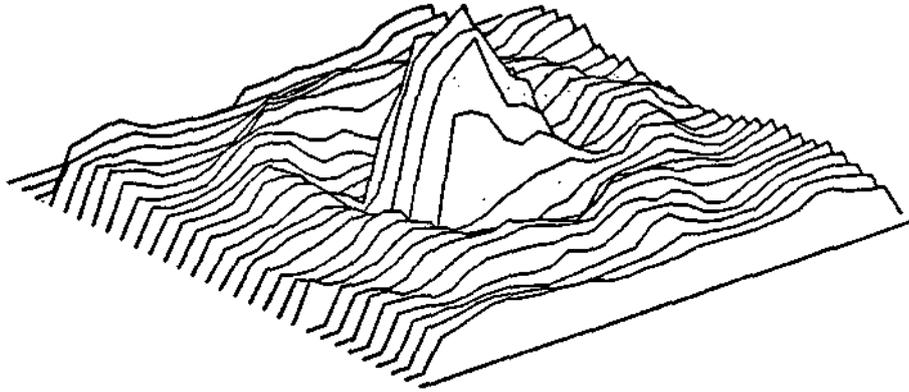


Fig. 4.21 - Projeção paralela do modelo gerado a partir do conjunto de amostras  $\xi_2$  e interpolador 1.

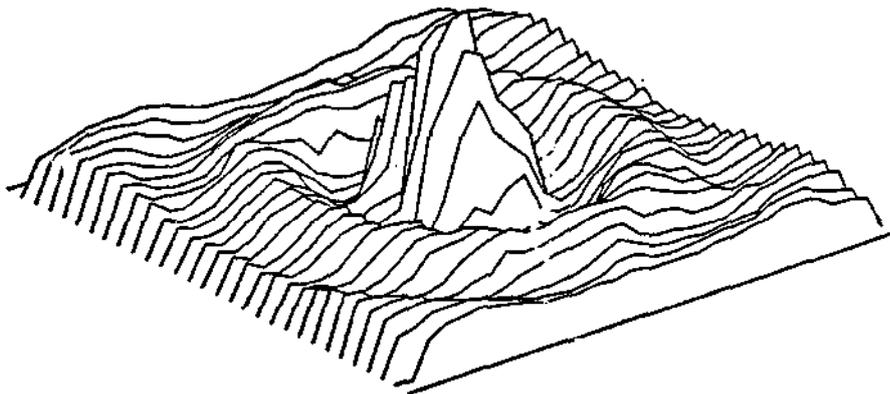


Fig. 4.22 - Projeção paralela do modelo gerado a partir do conjunto de amostras  $\xi_3$  e interpolador 1.

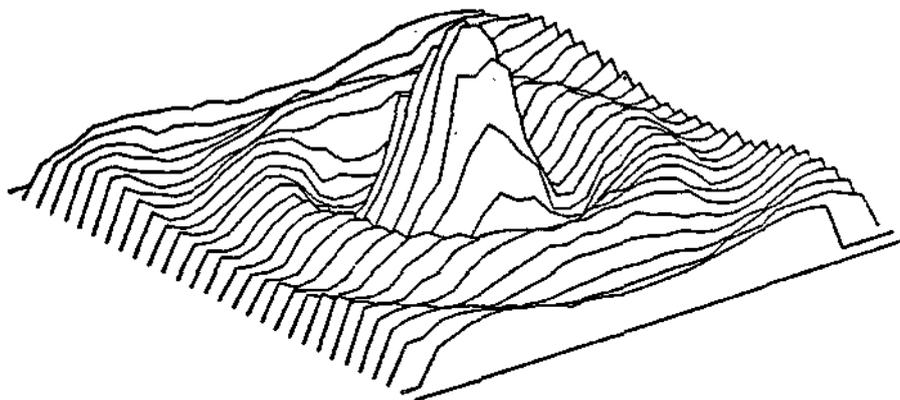


Fig. 4.23 - Projeção paralela do modelo gerado a partir do conjunto de amostras  $\xi_4$  e interpolador 1.

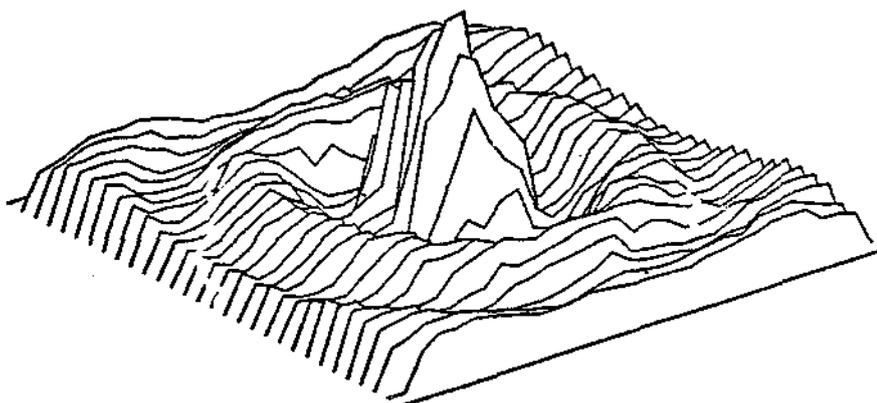


Fig. 4.24 - Projeção paralela do modelo gerado pelo interpolador 2.

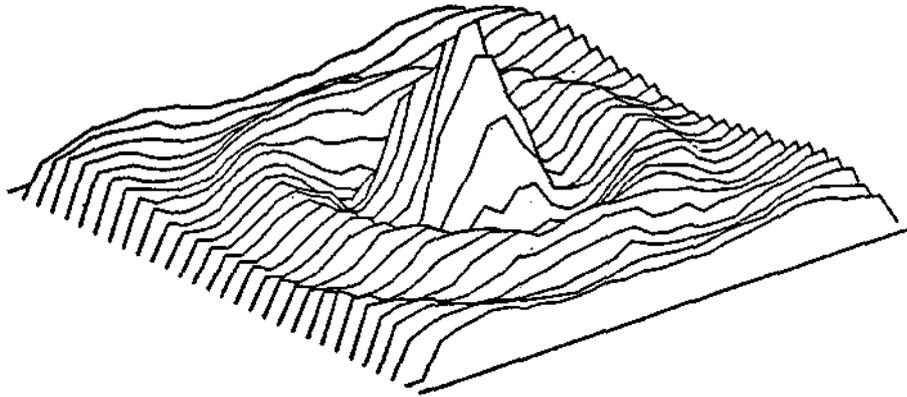


Fig. 4.25 - Projeção paralela do modelo gerado pelo interpolador 3.

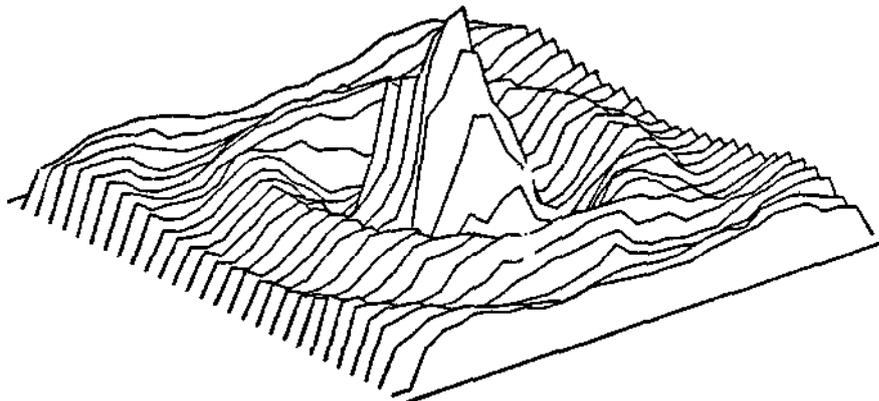


Fig. 4.26 - Projeção paralela do modelo gerado pelo interpolador 4.

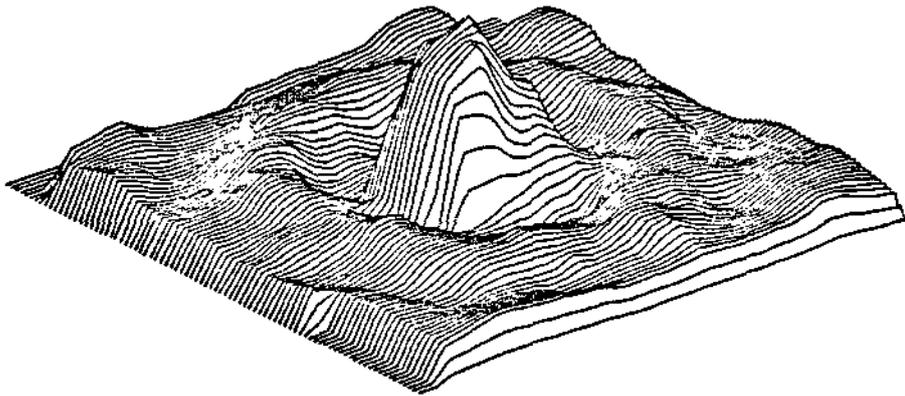


Fig. 4.27 - Projeção paralela de uma grade refinada.

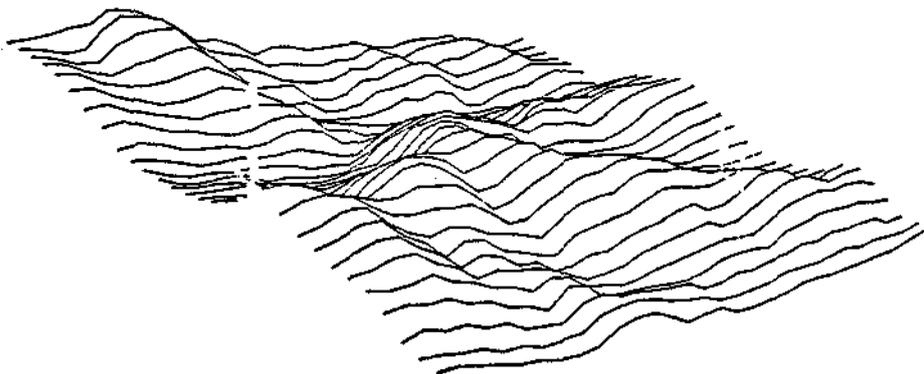


Fig. 4.28 - Projeção perspectiva da grade gerada a partir do conjunto de amostras £5.

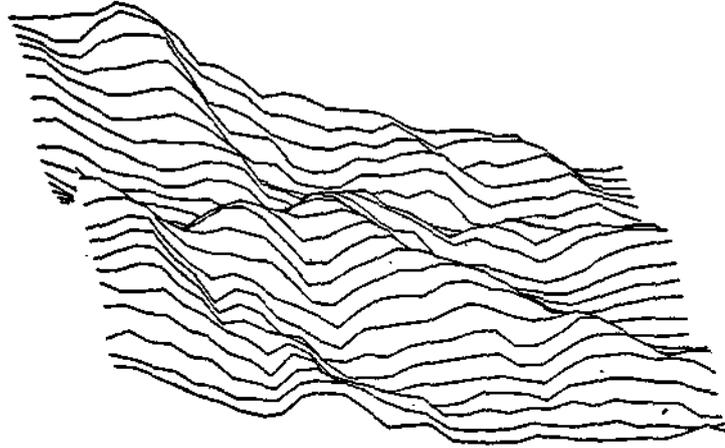


Fig. 4.29 - Projeção perspectiva da grade gerada a partir do conjunto de amostras  $\$5$  (fator de escala = 7 e azimute = -10).

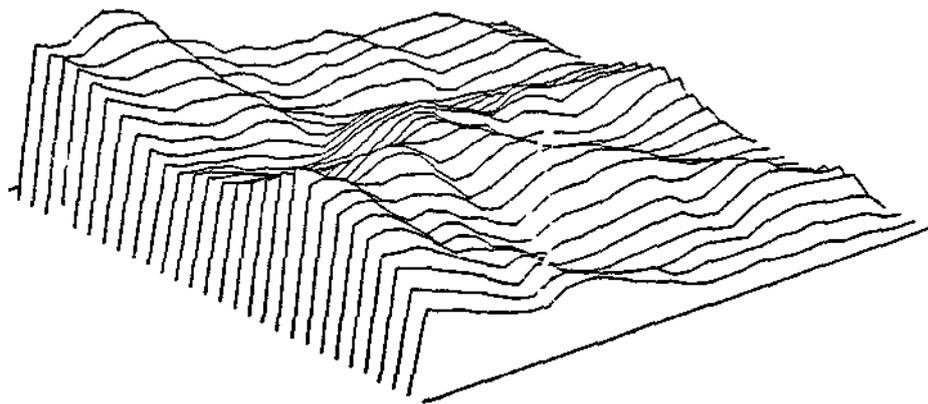


Fig. 4.30 - Projeção paralela da grade gerada a partir do conjunto de amostras  $\$5$  com região de interesse.

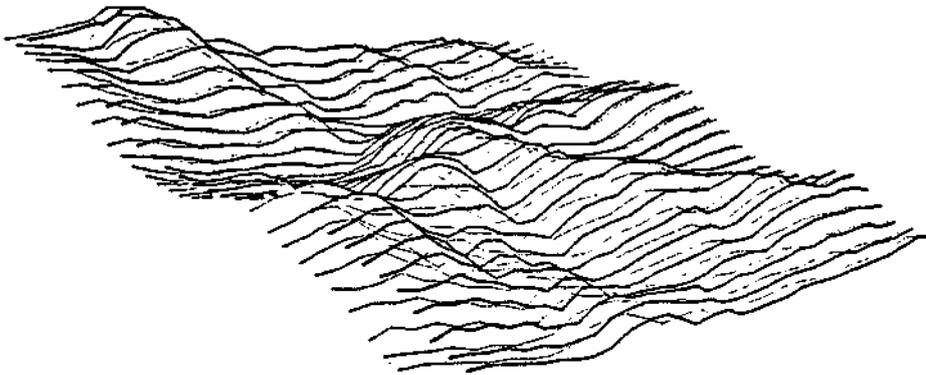


Fig. 4.31 - Par estéreo da grade gerada a partir do conjunto de amostras f5.

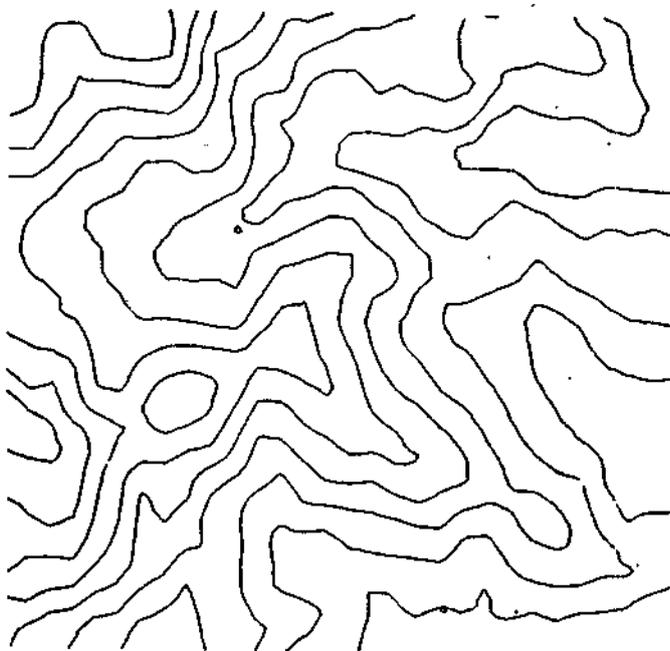


Fig. 4.32 - Mapa de contornos com traçado linear das linhas.

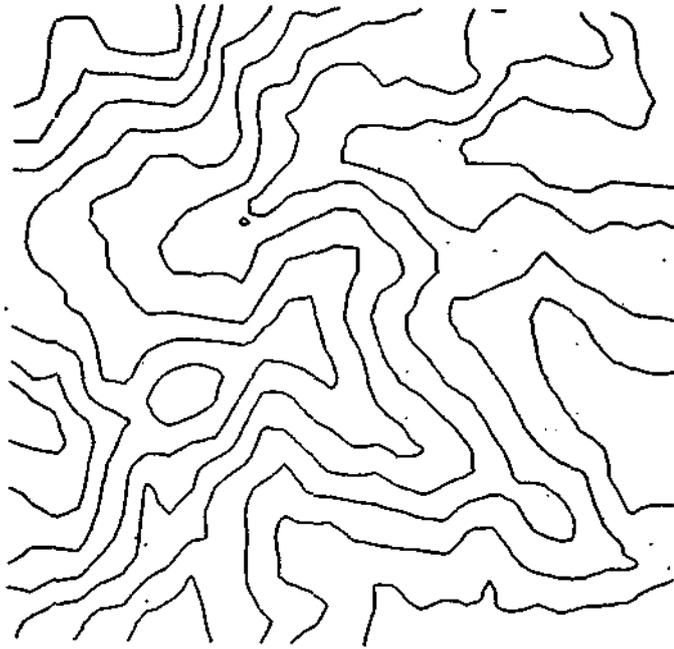


Fig. 4.33 - Mapa de contornos com traçado das linhas interpoladas pelo interpolador Akima 2d (5 intervalos).

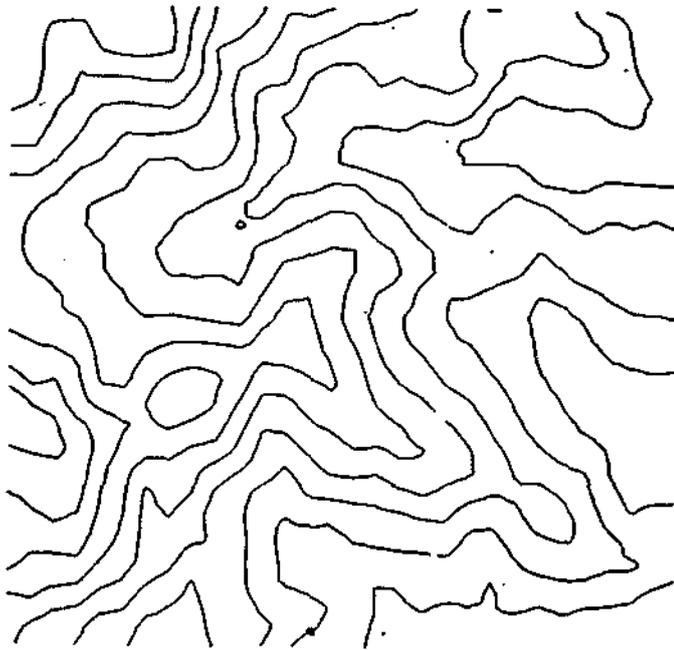


Fig. 4.34 - Mapa de contornos com traçado das linhas interpoladas pelo interpolador Akima 2d (10 intervalos).

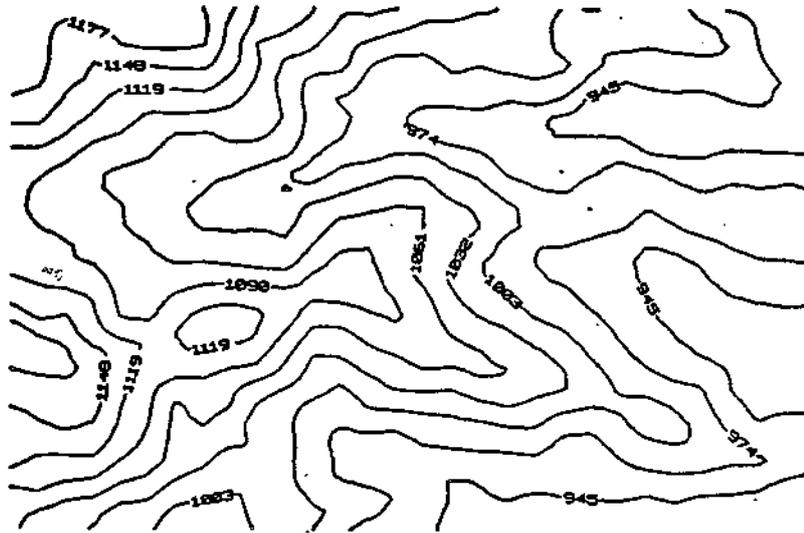


Fig. 4.35 - Mapa de contornos com plotagem automática das cotas associadas as linhas.

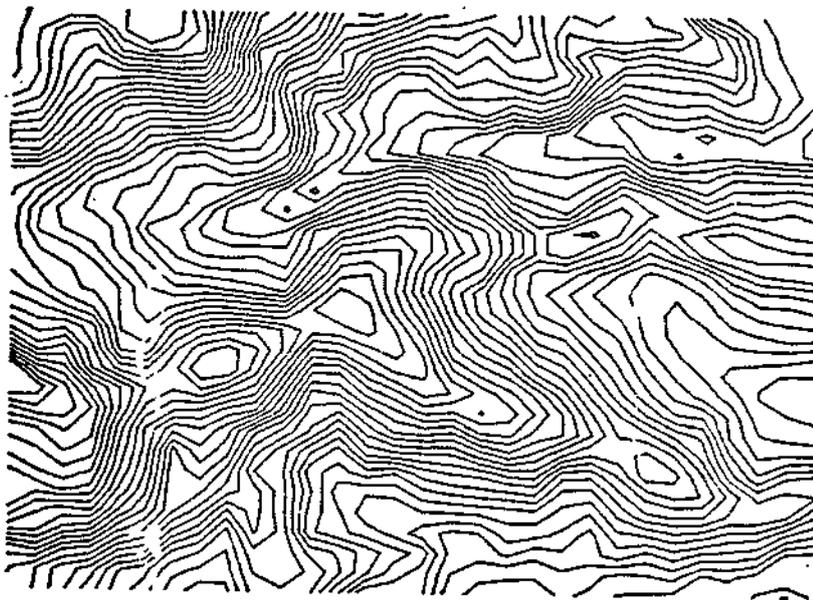


Fig. 4.36 - Mapa de contornos com espaçamento entre cotas igual a 8.

## CAPÍTULO 5

### CONCLUSÃO

Este trabalho apresentou uma metodologia para desenvolvimento e implementação, em microcomputador, de um sistema de modelagem digital de terreno.

Os objetivos principais do trabalho, descritos no capítulo i, foram plenamente alcançados ou seja : estudou-se as principais metodologias correntes relacionadas com as soluções de problemas de modelagem digital de terreno; desenvolveu-se e implementou-se, em microcomputador, um sistema de modelagem digital de terreno e; integrou-se esse sistema ao Sistema Geográfico de Informações do INPE.

O sistema de MDT implementado é completo no sentido que ele comporta funções para cada um dos elementos, que estão definidos no ítem 2.1, e que compõem um sistema desse tipo . Porém ele não é um sistema fechado, ou seja ele pode ser expandido com a inclusão de novas funções em cada um de seus elementos. Dentre as futuras expansões que seriam apropriadas para o sistema implementado podem-se destacar:

- Na aquisição:

Inclusão de novas funções de mapeamento para relacionar as coordenadas de mesa com as coordenadas de mapa ou de armazenamento dos dados amostrados. Pretende-se incluir nova função que considere também possíveis deformações sofridas pelo mapa digitalizado.

- No préprocessamento:

1. Introdução de novos algoritmos que delimitem regiões de interesse baseados em fronteiras não convexas.
2. Introdução de novos algoritmos interpoladores para geração e refinamento do modelo digital que representará a superfície real. Isto é interessante na medida que se diversifiquem os tipos de dados de entrada do sistema, ou seja, um interpolador pode ser mais apropriado para um determinado tipo de dado do que para outro. Dentre estes podemos destacar dados geofísicos e geoquímicos cuja geração de seu modelo digital pode ser otimizada por um interpolador do tipo krigagem, por exemplo. No caso do refinamento, encontra-se em fase de especificação um interpolador bicúbico baseado no algoritmo do Akima, 1974.

3. Geração de novos tipos de modelos de grades polinomiais. No estágio atual que o sistema se encontra é interessante a inclusão de uma função de geração de grade triangular irregular. Esse tipo de modelo digital é mais apropriado para ser utilizado por aplicações de caráter quantitativo como por exemplo: medidas sobre a superfície (área, volume, etc...).

- Nas aplicações

A implementação atual do sistema comporta as duas aplicações mais comuns nos sistemas de modelagem digital de terreno atualmente comercializados, que são: a projeção geométrica planar e a geração do mapa de contornos. Além destas, tem-se especial interesse nas seguintes aplicações : cálculos de trabalhos de engenharia sobre o terreno (volumes de represas, terraplanagens, etc...); geração de mapas de declividade a partir do modelo digital e; utilização do modelo digital para correção radiométrica de imagens de satélite.



## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AKIMA, H. A new method of interpolation and smooth curve fitting based on local procedures. Journal of the Association for Computing Machinery, 17(4):589-602, Oct. 1970.
- AKIMA, H. A method of bivariate interpolation and smooth surface fitting based on local procedures. Communications of the ACM, 17(1):18-20, Jan. 1974.
- DOYLE, F. J. Digital terrain models: An overview. Photogrametric Engineering and Remote Sensing, 44(12):1481-1485, Dec. 1978.
- DOZIER, J.; BRUNO, J.; DOWNEY, P. A faster solution to the horizon problem. Computers and Geoscience, 7(2):145-151, 1981
- DUBAYAH, O. R.; DOZIER, J. Orthographic terrain views using data derived from digital elevation models. Photogrametric Engineering and Remote Sensing, 54(2):509-518, Apr. 1986.
- ERTHAL, G. J.; OLIVEIRA, M. O. B.; FELGUEIRAS, C. A. ; NETO G. C.; PAIVA, J. A. O banco de dados geográficos do INPE. SIMPÓSIO BRASILEIRO DE BANCO DE DADOS, 1., Rio de Janeiro, 11-12 abr. 1986.
- FRANKE, R. Scattered data interpolation: tests of some methods. Mathematics of computation, 35(157):181-199, Jan. 1982.
- HANDLEY, C. C. Efficient planar convex hull algorithm. Image and Vision Computing, 3(1):29-35, Feb. 1985.

- JUNKIN, B. G. Development of three-dimensional spacial displays using a geographically based information system. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 48(4):577-586, Apr. 1982.
- PALLUDETTI, C.; HAYAMA, M. Análise e implementação de um sistema gráfico. Trabalho de Graduação. São José dos Campos; ITA, Divisão de Engenharia Aeronáutica, 1985.
- PETTINATI, F. Modelamento digital de terreno e representação gráfica de superfície. Dissertação de Mestrado em Engenharia. São Paulo, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 1983.
- PEUCKER, T. K. The impact of different mathematical approaches to contouring. Cartographica, 17(2):73-95, 1980.
- PHONG, B. T. Illumination for computer generated images. Association on Computer Machinery, 18(6):311-317, June 1975.
- ROM, M.; BERGMAN, S. A new technique for automatic contouring and contour representation from machine-readable spatial data. The computer journal, 29(5):467-471, 1986.
- SCHAGEN, I. P. Automatic contouring from scattered data points. The computer journal, 25(1): 7-11, 1982.
- WHITTED, T. An improved illumination model for shaded display. Communication of ACM, 23(6):343-349, June 1980.
- YAMAMOTO, J. K. Representações gráficas espaciais em geologia aplicações no complexo alcalino de Anitapolis. Dissertação de Mestrado. São Paulo, Instituto de Geociencias da Universidade de São Paulo, 1986.

## BIBLIOGRAFIA

- AKIMA, H. Interpolation and smooth curve fitting based on local procedures, algorithm 433. Communications of the ACM, 15(10):914-918, Oct. 1972.
- ANDERSON, D. P. Hidden line elimination in projected grid surfaces. ACM Transactions on Graphics, 1(4):274-288, Oct. 1982.
- CARLSON, I. Planar geometric projections and viewing transformations. Computing Surveys, 10(4):465-502, Dec. 1978.
- COQUILHART, S.; GANGNET, M. Shaded display of digital maps. IEEE Computer Graphics & Applications, : 35-42, July 1984.
- FISHMAN, B.; SCHACHTER, B. Computer display of height fields. Computer & Graphics, 5(2):53-60, Mar. 1980.
- GORDON, D.; REYNOLDS, R. A. Image space shading of 3-dimensional objects. Computer Vision, Graphics, and Image Processing, 29(3):361-376, Mar. 1985.
- MACCALLUM, K. J.; ZHANG, J. M. Curve-smoothing techniques using B-splines. The Computer Journal, 29(6):564-571, 1986.
- NEWMAN, W. M.; SPROULL, R. F. Principles of interactive computer graphics . 2.ed. New York, McGraw Hill, 1979.
- PAVLIDIS, T. Algorithms for graphics and image processing. New Jersey, Computer Science Press, 1982.
- PEUCKER, T. K. The use of computer graphics for displaying data in three dimensions. Cartographica, 17(2):59-72, 1980.

- SCHACHTER, B. Computer generation of shaded relief maps.  
In: FREEMAN, H.; Pieroni, G. G., ed. Map data processing. New York, Academic Press, 1980, p.355-368 .
- SCHILCHER, M. Interactive graphic data processing in cartography. Computer & Graphics, 9(1):57-66,1985
- SUTHERLAND, I. R.; SPROULL, R. F.; SCHUMACKER, R. A. A characterization of ten hidden surface algorithms. ACM Computing Surveys. 6(1):1-55, Mar. 1974.
- WATKINS, S. L. Masked three-dimensional plot program with rotations, algorithm 483. Communications of ACM, 17(9):520-523, Sep. 1974.
- YOELI, P. Compilation of data for computer assisted relief cartography. In: DAVIS, J. C.;McCullagh, M. J.,ed. Display and analysis of spacial data. London, Wiley-Interscience, 1975, p.352-366.

## APÊNDICE A

### DESCRIÇÃO DOS ARQUIVOS DA BD E ROTINAS DE ACESSO

#### A.1 INTRODUÇÃO

Este documento descreve os arquivos que compõem a base de dados em termos do seu conteúdo e das suas rotinas de acesso.

A base de dados do SGI é dividida por regiões geográficas. Cada região é identificada por um nome, e compõe-se de um certo número de planos de informação. Dentro do SGI, cada sessão de trabalho permitirá operações (entrada, manipulação, saída) sobre uma determinada região, a ser escolhida pelo usuário.

De maneira esquemática, a BD do SGI é composta de:

- arquivo contexto ( com nome: SGI.CTX )
- conjunto de regiões

O arquivo contexto contém o nome da região de trabalho utilizada no último processamento.

## A.2

Cada região é composta de:

- arquivo diretório ( com nome: (nome\_região).dir )
- conjunto de planos de informação (PI).

O arquivo diretório contém o número de PI's que compõem a região e o nome de cada um deles.

Cada PI é composto pelos seguintes arquivos:

- arquivo descritor (nome\_arquivo).des
- arquivo imagem (nome\_arquivo).i
- arquivo descritor da imagem (nome\_arquivo).d
- arquivo tabela (nome\_arquivo).tab

Além destes, os seguintes arquivos poderão compor um PI, dependendo do tipo de dado a ser introduzido no sistema:

- arquivo de linhas (nome\_arquivo).li1  
(nome\_arquivo).li2
- arquivo de polígonos (nome\_arquivo).pol
- arquivo de centróides (nome\_arquivo).cen
- arquivo de pontos (nome\_arquivo).pt
- arquivo de pontos organizados (nome\_arquivo).pto
- arquivo grade regular (nome\_arquivo).grd
- arquivo pontos de controle (nome\_arquivo).ptc
- arquivo de pares estéreo (nome\_arquivo).par
- arquivo árvore (nome\_arquivo).pta
- arquivo amarra mesa (nome\_arquivo).ama

A.3

O esquema abaixo mostra a organização dos arquivos na BD.

Base de Dados do SGI

```

-----
| contexto      região 1      região 2      região n      |
| -----      -----      -----      -----      |
| |           | |           | |           | ... |           | |
| -----      -----      -----      -----      |
-----
|
Região Geográfica          V
|
-----
| diretório     P.I.1        P.I.2        P.I.n        |
| -----      -----      -----      -----      |
| |           | |           | |           | ... |           | |
| -----      -----      -----      -----      |
-----
|
Plano de Informação        V
|
-----
| |descr. | | .1 | | .tab | | .ptc | |
| ----- | ----- | ----- | ----- |
| | .ptc | | .111 | | .112 | | .pol | |
| ----- | ----- | ----- | ----- |
| | .di | | .cen | | .pt | | .grd | |
| ----- | ----- | ----- | ----- |
| | .par | | .pta | | .ama | |
| ----- | ----- | ----- |
-----

```

#### A.4

Para mapas poligonais (mapas temáticos) usam-se os arquivos com extensões: .li1, .li2, .pol, e .cen .

Para mapas pontuais usam-se os arquivos com extensões: .pt, .pto, .pta e .grd .

Nos itens que seguem, faz-se uma descrição das estruturas dos arquivos da BD e é fornecido os nomes das funções do gerenciador que acessam essas estruturas.

#### A.2 ARQUIVO CONTEXTO DO SGI

Nome do arquivo contexto: sgi.ctx

Este arquivo é utilizado para armazenar o nome da REGIÃO utilizada no último processamento.

##### A.2.1 ROTINAS DE ACESSO AO ARQUIVO CONTEXTO

- 1) SGI\_LE\_CONTEXTO : le arquivo contexto do sgi  
(sgi.ctx)
  
- 2) SGI\_ESC\_CONTEXTO : escreve arquivo contexto do SGI  
(sgi.ctx)

A.3 DIRETÓRIO DE PLANOS DE INFORMAÇÃO

Nome do arquivo diretório: (nome\_região).dir

Nome da estrutura usada: struct sgi\_diretório

A.3.1 CONTEÚDO DO DIRETÓRIO

O arquivo diretório é montado a partir dos PI's que compõem uma dada região. As seguintes informações estão armazenadas:

- |                   |      |
|-------------------|------|
| - número de P.I.s | INT  |
| - nome dos planos | CHAR |

A.3.2 ROTINAS DE ACESSO AO DIRETÓRIO

- 1) DIR\_LE\_ARQ : abre arquivo, le diretório completo e fecha arquivo
- 2) DIR\_ESC\_ARQ : abre arquivo, escreve diretório completo e fecha arquivo.
- 3) DIR\_REM\_ARQ : remove arquivo diretório

## A.6

### A.4 ARQUIVO DESCRITOR DO PLANO DE INFORMAÇÃO

Nome do arquivo descritor: (nome\_regiao)\_(nome\_pi).dir

Nome da estrutura usada: struct arq\_descritor

Este arquivo é criado no subsistema de inicialização ou no subsistema de manipulação.

#### A.4.1 CONTEÚDO DO ARQUIVO DESCRITOR

O arquivo descritor conterá as seguintes informações:

- texto de identificação CHAR
- tipo de entidade CHAR
  - 0 = indefinido
  - 1 = mapa de pontos
  - 2 = mapa de linhas (polígonos abertos)
  - 3 = mapa temático (polígonos)
  - 4 = superfícies 3D
  - 5 = imagem não classificada.
- tipo entrada CHAR
  - 0 = indefinido
  - 1 = polígono
  - 2 = isolinhas
  - 3 = pontual
  - 4 = raster
- escala do mapa de entrada FLOAT

## A.7

<ul style="list-style-type: none"> <li>- projeção de entrada</li> <li style="padding-left: 20px;">0 = indefinido</li> <li style="padding-left: 20px;">1 = nenhuma</li> <li style="padding-left: 20px;">2 = fi,lambda</li> <li style="padding-left: 20px;">3 = UTM</li> <li style="padding-left: 20px;">4 = SOM</li> </ul>	CHAR
<ul style="list-style-type: none"> <li>- projeção atual</li> <li style="padding-left: 20px;">0 = indefinido</li> <li style="padding-left: 20px;">1 = nenhuma</li> <li style="padding-left: 20px;">2 = fi,lambda</li> <li style="padding-left: 20px;">3 = UTM</li> <li style="padding-left: 20px;">4 = SOM</li> </ul>	CHAR
<ul style="list-style-type: none"> <li>- modo de digitalização</li> <li style="padding-left: 20px;">"p" = por polígonos</li> <li style="padding-left: 20px;">"a" = por arcos</li> </ul>	CHAR
<ul style="list-style-type: none"> <li>- tipo de imagem</li> <li style="padding-left: 20px;">0 = indefinido</li> <li style="padding-left: 20px;">1 = direta</li> <li style="padding-left: 20px;">2 = indireta-numérica</li> <li style="padding-left: 20px;">3 = indireta-simbólica</li> </ul>	CHAR
<ul style="list-style-type: none"> <li>- correção geométrica</li> <li style="padding-left: 20px;">0 = indefinido</li> <li style="padding-left: 20px;">1 = nenhuma</li> </ul>	CHAR
<ul style="list-style-type: none"> <li>- f de bits por pixel</li> </ul>	CHAR
<ul style="list-style-type: none"> <li>- resolução horizontal em metros</li> </ul>	INT
<ul style="list-style-type: none"> <li>- resolução vertical em metros</li> </ul>	INT
<ul style="list-style-type: none"> <li>- coordenadas da imagem raster</li> </ul>	INT
<ul style="list-style-type: none"> <li>- f de linhas (arcos) digitalizadas</li> </ul>	INT
<ul style="list-style-type: none"> <li>- f máximo de linhas (arcos)</li> </ul>	INT
<ul style="list-style-type: none"> <li>- tamanho máximo da linha</li> </ul>	INT
<ul style="list-style-type: none"> <li>- proximo número de linha</li> </ul>	INT

## A.8

- compactação do arquivo de linhas	CHAR
- f de centróides	INT
- f de classes	INT
(1 classe = vários polígonos)	
- f de polígonos	INT
- f máximo de polígonos	INT
- f máximo de linhas por polígono	INT
- coord. de proj. da imagem	FLOAT
- coord. absolutas da imagem	FLOAT
- cota mínima	FLOAT
- cota máxima	FLOAT
- "flags" de gerenciamento	CHAR
- digitalização de linhas	
- edição de linhas	
- poligonalização	
- edição de polígonos	
- digitalização de centróides	
- edição de centróides	
- digitalização de pontos de controle	
- edição de pontos de controle	
- transformação geométrica	
- rasterização	
- dispositivo de armazenamento	CHAR
- ponteiro arq. de linhas (cab.)	UNSIGNED
- pont. posição atual	LONG
no arq. de linhas (cab.)	
- ponteiro arq. de linhas (dados)	UNSIGNED
- pont. posição atual	LONG
no arq. de linhas (dados)	
- ponteiro para o arq. de polígonos	UNSIGNED

## A.9

- pont. para a posição atual                      LONG  
    no arq. de polígonos
- ponteiro para o arquivo tabela                UNSIGNED
- pont. para a posição atual                      LONG  
    no arq. tabela

### A.4.2 ROTINAS DE ACESSO AO ARQUIVO DESCRITOR

- 1) PI\_LE\_DESCRITOR : le arquivo descritor
- 2) PI\_ESC\_DESCRITOR : escreve arquivo descritor
- 3) PI\_REM\_DESCRITOR : remove arquivo descritor

### A.5 ARQUIVO DE LINHAS

Cada linha (ou arco) digitalizada é composta de duas partes: (a) cabeçalho e (b) dados. O armazenamento das linhas é feito utilizando dois arquivos:

- arq. de cabeçalhos: (nome\_região)\_(nome\_pi).li1
- arq. de dados :        (nome\_região)\_(nome\_pi).li2

## A.10

### A.5.1 CONTEÚDO DO ARQUIVO

Cada linha é identificada por um rótulo numérico cujo valor varia na faixa (1 , NUM\_LIN\_MAX). Quando uma linha é deletada o seu rótulo não é mais utilizado: São exemplos de sequências de rótulos válidas:

(1,2,3,4,5) ou ((1,2,4,5) ou (2,4,5,7)

Seguem as descrições das informações referentes a uma linha:

a) conteúdo do cabeçalho de uma linha: (84 bytes)

- f de pontos INT
- cota z FLOAT
- flag de ajuste de pontas CHAR
  - 0 = não realizado
  - 1 = realizado
- flag de redução de dados CHAR
  - 0 = não realizado
  - 1 = realizado
- x máximo (de projeção) FLOAT
- y máximo (" " ) FLOAT
- x mínimo (" " ) FLOAT
- y mínimo (" " ) FLOAT
- coord. (x,y) do primeiro e último pontos FLOAT
- 10 campos para os f das linhas ligadas a (X1,Y1) INT
- f de linhas ligadas a (X1,Y1) INT

## A.11

- 10 campos para os  $f$  das linhas ligadas a  $(X_n, Y_n)$  INT
- $f$  de linhas ligadas a  $(X_n, Y_n)$  INT
- $f$  de vezes a linha foi usada na poligonalização uma linha pode ser usada uma (ilha ou ilha poligonal) ou duas vezes (polígono comum) CHAR
- $f$  dos polígonos que a usam INT
- tipo de linha: CHAR
  - 0 = ilha
  - 1 = polígono aberto
  - 2 = polígono fechado
  - 3 = linha (arco)

b) conteúdo do registro de dados:

- $(x_1, x_2, \dots, x_n), (y_1, y_2, \dots, y_n)$  FLOAT

### A.5.2 ROTINAS DE ACESSO

O acesso as informações de uma linha pode ser feito de duas maneiras: (a) pelo número da linha ou (b) sequencialmente ( $i$ -ésima linha). O cabeçalho da linha pode ser lido separadamente dos dados, mas a escrita é sempre realizada em conjunto.

Existem dois formatos de armazenamento para o arquivo de linhas: (a) normal e (b) compactado.

## A.12

Modo normal: no arquivo de cabeçalhos, o número de registros alocados é igual ao número de registros definidos na criação do arquivo. No arquivo de dados existe o mesmo número de registros, sendo todos de comprimento fixo (= 2 vezes o tamanho máximo de linha que foi definido na criação do arquivo).

Modo compactado: no arquivo de cabeçalhos permanecem apenas os registros realmente ocupados. No arquivo de dados ocorre o mesmo, com o detalhe de que os registros passam a ser de comprimento variável.

Importante: operações que modificam os arquivos só podem ser realizadas no modo normal. Para isto existem (por enquanto não) as rotinas de compactação e descompactação de arquivos.

Segue a descrição das rotinas existentes.

- 1) LINHA\_CRIA\_ARQ : cria arquivo de linhas
- 2) LINHA\_ABRE\_ARQ : abre arquivo de linhas
- 3) LINHA\_FECHA\_ARQ : fecha arquivo de linhas
- 4) LINHA\_LE\_HEAD : le o cabeçalho de uma dada linha
- 5) LINHA\_LE : le cabeçalho e dados de uma linha
- 6) LINHA\_ESC : escreve cabeçalho e dados de uma linha
- 7) LINHA\_DEL : deleta uma linha
- 8) LINHA\_LESEQ\_HEAD : le o cabeçalho da i-ésima linha
- 9) LINHA\_LESEQ : le cabeçalho e dados da i-ésima linha
- 10) LINHA\_SUBSTITUI : substitui cabeçalho e dados de uma linha

- 11) LINHA\_COMPACTA\_ARQ : compacta arquivo de linhas.
- 12) LINHA\_DESPACTA\_ARQ : descompacta arquivo de linhas.
- 13) LINHA\_AMPLIA\_ARQ : amplia arquivo de linhas.
- 14) LINHA\_REM\_ARQ : remove arquivo de linhas

#### A.6 ARQUIVO IMAGEM (RASTER)

A imagem raster é representada por dois arquivos, a saber:

(nome\_região)\_(nome\_pi).i - dados da imagem  
(nome\_região)\_(nome\_pi).d - descritor da imagem

A imagem de referência da base de dados é uma imagem LANDSAT. Todas as imagens a serem manipuladas pelo sistema deverão estar residentes em disco.

##### A.6.1 CONTEÚDO DO ARQUIVO IMAGEM

O arquivo de imagem (dados) compõe-se de registros de tamanho fixo representando as linhas da imagem, sendo cada "pixel" armazenado em um "byte".

O arquivo descritor da imagem contém as seguintes informações:

## A.14

- nome da região	CHAR
- nome do PI	CHAR
- coordenadas da imagem em disco	INT
- coord. raster da janela em uso	INT
- coord. raster da janela de tela	INT
- coord. normalizadas da janela de tela	INT
- coord. vetoriais da imagem	INT
- coord. vetoriais da janela em uso	INT
- dispositivo de saída	CHAR
- resolução horizontal	FLOAT
- resolução vertical	FLOAT

### A.6.2 ROTINAS DE ACESSO

- 1) IMAGE\_CRIA\_ARQ : cria arquivo de imagem
- 2) IMAGE\_ABRE\_ARQ : abre arquivo de imagem
- 3) IMAGE\_FECHA\_ARQ : fecha arq. de imagem
- 4) IMAGE\_LE\_LIN : le linha de imagem
- 5) IMAGE\_ESC\_LIN : escreve linha de imagem
- 6) IMAGE\_REM\_ARQ : remove arquivo de imagem
- 7) IMAGE\_LE\_ATRIBUTOS : le atributos da imagem
- 8) IMAGE\_ESC\_ATRIBUTOS: escreve atributos da imagem
- 9) IMAGE\_REM\_ATRIBUTOS : remove arquivo de atributos da imagem

A.7 ARQUIVO DE PONTOS

Nome do arquivo: (nome do PI: 12 chars).PT

Nome da estrutura : struct arq\_pontos

A.7.1 CONTEÚDO DO ARQUIVO

Este arquivo compõe-se de um cabeçalho, seguido de tres vetores contendo os dados referentes aos pontos.

## a) conteúdo do cabeçalho

- número de pontos no arquivo	INT
- número de pontos máximo para o arquivo	INT
- coordenada horizontal mínima	FLOAT
- coordenada horizontal máxima	FLOAT
- coordenada vertical mínima	FLOAT
- coordenada vertical máxima	FLOAT
- cota mínima	FLOAT
- cota máxima	FLOAT
- ponteiro para a posição atual	LONG
- ponteiro para o arquivo	UNSIGNED

### A.7.2 ROTINAS DE ACESSO

- 1) PONTOS\_CRIA\_ARQ : cria arquivo de pontos
- 2) PONTOS\_ABRE\_ARQ : abre arquivo e le cabeçalho.
- 3) PONTOS\_FECHA\_ARQ : escreve cabeçalho e fecha arquivo.
- 4) PONTOS\_LE\_REG : le registro de pontos
- 5) PONTOS\_ESC\_REG : escreve registro de dados.
- 6) PONTOS\_REM\_ARQ : remove arquivo de pontos.

### A.8 ARQUIVO AMARRA

Nome do arquivo: (nome do PI: 12 chars).AMA

Nome da estrutura : struct arq\_amarra\_mesa

#### A.8.1 CONTEÚDO DO ARQUIVO

Este arquivo contém os pontos de controle que são utilizados para o mapeamento das coordenadas (x,y) da mesa para as coordenadas (u,v) escolhidas pelo usuário. Estas últimas serão tratadas, neste documento, como coordenadas do mapa. A utilização desses pontos "amarram" os valores de um sistema de coordenada a outro.

## A.17

O arquivo está dimensionado para aceitar até 10 pontos de controle sendo que na versão atual são utilizados apenas 4.

O arquivo é composto por uma estrutura do tipo `arq_amarra_mesa` que tem o seguinte formato:

```
struct  arq_amarra_mesa
{
    float ama_xmesa(10); /* abscissa do ponto da mesa */
    float ama_ymesa(10); /* ordenada do ponto da mesa */
    float ama_xmapa(10); /* abscissa do ponto do mapa */
    float ama_ymapa(10); /* ordenada do ponto do mapa */
};
```

### A.8.2 ROTINAS DE ACESSO

- 1) `LE_ARQ_AMARRA` : le os pontos do arquivo amarra.  
número de nós da árvore e os nós da mesma.
- 2) `ESC_ARQ_AMARRA` : escreve os pontos no arquivo  
amarra
- 3) `REMOVE_ARQ_AMARRADOR` : remove arquivo amarra.

### A.9 ARQUIVO DE GRADE REGULAR

Nome do arquivo: (nome do PI: 12 chars).GRD

Nome da estrutura : `struct arq_grade_regular`

A.9.1 CONTEÚDO DO ARQUIVO

Este arquivo compõe-se de um cabeçalho, seguido dos dados referentes a grade regular. Cada posição da grade é ocupada por um "float". O acesso aos dados da grade é feito por linhas (ver rotinas 6 e 7).

## a) conteúdo do cabeçalho

- tamanho horizontal da grade	INT
- tamanho vertical da grade	INT
- distancia horiz. entre ptos. da grade	FLOAT
- distancia vert. entre ptos. da grade	FLOAT
- coordenada horizontal mínima	FLOAT
- coordenada horizontal máxima	FLOAT
- coordenada vertical mínima	FLOAT
- coordenada vertical máxima	FLOAT
- cota mínima	FLOAT
- cota máxima	FLOAT
- ponteiro para o arquivo	LONG

A.9.2 ROTINAS DE ACESSO

- 1) GRADE\_CRIA\_ARQ : aloca area para o arquivo
- 2) GRADE\_ABRE\_ARQ : abre arquivo grade regular
- 3) GRADE\_FECHA\_ARQ : fecha arquivo grade regular
- 4) GRADE\_LE\_CABEÇALHO : le cabeçalho do arquivo

- 5) GRADE\_ESC\_CABEÇALHO : escreve cabeçalho do arquivo
- 6) GRADE\_LE\_LINHA : le linha do arquivo
- 7) GRADE\_ESC\_LINHA : escreve linha do arquivo

#### A.10 ARQUIVO TABELA

Nome do arquivo: (nome do PI).TAB

Este arquivo é criado no subsistema de inicialização.

##### A.10.1 CONTEÚDO DO ARQUIVO

Registro contendo:

- índice para a classe	INT
- nome da classe (rótulo)	CHAR
- cor	INT
- tipo de preenchimento	INT
- retângulo envolvente	INT
- area da classe	FLOAT
- número de "clusters"	INT
- texto	CHAR

A.10.2 ROTINAS DE ACESSO

- 1) TAB\_CRIA\_ARQ : cria arquivo tabela
- 2) TAB\_ABRE\_ARQ : abre arquivo tabela
- 3) TAB\_FECHA\_ARQ : fecha arquivo tabela
- 4) TAB\_LE\_ATRIBUTOS : le atributos da classe
- 5) TAB\_ESC\_ATRIBUTOS : escreve atributos da classe
- 6) TAB\_REM\_ARQ : remove arquivo tabela

A.11 ARQUIVO DE PONTOS ORGANIZADOS

Nome do arquivo: (nome do PI: 12 chars).PTO

Nome da estrutura : struct arq\_pont\_org

A.11.1 CONTEÚDO DO ARQUIVO

Este arquivo compõe-se de um cabeçalho, seguido registros contendo triplas (x,y,z) que representam os pontos. Os registros são numerados de 1 a N (N = número de registros).

- a) conteúdo do cabeçalho
  - número de pontos no arquivo INT
  - número de registros no arquivo INT
  - número de pontos máximo INTpor registro

## A.21

- número de registros máximo no arquivo	INT
- coordenada horizontal mínima	FLOAT
- coordenada horizontal máxima	FLOAT
- coordenada vertical mínima	FLOAT
- coordenada vertical máxima	FLOAT
- cota mínima	FLOAT
- cota máxima	FLOAT
- espaçamento horizontal entre celas	FLOAT
- espaçamento vertical entre celas	FLOAT
- ponteiro para a posição atual	LONG
- ponteiro para o arquivo	UNSIGNED

### A.11.2 ROTINAS DE ACESSO

- 1) PTORG\_CRIA\_ARQ : cria arquivo de pontos organizados
- 2) PTORG\_ABRE\_ARQ : abre arquivo e le cabeçalho.
- 3) PTORG\_FECHA\_ARQ : fecha arquivo.
- 4) PTORG\_LE\_REG : le registro de pontos organizados.
- 5) PTORG\_ESC\_REG : escreve registro de dados.
- 6) PTORG\_REM\_ARQ : remove arquivo de pontos organizados.

A.12 ARQUIVO ÁRVORE

Nome do arquivo: (nome do PI: 12 chars).PTA

Nome da estrutura : struct arq\_nó

A.12.1 CONTEÚDO DO ARQUIVO

Este arquivo contém um cabeçalho e os nós que compõem a árvore (2d-A)

a) conteúdo do cabeçalho

- número de pontos máximo por partição      INT
- numero de nós da árvore                              INT

A.12.2 ROTIINAS DE ACESSO

- 1) ÁRVORE\_LE\_ARQ : le limite máximo de pontos por partição, número de nós da árvore e os nós da mesma.
- 2) ÁRVORE\_ESC\_ARQ : escreve árvore (2d-A) no arquivo árvore.
- 3) ÁRVORE\_REM\_ARQ : remove arquivo árvore.