

**MARIA DE LOURDES DE AQUINO MACEDO GONÇALVES**

**GERAÇÃO DE MODELO DIGITAL DE TERRENO A PARTIR DE MAPAS DIGITAIS 3D:  
ESTUDO DE CASO PARA GARANTIA DO CONTEXTO GEOMORFOLÓGICO COM  
REDUÇÃO DOS DADOS AMOSTRAIS**

Dissertação apresentada como requisito parcial à  
obtenção do grau de Mestre em Ciências  
Geodésicas, Área de Concentração: Cartografia  
Curso de Pós-Graduação em Ciências  
Geodésicas, Setor de Ciências da Terra,  
Universidade Federal do Paraná.

Orientador: Prof. Alberto Picanço Carvalho, Ph.D.  
Co-orientador: Prof. Antônio José Berutti Vieira, M.Sc.

CURITIBA  
2001

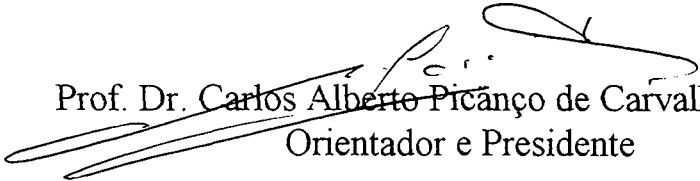
**“GERAÇÃO DE MODELO DIGITAL DE TERRENO A PARTIR DE  
MAPAS DIGITAIS 3D: ESTUDO DE CASO PARA GARANTIA DO  
CONTEXTO GEOMORFOLÓGICO COM REDUÇÃO DOS DADOS  
AMOSTRAIS”**

**POR**

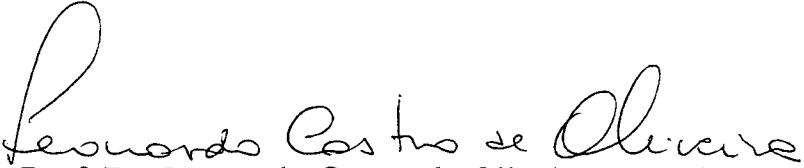
**MARIA DE LOURDES DE AQUINO MACEDO GONÇALVES**

Dissertação n° 155 aprovada como requisito parcial do grau de Mestre no  
Curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas da Universidade  
Federal do Paraná, pela Comissão formada pelos professores:

Curitiba, 21 de setembro de 2001.



Prof. Dr. Carlos Alberto Picânço de Carvalho (UFPR)  
Orientador e Presidente



Prof. Dr. Leonardo Castro de Oliveira - Membro (IME)



Prof. Dr. Luis Augusto Koenig Veiga – Membro (UFPR)

## **DEDICATÓRIA**

**Aos meus pais, João Roberto e Eliene.  
Ao meu marido, Creso.  
Aos meus filhos, Thiago, Gustavo e Carolina.**

## **AGRADECIMENTOS**

A Deus, que me permite, a cada novo dia, desfrutar do convívio de minha família.

Aos meus pais, Eliene e João Roberto, que sempre me incentivaram a lutar por um ideal de forma digna.

Ao meu marido Creso, pelo companheirismo e apoio em todos os momentos.

Aos meus filhos, Thiago, Gustavo e Carolina, por me darem a força necessária para continuar.

Aos meus irmãos, João Roberto e Thomaz, pelo apoio irrestrito, sempre com palavras de incentivo.

À Universidade Federal do Paraná, pela oportunidade do curso, com auxílio em materiais e equipamentos.

Ao CNPq – Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico, pela bolsa de estudo.

Ao Professor Carlos Alberto Picanço de Carvalho, pela orientação e conselhos que permitiram a realização deste trabalho.

Ao Professor Antônio José Berutti Vieira, pela dedicação e ajuda inestimável.

Ao ParanaCidade, na pessoa do Engenheiro Helder de Oliveira Guimarães, por ter auxiliado na obtenção de autorização para utilização dos mapas digitais 3D.

À Empresa Esteio de Aerolevantamentos, em especial ao Eng. Hiram Skolimowski da Silva e Eng. Amauri Alfredo Brandalize, por ter cedido os mapas digitais 3D e realizado algumas verificações sobre os mesmos.

À amiga e Professora Luciene Stamato Delazari Skroch, sempre presente, com conselhos e ajuda irrestrita.

Ao Professor Henrique Firkowski, pelo auxílio durante todo o curso e realização do trabalho.

À Professora Claudia Robbi Sluter, pelo apoio recebido.

À colega e amiga Isabel do Franco Lago, sempre presente com conselhos e palavras de apoio.

Aos colegas e amigos do Curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas da Universidade Federal do Paraná, pelo apoio e amizade em todos os momentos.

A todos que, direta ou indiretamente, auxiliaram na realização deste trabalho.

## SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS.....	vii
LISTA DE TABELAS.....	viii
LISTA DE FLUXOGRAMAS E GRÁFICOS .....	viii
RESUMO .....	ix
ABSTRACT.....	x
1 INTRODUÇÃO.....	1
1.1 PROBLEMA.....	1
1.2 OBJETIVOS.....	2
1.2.1 Objetivo Geral.....	2
1.2.2 Objetivos Específicos.....	2
1.3 JUSTIFICATIVA.....	3
1.4 DESCRIÇÃO DO TRABALHO.....	3
2 CONCEITOS E ELEMENTOS DA PESQUISA.....	4
2.1 MODELO DIGITAL DO TERRENO .....	4
2.1.1 MODELO <i>TIN</i> .....	5
2.2 ELEMENTOS DA PESQUISA .....	10
2.2.1 Mapa Digital 3D .....	10
2.2.2 Programa Computacional - <i>MicroStation</i> e <i>GeoTerrain</i> .....	11
2.2.3 Modelo Digital do Terreno (MDT) e Modelo <i>TIN</i> .....	11
3 METODOLOGIA .....	12
3.1 ÁREAS DE ESTUDO.....	12
3.2 NOMENCLATURA DOS MDT GERADOS .....	15
3.3 EDIÇÃO DOS MAPAS DIGITAIS .....	15
3.4 PROCESSO DA PESQUISA .....	20
3.4.1 Extração dos Dados Amostrais.....	20
3.4.2 Edição do Conjunto de Dados .....	27
3.4.3 Geração do Modelo <i>TIN</i> .....	34
4 ANÁLISE DOS PRODUTOS DERIVADOS DOS MDT .....	35
4.1 RELATÓRIO ESTATÍSTICO DO <i>TIN</i> .....	35
4.2 ANÁLISE GRÁFICA.....	38
4.2.1 Análise Gráfica da Área-Piloto.....	39
4.2.2 Análise Gráfica da Folha.....	44
4.3 ANÁLISE NUMÉRICA.....	49
4.3.1 Análise Numérica da Área-Piloto .....	50
4.3.2 Análise Numérica da Folha.....	51
4.4 ANÁLISE VOLUMÉTRICA.....	52
4.5 ANÁLISE DO ERRO MÉDIO QUADRÁTICO .....	54
5 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES .....	58
6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	60
APÊNDICE 1– INSERÇÃO DE DIVISORES D'ÁGUA .....	62
APÊNDICE 2– INCOERÊNCIAS ALTIMÉTRICAS .....	66
APÊNDICE 3– ARQUIVO DE DADOS .....	73
APÊNDICE 4 – TESTE PARA DEFINIR O VALOR DA TOLERÂNCIA .....	76

APÊNDICE 5 – PROCESSO DE FILTRAGEM.....	79
APÊNDICE 6 – TESTE PARA REDUÇÃO DO ERRO ALTIMÉTRICO.....	82

## LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 – MODELO <i>TIN</i> .....	5
FIGURA 2 – TRIANGULAÇÃO QUE SATISFAZ O CRITÉRIO DE DELAUNAY .....	6
FIGURA 3 – TRIANGULAÇÃO QUE NÃO SATISFAZ O CRITÉRIO DE DELAUNAY.....	6
FIGURA 4 – TRIÂNGULOS HORIZONTAIS E ARESTAS DE TRIÂNGULOS INTERCEPTANDO CANAIS DE DRENAGEM.....	8
FIGURA 5 – <i>TIN</i> SEM TRIÂNGULOS HORIZONTAIS.....	8
FIGURA 6 – LOCALIZAÇÃO DO MUNICÍPIO DE RIO AZUL.....	12
FIGURA 7 – ÁREA-PILOTO.....	13
FIGURA 8 – DETALHE DA FOLHA.....	14
FIGURA 9 – PONTOS DE CONTROLE DA ÁREA-PILOTO.....	18
FIGURA 10 – PONTOS DE CONTROLE DA FOLHA.....	19
FIGURA 11 – TRIANGULAÇÃO SEM O ELEMENTO <i>BOUNDARY</i> .....	23
FIGURA 12 – TRIANGULAÇÃO COM O ELEMENTO <i>BOUNDARY</i> .....	23
FIGURA 13 – DISTÂNCIA ORTOGONAL CALCULADA.....	32
FIGURA 14 – C. N. “ <i>REST</i> ”.....	37
FIGURA 15 – C.N. “ <i>RES5</i> ”.....	37
FIGURA 16 – C.N. “ <i>RES10</i> ”.....	37
FIGURA 17 – ANÁLISE VISUAL DO MDT “ <i>REST</i> ”.....	39
FIGURA 18 – ANÁLISE VISUAL DO MDT “ <i>RES1</i> ”.....	40
FIGURA 19 – ANÁLISE VISUAL DO MDT “ <i>RES5</i> ”.....	41
FIGURA 20 – ANÁLISE VISUAL DO MDT “ <i>RES10</i> ”.....	42
FIGURA 21 – ANÁLISE VISUAL DO MDT “ <i>RESDIV</i> ”.....	43
FIGURA 22 – ANÁLISE VISUAL DO MDT “ <i>REST</i> ” DA FOLHA.....	44
FIGURA 23 – ANÁLISE VISUAL DO MDT “ <i>RES1</i> ” PARA A FOLHA.....	45
FIGURA 24 – ANÁLISE VISUAL DO MDT “ <i>RES5</i> ” PARA A FOLHA.....	46
FIGURA 25 – ANÁLISE VISUAL DO MDT “ <i>RES10</i> ” PARA A FOLHA.....	47
FIGURA 26 – ANÁLISE VISUAL DO MDT “ <i>RESDIV</i> ” PARA A FOLHA.....	48
FIGURA 27 – CURVAS DE NÍVEL INTERPOLADAS DO MDT SEM LINHAS DE MÁXIMO.....	63
FIGURA 28 – TRIANGULAÇÃO COM TRIÂNGULOS HORIZONTAIS.....	64
FIGURA 29 – TRIANGULAÇÃO APÓS INSERÇÃO DE LINHAS DE MÁXIMO.....	64
FIGURA 30 – CURVAS DE NÍVEL INTERPOLADAS A PARTIR DO MDT COM LINHAS DE MÁXIMO ..	65
FIGURA 31 – ÁREA DO MAPA DIGITAL QUE APRESENTOU INCOERÊNCIA ALTIMÉTRICA.....	67
FIGURA 32 – COMPORTAMENTO INCORRETO DA CURVA DE NÍVEL INTERPOLADA.....	68
FIGURA 33 – VALOR ALTIMÉTRICO DOS VÉRTICES.....	69
FIGURA 34 – ALTERAÇÃO ALTIMÉTRICA E COMPORTAMENTO DA CURVA DE NÍVEL INTERPOLADA.....	70
FIGURA 35 – CURVAS DE NÍVEL INTERPOLADAS E VALOR ALTIMÉTRICO DOS VÉRTICES .....	71
FIGURA 36 – CURVAS DE NÍVEL INTERPOLADAS.....	72
FIGURA 37 – ARQUIVO DE DADOS COM FORMATO ASCII.....	74
FIGURA 38 – ÁREA DE TESTE.....	77
FIGURA 39 – RESULTADO DO PROCESSO DE FILTRAGEM COM TOLERÂNCIA 0,5 m.....	80
FIGURA 40 – RESULTADO DO PROCESSO DE FILTRAGEM COM TOLERÂNCIA 0,1 M.....	81
FIGURA 41 – CURVAS DE NÍVEL INTERPOLADAS.....	81
FIGURA 42 – REGIÃO DO PONTO DE CONTROLE Nº 7.....	84
FIGURA 43 – TRIANGULAÇÃO SOBRE O PONTO DE CONTROLE Nº 7.....	85
FIGURA 44 – REGIÃO DO PONTO DE CONTROLE Nº 7 COM INSERÇÃO DE LINHAS CARACTERÍSTICAS.....	86



## LISTA DE TABELAS

TABELA 1 – NÍVEIS DOS MAPAS DIGITAIS .....	16
TABELA 2 – FEIÇÕES UTILIZADAS NA GERAÇÃO DOS MDT .....	26
TABELA 3 – RELATÓRIO DE PONTOS DUPLICADOS .....	28
TABELA 4 – RESULTADO DO PROCESSO DE JUNÇÃO .....	31
TABELA 5 – RESULTADO DO PROCESSO DE FILTRAGEM.....	33
TABELA 6 – RELATÓRIO ESTATÍSTICO DOS MDT .....	35
TABELA 7 – ANÁLISE NUMÉRICA DA ÁREA-PILOTO .....	50
TABELA 8 – ANÁLISE NUMÉRICA DA FOLHA.....	52
TABELA 9 – RESULTADOS DA ANÁLISE VOLUMÉTRICA .....	53
TABELA 10 – MÁXIMO ERRO MÉDIO QUADRÁTICO DAS CLASSES.....	55
TABELA 11 – ERRO MÉDIO QUADRÁTICO.....	56
TABELA 12 – RESULTADOS DAS ANÁLISES.....	58
TABELA 13 – PONTOS DE CONTROLE DO “RES5” DA ÁREA-PILOTO COM DESLOCAMENTO MAIOR QUE $\pm 1$ m.....	83

## LISTA DE FLUXOGRAMAS E GRÁFICOS

FLUXOGRAMA 1 – ELEMENTOS DA PESQUISA .....	10
FLUXOGRAMA 2 – SEQÜÊNCIA DE GERAÇÃO DO MDT .....	20
GRÁFICO 1 – ERRO MÉDIO QUADRÁTICO PARA A ÁREA-PILOTO .....	55
GRÁFICO 2 – ERRO MÉDIO QUADRÁTICO PARA A FOLHA.....	56

## RESUMO

Usualmente, o Modelo Digital do Terreno (MDT) é gerado a partir de curvas de nível e pontos altimétricos. Existem dois inconvenientes quanto à utilização somente destes dois tipos de feições: o volume de dados amostrais, que interfere na geração, manipulação e armazenamento do MDT; e a possibilidade do MDT apresentar inconsistência, apesar do volume de dados. Com este trabalho, pretende-se propor uma sistematização para geração do MDT a partir de dados de mapa digital 3D, com uma diminuição da quantidade de dados amostrais, principalmente com uma maior equidistância vertical entre as curvas de nível. Para manter a geomorfologia do terreno, foram inseridas feições topográficas estruturais no conjunto de dados amostrais, por serem feições que caracterizam a geomorfologia do terreno. Inicialmente, foi gerado um MDT com todas as feições altimétricas disponíveis no mapa digital 3D. Sucessivamente, foram gerados modelos, reduzindo-se o volume de dados amostrais progressivamente. Estes modelos foram analisados por meio de: relatório estatístico, comparando-se a quantidade de vértices, arestas, triângulos e tamanho do arquivo dos diferentes modelos; análise gráfica, confrontando-se as curvas de nível do mapa digital e as curvas de nível interpoladas a partir dos MDT; análise numérica, comparando-se o erro altimétrico apresentado nos pontos de controle dos MDT, e classificando os MDT segundo o Padrão de Erro Cartográfico (PEC); análise volumétrica, calculando-se o volume representado por cada MDT para confrontá-los; e, finalmente, realizou-se uma análise utilizando-se o erro médio quadrático obtido para cada MDT, comparando-os com o valor estabelecido no Decreto nº 89.817. Com os resultados obtidos nas análises, confirmou-se a redução do volume de dados amostrais e o MDT não apresentou alteração no contexto geomorfológico do terreno.

## ABSTRACT

Digital Terrain Models are usually generated from contours and elevation points. There can be two problems if only these kinds of data are used: the large volume of data that affects DTM generation, manipulation and storage, and the possibility of DTM inconsistencies. The goal of these project is to propose a systematic approach for the generation of DTM reducing the amount of sample data, mainly using a larger contour interval. In order to preserve the geomorphological characteristics (topographic characteristic of the landscape), structural features were added to the sample data. Initially a DTM was created from the original 3D digital map. Then, Digital Terrain Models were generated by progressively reducing the amount of sample data. These Digital Terrain Models were then analyzed by statistical report; visual analysis; numerical analysis; volume analysis; analysis of mean square error. The statistical report allowed for the analysis of the number of vertices, sides, triangles and file size of each different DTM. The visual analysis was accomplished by overlaying the contours of original digital map and those contours generated from DTM. The numerical analysis was based on the Brazilian Map Standard Error for topographic maps, in accordance with the elevation error of control points. The volume analysis was the comparison of the volume of each DTM. And finally the mean square error was analyzed by comparing the value obtained for each DTM with the one established in the Brazilian Federal Government Regulation for quality control of topographic maps (Decreto 89.817). The results confirmed the initial assumption that the reduction in the sample data amount does not cause significant errors in terrain geomorphology, since structural features are used to generate the DTM.

## **1 INTRODUÇÃO**

O Modelo Digital de Terreno (MDT) é uma representação digital do terreno (WEIBEL e HELLER, 1991, p.01). O MDT tornou-se muito utilizado, principalmente em Ciências Geodésicas, por permitir a derivação de diversos produtos tais como mapa de declividade, curvas de nível, cálculo de corte/aterro, visualização 3D ( BURROUGH, 1986, p. 01).

Para a geração do MDT, é necessário obter informações altimétricas do terreno que garantam a geomorfologia do mesmo. Usualmente, são utilizadas curvas de nível e pontos altimétricos como fonte de informação altimétrica.

Neste estudo os dados amostrais serão extraídos de mapas digitais 3D, tais mapas possuem suas feições referidas por três coordenadas. Conseqüentemente, pode-se utilizar feições topográficas estruturais, tais como sistema viário e linhas características, na geração do MDT. Segundo Felgueiras (2000, p.17) as linhas características são os canais de drenagem (linhas de mínima altitude) e divisores d'água (linhas de máxima altitude). Estas feições auxiliam a garantir o contexto geomorfológico, tornando o modelo mais adequado da realidade.

No presente trabalho, desenvolveu-se um estudo de redução do volume de dados utilizados na geração do MDT, sem que o mesmo apresente comprometimento na geomorfologia. Os estudos foram realizados em duas áreas, disponibilizadas em mapas digitais 3D, que possuem características rurais.

### **1.1 PROBLEMA**

O MDT, gerado a partir de curvas de nível e pontos altimétricos como as únicas fontes de informação altimétrica, tem dois inconvenientes:

- a) resultar num grande volume de dados, que interfere no processamento e manipulação dos dados, pois o tempo gasto na execução destas tarefas depende do volume de dados. A armazenagem também é prejudicada, porque o espaço computacional também depende do volume de dados;

- b) apresentar inconsistências (triângulos horizontais e aresta de triângulos interceptando feições topográficas estruturais), que alteram a representação do terreno.

A geração do MDT, a partir de mapas digitais 3D, possibilita a inserção de feições topográficas estruturais, tais como: canais de drenagem; sistema viário e divisores d'água, entre outras. Estas feições auxiliam a garantir o contexto geomorfológico do terreno. Em contrapartida, ao serem inseridas, aumentam o volume de dados amostrais. Assim, pretende-se aumentar a equidistância vertical entre as curvas de nível, com a eliminação de algumas curvas de nível, para reduzir o volume de dados amostrais.

## 1.2 OBJETIVOS

### 1.2.1 Objetivo Geral

Com este trabalho, tem-se por objetivo propor uma sistematização para geração do MDT a partir de dados de mapas digitais 3D.

### 1.2.2 Objetivos Específicos

- a) gerar o MDT, utilizando como dados amostrais: curvas de nível, pontos altimétricos isolados, canais de drenagem, sistema viário e linhas características;
- b) estabelecer a amostra mais adequada entre as curvas de nível, quando se reduz a quantidade dos dados amostrais, procurando manter o contexto geomorfológico do MDT;
- c) avaliar os MDT por meio de seus produtos (curvas de nível, erro altimétrico dos pontos de controle) em termos de qualidade posicional.

### 1.3 JUSTIFICATIVA

Entende-se que com a redução do volume de dados amostrais, também haverá redução no tempo de processamento computacional para geração e redução do arquivo que armazena o MDT. Com isto, haverá contribuição:

- a) funcional - o usuário, ao manipular o MDT, obtém respostas com maior rapidez, o que proporciona um melhor aceite da técnica, contribuindo para melhorar a exploração do MDT;
- b) econômica - o custo para levantamento da informação altimétrica utilizada na geração do MDT será reduzido;
- c) intercâmbio empresa/usuário - o MDT poderá ser enviado ao usuário via *internet*, facilitando a comunicação entre as partes envolvidas no processo de geração e manipulação do MDT.

### 1.4 DESCRIÇÃO DO TRABALHO

O presente trabalho é composto de seis capítulos. No segundo capítulo, apresenta-se a revisão de literatura, abrangendo o Modelo Digital de Terreno (MDT) e o modelo *TIN*, que é o modelo utilizado neste estudo. Também neste capítulo apresentam-se os elementos utilizados neste estudo.

No terceiro capítulo, apresentam-se as áreas de estudo, bem como a localização, as feições altimétricas existentes nestas áreas e que foram utilizadas na geração do MDT. Também no terceiro capítulo encontra-se a metodologia utilizada no presente estudo, descrevendo-se a seqüência de geração do MDT, detalhando-se os problemas encontrados no decorrer do estudo e as soluções adotadas.

No quarto capítulo, mostram-se as análises realizadas e os resultados obtidos, explicando-se os resultados. No quinto capítulo, apresenta-se a conclusão e as recomendações. No sexto e último capítulo, apresentam-se as referências bibliográficas.

## **2 CONCEITOS E ELEMENTOS DA PESQUISA**

### **2.1 MODELO DIGITAL DO TERRENO**

A superfície terrestre tem uma variação contínua, expressa por variações de altitude. Existem dificuldades para a representação desta superfície, motivadas pela sua variação contínua e por ser esta tridimensional (KEATES, 1973, p.34). O método usado para representação é conhecido como Modelo Digital de Terreno que, segundo BURROUGH (1986, p.39), é definido como qualquer representação digital de uma variação contínua do relevo no espaço. Existem basicamente duas formas de gerar o MDT quando utiliza-se uma rede de pontos: irregular (*TIN – Triangulated Irregular Network*) e regular.

FELGUEIRAS (1999, p.01) destaca que alguns dos fenômenos que podem ser representados por um MDT são: altitudes, informações geológicas, levantamentos de profundidades do mar ou de um rio, entre outros. BURROUGH (1986, p.39) cita algumas das utilidades do MDT:

- a) auxiliar o estudo de corte e aterro em projetos de construção de estradas;
- b) servir de base para representação de informações temáticas ou combinação de dados da superfície com dados temáticos, como tipo de solo, usos do solo ou vegetação;
- c) fornecer dados para simulação de paisagismo e processos ambientais;
- d) permitir a visualização da superfície em 3D;
- e) auxiliar na análise de visibilidade;
- f) auxiliar na elaboração de planos, programas, projetos, ações e atividades voltadas para identificação prévia de problemas ou de áreas prioritárias dentro do processo de desenvolvimento urbano e regional.

Para a modelagem da superfície terrestre, é necessário coletar dados altimétricos representativos da superfície estudada. A amostragem não é, em geral, aleatória. Tem que ser representativa, considerando tanto a quantidade como também a distribuição das amostras (FELGUEIRAS, 1999, p.02).

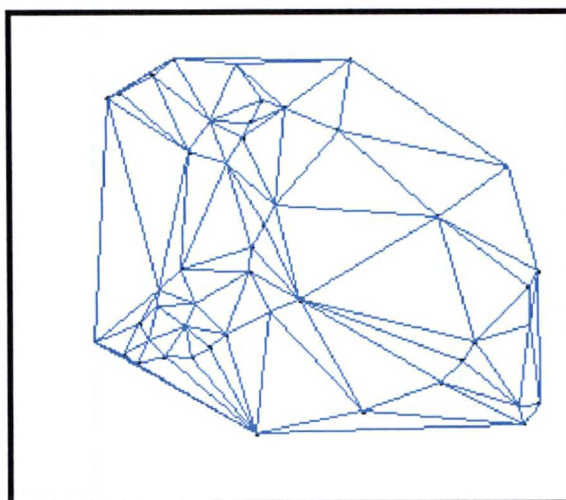
As curvas de nível e pontos altimétricos são citados como as fontes de dados mais usuais. FELGUEIRAS (1999, p.17) destaca a importância de também incorporar feições topográficas estruturais, tais como canais de drenagem e divisores d'água.

### 2.1.1 MODELO *TIN*

KUMLER (1994, p.01) define *TIN* como uma malha de elementos triangulares que modela o relevo. A geração do modelo *TIN* é realizada diretamente sobre os dados amostrais (BURROUGH, 1986, p.42), ou seja, os vértices dos triângulos são os pontos amostrais coletados. MCCULLAGH (citado em HUTCHINSON E GALLANT, 1999 p.110) afirma que a triangulação é um método atrativo, que é motivado por sua capacidade de adaptação aos vários tipos de terrenos.

Neste trabalho para a geração da malha triangular *TIN*, foi obedecido o critério de Delaunay. Este critério procura maximizar os ângulos dos triângulos. A malha deve conter triângulos com geometria mais próxima possível de equiláteros, evitando a criação de triângulos afinados (FELGUEIRAS, 1999, p.16). Na Figura 1, mostra-se um exemplo do *TIN*.

FIGURA 1 – MODELO *TIN*



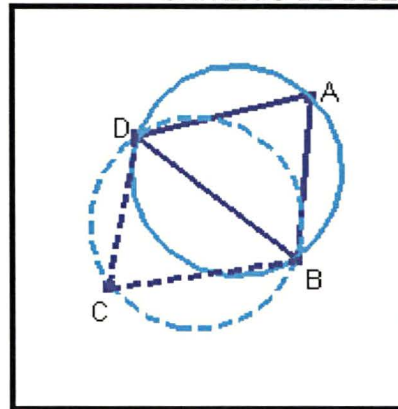
BURROUGH (1986, p.42) define o critério de Delaunay como:



*“uma triangulação de um conjunto de pontos é uma triangulação de Delaunay se, e somente se, o círculo circunscrito em qualquer dos triângulos não contém nenhum outro ponto em seu interior”.*

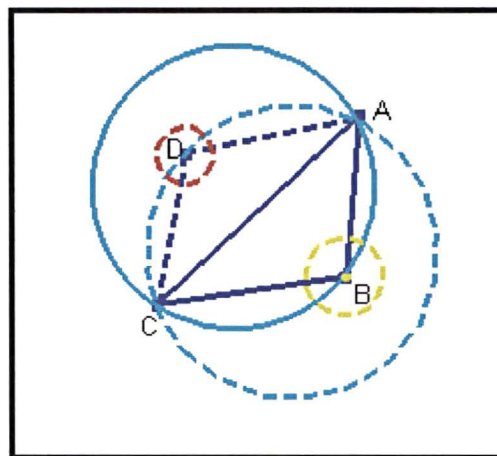
Na Figura 2, mostra-se um exemplo de triângulos que satisfazem ao critério de Delaunay.

FIGURA 2 – TRIANGULAÇÃO QUE SATISFAZ O CRITÉRIO DE DELAUNAY



Observando a Figura 2, percebem-se dois triângulos, um com linha contínua (vértices A, B, D) e outro com linha tracejada (vértices B, C, D). O triângulo que possui linha tracejada está circunscrito ao círculo de linha tracejada, e o triângulo de linha contínua está circunscrito ao círculo com linha contínua. Observa-se que, no interior do círculo de linha tracejada, não existe nenhum vértice pertencente ao triângulo de linha contínua, e vice-versa.

FIGURA 3 – TRIANGULAÇÃO QUE NÃO SATISFAZ O CRITÉRIO DE DELAUNAY

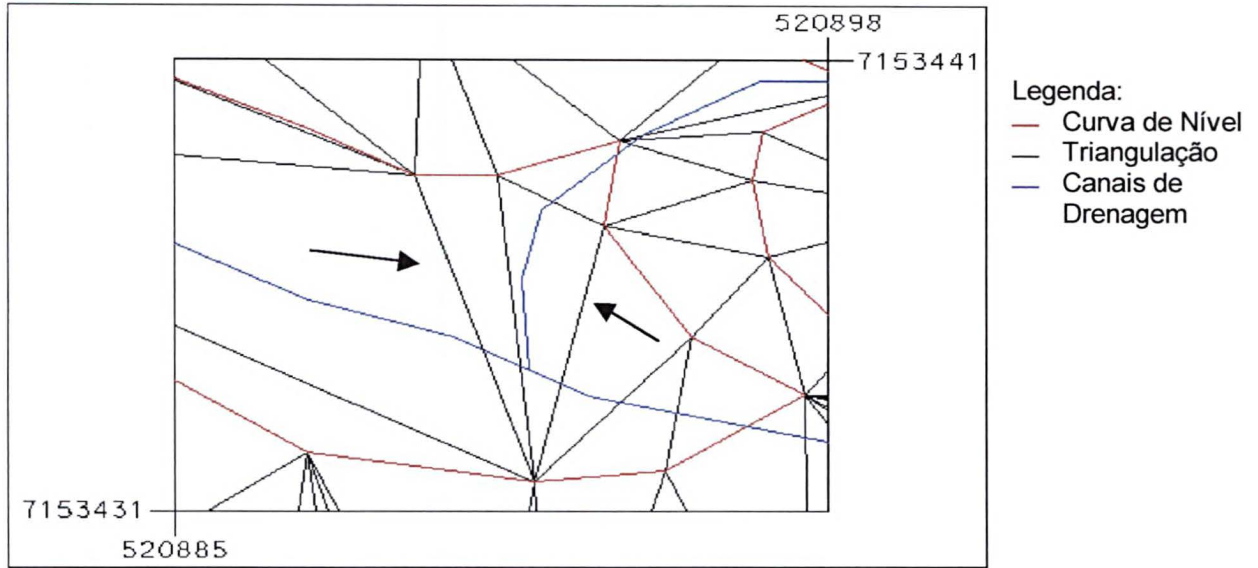


Na Figura 3, mostram-se os mesmos vértices da Figura 2. Porém, a triangulação não satisfaz o critério de Delaunay. Confrontando as Figuras 2 e 3, percebe-se que, na Figura 3, o círculo de linha tracejada possui em seu interior o vértice B pertencente ao triângulo de linha contínua (circulado em amarelo). E o círculo de linha contínua possui em seu interior o vértice D pertencente ao triângulo de linha tracejada (circulado em vermelho). Nos dois triângulos da Figura 3, o critério de Delaunay não é respeitado.

O TIN gerado a partir de curvas de nível e obedecendo somente ao critério de Delaunay apresenta dois tipos de inconsistências, que são descritas por SCHNEIDER (1998, p.05) como:

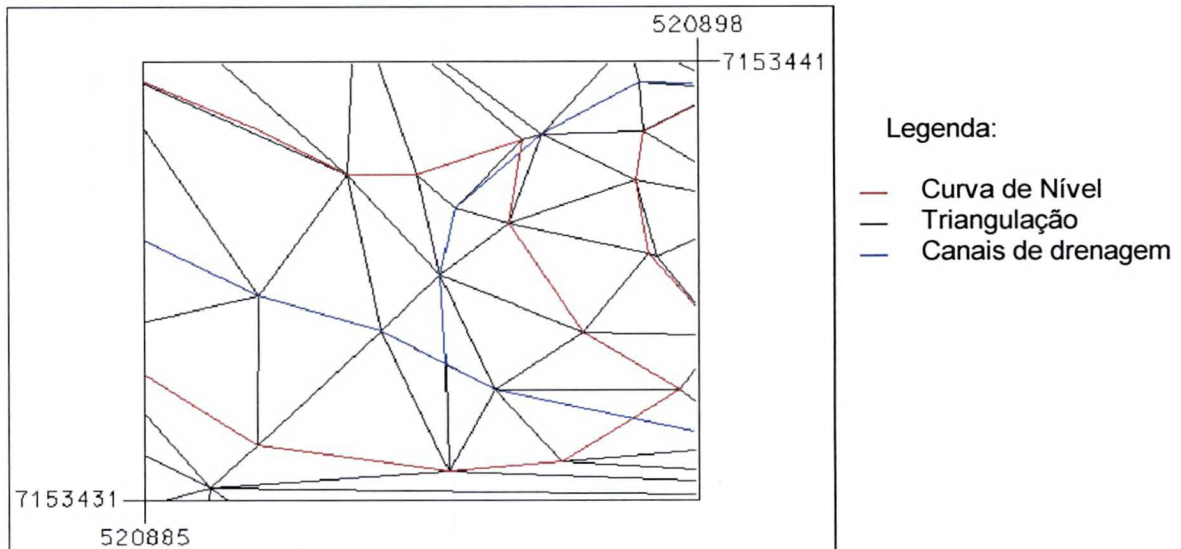
- a) Triângulos Horizontais – triângulos gerados ao longo dos braços das curvas de nível. Também exemplificados por FELGUEIRAS (1999, p.17) como triângulos patamares, onde os vértices estão todos na mesma curva de nível. Podem ser encontrados em áreas fechadas por uma curva de nível e em regiões que têm canais de drenagem que não foram considerados. Existe a necessidade de minimizar a incidência de triângulos horizontais para garantir o contexto geomorfológico do terreno (SCHNEIDER, 1998, p.5).
  
- b) Arestas de Triângulos Interceptando Estruturas Topográficas Lineares – a detecção e correção são simples se as estruturas topográficas lineares forem consideradas na modelagem. As feições interceptadas geralmente são canais de drenagem, divisores d'água e outras feições topográficas lineares, que agem como linhas de quebra. Esta inconsistência na triangulação provoca também o surgimento de triângulos horizontais (SCHNEIDER, 1998, p.5), citados na seção anterior. Na Figura 4, mostra-se um exemplo de triângulos horizontais gerados no interior de uma curva de nível. Verifica-se que as arestas dos triângulos horizontais interceptam estruturas topográficas lineares (canais de drenagem).

FIGURA 4 – TRIÂNGULOS HORIZONTAIS E ARESTAS DE TRIÂNGULOS INTERCEPTANDO CANAIS DE DRENAGEM



Na Figura 5, mostra-se o comportamento da triangulação, quando são inseridos canais de drenagem (em azul). Confrontando as Figuras 4 e 5, percebe-se que, na Figura 5, a triangulação foi modificada – não passa sobre o canal de drenagem, não gerando assim triângulos horizontais.

FIGURA 5 – TIN SEM TRIÂNGULOS HORIZONTAIS

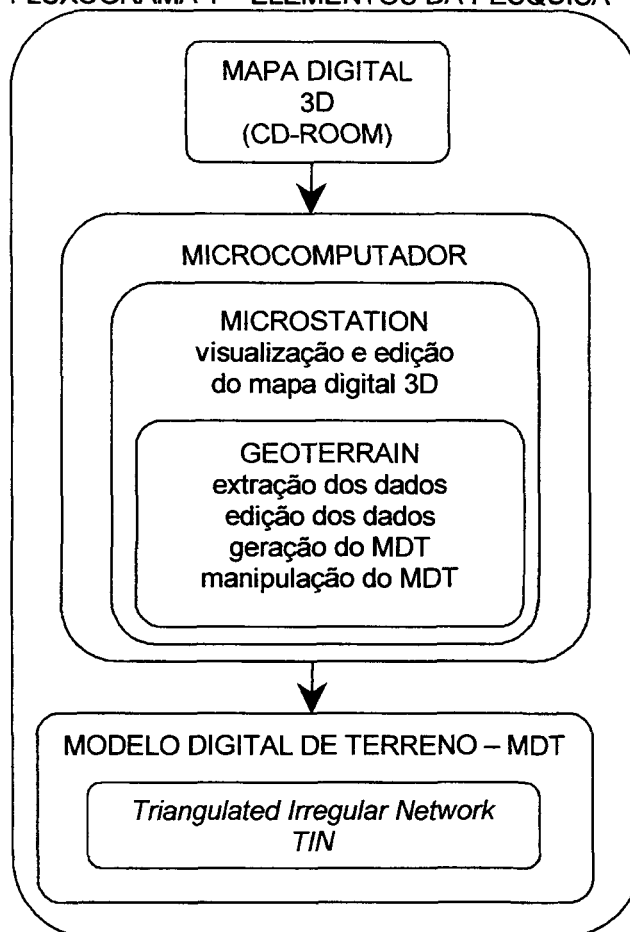


FELGUEIRAS (1999, p.17) sugere a utilização do critério de Delaunay com restrições, definido como uma triangulação que deve considerar inicialmente as características topográficas da superfície em estudo e, posteriormente, o critério de Delaunay. Adotam-se restrições para que o resultado da modelagem mantenha a geomorfologia da superfície (PRIES, citado em HUTCHINSON E GALLANT, 1999, p.110). Assim, o processo de geração da triangulação é interrompido quando alcançar pontos que definam uma estrutura topográfica linear como, por exemplo, canais de drenagem, e é reiniciado a partir destes pontos. Para que estas restrições sejam obedecidas, é necessário incorporar linhas características (feições topográficas estruturais), que são identificadas como canais de drenagem; linhas divisoras d'água e linhas de crista (FELGUEIRAS, 1999, p.17).

## 2.2 ELEMENTOS DA PESQUISA

No presente capítulo são apresentados os elementos utilizados no processo da pesquisa, iniciando com a definição de mapa, mapa digital 3D e finalmente a definição do MDT e *TIN*. Para a realização da pesquisa, utilizaram-se os elementos apresentados no Fluxograma 1:

FLUXOGRAMA 1 – ELEMENTOS DA PESQUISA



### 2.2.1 Mapa Digital 3D

Mapa é uma representação cartográfica do meio físico e do meio humano, visando uma finalidade e para o qual são conhecidos a escala, a projeção cartográfica, o *datum* e a legenda (VIEIRA, 2001).

Mapa digital 3D é um mapa que está armazenado em meio digital, segundo uma estrutura que permite sua recuperação, manipulação e visualização por meios digitais. Além disto, o valor altimétrico (Z) de cada posição armazenada está explícito na estrutura de dados (VIEIRA, 2001).

### 2.2.2 Programa Computacional - *MicroStation* e *GeoTerrain*

Para a realização da pesquisa, utilizou-se o programa computacional *MicroStation* da *Bentley* e seu módulo *GeoTerrain*, recursos que estão disponíveis no laboratório de Cartografia do Curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas da Universidade Federal do Paraná.

O *MicroStation* é um sistema CAD que possibilita a criação, edição e manipulação de mapas digitais. O sistema *MicroStation* admite a organização de dados em até 63 níveis de informação. As feições introduzidas nos níveis podem ter atributos distintos (como cor, espessura do traço, tipo de linha).

O *GeoTerrain* é um módulo do *MicroStation*, destinado à geração, manipulação, interpretação e visualização do MDT. No *GeoTerrain*, os dois modelos básicos são identificados como *TIN* (irregular) e *LATTICE* (regular).

### 2.2.3 Modelo Digital do Terreno (MDT) e Modelo *TIN*

Como descrito no capítulo anterior, o MDT é conhecido como qualquer representação digital da variação contínua do relevo no espaço (BURROUGH, 1986, p.39). Neste estudo foi utilizado o *TIN* porque a estrutura deste modelo é mais propícia para a inclusão das feições topográficas estruturais (FELGUEIRAS, 2000, p.17). Como neste modelo os vértices da triangulação são os pontos amostrais, não é necessária uma interpolação para gerar o modelo, que poderia interferir no resultado das análises.

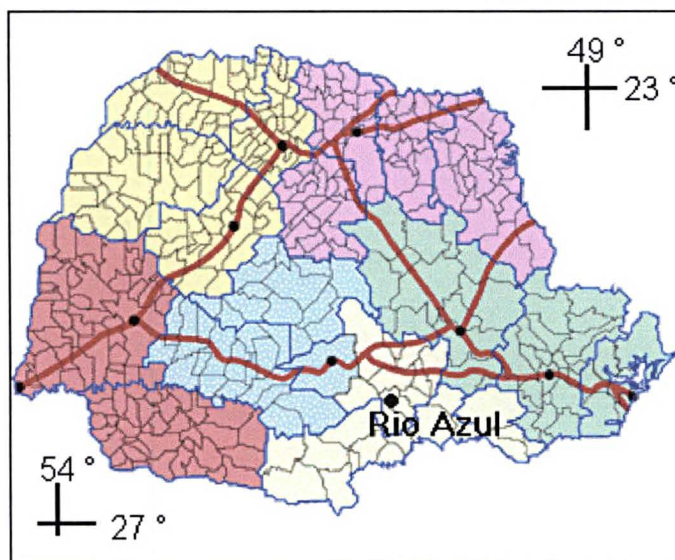
### 3 METODOLOGIA

No presente capítulo, detalham-se as áreas utilizadas no estudo e a localização. Também explica-se a edição que foi realizada nos mapas digitais trabalhados para torná-los compatíveis com o estudo realizado. Seqüencialmente, descreve-se a metodologia empregada nos processos de extração dos dados altimétricos dos mapas digitais que sejam representativos da superfície, edição dos dados amostrais e geração do MDT.

#### 3.1 ÁREAS DE ESTUDO

Para a execução da pesquisa, foram utilizados mapas digitais 3D da área urbana de Rio Azul, município do Estado do Paraná, com escala de 1:2.000 e eqüidistância vertical entre as curvas de nível de um metro. Este município possui uma área de aproximadamente 613km<sup>2</sup>. Na Figura 6, mostra-se a localização do Município de Rio Azul no Estado do Paraná.

FIGURA 6 – LOCALIZAÇÃO DO MUNICÍPIO DE RIO AZUL



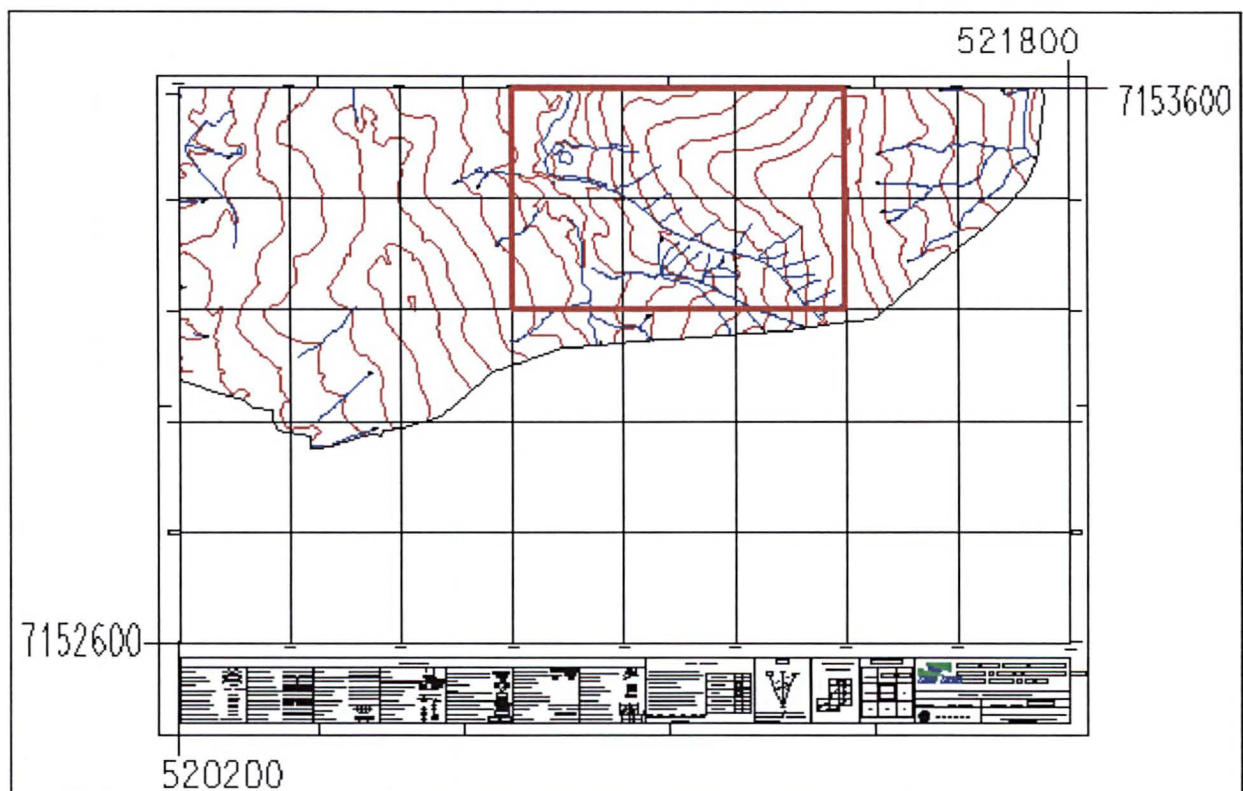
A área urbana do município está representada por onze mapas digitais, abrangendo uma área de aproximadamente 42km<sup>2</sup>.

Os mapas digitais foram produzidos pela empresa Esteio Aerolevantamentos S. A., sob contrato do Serviço Social Autônomo Paranaidade. O vôo, apoio de campo, aerotriangulação e restituição foram realizados em 1998. A projeção utilizada é a Universal Transversa de Mercator - UTM.

Para a realização dos estudos preliminares, adotou-se uma área-piloto, representada por uma pequena região com canais de drenagem e com características rurais, ou seja, sem a presença de quadras, lotes e edificações. Este procedimento facilitou o entendimento e a análise de como o MDT é gerado e possibilitou a detecção de inconsistências e a realização de testes para sua correção.

A área-piloto escolhida está compreendida no mapa digital 520-152, região compreendida entre as coordenadas (520.800m E; 7.153.200m N) e (521.400m E; 7.153.600m N), que abrange uma área de 0,24 km<sup>2</sup>. Na Figura 7, mostra-se a localização da área-piloto no mapa digital 520-152.

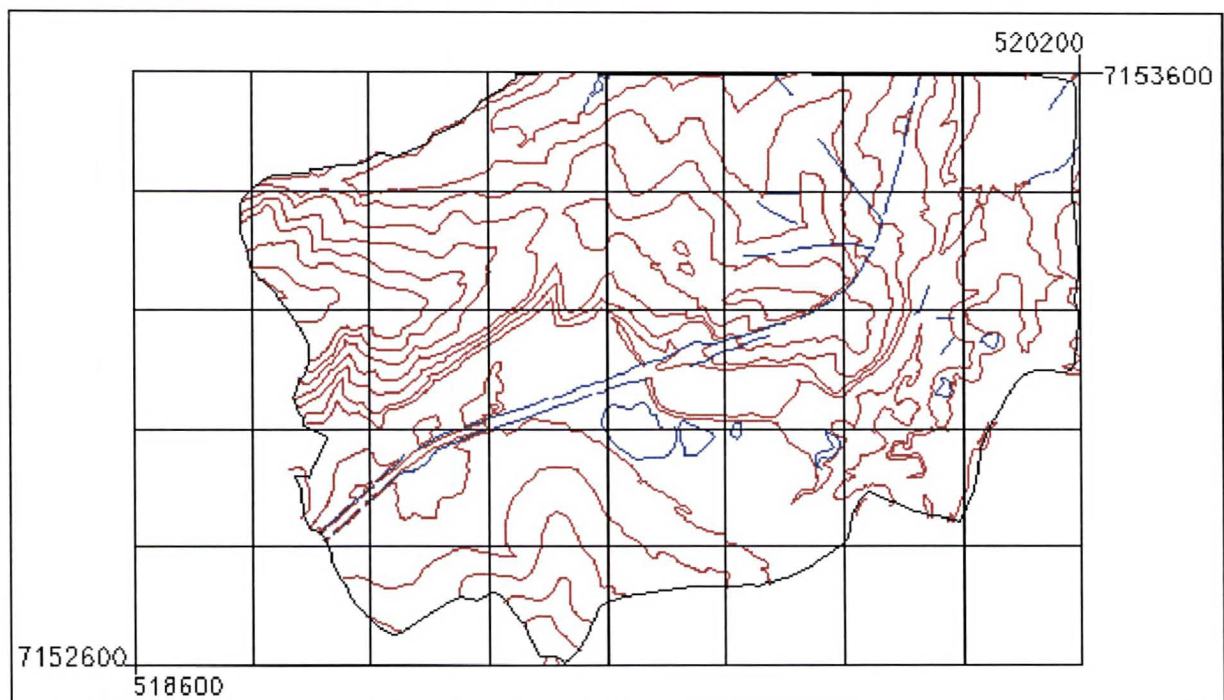
FIGURA 7 – ÁREA-PILOTO





Um segundo estudo foi realizado no mapa digital 518-152, região compreendida entre as coordenadas (518.600m E; 7.152.600m N) e (520.200m E; 7.153.600m N), que abrange uma área de aproximadamente 1,6 km<sup>2</sup>. Na Figura 8, mostra-se a folha em detalhe. As curvas de nível representadas possuem uma eqüidistância vertical de cinco metros, e também algumas feições existentes na figura foram retiradas para não sobrecarregar visualmente a Figura.

FIGURA 8 – DETALHE DA FOLHA



Legenda:

- Curvas de nível
- Canais de drenagem, lagos e alagado

### 3.2 NOMENCLATURA DOS MDT GERADOS

Para a pesquisa foram gerados cinco modelos para cada área escolhida. Estes foram denominados *res* (porque os mapas digitais 3D foram gerados por restituição), seguidos de abreviaturas que permitissem a identificação imediata das principais feições extraídas para geração do conjunto de dados amostrais, sendo que:

- a) *t* – utilizaram-se todas as feições que possuem informação altimétrica, ou seja, curvas de nível com equidistância vertical de um metro, pontos altimétricos isolados, canais de drenagem, sistema viário, edificações, divisores d'água, limite da área trabalhada e linhas características;
- b) *1* – utilizaram-se apenas as curvas de nível com equidistância vertical de um metro, os pontos altimétricos e o limite da área trabalhada;
- c) *5* – utilizaram-se as mesmas feições do MDT "*res*", porém as curvas de nível foram extraídas com um equidistância vertical de cinco metros;
- d) *10* – utilizaram-se as mesmas feições do MDT "*res*", porém as curvas de nível foram extraídas com equidistância vertical de dez metros;
- e) *div* – utilizaram-se os pontos altimétricos isolados, canais de drenagem, sistema viário, edificações, divisores d'água, limite da área trabalhada e linhas características, ou seja, as curvas de nível não foram extraídas do mapa digital.

### 3.3 EDIÇÃO DOS MAPAS DIGITAIS

Para compatibilizar os mapas digitais trabalhados com as necessidades existentes neste estudo, realizou-se um processo de edição nos mapas digitais. Com a edição o processo de extração tornou-se mais rápido por ter sido reduzido o número de níveis trabalhados. O processo de edição constitui-se de 6 etapas:

a) Homogeneização dos níveis dos mapas digitais

Os mapas digitais possuíam feições iguais em níveis distintos, ou seja, algumas feições não estavam localizadas no mesmo nível em todos os mapas digitais. Na Tabela 1, apresentam-se os níveis e respectivas feições para a área-piloto e a “folha” (não estão citados os níveis vazios).

TABELA 1 – NÍVEIS DOS MAPAS DIGITAIS

Nível	Feição
01	Vértices para análise
03	Curvas Mestra
04	Ponto Altimétrico
05	Curvas Mestra
06	Curvas Intermediária
09	Divisores d'água
15	Via Pavimentada Meio Fio
**16	Edificação Residencial
19	Alagado, Mangue
**38	Edificação Comercial
**39	Edificação Industrial
**40	Edificação Pública
**41	Ferrovia
*47	Rios de Margem Dupla, Lagoas
**52	Estrada Pavimentada/Não Pavim.
54	Rio Perene Margem Simples/ Vala Drenagem
63	Limite da Área de Trabalho

Obs.: \* - nível existente somente na área-piloto  
\*\* - nível existente somente na folha

b) Eliminação de feições desnecessárias

Algumas feições presentes no mapa digital não são relevantes à pesquisa. Assim, as feições que não foram usadas no processo de extração foram retiradas do mapa digital para não interferir no tempo de processamento para a geração dos MDT.

c) Inserção dos divisores d'água

Os divisores d'água foram inseridos manualmente nas áreas de interesse, pois os mapas digitais não possuem tais feições. Os vértices dos divisores d'água foram inseridos sobre as curvas intermediárias, porque estas feições não serão extraídas do mapa digital para gerar os MDT com redução do volume de dados. Também, observou-

se a necessidade de inserir linhas características (linhas de crista) da superfície do terreno para eliminar a geração de triângulos horizontais. O valor altimétrico dos vértices destas feições foi introduzido manualmente. No Apêndice 1 (p.62), detalha-se a inserção destas feições.

d) Adequação das feições com os elementos do *GeoTerrain*

Para compatibilizar o trabalho de extração das feições, foi necessária uma nova edição, visando adequar as feições com características dos elementos do *GeoTerrain*. Nesta operação foram realizadas as seguintes alterações:

- rios perenes de margem dupla, lagoas e alagados, que representam áreas fechadas e não estavam estruturados como um elemento fechado, foram editados e posteriormente identificados como *voids*;
- o limite da área-piloto foi criado como um retângulo fechado e não preenchido. Posteriormente, este limite foi identificado como o elemento *boundary*. O limite do mapa digital foi criado seguindo o limite da restituição, porém delimitando uma área menor, extraíndo-se posteriormente a informação altimétrica de seus vértices, com a mesma técnica adotada nos divisores d'água. Foi necessário reduzir a área para que houvesse informação altimétrica externa ao limite, sem a qual não seria possível a extração do valor altimétrico dos seus vértices;
- o nível que informa o valor dos pontos altimétrico isolados e o valor das curvas de nível intermediárias (na forma textual) foram eliminados, porque estavam sendo interpretados como vértices. Por ser 3D o mapa digital trabalhado, a informação altimétrica das feições está armazenada com as coordenadas, não sendo necessária na forma textual.

e) Correção de incoerências altimétricas

No decorrer do trabalho, encontraram-se incoerências altimétricas nos mapas digitais, tais como:

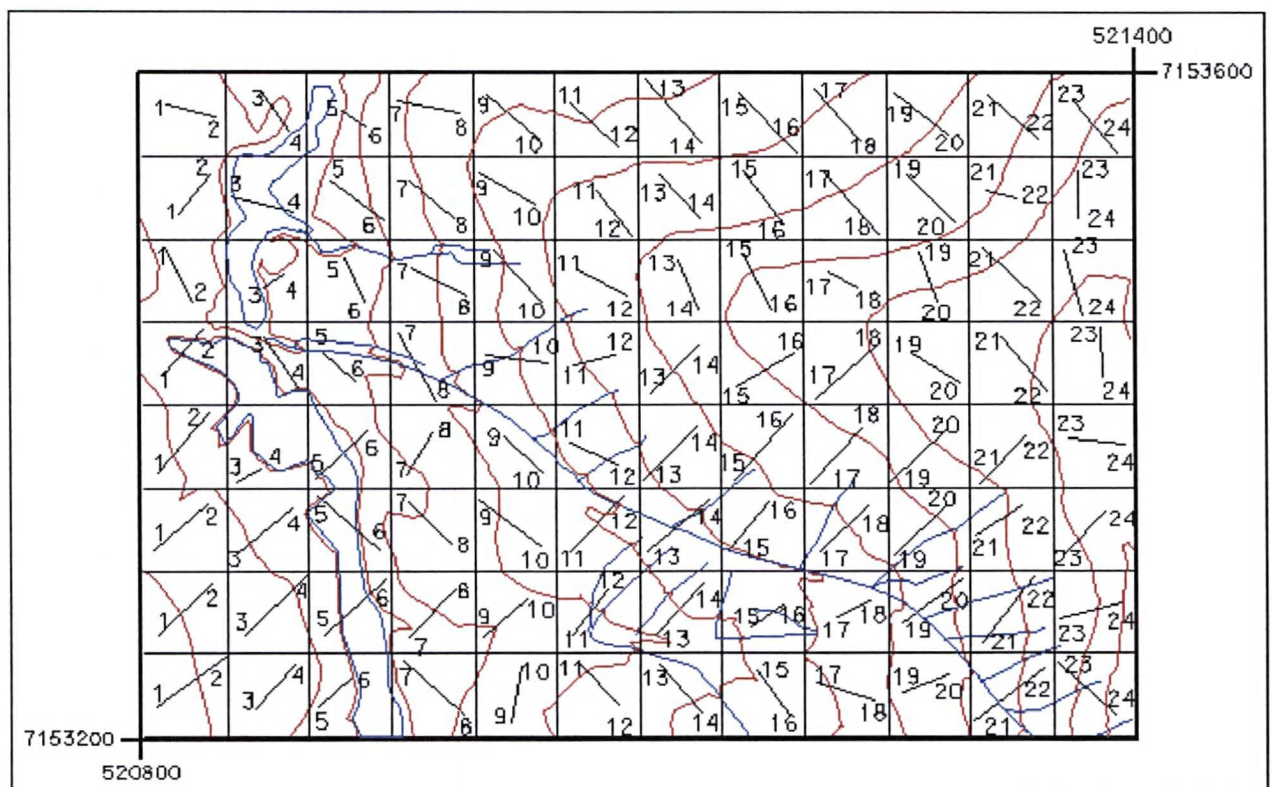
- vértices de edificações e rodovia com o valor altimétrico inteiro e incoerente com o intervalo de curva de nível a que pertencem;
- vértices de rodovias e canais de drenagem com valor altimétrico inteiro.

Estas incoerências estão explicadas mais detalhadamente no Apêndice 2 (p.66).

f) Inserção dos pontos de controle

Para poder ser realizada a análise numérica, foram inseridos os pontos de controle. A área-piloto foi dividida em 8 faixas e foram inseridos 24 pontos de controle em cada faixa, totalizando 192 vértices. Na Figura 9, mostra-se a localização dos pontos de controle que foram inseridos na área-piloto.

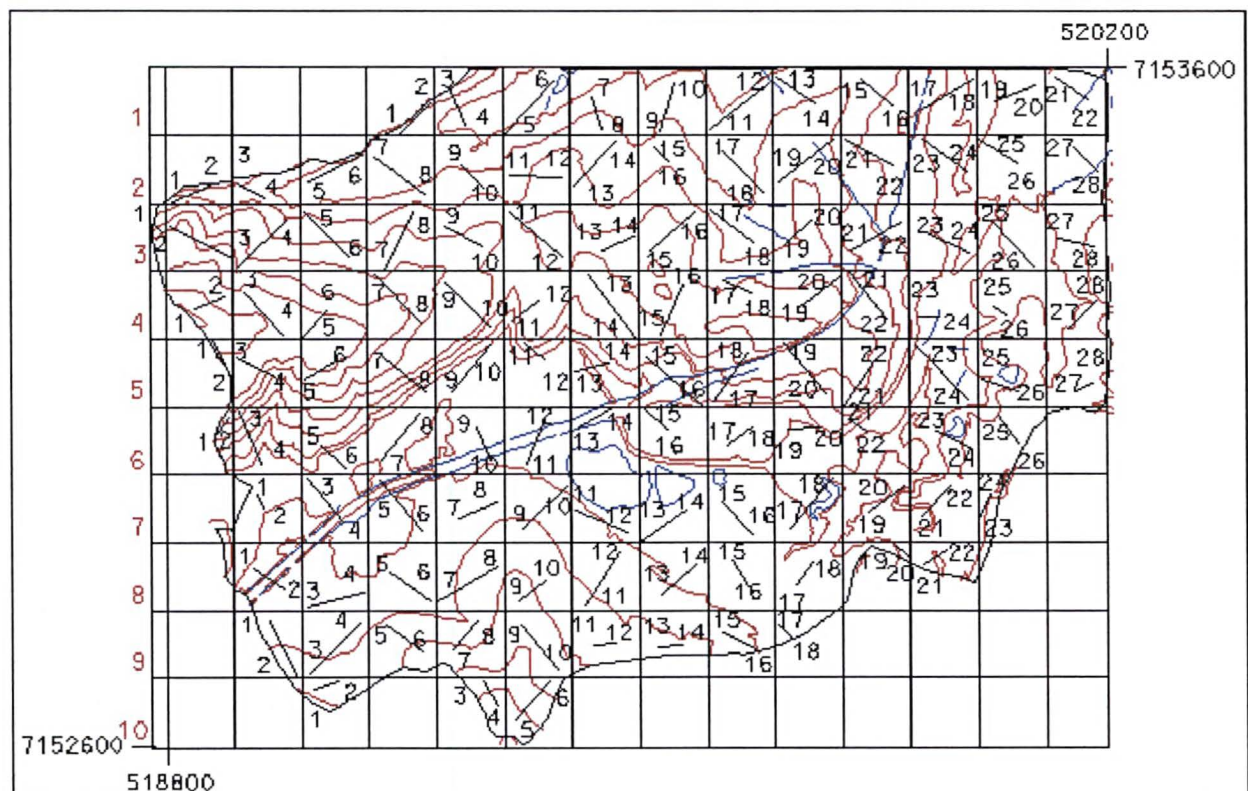
FIGURA 9 – PONTOS DE CONTROLE DA ÁREA-PILOTO



- Legenda:
- Curvas de nível eqüidistância vertical de dez metros (linha mais espessa)
  - Curvas de nível eqüidistância vertical de cinco metros
  - Canais de drenagem
  - 19 Números indicativos dos pontos de controle
  - Segmento cujas extremidades possuem os pontos de controle
  - Linha divisora das faixas

A segunda área de estudo, denominada “folha”, foi dividida em 10 faixas e, por ser uma área irregular, tem um número diferente de vértices para cada faixa, totalizando 232 pontos de controle para a folha. Na Figura 10, mostram-se os pontos de controle da folha. Estão representados pontos de controle e as curvas de nível mestras, com equidistância vertical de dez metros.

FIGURA 10 – PONTOS DE CONTROLE DA FOLHA



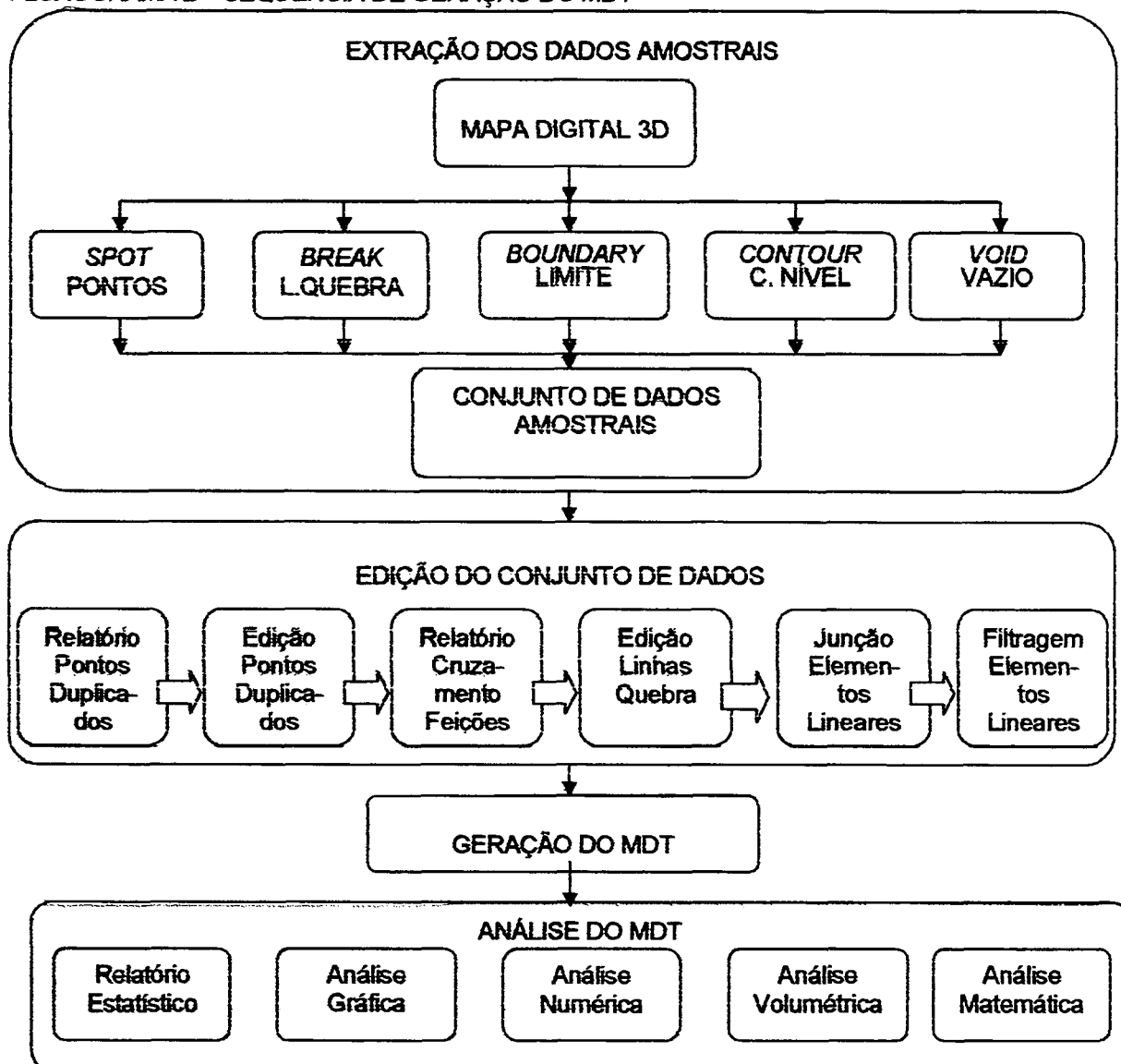
- Legenda:
- Curvas de nível com equidistância vertical de dez metros
  - Limite da área de trabalho
  - 19** Número indicativo dos vértices
  - Linha divisora das faixas
  - Segmento cujas extremidades possuem os pontos de controle

Nas Figuras 9 e 10, pode-se perceber que os pontos de controle foram espalhados sobre a totalidade das áreas de estudo, procurando não deixar espaços vazios. Assim, o resultado obtido com a análise numérica e do erro médio quadrático abrange toda a área de estudo.

### 3.4 PROCESSO DA PESQUISA

No Fluxograma 2, está sintetizada a seqüência de geração do MDT, utilizando o *GeoTerrain*.

FLUXOGRAMA 2 – SEQÜÊNCIA DE GERAÇÃO DO MDT



#### 3.4.1 Extração dos Dados Amostrais

O processo de extração dos dados amostrais é a primeira etapa para a geração do MDT. Neste processo é gerado um arquivo de dados, com as coordenadas X, Y e Z dos vértices das feições extraídas. No *GeoTerrain*, o processo de extração das feições

de um mapa digital é constituído de 6 etapas:

a) Ajuste do espaçamento dos vértices

Definem-se dois valores de tolerância que determinam o espaçamento de inserção de vértices interpolados (não existentes no mapa digital), no conjunto de dados amostrais. Os vértices são inseridos quando as rotinas (*curve stroke tolerance* e *minimum linear distance*) estão ativadas e quando a distância entre os vértices do mapa digital é maior que a tolerância:

- *curve stroke tolerance* – adiciona vértices ao longo de curvas;
- *minimum linear distance* – adiciona vértices ao longo dos elementos lineares.

Para utilização destas duas rotinas, necessita-se de um mapa digital 3D. Como o objetivo principal do presente trabalho é a redução do volume de dados e, estas rotinas inserem vértices interpolados que não existem no mapa digital, optou-se por não ativar estas rotinas. Também verificou-se na análise gráfica (seção 4.2) que a curva de nível interpolada a partir do MDT não apresentou nenhum deslocamento em relação a mesma curva de nível do mapa digital, quando esta foi utilizada para gerar o conjunto de dados amostrais, ou seja, as curvas de nível do mapa digital possuem um número suficiente de vértices, não sendo necessária a inserção de mais vértices.

b) Denominação e definição do formato do arquivo de dados

Nomeia-se e indica-se o formato do arquivo que armazenará os dados amostrais. Este arquivo pode estar no formato binário ou ASCII (*American Standard Code Information Interchange*). O formato binário ocupa um espaço computacional menor, porém não pode ser visualizado com um editor de texto, enquanto o formato ASCII ocupa um espaço computacional maior, mas pode ser visualizado com um editor de texto. Foi adotado o formato ASCII, porque, no decorrer do trabalho, foi necessária a consulta do arquivo gerado pela extração dos pontos de controle.



c) Determinação do modo de armazenamento dos dados

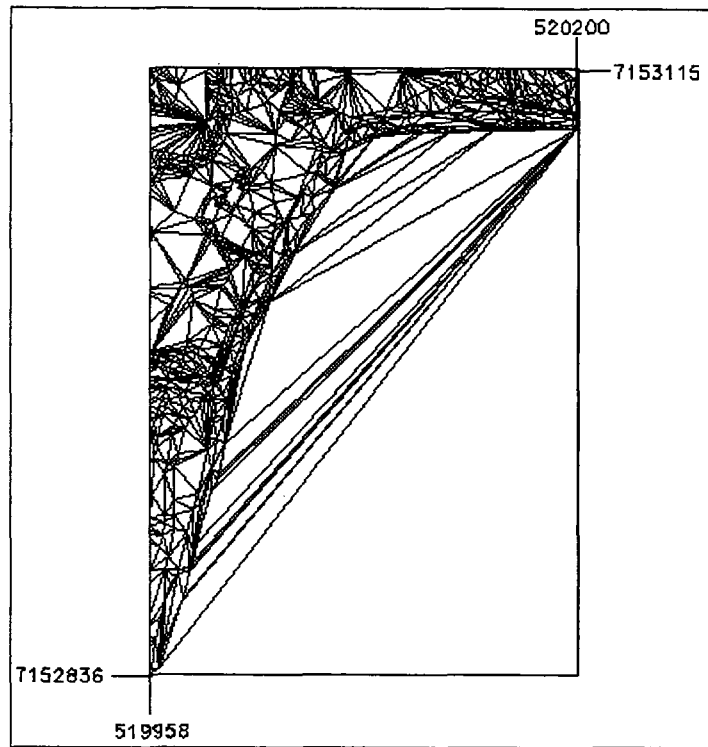
Esta etapa permite que as feições extraídas do mapa digital sejam inseridas em um arquivo já existente ou será gerado um novo arquivo de dados. Para a extração da primeira feição, gera-se um arquivo. As demais feições serão inseridas no mesmo arquivo.

d) identificação dos dados

Classificam-se as feições extraídas, segundo os tipos de dados admitidos pelo *GeoTerrain*. Os tipos de dados são identificados com os números de 1 a 8, e são os seguintes:

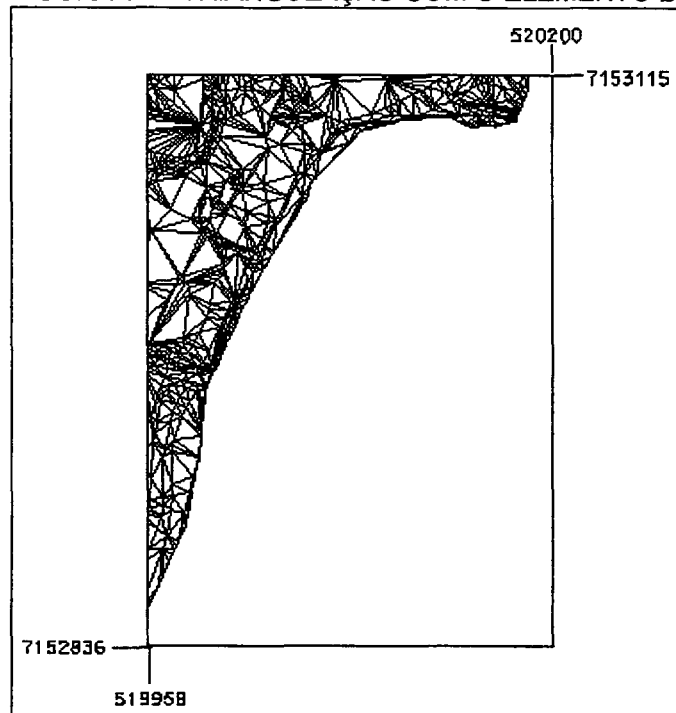
- *Spot* – elemento pontual. Constituído por pontos altimétricos isolados, identificado pelo número 1;
- *Break line* – elemento linear. Representa as feições topográficas estruturais lineares, tais como: canais de drenagem; sistema viário e linhas características. A feição identificada como *break line* não permite que a triangulação se sobreponha a ela. A triangulação é interrompida e reiniciada após esta feição. A *break line* tem o primeiro vértice identificado pelo número 2 e a seqüência de vértices identificados pelo número 3;
- *Boundary* – elemento linear fechado. Representa o limite da área trabalhada, sendo que seus vértices possuem informação altimétrica. Quando o MDT contém o limite da área trabalhada, a triangulação não excede este limite. Este elemento é identificado pelo número 4. Na Figura 11, mostra-se uma triangulação gerada sem a inserção do elemento *boundary*. Verifica-se, a existência de triângulos (indicados pela seta azul) fora do limite da área trabalhada. Estes triângulos não podem ser representados, porque estão sobre uma área que não possui informação altimétrica.

FIGURA 11 – TRIANGULAÇÃO SEM O ELEMENTO *BOUNDARY*



Na Figura 12, mostra-se a mesma triangulação quando se introduz este elemento.

FIGURA 12 – TRIANGULAÇÃO COM O ELEMENTO *BOUNDARY*



- *Contour* – elemento linear. Constituído por curvas de nível do mapa digital. O primeiro vértice é identificado pelo número 5 e a seqüência de vértices identificados pelo número 6;
- *Void* – elemento de área fechada. Possui informação altimétrica em seu contorno. Tal elemento não permite que se gere triangulação em seu interior. O elemento *void* é usado para caracterizar regiões de alagados, lagos e edificações, pois tais feições possuem o mesmo valor altimétrico em seu interior. O primeiro vértice do *void* é identificado pelo número 7 e a seqüência de vértices identificados pelo número 8.

e) Seleção do critério de extração

Seleciona-se o critério de identificação dos cinco elementos citados na etapa anterior, que podem ser:

- nível - informa-se o número do nível (dentre os 63 níveis disponíveis no *MicroStation*). Todas as feições existentes, no nível indicado, são identificadas como pertencentes ao mesmo tipo de elemento;
- cor - informa-se a cor utilizada na representação gráfica do elemento. É realizada uma busca em todos os níveis do *MicroStation* e todos os elementos que estão com a cor indicada são selecionados;
- tipo de linha - define-se o tipo de linha utilizado na representação gráfica do elemento. É realizada uma busca em todos os níveis do *MicroStation* e todos os elementos que estão representados com o tipo de linha definido são selecionados;
- espessura – define-se a espessura da linha utilizada na representação gráfica do elemento. É realizada uma busca em todos os níveis do *MicroStation* e todos os elementos que estão representados com a espessura indicada são selecionados.

Como estratégia de trabalho, optou-se por identificar as feições por meio dos níveis que elas ocupam. Esta estratégia foi adotada pelo fato de feições distintas já estarem distribuídas em níveis diferentes.

f) Seleção do modo de extração

Nesta etapa é definido se os dados serão extraídos ou interpolados. No modo extração, o arquivo de dados é constituído pelos vértices das feições existentes no mapa digital, visualizado no *MicroStation*. O modo interpolação é utilizado quando o mapa digital é 2D. Selecionou-se o modo extração por ser o que se adapta ao mapa digital 3D.

No Apêndice 3 (p. 73), encontra-se uma parte de um arquivo que armazena os dados, ou seja, o arquivo gerado no processo de extração.

Para a extração dos dados amostrais, as feições foram identificadas segundo o critério apresentado a seguir:

- curvas de nível - foram identificadas como elemento *contour*;
- pontos altimétricos - identificados como elemento *spot*;
- divisores d'água - identificados como elemento *break line*;
- linhas características - identificadas como elemento *break line*;
- canais de drenagem - identificados como elemento *break line*. Os canais de drenagem identificados como *break line* são rios perenes com margem simples e vala de drenagem;
- limite da área de trabalho - identificado como elemento *boundary*;
- sistema viário - identificado como *break line*. O sistema viário inclui via pavimentada com meio-fio, ferrovia, estrada pavimentada e não pavimentada;
- alagado, lagos, edificações e rios de margem dupla - identificados como elemento *void*.

Na Tabela 2, mostram-se as especificações dos cinco MDT gerados para cada área de estudo e as feições utilizadas em cada MDT estão com o símbolo ✓. Também

se apresenta o número correspondente ao nível do *MicroStation* (nível) e o número de identificação de cada feição associada aos elementos do *GeoTerrain* (elemento).

TABELA 2 – FEIÇÕES UTILIZADAS NA GERAÇÃO DOS MDT

	cm		ci	pi	cd			sv			ed			di	li	
	5	10			md	lg	ms	v	f	r	r	c	i			p
Nível	3	5	6	4	19	47	54	15	41	52	16	38	39	40	9	63
Elemento	5	5	5		7	7	2	2	2	2	7	7	7	7	2	
	6	6	6	1	8	8	3	3	3	3	8	8	8	8	3	4
PILOTO	rest	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓							✓	✓
	res1	✓	✓	✓	✓											✓
	res5	✓	✓		✓	✓	✓	✓							✓	✓
	res10		✓		✓	✓	✓	✓							✓	✓
	resdiv				✓	✓	✓	✓							✓	✓
FOLHA	rest	✓	✓	✓	✓		✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
	res1	✓	✓	✓	✓											✓
	res5	✓	✓		✓	✓		✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
	res10		✓		✓	✓		✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
	resdiv				✓	✓		✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓

Legenda:

cm - curvas de nível mestras

ci - curvas de nível intermediárias

pi - pontos altimétricos

cd - canais de drenagem

md - rios de margem dupla

lg - lagos e alagados

ms - rio margem simples

sv - sistema viário (via, rodovia, caminho, ferrovia)

ed - edificações (residencial, comercial, industrial, pública)

di - divisores d'água

li - limite da área trabalhada

Elementos: 1 - spot;  
2 e 3 - break line;  
4 - boundary;  
5 e 6 - contours;  
7 e 8 - voids.

As curvas de nível mestras (cm) estão representadas em duas colunas distintas por também estarem em níveis distintos, sendo a equidistância vertical entre as mesmas de dez em dez metros. Na primeira coluna (5), estão as curvas de nível mestras com valores dentro do intervalo de 865,000 a 895,000 m (para a área-piloto) e de 855,000 a 905,000 m (para a folha), incluindo estes valores. Na segunda coluna (10), estão as curvas de nível mestras com valores dentro do intervalo de 860,000 a 900,000 m (as duas áreas de estudo possuem o mesmo intervalo), incluindo estes valores.

As feições canais de drenagem (cd) estão divididas em três grupos: rios de margem dupla (md); alagados e lagos (lg) e rios de margem simples (ms).

Observando a Tabela 2, percebe-se que inicialmente foi gerado um MDT, denominado “*res*”, com todas as feições altimétricas existentes no mapa digital e que influenciam na geomorfologia do terreno. O segundo MDT, “*res1*”, foi gerado a partir de curvas de nível e pontos altimétricos. Este MDT possui inconsistências altimétricas (triângulos horizontais e arestas de triângulos interceptando feições estruturais). Deste modo, não é objetivo desta pesquisa avaliar sua redução de volume de dados ou qualidade de representação da superfície. O terceiro e quarto MDT, “*res5*” e “*res10*”, possuem as mesmas feições do “*res*”, porém, no primeiro, as curvas de nível utilizadas em sua geração possuem uma equidistância vertical de cinco metros, e no segundo, de dez metros.

O quinto e último MDT, “*resdiv*”, foi gerado para confrontar os extremos opostos, ou seja, o MDT “*res*”, que possui toda informação altimétrica disponível e este MDT, “*resdiv*”, que foi gerado sem a utilização de curvas de nível, que são as feições altimétricas básicas em todos os projetos que possuem informação altimétrica.

#### 3.4.2 Edição do Conjunto de Dados

Concluído o processo de extração, realiza-se a edição do conjunto de dados. O objetivo da edição é a correção de possíveis erros no arquivo de dados e também a eliminação de vértices desnecessários. O *GeoTerrain* possui as rotinas de edição descritas a seguir:

- a) *report duplicate points* - relatório de pontos duplicados;
- b) *edit duplicate points* - edição dos pontos duplicados;
- c) *report crossing features* - relatório de feições cruzadas;
- d) *edit breaks* - edição das linhas de quebra;
- e) *join linear features* - junção das feições lineares;
- f) *filter linear features* - filtragem das feições lineares.

a) - Relatório de pontos duplicados

Esta rotina de edição, quando acionada, cria um relatório no formato ASCII, que contém as coordenadas X, Y e Z dos pontos duplicados. Existem duas possibilidades:

- pontos coincidentes - as coordenadas X, Y e Z são coincidentes. No relatório são mostrados os pontos coincidentes, ou seja, duplicados;
- erro no arquivo de dados – são mostradas as coordenadas X e Y coincidentes e associados seus diferentes valores de Z. As coordenadas são mostradas com uma mensagem de erro, necessitando de uma correção posterior.

Esta rotina não permite nenhuma edição no arquivo de dados.

Na Tabela 3, mostra-se o resultado obtido com a rotina *report duplicate points*. Na coluna denominada *nº total de pontos*, mostra-se o número de vértices do arquivo de dados (extraídos do mapa digital). Na coluna *nº pontos duplicados*, mostra-se a quantidade de vértices que estão duplicados no arquivo de dados. E na coluna *nº erros detectados*, mostra-se o número de vértices do arquivo de dados que tem as coordenadas X e Y coincidentes e a coordenada Z diferente.

TABELA 3 – RELATÓRIO DE PONTOS DUPLICADOS

MDT		nº total de pontos	nº pontos duplicados	nº erros detectados
ÁREA PILOTO	<i>rest</i>	7393	158	*2
	<i>res1</i>	5834	134	0
	<i>res5</i>	3160	71	*2
	<i>res10</i>	2632	55	*2
	<i>resdiv</i>	1897	25	*2
FOLHA	<i>rest</i>	32616	1746	0
	<i>res1</i>	27157	1293	0
	<i>res5</i>	12287	796	0
	<i>res10</i>	8897	858	0
	<i>resdiv</i>	6220	435	0

\*O erro detectado no arquivo de dados estava localizado sobre a margem de um lago.

#### b) - Edição de pontos duplicados

Rotina que permite a correção da coordenada Z dos vértices listados no relatório de pontos duplicados com mensagem de erro, ou seja, com a coordenada Z diferente. Existem três opções possíveis:

- *average* – assume a média entre as altitudes (coordenada Z) para os dois vértices;
- *set* – adota o valor determinado pelo usuário para os dois vértices;
- *skip* – não faz nenhuma alteração.

O processo de edição dos pontos duplicados foi necessário para os arquivos de dados dos MDT “*resf*”, “*res5*”, “*res10*” e “*resdiv*” da área-piloto. Nestes arquivos o erro encontrado foi entre um vértice do limite da área de trabalho e um vértice do alagado. Como os dois vértices estão próximos a curva de nível com valor altimétrico 860,000m, na correção, adotou-se o valor altimétrico 859.990 para os dois vértices. Para informar o valor altimétrico, utilizou-se a opção *set*.

#### c) - Relatório de cruzamento de feições

Pode-se criar um relatório informando todos os pontos de cruzamento entre curvas de nível ou linhas de quebra. São calculadas as coordenadas X, Y e Z do ponto de interseção, mesmo que não exista nenhum vértice na interseção. Permite detectar possíveis erros na produção do mapa digital, como, por exemplo, quando existem duas curvas de nível se interceptando.

Esta rotina não permite edição no arquivo de dados. As correções são realizadas utilizando-se a rotina edição de linha de quebra (*edit break line*), descrita na próxima seção.

Foram gerados relatórios informando cruzamento de feições para todos os arquivos de dados. Na seqüência de trabalho, buscou-se detectar cruzamento entre curvas de nível, o que constitui um erro no mapa digital. No entanto, não foi encontrado cruzamento entre curvas de nível no mapa digital.



#### d) - Edição das linhas de quebra

Localiza o ponto de interseção entre as linhas de quebra ou curvas de nível, mostrando sua localização diretamente no mapa digital. Também mostra na tela, por meio de um quadro, as coordenadas X, Y e Z dos vértices adjacentes ao ponto de interseção, nas duas feições lineares em questão. As coordenadas X e Y do ponto de interseção são calculadas. A coordenada Z (altitude) é definida pelo usuário, como explicado a seguir.

Inicialmente, define-se um valor de tolerância. Se a diferença entre as coordenadas Z das duas feições, no ponto de interseção, for menor que a tolerância, nenhuma correção é feita. Para diferenças maiores que a tolerância, as opções são:

- *average* – adota o valor médio da coordenada Z das duas feições que se interceptam e insere um vértice no ponto de interseção;
- *remove break line* – remove a feição que for selecionada;
- *conform* – adota o valor da coordenada Z da feição escolhida e insere um vértice com o valor da mesma;
- *define elevation* – utiliza o valor determinado pelo usuário para a coordenada Z do vértice inserido no ponto de interseção;
- *skip* – nenhuma correção é realizada.

A correção é feita individualmente para cada vértice do ponto de interseção. A quantidade de vértices inseridos depende do tamanho da área trabalhada. Nos testes realizados, a quantidade de pontos de interseção foi de 3 a 10% do número total de vértices do MDT. Ao realizar a edição utilizando-se esta rotina, ocorreram duplicações de pontos. Por este motivo, optou-se por não utilizá-la.

#### e) - Junção dos elementos lineares

Com esta rotina processa-se a união de feições lineares, curvas de nível e linhas de quebra, quando estas são formadas por segmentos contendo diversos vértices. Durante o processo, o início e o fim de um elemento são alterados, unindo o

segmento com o segmento adjacente, de modo a formar uma seqüência de vértices e somente um segmento.

Inicialmente, determina-se um valor de tolerância, sendo que o segmento só é unido quando a distância calculada entre o último vértice e o primeiro, de dois segmentos adjacentes, está dentro da tolerância definida. Após o valor de tolerância ser definido, o processo é executado automaticamente. Adotou-se uma tolerância de 0,1 m, por ser a que apresentou o melhor resultado nos testes detalhados no Apêndice 4 (p.76).

O processo de junção de feições lineares foi executado no arquivo de dados de todos os MDT gerados. Na Tabela 4, mostra-se a redução de segmentos obtida para os cinco MDT de cada área de estudo. Na coluna *break line*, apresenta-se a redução para o elemento *break line*, e, na coluna *contour*, apresenta-se a redução para o elemento *contour*.

TABELA 4 – RESULTADO DO PROCESSO DE JUNÇÃO

MDT		<i>BREAK LINE</i> REDUÇÃO %	<i>CONTOUR</i> REDUÇÃO %
ÁREA PILOTO	<i>rest</i>	17	65
	<i>res1</i>	–	65
	<i>res5</i>	17	75
	<i>res10</i>	17	75
	<i>resdiv</i>	17	–
FOLHA	<i>rest</i>	27	83
	<i>res1</i>	–	83
	<i>res5</i>	27	87
	<i>res10</i>	27	85
	<i>resdiv</i>	27	–

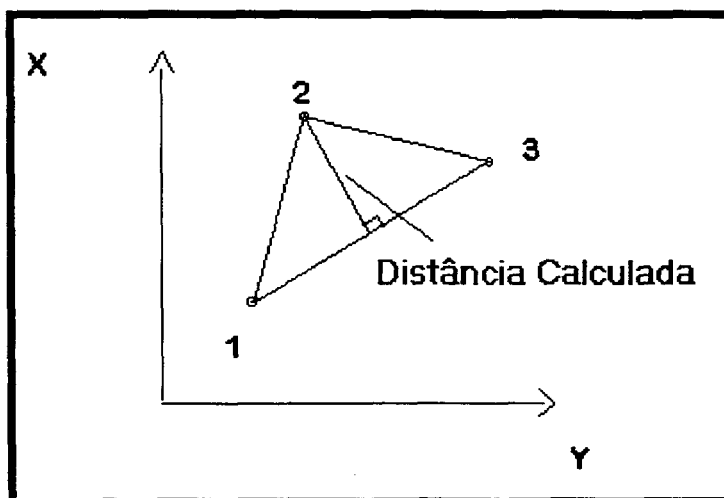
A redução de segmentos das *break lines* foi de 17% para a área-piloto e 27% para a folha. Para as curvas de nível, a redução de segmentos foi de 65 a 75% na área-piloto e de 83 a 87% para a folha. Com as reduções obtidas com a utilização desta rotina, o tempo de processamento para a geração do MDT também se reduz, ou seja, as informações referentes as *break lines* e *contours*, quando pertencentes ao mesmo elemento, tornam-se seqüenciais.

f) - Filtragem dos elementos lineares

A filtragem permite a eliminação de vértices, das curvas de nível e linhas de quebra. Neste processo, é realizada uma comparação entre três vértices consecutivos. Somente os vértices cuja distância calculada seja menor que a tolerância predefinida são eliminados. Utilizou-se uma tolerância de 0,1 m para as coordenadas X, Y e de 0,1 m para a coordenada Z, porque apresentou melhor resultado nos testes realizados. Nos testes, utilizou-se tolerância de 0,1 m; 0,2 m; 0,3 m; 0,4 m; e 0,5 m. Os testes estão detalhados no Apêndice 5 (p. 79).

É traçada uma reta entre os vértices 1 e 3 e calculada a distância ortogonal entre esta reta e o vértice dois. Na Figura 13, mostra-se a distância calculada, que deve ser menor que a tolerância XY.

FIGURA 13 – DISTÂNCIA ORTOGONAL CALCULADA



FONTE: MANUAL DO GEOTERRAIN

Se a distância calculada for maior que a tolerância especificada, o vértice não é eliminado. Se for menor, são realizados outros dois testes:

1º - se o valor absoluto da diferença entre as altitudes dos vértices 1 e 2 for maior que a tolerância Z ( $|Z_1 - Z_2| > \text{tolerância Z}$ ), o vértice não é eliminado. Se for menor, é realizado um segundo teste;

2º - se o valor absoluto da diferença entre as altitudes dos vértices 2 e 3 for maior que a tolerância Z ( $|Z_2 - Z_3| > \text{tolerância Z}$ ), o vértice não é eliminado. Se for menor, o vértice 2 é eliminado.

Este processo é executado sucessivamente até que tenham sido analisados todos os vértices das curvas de nível e linha de quebra. A filtragem permite a redução de informações altimétricas, bem como a eliminação de vértices duplicados.

O processo de filtragem reduziu o número de vértices do arquivo de dados segundo os resultados apresentados na Tabela 5.

TABELA 5 – RESULTADO DO PROCESSO DE FILTRAGEM

MDT		<i>BREAK LINES</i> REDUÇÃO %	<i>CONTOURS</i> REDUÇÃO %
ÁREA PILOTO	<i>rest</i>	19,78	7,60
	<i>res1</i>	–	7,60
	<i>res5</i>	19,78	9,35
	<i>res10</i>	19,78	10,18
	<i>resdiv</i>	19,78	–
FOLHA	<i>rest</i>	8,24	13,18
	<i>res1</i>	–	13,18
	<i>res5</i>	8,24	14,41
	<i>res10</i>	8,24	14,18
	<i>resdiv</i>	8,24	–

Observando-se a Tabela 5, verifica-se que a redução em volume de dados, ou seja, a eliminação de vértices desnecessários (por estarem muito próximos e com altitude semelhante) obtida no processo de filtragem é relevante. Para as *break lines*, a redução foi de 19% e 8% para a área-piloto e folha, respectivamente. Para as curvas de nível, a redução foi de 7 a 10% e de 13 a 14% para a área-piloto e folha, respectivamente.

### 3.4.3 Geração do Modelo *TIN*

Para geração do *TIN*, no *GeoTerrain*, utiliza-se a rotina *build triangles*. No processo de geração, necessita-se informar o nome do arquivo de dados que será usado e também o nome do arquivo *TIN* que será gerado. Foram ativadas duas opções:

- a) *minimize inserted break points* – assegura a construção da triangulação ao longo das linhas de quebra. As linhas de quebra não são segmentadas pelos triângulos;
- b) *clip external to boundary polygon* – elimina qualquer triângulo externo ao limite da área trabalhada durante o processo de construção da triangulação.

## 4 ANÁLISE DOS PRODUTOS DERIVADOS DOS MDT

A análise consiste em verificar se a geomorfologia do terreno foi mantida após a redução do volume de dados amostrais e também se a redução de volume de dados é significativa. Nesta pesquisa analisaram-se produtos derivados do MDT, tais como as curvas de nível interpoladas a partir do modelo *TIN* e o erro altimétrico apresentado nos pontos de controle.

### 4.1 RELATÓRIO ESTATÍSTICO DO *TIN*

Quando acionada, esta rotina, disponível no *GeoTerrain*, cria um relatório sobre o *TIN* selecionado, informando o número de vértices; o número de linhas; o número de triângulos; o número de *voids*; o modo de interpolação; e o valor máximo e mínimo das coordenadas X, Y e Z. Os resultados obtidos são apresentados na Tabela 6.

TABELA 6 – RELATÓRIO ESTATÍSTICO DOS MDT

MDT		nº pontos	dif. %	nº linhas	dif. %	nº triângulos	dif. %	kb	dif. %
ÁREA PILOTO	<i>rest</i>	6831	–	20054	–	13224	–	838	–
	<i>res1</i>	5294	- 23	15490	- 23	10197	- 23	617	-26
	<i>res5</i>	2790	- 59	8010	- 60	5221	- 60	432	-48
	<i>res10</i>	2314	- 66	6592	- 67	4279	- 68	374	-55
	<i>resdiv</i>	1633	- 76	4566	- 77	2934	- 78	290	-65
FOLHA	<i>rest</i>	28755	–	84673	–	55919	–	3.897	–
	<i>res1</i>	23019	- 20	67655	- 20	44637	- 20	3.146	-19
	<i>res5</i>	10702	- 63	31382	- 63	20681	- 63	1.592	-59
	<i>res10</i>	7902	- 72	23051	- 73	15150	- 73	1.204	-69
	<i>resdiv</i>	5689	- 80	16524	- 80	10836	- 81	896	-78

O tamanho dos arquivos dos mapas digitais, contendo somente as feições utilizadas para geração dos MDT, com extensão “*dxp*”, foi inserido na Tabela 6 para auxiliar a análise quanto à redução do volume de dados. As colunas da Tabela indicam:

- nº pontos* - número de vértices do MDT;
- nº linhas* - número de linhas que unem os vértices do MDT;
- nº triângulos* - número de triângulos do MDT;
- kb* - tamanho em kbytes;

e) *dif. %* - diferença em porcentagem (redução) entre o MDT “*resf*” e os demais MDT, para as duas áreas de estudo.

Adotou-se o MDT “*resf*” como parâmetro para os demais, por ser o MDT que utiliza todas as feições altimétricas utilizadas na realização do projeto.

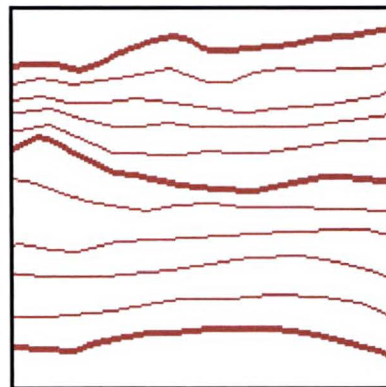
O MDT “*res1*” apresentou uma redução no volume de dados de, basicamente, 20% para as duas áreas de estudo. Mesmo com esta redução, este MDT ainda apresenta um grande volume de dados. Também é importante ressaltar que, apesar de possuir um grande volume de dados, este MDT apresenta inconsistências (triângulos horizontais e aresta de triângulo interceptando feições topográficas estruturais), que prejudicam a qualidade da informação altimétrica do mesmo.

O MDT “*res5*” apresentou uma redução média no volume de dados de 61% (para as duas áreas de estudo). O tamanho do arquivo “*dxr*” do “*res5*” é de 1,5 MB, enquanto que o do “*resf*” é de 3,8 MB, ambos para a área de estudo denominada folha (área de 1 km<sup>2</sup>). Esta diminuição de volume de dados foi obtida com a eliminação das curvas de nível intermediárias.

Para o MDT “*res10*”, a redução média de volume é de 69% e para o MDT “*resdiv*”, a redução média é de 78%. Comparando-se as reduções dos três últimos MDT (“*res5*”, “*res10*”, “*resdiv*”), pode-se afirmar que a redução obtida no “*res5*” é mais significativa que a obtida nos MDT “*res10*” e “*resdiv*”. Isto porque as curvas de nível, dentre as feições utilizadas neste estudo, são as que ocupam maior espaço computacional. Para cada intervalo altimétrico de dez metros, existem oito curvas de nível intermediárias e apenas três curvas de nível mestras. Como no “*res5*” utilizaram-se apenas curvas de nível mestras, eliminando-se todas as curvas de nível intermediárias, este obteve a redução mais significativa. Na seqüência, são apresentadas três Figuras que ilustram a eliminação das curvas de nível utilizadas para geração dos modelos. Na Figura 14, apresentam-se as curvas de nível mestras e intermediárias utilizadas na geração do MDT “*resf*”. Na Figura 15, mostram-se as curvas de nível mestras utilizadas na geração do MDT “*res5*”, neste modelo não foram utilizadas curvas de nível intermediárias, pode-se comprovar, observando as Figuras 14

e 15, que foram eliminadas 8 curvas de nível intermediárias na Figura 15. Na Figura 16, apresentam-se as curvas de nível mestras, com equidistância vertical de 10 metros, utilizadas na geração do MDT "res10". Comparando a Figura 15 e 16, percebe que apenas uma curva de nível mestra da Figura 15 foi eliminada na Figura 16 .

FIGURA 14 – C. N. "RES7"



Legenda das Fig. 14, 15 e 16:

- Curvas de Nível Mestras
- Curvas de Nível intermediárias

FIGURA 15 – C.N. "RES5"

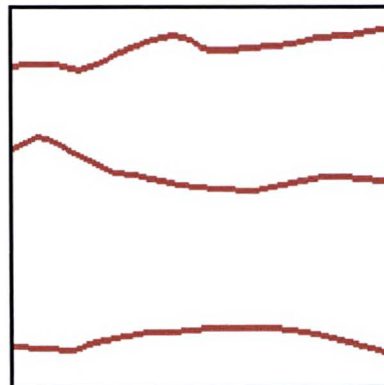
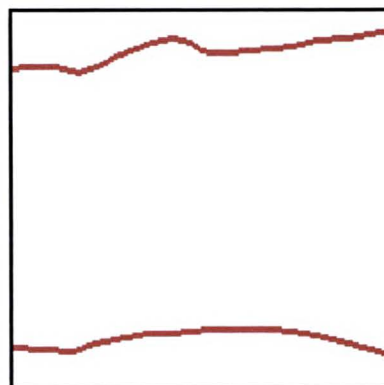


FIGURA 16 – C.N. "RES10"





A redução de volume obtida para os MDT é importante em termos de espaço computacional para armazenagem do MDT, tempo de processamento e custo para obtenção (levantamento de campo, restituição e outros) das feições utilizadas no processo de extração. Desta forma, com eliminação das curvas de nível intermediárias, alcançou-se o objetivo de reduzir o volume de dados e, com as demais análises, será possível concluir se foi mantida a geomorfologia do terreno.

## 4.2 ANÁLISE GRÁFICA

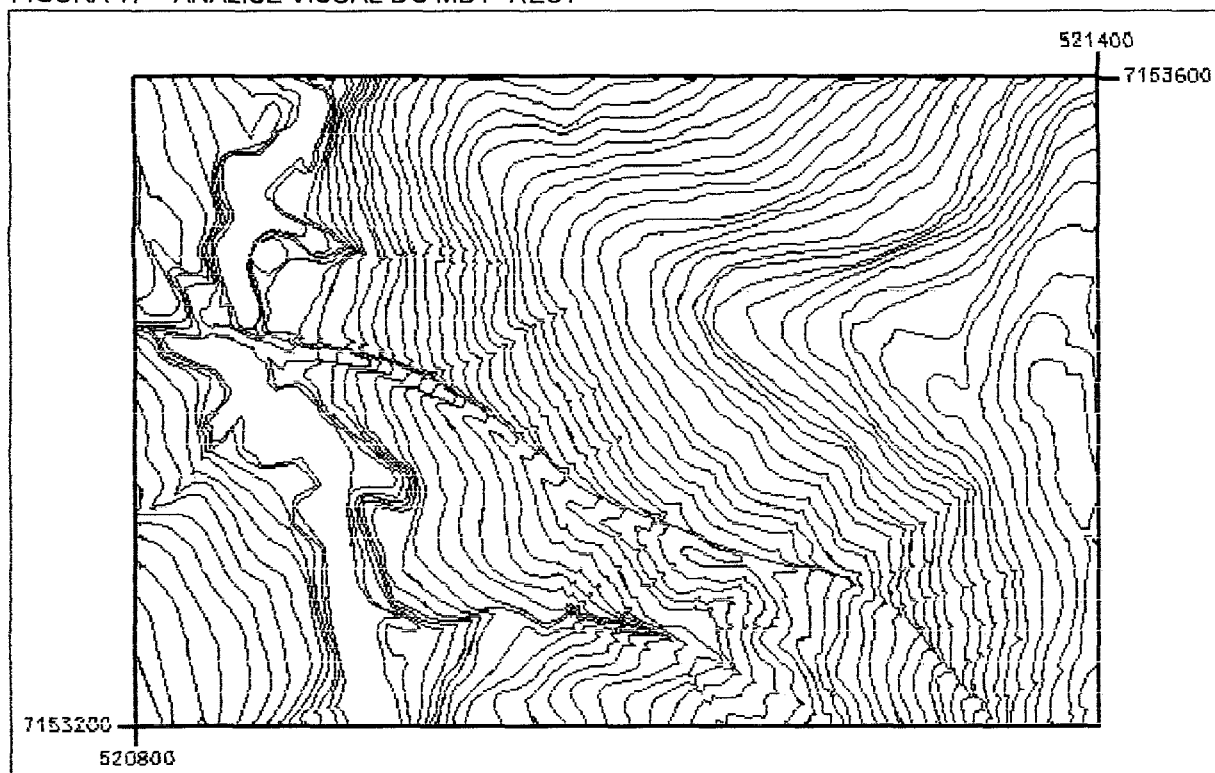
A análise gráfica consiste em comparar as curvas de nível do mapa digital e as curvas de nível interpoladas a partir dos MDT. Optou-se por realizar esta análise porque ela permite visualizar o comportamento global das curvas de nível interpoladas a partir dos modelos, permitindo uma análise qualitativa do contexto geomorfológico da representação. O *GeoTerrain* traça as curvas de nível a partir do *TIN* por meio de interpolação linear.

#### 4.2.1 Análise Gráfica da Área-Piloto

- MDT "rest"

Na Figura 17, mostram-se as curvas de nível geradas a partir do MDT "rest" sobrepostas às curvas de nível do mapa digital.

FIGURA 17 – ANÁLISE VISUAL DO MDT "REST"



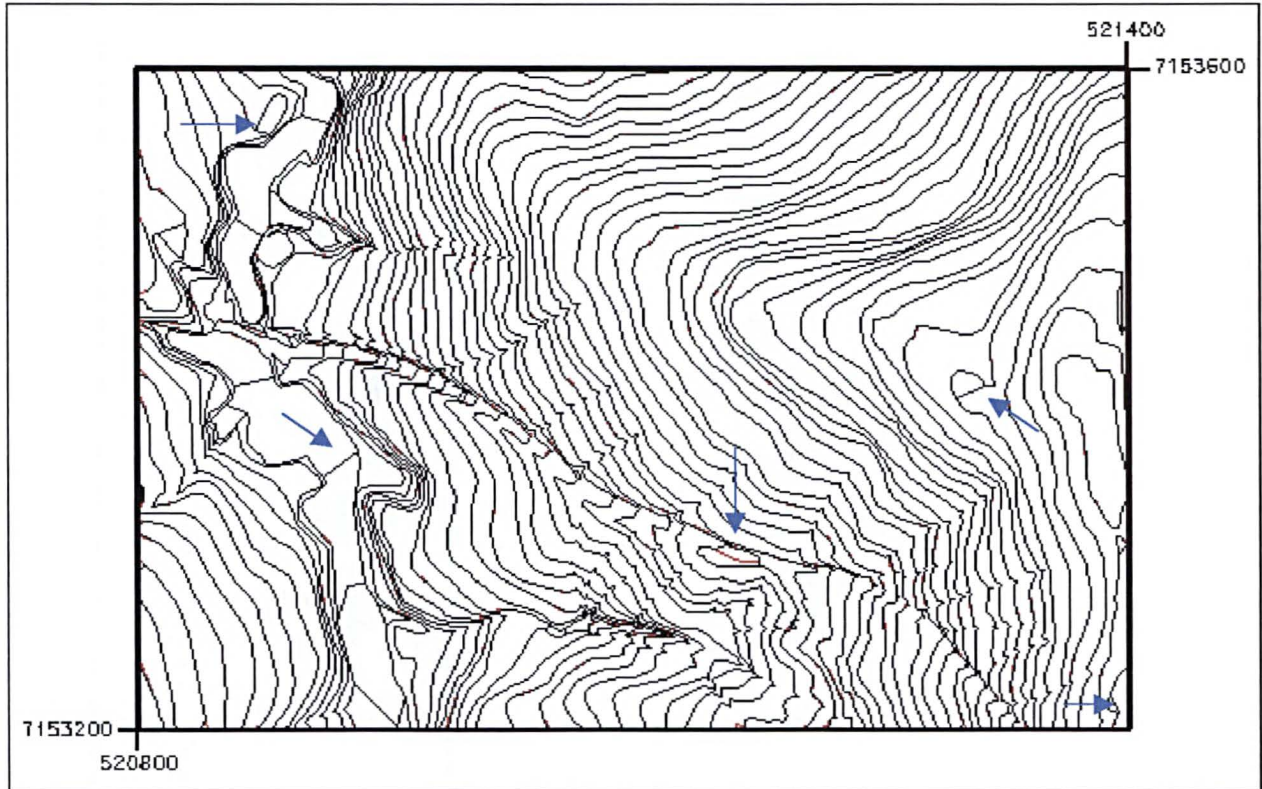
Legenda: — Curvas de nível interpoladas do MDT "rest"  
— Curvas de nível do mapa digital

Observando-se a Figura 17, percebe-se que não houve deslocamento das curvas de nível geradas a partir do MDT "rest", com relação ao mapa digital. O resultado encontrado na análise visual foi o esperado, já que todas as curvas de nível existentes no mapa digital foram utilizadas no processo de extração. Ou seja, o TIN possui como vértices, entre outros, os vértices de todas as curvas de nível do mapa digital.

- MDT “res1”

Na Figura 18, mostram-se as curvas de nível geradas a partir do MDT “res1” sobrepostas às curvas de nível do mapa digital.

FIGURA 18 – ANÁLISE VISUAL DO MDT “RES1”



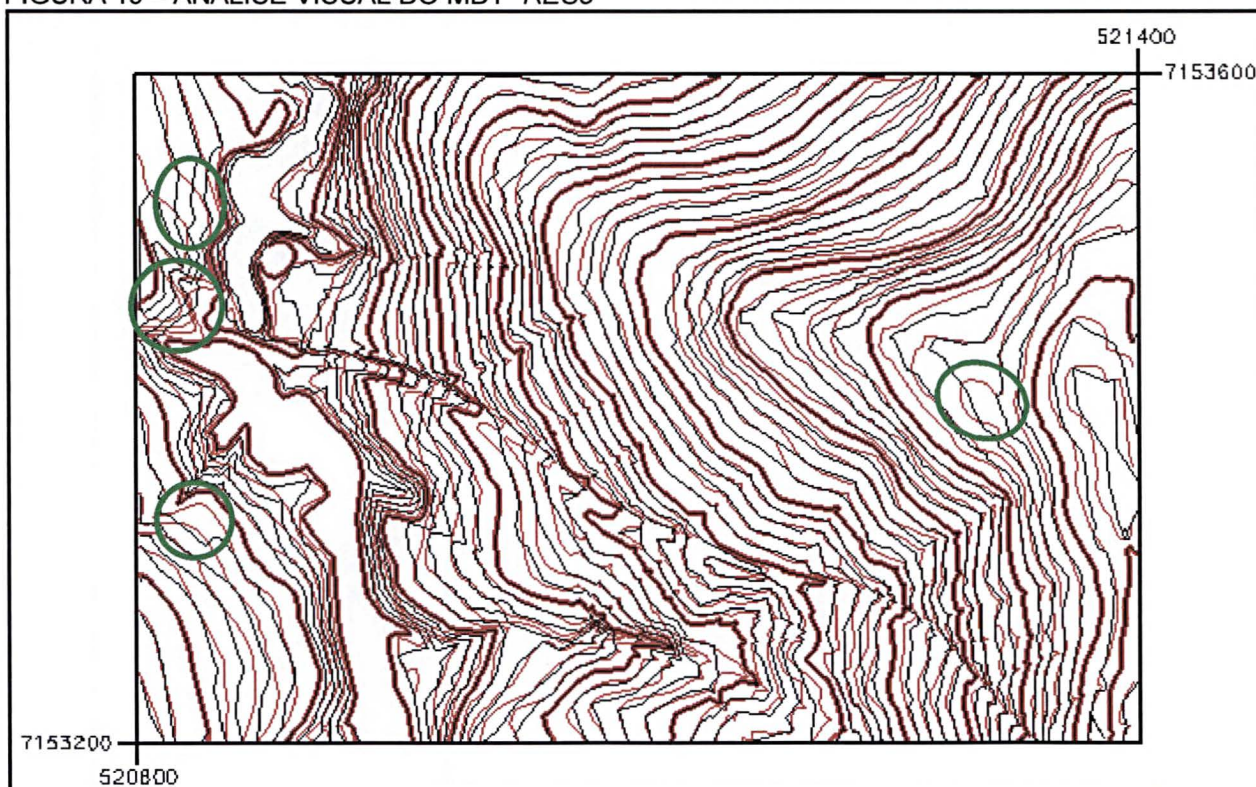
Legenda: — Curvas de nível interpoladas do MDT “res1”  
— Curvas de nível do mapa digital

Na Figura 18, as setas azuis indicam alguns erros encontrados nas curvas de nível interpoladas, causados por triângulos horizontais e arestas de triângulos interceptando feições topográficas estruturais (inconsistências). Também neste MDT não houve deslocamento das curvas de nível interpoladas em relação às curvas de nível do mapa digital. Este resultado também estava previsto pelo mesmo motivo já explicado para o MDT “res1”.

- MDT “res5”

Na Figura 19, mostram-se as curvas de nível geradas a partir do MDT “res5” sobrepostas às curvas de nível do mapa digital.

FIGURA 19 – ANÁLISE VISUAL DO MDT “RES5”



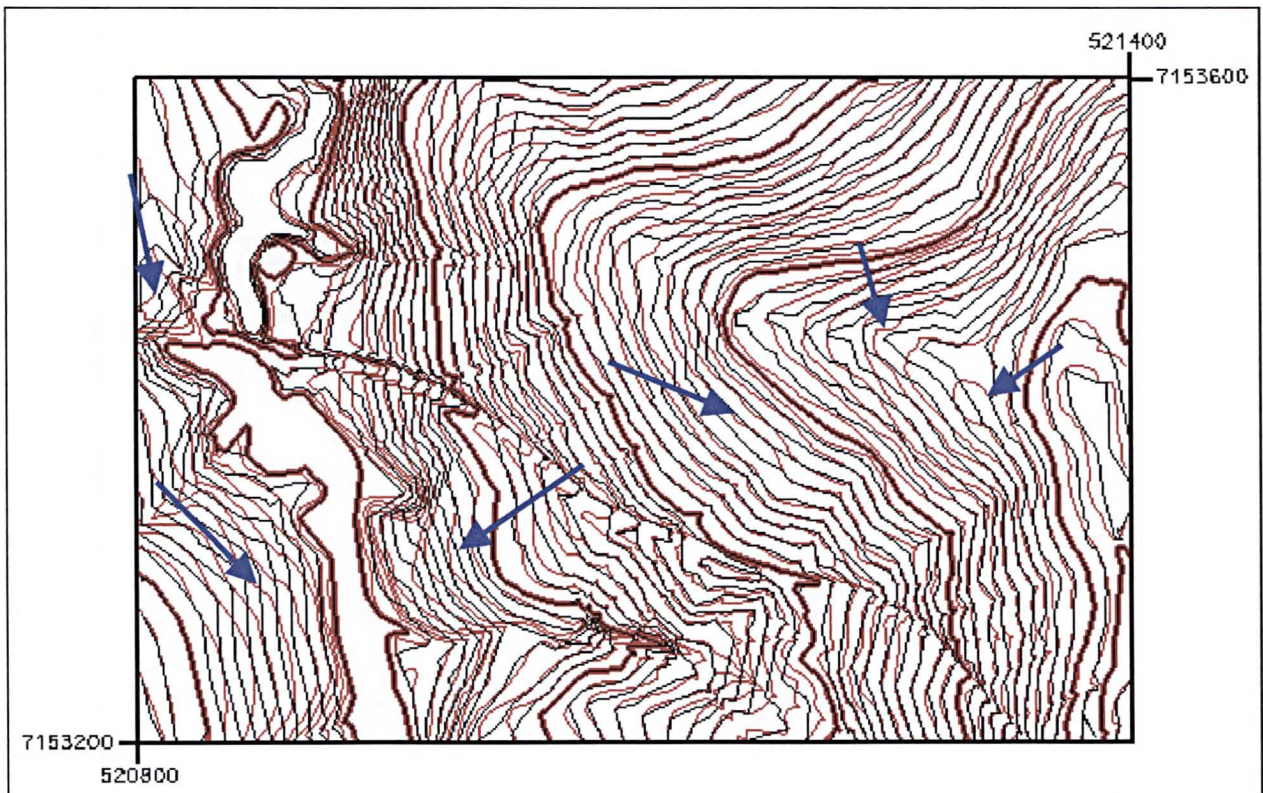
Legenda: — Curvas de nível interpoladas do MDT “res5”  
— Curvas de nível do mapa digital

Verifica-se, na Figura 19, que houve um pequeno deslocamento em algumas curvas de nível e um deslocamento maior em regiões onde o comportamento entre as curvas de nível, mestres e intermediárias, do mapa digital não é semelhante (regiões delimitadas por círculos verdes). As curvas de nível em vermelho, com linha mais espessa, são as que foram extraídas do mapa digital para gerar o MDT “res5”. Pode-se afirmar que na análise gráfica as curvas de nível geradas a partir do MDT “res5” mantiveram a geomorfologia do terreno.

### MDT "res10"

Na Figura 20, mostram-se as curvas de nível geradas a partir do MDT "res10" sobrepostas às curvas de nível do mapa digital.

FIGURA 20 – ANÁLISE VISUAL DO MDT "RES10"



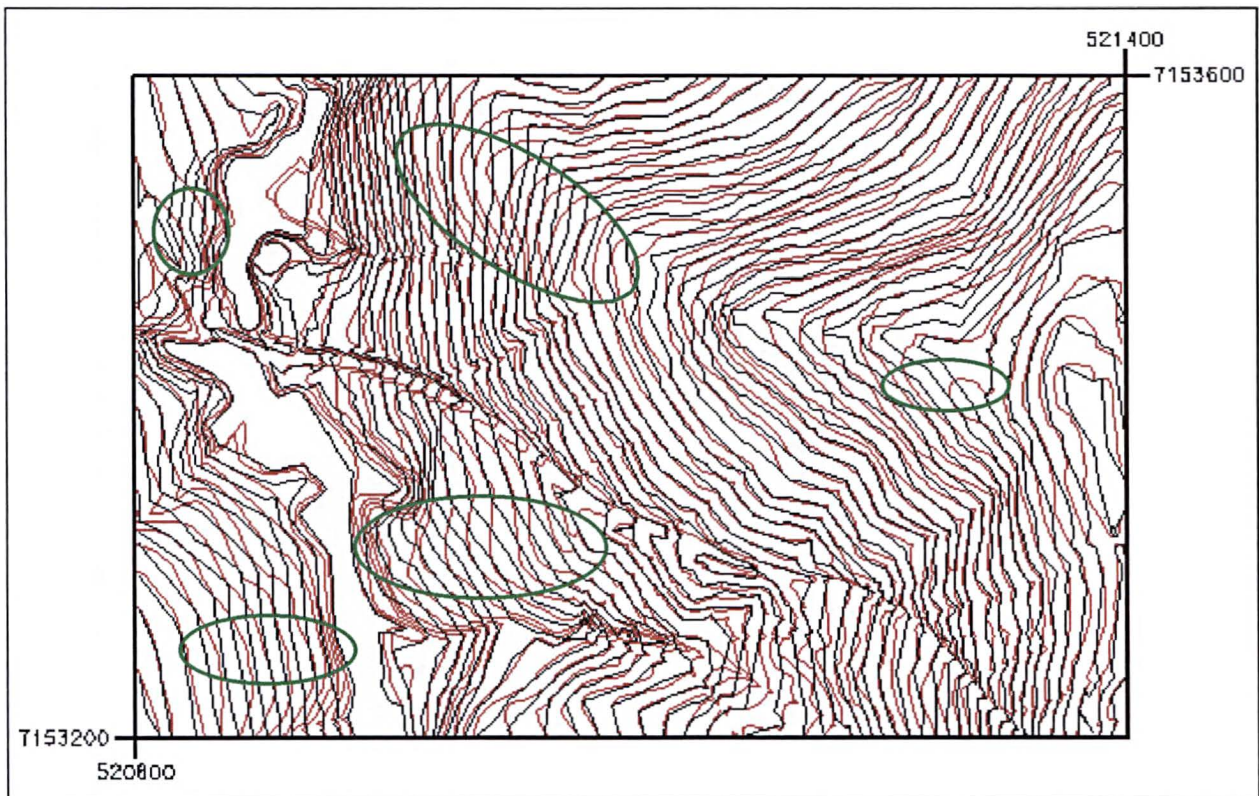
Legenda: — Curvas de nível interpoladas do MDT "res10"  
— Curvas de nível do mapa digital

Observando-se a Figura 20, conclui-se que as curvas de nível interpoladas apresentaram um deslocamento maior que o apresentado no MDT "res5". As curvas de nível em vermelho, com linha mais espessa, são as que foram extraídas do mapa digital para gerar o MDT "res10".

- MDT “resdiv”

Na Figura 21, mostram-se as curvas de nível geradas a partir do MDT “resdiv” sobrepostas as curvas de nível do mapa digital.

FIGURA 21 – ANÁLISE VISUAL DO MDT “RESDIV”



Legenda: — Curvas de nível interpoladas do MDT “resdiv”  
— Curvas de nível do mapa digital

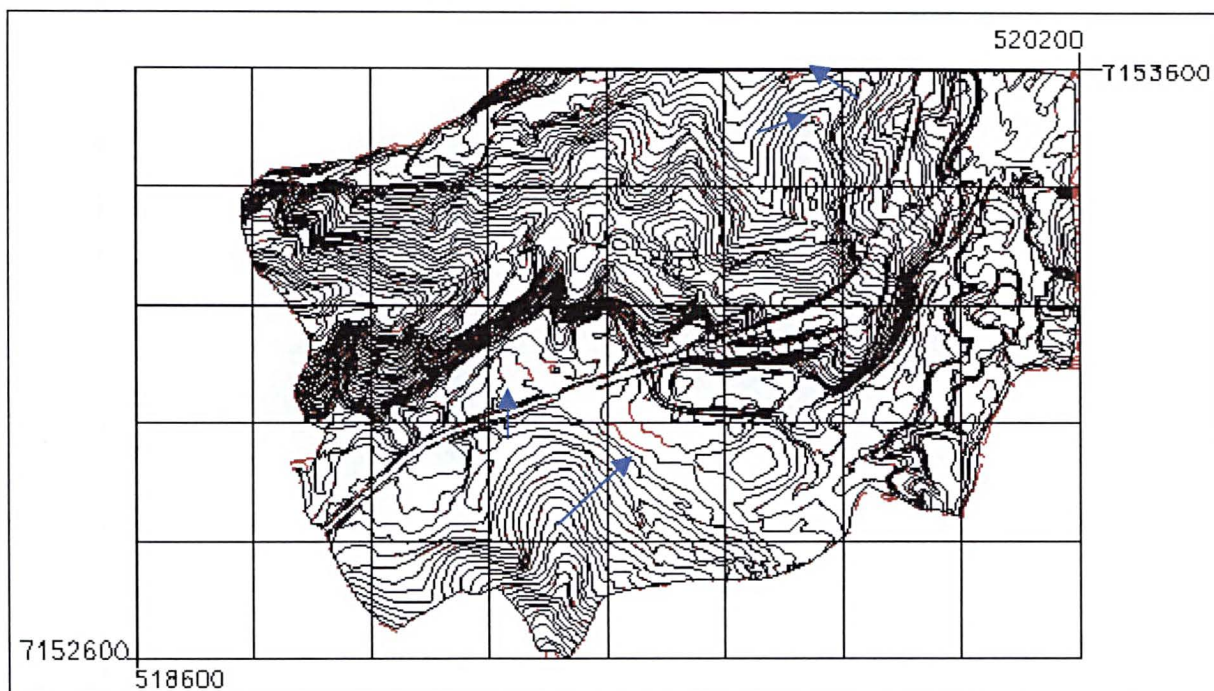
Verifica-se, na Figura 21, que houve deslocamento das curvas de nível geradas a partir do “resdiv” em relação às curvas de nível do mapa digital. Em algumas regiões, as curvas de nível mantiveram a geomorfologia do terreno. Porém, em outras regiões, o deslocamento das curvas de nível interpoladas ocasionou alterações na representação do terreno (áreas demarcadas em verde). Com a análise gráfica deste MDT, descarta-se a possibilidade de sua utilização.

#### 4.2.2 Análise Gráfica da Folha

- MDT “rest”

Na Figura 22, mostram-se as curvas de nível interpoladas a partir do MDT “rest” sobrepostas às curva de nível do mapa digital.

FIGURA 22 – ANÁLISE VISUAL DO MDT “REST” DA FOLHA



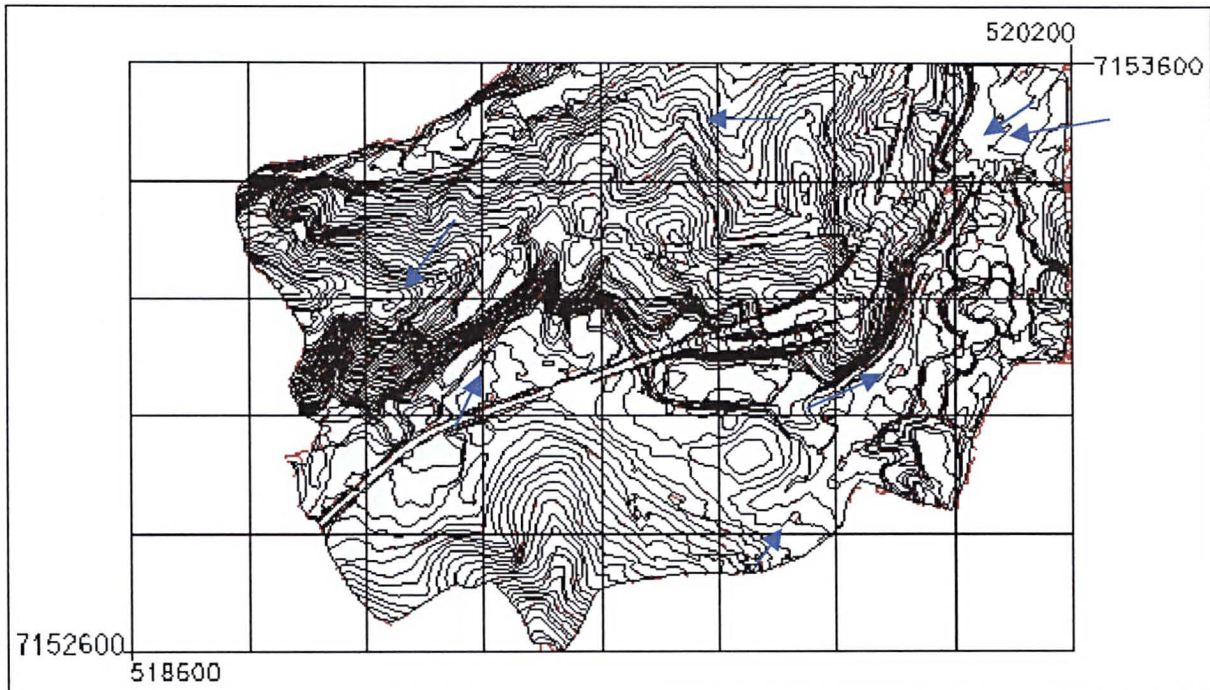
Legenda: — Curvas de nível interpoladas do MDT “rest”  
— Curvas de nível do mapa digital

Observa-se, na Figura 22, que as curvas de nível interpoladas a partir deste MDT não apresentaram deslocamento em relação às curvas de nível do mapa digital, porque foram utilizados todos os vértices de todas as curvas de nível existentes na “folha”. As setas azuis indicam as regiões onde se situam as feições identificadas como o elemento *void*. No interior destas feições, as curvas de nível não são interpoladas.

- MDT “res1”

Na Figura 23, mostram-se as curvas de nível interpoladas a partir do MDT “res1” sobrepostas às curva de nível do mapa digital.

FIGURA 23 – ANÁLISE VISUAL DO MDT “RES1” PARA A FOLHA



Legenda: — Curvas de nível interpoladas do MDT “res1”  
— Curvas de nível do mapa digital

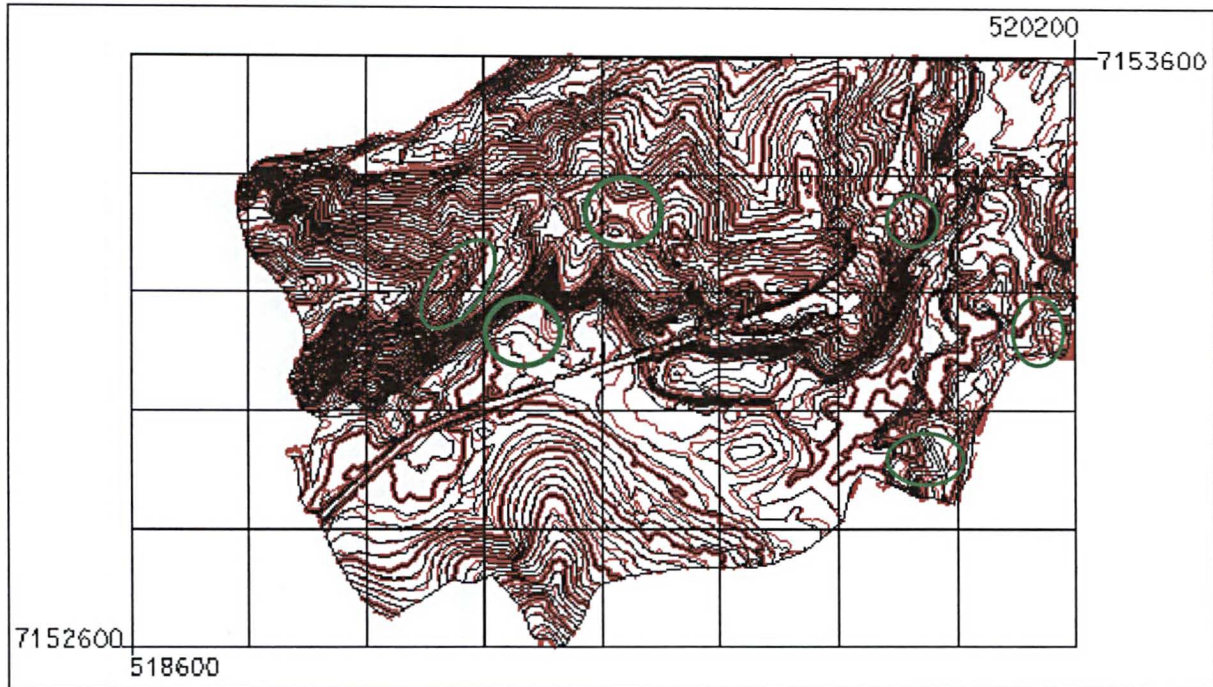
Percebe-se, na Figura 23, que as curvas de nível interpoladas a partir deste MDT não apresentaram deslocamento em relação às curvas de nível do mapa digital. Porém, este MDT apresenta inconsistências (triângulos horizontais e arestas de triângulos interceptando feições topográficas estruturais), motivadas pela inexistência de feições topográficas estruturais. As setas azuis indicam regiões em que as curvas de nível interpoladas apresentam um comportamento incorreto (gerando uma área fechada) causado pelas inconsistências.



- MDT “res5”

Na Figura 24, mostram-se as curvas de nível interpoladas a partir do MDT “res5” sobrepostas às curva de nível do mapa digital.

FIGURA 24 – ANÁLISE VISUAL DO MDT “RES5” PARA A FOLHA



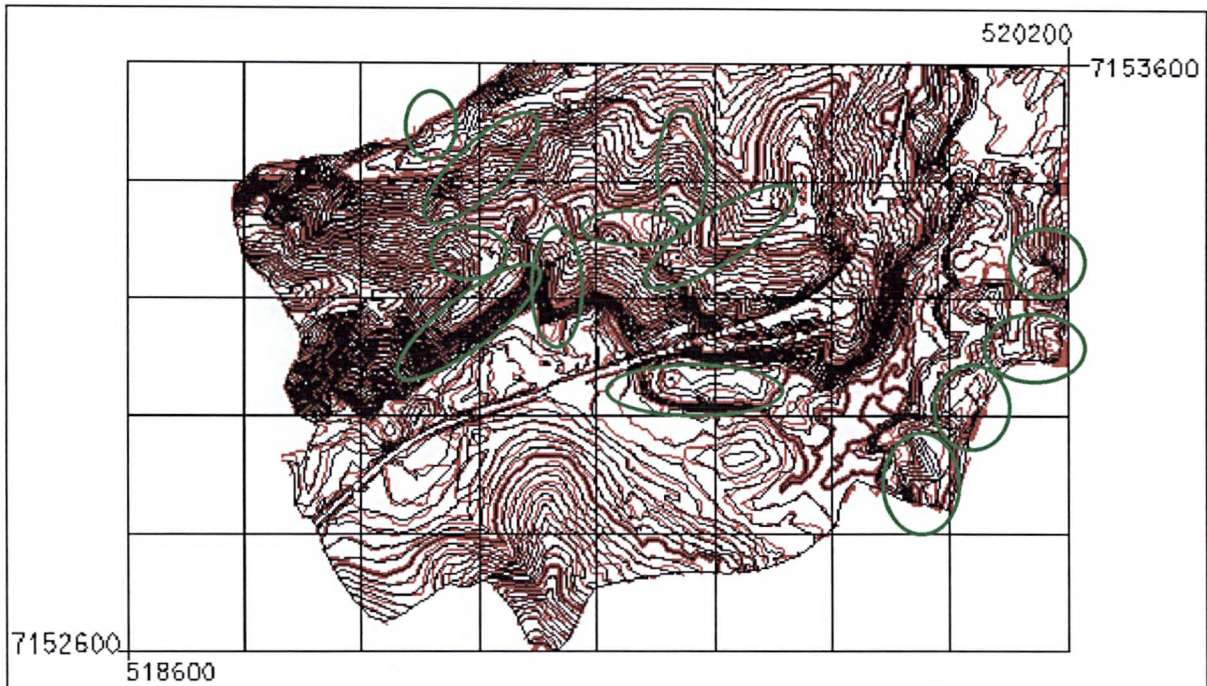
Legenda: — Curvas de nível interpoladas do MDT “res5”  
— Curvas de nível do mapa digital

Verifica-se, na Figura 24, que as curvas de nível interpoladas a partir deste MDT apresentaram um pequeno deslocamento em relação às curvas de nível do mapa digital. As regiões delimitadas por círculos verdes apresentaram maior deslocamento. Apesar destas regiões, pode-se afirmar que, no contexto global da área estudada, este MDT manteve a geomorfologia do terreno.

- MDT “res10”

Na Figura 25, mostram-se as curvas de nível interpoladas a partir do MDT “res10” sobrepostas às curva de nível do mapa digital.

FIGURA 25 – ANÁLISE VISUAL DO MDT “RES10” PARA A FOLHA



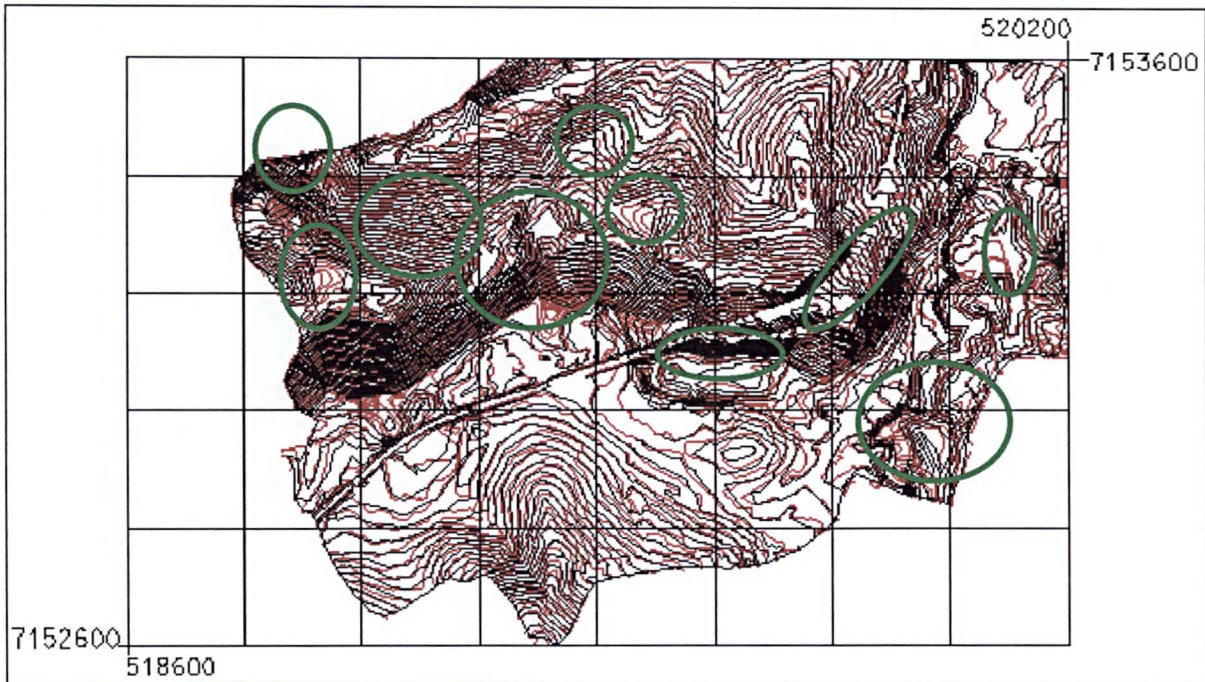
Legenda: — Curvas de nível interpoladas do MDT “res10”  
— Curvas de nível do mapa digital

Na Figura 25, observa-se que as curvas de nível interpoladas a partir deste MDT apresentaram um deslocamento maior em relação ao deslocamento apresentado nos MDT “res1”, “res5” e “res10”. O MDT “res10” apresentou alteração na geomorfologia do terreno em várias regiões (delimitadas por círculos verdes). Com isto, descarta-se sua utilização neste estudo.

- MDT "resdiv"

Na Figura 26, mostram-se as curvas de nível interpoladas a partir do MDT "resdiv" sobrepostas às curvas de nível do mapa digital.

FIGURA 26 – ANÁLISE VISUAL DO MDT "RESDIV" PARA A FOLHA



Legenda: — Curvas de nível interpoladas do MDT "resdiv"  
— Curvas de nível do mapa digital

Observa-se, na Figura 26, que as curvas de nível interpoladas a partir deste MDT apresentaram um grande deslocamento, basicamente na totalidade da área de estudo (folha). O MDT apresentou alteração na representação da geomorfologia. Algumas regiões, que apresentaram uma alteração maior na representação da geomorfologia, estão delimitadas por círculos verdes. Com esta análise, descarta-se a utilização do "resdiv" neste estudo.

Na análise gráfica dos MDT para as duas áreas de estudo, constatou-se a viabilidade de utilização dos MDT "rest" e "res5", que conseguiram manter a geomorfologia do terreno com melhor qualidade que os demais ("res10" e "resdiv").

Os dois primeiros MDT (“*res1*” e “*res2*”) não apresentaram deslocamento nas curvas de nível interpoladas. O MDT “*res5*” apresentou um pequeno deslocamento, que não alterou a representação da geomorfologia.

Como o MDT “*res1*” possui um grande volume de dados amostrais e a análise visual confirmou a existência de inconsistências, este MDT não será objeto de estudo das demais análises, podendo ser apresentado, porém não detalhado.

#### 4.3 ANÁLISE NUMÉRICA

Para realizar a análise numérica, necessitou-se de pontos de controle, que são pontos com a altitude conhecida. Estes pontos não podem ser utilizados na geração do MDT, para não influenciar a análise. Como o mapa digital usado não possui tais pontos, foi necessária a inserção manual.

Os pontos de controle foram inseridos sobre as curvas de nível intermediárias. Assim, para determinar o valor altimétrico do ponto de controle, adotou-se o valor da curva de nível na qual o ponto está localizado. Também optou-se por inserir os pontos de controle sobre as curvas de nível intermediárias, porque estas curvas de nível não foram utilizadas na geração dos MDT quando reduziu-se o volume de dados.

Para obter o deslocamento altimétrico apresentado pelos pontos de controle nos MDT gerados, foi utilizada a rotina *drape vértices*, do *GeoTerrain*. Esta rotina ajusta o valor altimétrico dos vértices de elementos do *MicroStation* para o valor altimétrico da superfície do *TIN*. Para utilizar esta rotina, é necessário:

- a) definir o *TIN* que será usado;
- b) definir o tipo de elemento (ponto, linha e outros);
- c) definir o nível que contém este elemento;
- d) selecionar o elemento individualmente ou utilizando a *fence* (rotina que delimita uma área). Precisa-se definir o modo de ajuste da *fence* para *inside* – onde todos os elementos internos são selecionados.

Estando os pontos de controle, com seu valor altimétrico ajustado à superfície do *TIN*, realizou-se a extração dos mesmos. Calculou-se o deslocamento altimétrico em relação ao mapa digital. Foram gerados gráficos mostrando o deslocamento altimétrico

dos pontos de controle para os MDT gerados. Como a legislação atual não possui nenhum decreto que estabeleça normas para classificação de MDT ou produtos derivados, no presente estudo utilizou-se o Decreto nº 89.817, de 20 de junho de 1984, o qual estabelece normas para classificar cartas, a saber:

“90% (noventa por cento) dos pontos isolados de altitude, obtidos por interpolação de curvas de nível, quando testados no terreno, não deverão apresentar erro superior ao Padrão de Exatidão Cartográfica (PEC) – Altimétrico: estabelecido”.

As cartas são classificadas nas Classes A, B e C, segundo os critérios:

- a) Classe A - PEC altimétrico é de 1/2 (metade) da equidistância entre as curvas de nível;
- b) Classe B - PEC altimétrico é de 3/5 (três quintos) da equidistância entre as curvas de nível;
- c) Classe C - PEC altimétrico é de 3/4 (três quartos) da equidistância entre as curvas de nível.

#### 4.3.1 Análise Numérica da Área-Piloto

Na Tabela 7, mostra-se o intervalo de deslocamento altimétrico para as três classes, estabelecidos no Decreto, e a porcentagem de pontos de controle dos MDT “res5”, “res10” e “resdiv” que pertencem a tais intervalos.

TABELA 7 – ANÁLISE NUMÉRICA DA ÁREA-PILOTO

CLASSE	INTERVALO	RES5	RES10	RESDIV
A	0 à ± 0,5 m	77%	62%	60%
B	0 à ± 0,6 m	84%	68%	64%
C	0 à ± 0,8 m	91 %	79 %	75 %

A equidistância vertical entre as curvas de nível do mapa digital 3D é de um metro. Por este motivo, foi utilizado a mesma equidistância vertical para classificar o MDT.

Segundo o apresentado na Tabela 07, o MDT “*res5*” da área-piloto pertence à classe C, porque 91% dos pontos de controle apresentaram um deslocamento altimétrico entre 0 e  $\pm 0,8$  m. Na Tabela 7, observa-se que 79% dos pontos de controle do MDT “*res10*” apresentaram um deslocamento altimétrico entre 0 e  $\pm 0,8$  m. O MDT não obteve classificação, porque a quantidade de pontos de controle com deslocamento altimétrico menor que  $\pm 0,8$  m não foi suficiente, ou seja, não atingiu 90%, como estabelecido no Decreto. Também na Tabela 7, verifica-se que 75% dos pontos de controle do MDT “*resdiv*” apresentaram um deslocamento altimétrico entre 0 e  $\pm 0,8$  m, não atingindo classificação segundo o estabelecido no Decreto.

Com a análise numérica do MDT “*res5*”, constatou-se que 3% dos pontos de controle apresentaram um deslocamento altimétrico igual ou superior a um metro, que é um deslocamento grande e que foge às expectativas do trabalho. Estes deslocamentos altimétricos, superiores a  $\pm 1,0$  m, ocorreram por falta de feições topográficas estruturais.

O maior deslocamento altimétrico, apresentado no “*res5*” foi de 1,42 m. Estes deslocamentos altimétricos ocorreram em pontos de controle situados em regiões onde o comportamento das curvas de nível não é homogêneo. Ou seja, as curvas de nível extraídas para gerar o conjunto de dados amostrais não apresentam um comportamento semelhante ao das curvas de nível intermediárias (onde os pontos de controle estão situados).

Para procurar reduzir os deslocamentos altimétricos superiores a  $\pm 1$  m, foi realizado um estudo no MDT “*res5*” da área-piloto, no qual foram inseridas feições topográficas estruturais próximas aos pontos de controle que apresentaram tais deslocamentos altimétricos. Este estudo está detalhado no Apêndice 6 (p. 82)

#### 4.3.2 Análise Numérica da Folha

Na Tabela 8, mostra-se o intervalo de deslocamento altimétrico para as três classes, estabelecidos no Decreto nº 89.817, e a porcentagem de pontos de controle dos MDT “*res5*”, “*res10*” e “*resdiv*” que pertencem a tais intervalos.

TABELA 8 – ANÁLISE NUMÉRICA DA FOLHA

CLASSE	INTERVALO	RES5	RES10	RESDIV
A	0 à ± 0,5 m	74%	64%	57%
B	0 à ± 0,6 m	80%	70%	62%
C	0 à ± 0,8 m	88 %	78 %	73 %

Na Tabela 8, observa-se que 88% dos pontos de controle do “res5” apresentaram um deslocamento altimétrico entre 0 e ± 0,8 m. Com o resultado apresentado, o MDT não atingiu a classificação C, diferenciando-se do mesmo MDT na área-piloto. Os MDT “res10” e “resdiv” também não obtiveram classificação. O resultado encontrado foi de 78% e 73% dos pontos de controle dos MDT, respectivamente, apresentando um deslocamento altimétrico entre 0 e ± 0,8 m.

Na análise numérica, constata-se que o MDT “res5” obteve a classificação C para a área-piloto, o que viabiliza sua utilização. Para a folha, o mesmo MDT não obteve classificação. Mas é importante ressaltar que a região de estudo denominada folha é uma região com uma rede de drenagem escassa, o que prejudicou a geração do MDT, pois estas são feições topográficas estruturais. Também existem regiões planas nesta mesma área, porém com poucos pontos altimétricos isolados, ou seja, a informação altimétrica destas regiões não é adequada para a geração do MDT. Assim, com a análise numérica, afirma-se a viabilização de uso do MDT “res5”.

Os MDT “res10” e “resdiv”, segundo a classificação obtida na análise numérica, não atingiram os objetivos do estudo, sendo descartada sua utilização neste estudo, confirmando o resultado apresentado na análise visual destes modelos.

#### 4.4 ANÁLISE VOLUMÉTRICA

O *GeoTerrain* possui uma rotina denominada *prismoidal volume*, que calcula o volume de corte e aterro do MDT em relação a um plano horizontal. Inicialmente, necessita-se definir a unidade trabalhada para metro. Este ajuste é realizado por meio do *menu* do *MicroStation*.

O cálculo do volume do MDT é constituído de 5 etapas:

- a) definir o modo de cálculo do volume – neste trabalho, optou-se por calcular o volume dos TIN em relação a um plano horizontal, com altitude inferior à

menor altitude do *TIN*. Adotou-se este procedimento para facilitar a análise volumétrica entre os MDT, pois assim o volume calculado é apenas de corte.

- b) definir o *TIN* para o qual será calculado o volume;
- c) definir o valor altimétrico do plano;
- d) criar um arquivo que irá armazenar a informação obtida;
- e) seleccionar a área em que será realizado o cálculo – seleccionou-se toda a área trabalhada.

Foi seleccionada a unidade métrica, por ser a unidade usada na produção do mapa digital. O volume de corte foi calculado em relação a um plano horizontal com altitude 850 m. A altitude do plano horizontal é inferior à altitude da curva de nível de menor valor altimétrico, porque, desta maneira, o volume calculado apresenta somente corte, facilitando a análise.

Na Tabela 9, apresenta-se o resultado obtido. Na coluna *diferença %*, mostra-se a diferença volumétrica, em porcentagem, entre o MDT “*res*” e os demais modelos, para um melhor entendimento.

TABELA 9 – RESULTADOS DA ANÁLISE VOLUMÉTRICA

	MDT	DIFERENÇA %
ÁREA PILOTO	<i>rest</i>	–
	<i>res1</i>	+ 0,01
	<i>res5</i>	- 0,4
	<i>res10</i>	- 1,1
	<i>resdiv</i>	- 1,4
FOLHA	<i>rest</i>	–
	<i>res1</i>	+ 0,02
	<i>res5</i>	- 0,4
	<i>res10</i>	- 0,7
	<i>resdiv</i>	- 2,2

Segundo Church (1981, cap.17, p.4-5) a precisão no cálculo do volume depende da fórmula utilizada, sendo que as mais utilizadas possuem uma precisão que varia de 0,5 a 3%. Analisando os resultados apresentados na Tabela 9, percebe-se que o cálculo do volume dos MDT não apresentou uma mudança significativa com a



redução do volume de dados amostrais, ou seja, a redução de volume de dados não prejudicou o cálculo volumétrico dos MDT,

O MDT “res5” apresentou uma redução no volume de corte de 0,4 %, valor que viabiliza a utilização do mesmo. Também, o resultado encontrado para o “res10” e “resdiv”, 1% e 1,8% respectivamente, é considerado bom. Com os resultados encontrados nesta análise, constata-se que a redução dos dados amostrais não interfere no cálculo do volume dos MDT.

#### 4.5 ANÁLISE DO ERRO MÉDIO QUADRÁTICO

Para a análise por meio do erro médio quadrático, utilizou-se a rotina *drape vertices*, com a qual se obteve o valor altimétrico dos pontos de controle nos diversos MDT. Para calcular o erro médio quadrático, utilizou-se a formulação a seguir (GEMAEL, 1994, p.88):

$$m = \sqrt{\frac{\sum vi^2}{n-1}} \quad (4.1)$$

$$vi^2 = (zmi - zti)^2 \quad (4.2)$$

onde: *zmi* - valor altimétrico dos pontos de controle no mapa digital;

*zti* - valor altimétrico dos pontos de controle no TIN;

*n* - número total de vértices.

Também nesta análise foi utilizado o Decreto nº 89.817, de 20 de junho de 1984, Artigo 8º, parágrafo 4, que estabelece que as expressões Erro-Padrão, Desvio-Padrão e Erro Médio Quadrático são equivalentes. Assim, utilizou-se o erro médio quadrático para classificar os MDT, obedecendo ao estabelecido no Decreto para cartas com escala 1:2000, a saber:

- a) Classe A – o erro médio quadrático corresponde a 1/3 da equidistância altimétrica da carta;
- b) Classe B – o erro médio quadrático corresponde a 2/5 da equidistância altimétrica da carta;

c) Classe C – o erro médio quadrático corresponde a  $\frac{1}{2}$  da equidistância altimétrica da carta.

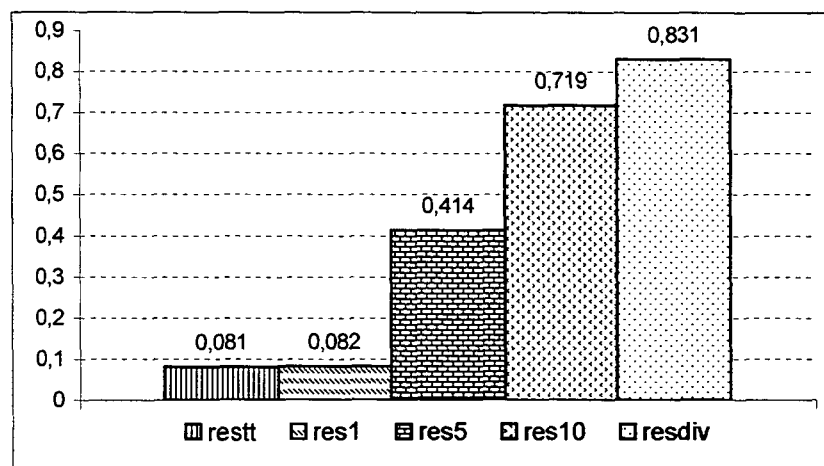
Na Tabela 10, apresenta-se o valor máximo do erro médio quadrático para as classes A, B e C. Estes valores foram calculados para cartas com equidistância vertical de um metro, por ser a equidistância vertical do mapa digital trabalhado.

TABELA 10 – MÁXIMO ERRO MÉDIO QUADRÁTICO DAS CLASSES

CLASSE	E. M. Q.
A	0,33
B	0,4
C	0,5

No Gráfico 1, mostra-se o valor do erro médio quadrático, para os MDT, na área-piloto.

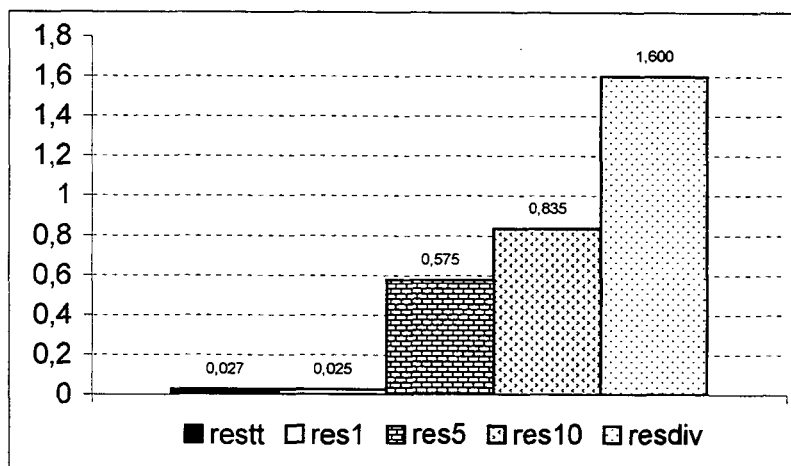
GRÁFICO 1 – ERRO MÉDIO QUADRÁTICO PARA A ÁREA-PILOTO



Comparando os valores da Tabela 10 com os valores apresentados no Gráfico 1, os MDT "res1" e "res1" obtiveram classificação A. O MDT "res5" obteve classificação C, e os MDT "res10" e "resdiv" não obtiveram classificação.

No Gráfico 2, mostra-se o valor do erro médio quadrático para a folha.

GRÁFICO 2 – ERRO MÉDIO QUADRÁTICO PARA A FOLHA



Comparando os valores da Tabela 10 com os valores apresentados no Gráfico 2, os MDT “res<sup>t</sup>” e “res<sup>1</sup>” pertencem à classe A. Os MDT “res<sup>5</sup>”, “res<sup>10</sup>” e “res<sup>div</sup>” não obtiveram classificação.

Na Tabela 11, mostra-se o valor do erro médio quadrático correspondente às três classes A, B e C e o valor do erro médio quadrático obtido para os MDT.

TABELA 11 – ERRO MÉDIO QUADRÁTICO

Classe	Erro Médio Q.	MDT					
		ÁREA-PILOTO			FOLHA		
		RES5	RES10	RESDIV	RES5	RES10	RESDIV
A	0,33						
B	0,4						
C	0,5	0,41					
nenhuma	> 0,5		0,71	0,83	0,57	0,83	1,6

Na Tabela 11, observa-se que o MDT “res<sup>5</sup>” da área-piloto obteve classificação C, sendo que os demais MDT não obtiveram classificação. Porém, o valor do erro médio quadrático do MDT “res<sup>5</sup>” da folha é 0,57 m, não atingindo classificação, o que não inviabiliza sua utilização.

É importante ressaltar novamente que o valor do erro médio quadrático obtido no “res5” da folha é superior ao valor obtido pelo mesmo MDT na área-piloto, porque a área-piloto possui um grande volume de canais de drenagem, o que não ocorre na região denominada folha.

## 5 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Realizamos a presente pesquisa com o objetivo de gerar MDT, utilizando um mínimo de informação altimétrica extraída do mapa digital e garantir o contexto geomorfológico do terreno.

Na análise gráfica, o MDT “*res5*” garantiu a geomorfologia do terreno, não apresentando um deslocamento acentuado das curvas de nível interpoladas para as duas áreas estudadas. O MDT “*res1*”, apesar de não apresentar deslocamento das curvas de nível interpoladas a partir do MDT em relação às curvas de nível do mapa digital, apresenta alteração na geomorfologia do terreno, motivada por triângulos horizontais e arestas de triângulos interceptando feições topográficas estruturais. Por este motivo e por apresentar um volume muito grande de dados amostrais, este MDT não foi objeto de estudo das demais análises. Os demais MDT, “*res10*” e “*resdiv*”, apresentaram alterações na geomorfologia.

Na Tabela 12, apresentamos os resultados das análises para os MDT “*res5*”, “*res10*” e “*resdiv*”.

TABELA 12 – RESULTADOS DAS ANÁLISES

ANÁLISES	ÁREA-PILOTO			FOLHA		
	RES5	RES10	RESDIV	RES5	RES10	RESDIV
ESTATÍSTICA (REDUÇÃO DE DADOS)	57%	64%	74%	62%	72%	80%
GRÁFICA (CURVAS DE NÍVEL)	OK	não	não	OK	não	não
NUMÉRICA (PEC)	Classe C 91%	Nenhuma 79%	Nenhuma 75%	Nenhuma 88%	Nenhuma 78%	Nenhuma 73%
VOLUMÉTRICA (CORTE)	0,4 %	1,1%	1,4%	0,4 %	0,7 %	2,2 %
E. M. Q.	Classe C 0,41	Nenhuma 0,72	Nenhuma 0,83	Nenhuma 0,57	Nenhuma 0,83	Nenhuma 1,60

Observando a Tabela 12, concluímos a viabilidade de utilização do MDT “*res5*”, que obteve uma redução média do volume de dados amostrais, de 57% para a área-piloto e 62% para a *folha*, manteve a geomorfologia do terreno e, segundo a

classificação utilizada para cartas (PEC), o modelo da área-piloto pertence a classe C. É importante ressaltar que a redução (61%) obtida neste MDT é muito significativa para armazenamento, manipulação do MDT e, principalmente, em redução de custo para obtenção da informação altimétrica.

Com a finalização das análises dos MDT gerados no presente trabalho, concluímos que o MDT “res5” atingiu os objetivos propostos, reduzindo o volume de dados e mantendo a geomorfologia do terreno.

Como já foi descrito anteriormente neste trabalho os divisores d’água foram inseridos manualmente no mapa digital, porém como são feições topográficas estruturais, que auxiliam a garantir a representação do terreno, recomendamos a inserção destas feições nos mapas digitais 3D, principalmente quando estes forem utilizados como fonte de informação altimétrica para geração de MDT, principalmente em regiões em que o comportamento das curvas de nível não é homogêneo. Assim, o MDT gerado com estas feições manterá a geomorfologia do terreno. Também recomendamos a inserção de um número maior de pontos altimétricos em regiões planas, para não comprometer a geração do MDT por escassez de informação altimétrica na região.

Ressaltamos a possibilidade de utilização do MDT como uma rotina de verificação dos mapas digitais 3D, porque, atualmente, o usuário não possui uma rotina de verificação do mapa digital 3D. Utilizando o MDT, é possível detectar visualmente os erros altimétricos, por meio das curvas de nível interpoladas a partir do MDT, que apresentam áreas fechadas, formando círculos contornando os vértices com altitude incorreta.

## 6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BURROUGH, P. A., Principles of Geographical Information Systems for Land Resources Assessment, Oxford: Clarendon Press, 1986, p.39-56.

BRASIL. Decreto-lei n.89.817, de 20 de junho de 1984. Estabelece as Instruções Reguladoras das Normas Técnicas da Cartografia Nacional. **Diário Oficial da República Federativa do Brasil**, Brasília, n.120, p.8884 – 8886, 22 de junho de 1984.

CHURCH, H. K.,Excavation Handbook, United States of America: MacGraw-Hill, 1981.

FELGUEIRAS, C. A., Introdução ao Geoprocessamento, Modelagem Numérica do Terreno, C.6, 1999. Disponível em <http://www.dip.inpe.br/~gilberto/livro/cap6-mnt.pdf>. Acessado em: 25 julho 2000.

GEMAEL, C. G., Introdução ao Ajustamento de Observações, Curitiba: Editora da Universidade Federal do Paraná, 1994. 319 p.

GEOTERRAIN, User's Guide, United States of America, 1995. CD-ROM.

HUTCHINSON, M.F. e GALLANT, J.C., Representation of Terrain, In: LONGLEY, P.A., GOODCHILD, M.F., MAGUIRE, D.J. e RHIND, D.W., Geographical Informatio Systems, England: Longman, 1999, p.105-124.

KEATES, J. S., Cartographic design and production. London: Longman, 1973.

KUMLER, M. P., An Intensive Comparison of Triangulated Irregular Networks (TINs) and Digital Elevation Models (DEMs), Monograph 45, Cartographica, V.31, N.2, 1994, Colorado, United States.

MICROSTATION, User's Guide, United States of America, 1995. CD-ROM.

SCHNEIDER, B., Geomorphologically Sound Reconstruction of Digital Terrain Surfaces from Contours, 1998. Disponível em <http://www.geo.unizc.ch/~benni> Acessado em:25 julho 2000.

VIEIRA, A. J. B., Textos Didáticos. Mensagem recebida por: [ml.aquino@uol.com.br](mailto:ml.aquino@uol.com.br) em: 23 abr. 2001.

WEIBEL, R. e HELLER, M., Digital Terrain Modelling. In: MAGUIRE, D. J., GOODCHILD, M. F. e RHIND, D., Geographical Information Systems, England: Longman, 1991. 649p. p. 269-294.



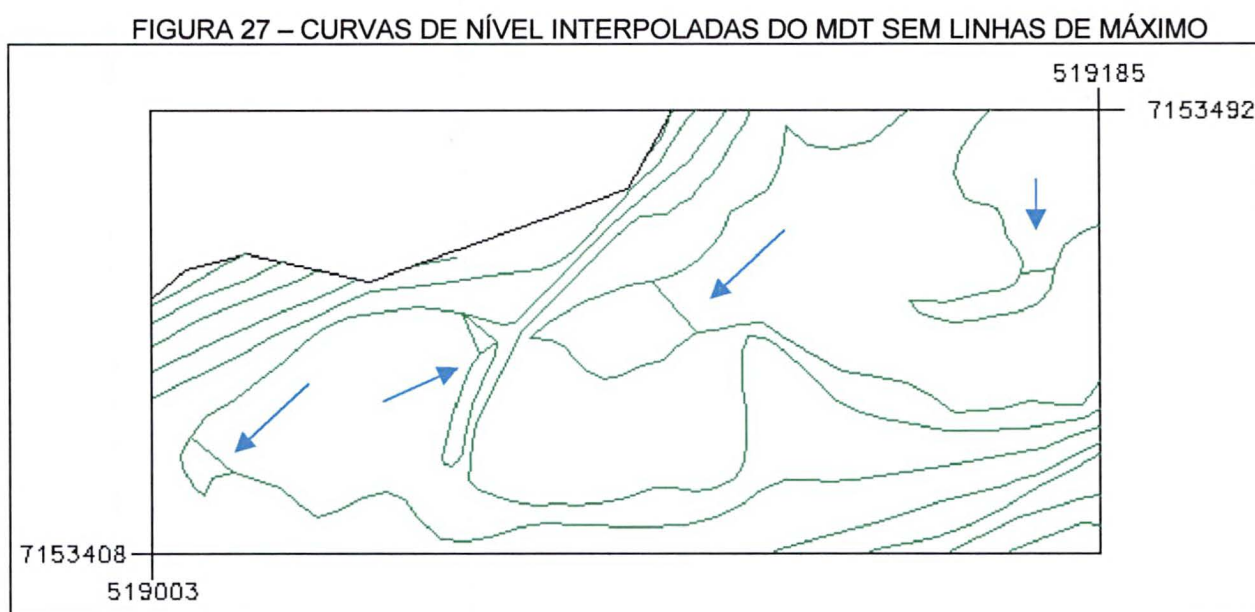
## **APÊNDICE 1– INSERÇÃO DE DIVISORES D'ÁGUA**

## 1 – INSERÇÃO DE DIVISORES D'ÁGUA

Para realização desta pesquisa inseriu-se os divisores d'água, porém, é importante ressaltar que estas feições devem estar presentes nos mapas digitais 3D, o usuário que pretende gerar um MDT deve solicitar sua existência, por ser uma feição topográfica estrutural, com importância para a geração de MDT.

Para inserir estas feições neste trabalho, foi preciso conhecer o valor altimétrico dos vértices das mesmas. O valor altimétrico dos vértices dos divisores d'água, foi determinado a partir de um MDT gerado com todas as feições altimétricas existentes no mapa digital, a saber: curvas de nível com equidistância vertical de um metro; pontos altimétricos isolados; canais de drenagem; sistema viário; área de alagado e lagos. A partir deste MDT, extraiu-se o valor altimétrico dos vértices dos divisores d'água, utilizando a rotina *drape vertices*.

Na Figura 27, mostra-se uma região em que as curvas de nível interpoladas apresentaram um comportamento incorreto (indicadas pelas setas azuis), causado pela inexistência da linha característica.

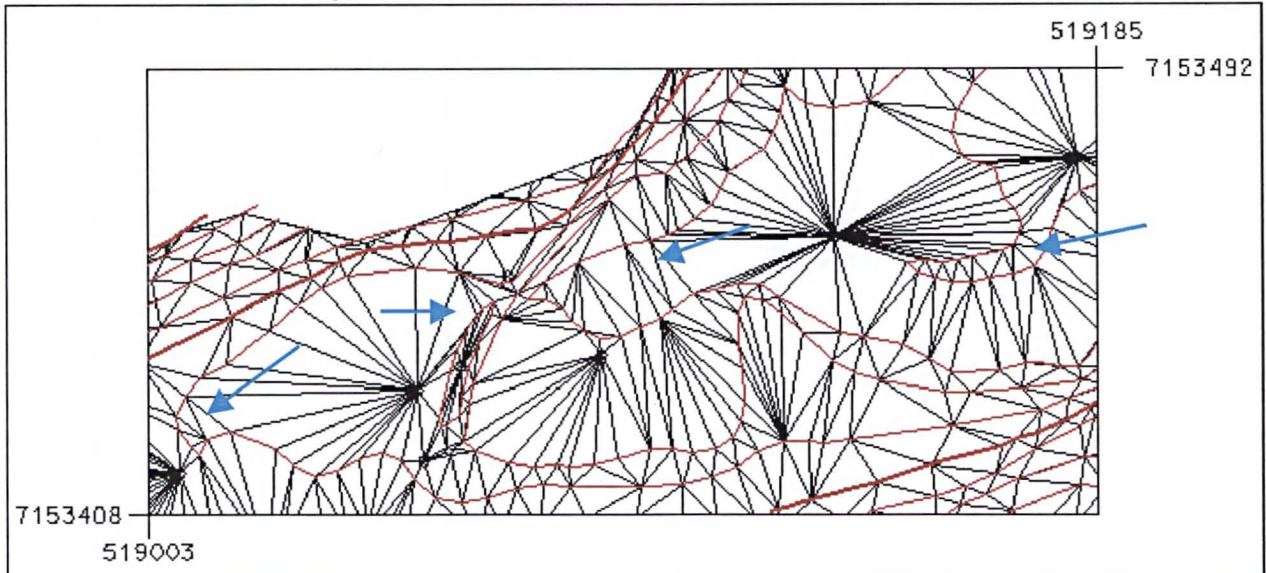


Legenda:

- Curvas de nível do mapa digital
- Limite da área trabalhada
- Curvas de nível interpoladas do MDT "rest"

Na Figura 28, mostra-se a triangulação, com triângulos horizontais (indicados com as setas azuis) que ocasionaram o erro apresentado na Figura anterior.

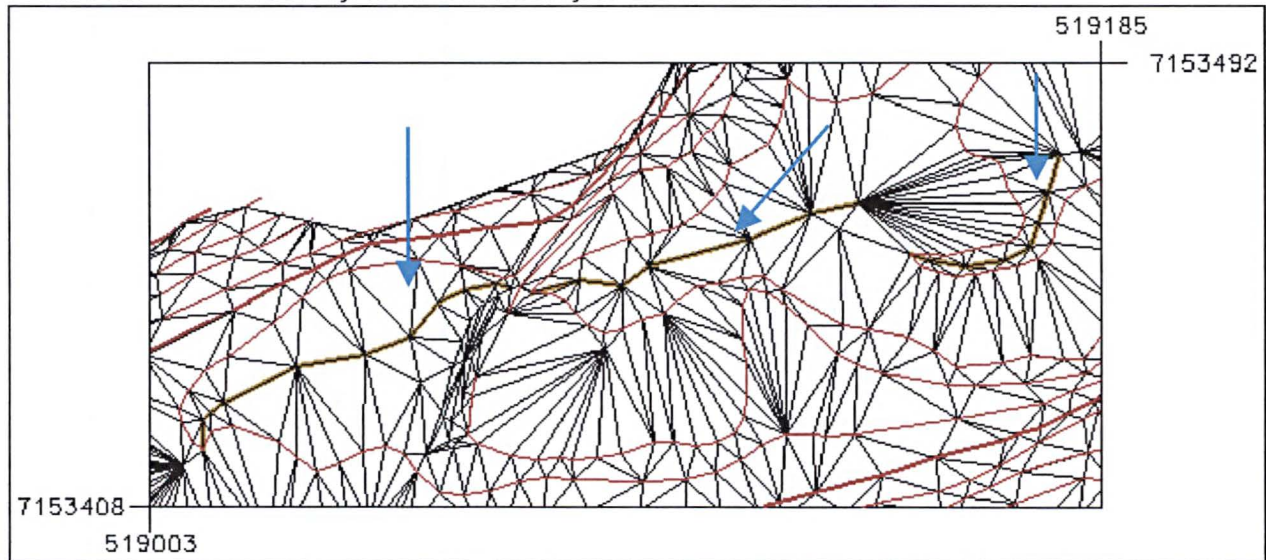
FIGURA 28 – TRIANGULAÇÃO COM TRIÂNGULOS HORIZONTAIS



Legenda: — Curvas de nível do mapa digital  
— Triangulação

Na Figura 29, mostra-se a triangulação após a inserção das linhas características, onde as setas azuis indicam as linhas características inseridas.

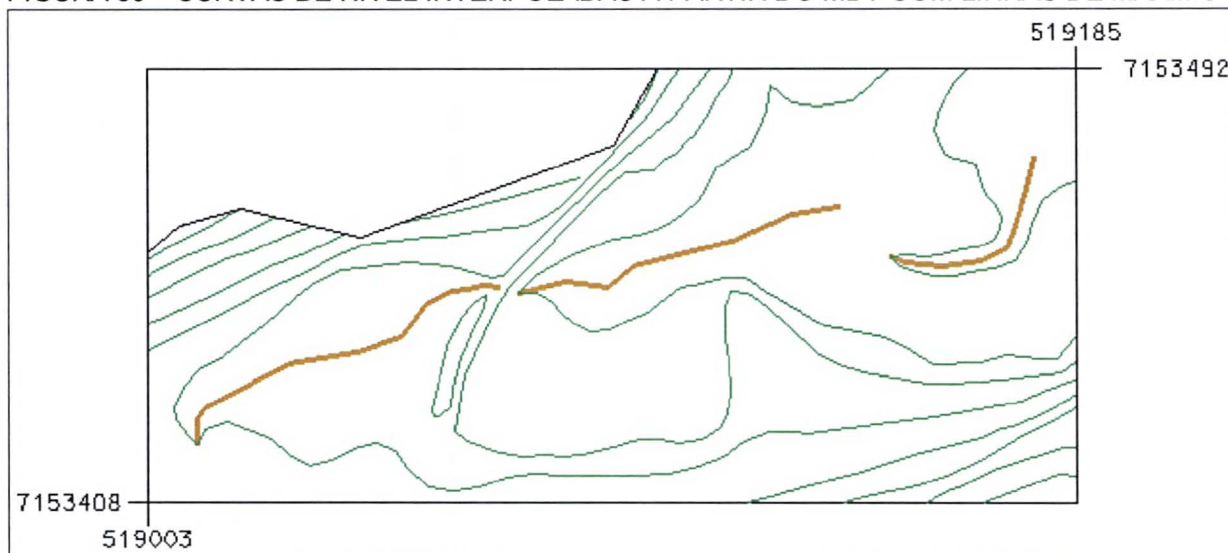
FIGURA 29 – TRIANGULAÇÃO APÓS INSERÇÃO DE LINHAS DE MÁXIMO



Legenda: — Curvas de nível do mapa digital  
— Triangulação  
— Linha de máximo

Na Figura 30, mostra-se o comportamento das curvas de nível interpoladas a partir do TIN após a inserção da linha característica.

FIGURA 30 – CURVAS DE NÍVEL INTERPOLADAS A PARTIR DO MDT COM LINHAS DE MÁXIMO



- Legenda:
- Curvas de nível interpoladas do MDT "rest"
  - Linha de máximo
  - Limite da área trabalhada

Observa-se, na Figura 30, que as curvas de nível interpoladas não formaram áreas fechadas como na Figura 27. Obteve-se uma representação correta da região trabalhada.

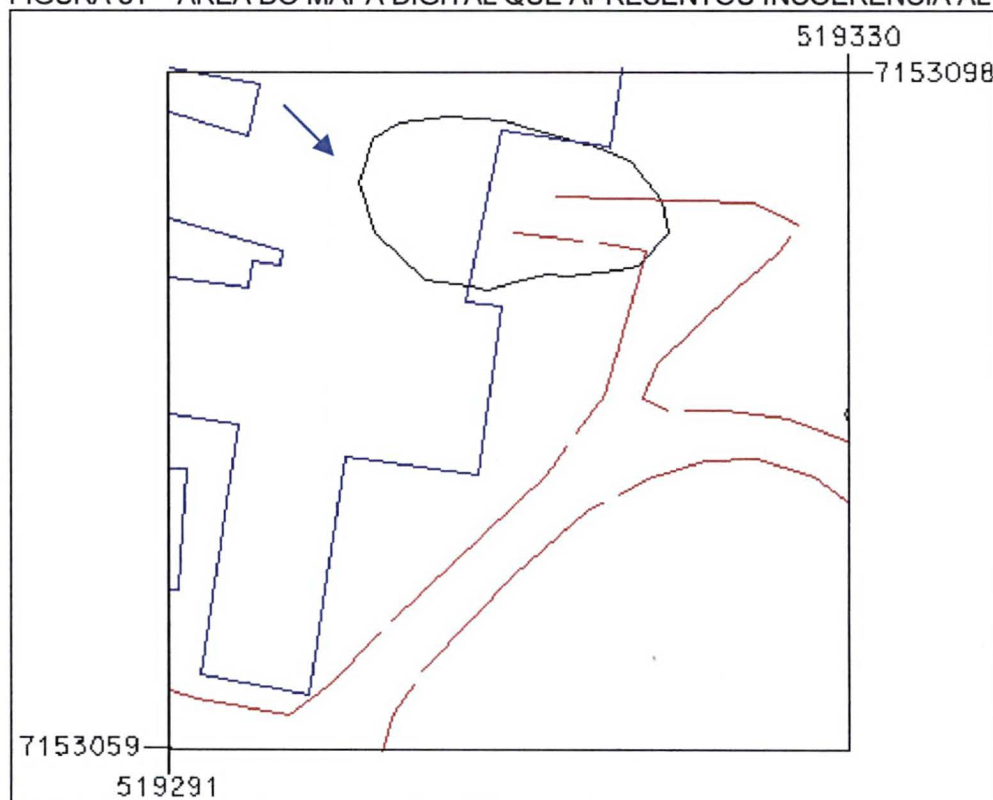
## **APÊNDICE 2– INCOERÊNCIAS ALTIMÉTRICAS**

## 1 – INCOERÊNCIAS ALTIMÉTRICAS

Para melhor entendimento do processo de edição efetuado no mapa digital 3D, a seguir detalha-se algumas incoerências altimétricas encontradas no mesmo. Na seqüência de Figuras de 31 a 34, todas da mesma área, mostram-se exemplos destas incoerências.

Na Figura 31, mostra-se uma pequena região do mapa digital que apresentou incoerência altimétrica explicada na seção 3.3.e, p.17. Os vértices da edificação e rodovia possuíam valor altimétrico inteiro (semelhante à curva de nível).

FIGURA 31 – ÁREA DO MAPA DIGITAL QUE APRESENTOU INCOERÊNCIA ALTIMÉTRICA

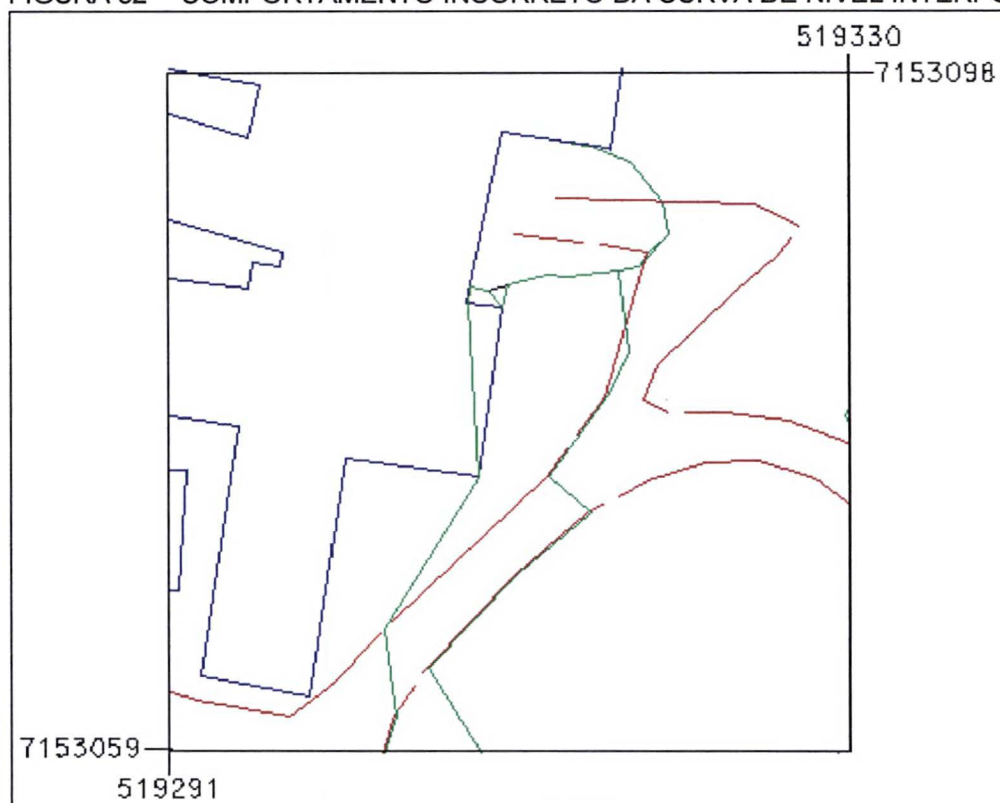


Legenda:

- Rodovia
- Curva de nível do mapa digital
- Edificação

Na Figura 32, mostra-se o comportamento das curvas de nível interpoladas, a partir do *TIN*, para a mesma área.

FIGURA 32 – COMPORTAMENTO INCORRETO DA CURVA DE NÍVEL INTERPOLADA



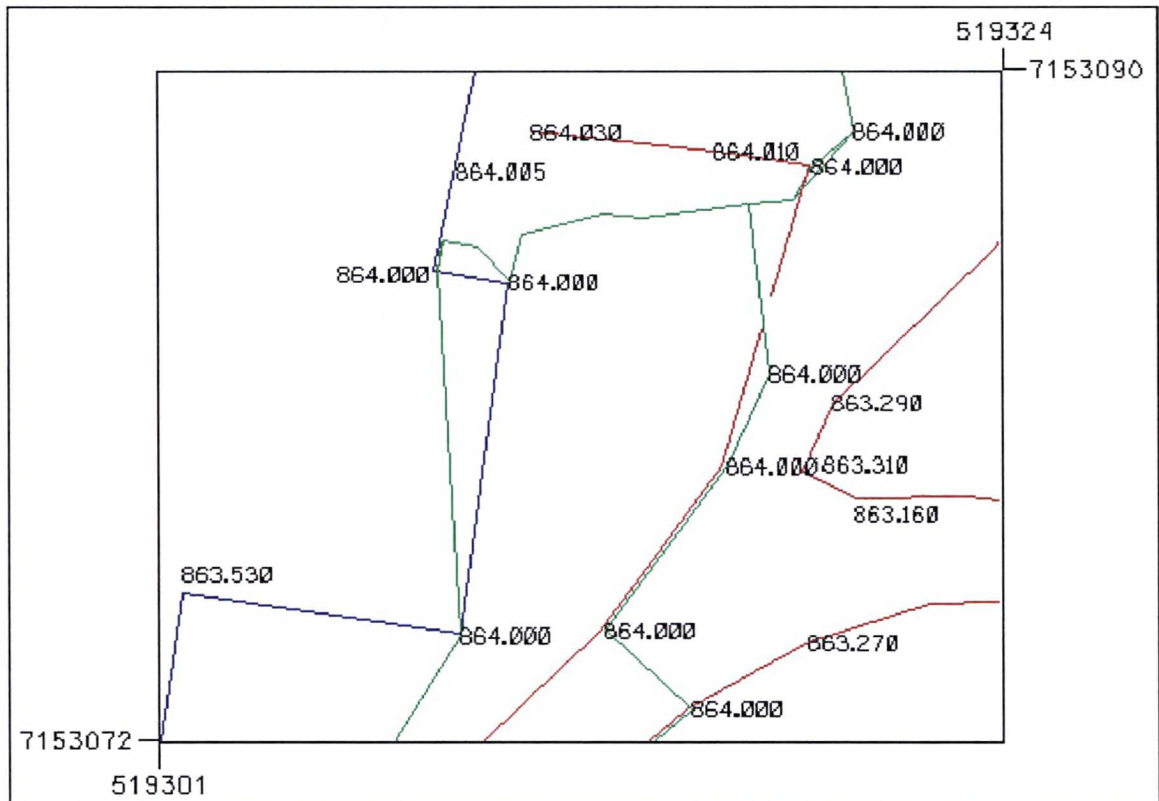
Legenda:

- Rodovia
- Curvas de nível interpoladas do MDT
- Edificação

Comparando-se as Figuras 31 e 32, observa-se que, na Fig. 31, a curva de nível do mapa digital passa sobre a edificação (seta azul). Na Fig. 32, a curva de nível interpolada (verde) está com um comportamento incorreto, criando áreas fechadas.

Na Figura 33, mostra-se o valor altimétrico dos vértices, da edificação e da rodovia extraídos do mapa digital.

FIGURA 33 – VALOR ALTIMÉTRICO DOS VÉRTICES



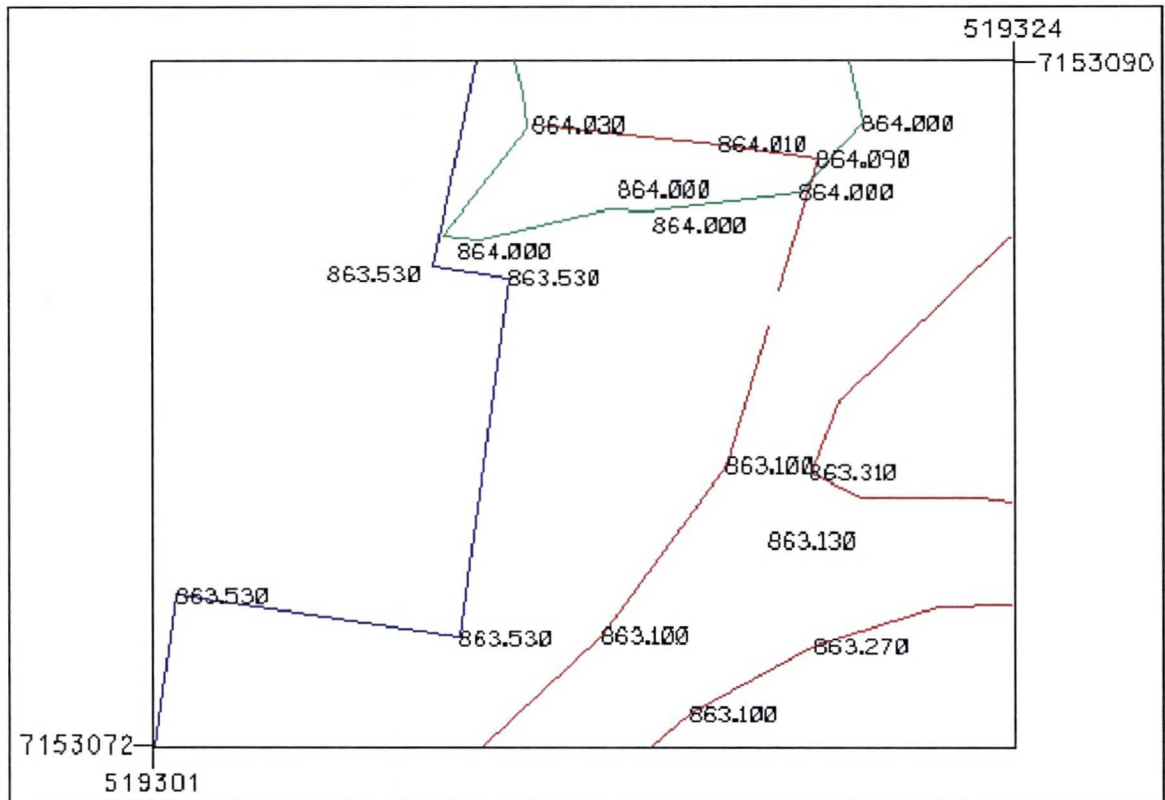
Legenda:

- Rodovia
- Curvas de nível interpoladas do MDT
- Edificação

Na Figura 34, mostra-se a alteração altimétrica nos vértices da edificação e rodovia, que apresentavam valor altimétrico inteiro, e o comportamento da curva de nível interpolada após a alteração. Para corrigir a incoerência dos valores altimétricos dos vértices da edificação e da rodovia, estes foram alterados para 863,100 e 863,530, (evitando-se valores inteiros 863,000 m ou 864,000 m) valores de outros vértices da mesma feição. A curva de nível interpolada (verde) não passa sobre a edificação, porque, no processo de extração, identificou-se esta feição com o elemento *void*, ou seja, elemento fechado que não permite triangulação em seu interior.



FIGURA 34 – ALTERAÇÃO ALTIMÉTRICA E COMPORTAMENTO DA CURVA DE NÍVEL INTERPOLADA



Legenda:

- Rodovia
- Curvas de nível interpoladas do MDT
- Edificação





### **APÊNDICE 3– ARQUIVO DE DADOS**

## 1 – ARQUIVO DE DADOS

No decorrer do presente trabalho, descreveu-se o funcionamento de rotinas ofertadas no *GeoTerrain*. Para auxiliar o entendimento destas rotinas, a presente seção refere-se ao arquivo de dados e gerado no processo de extração de feições existentes no mapa digital. Na Figura 37, mostra-se uma parte do arquivo de dados, em formato ASCII. Estão representados somente alguns vértices de cada elemento do *GeoTerrain*. Na primeira coluna, armazena-se o número que identifica o vértice da feição do mapa digital segundo a característica dos elementos do *GeoTerrain*. Na segunda, terceira e quarta colunas, armazenam-se as coordenadas planimétricas, N e E, e a altimétrica, Z, respectivamente.

FIGURA 37 – ARQUIVO DE DADOS COM FORMATO ASCII

7	519002.730	7152858.500	865.430	} 1°
8	519010.940	7152849.570	865.540	
8	519017.200	7152855.320	865.480	
8	519008.990	7152864.250	865.310	
8	519002.730	7152858.500	865.430	
8	519002.730	7152858.500	865.430	} 2°
5	519316.900	7152601.500	890.000	
6	519316.560	7152603.500	890.000	
6	519312.270	7152612.230	890.000	
6	519310.410	7152612.520	890.000	} 3°
6	519309.200	7152612.810	890.000	
4	518987.270	7153448.630	874.260	
4	518997.650	7153452.850	874.370	} 4°
4	519002.380	7153455.300	874.400	
2	519681.980	7153600.000	863.940	} 5°
3	519686.730	7153593.030	864.330	
3	519688.850	7153590.490	864.920	
3	519689.710	7153589.600	864.930	
3	519697.190	7153580.940	865.810	
3	519702.210	7153575.940	866.640	
3	519710.820	7153567.280	867.740	
3	519711.660	7153565.820	867.830	
3	519713.050	7153564.780	867.890	
3	519714.090	7153563.370	867.960	
3	519714.830	7153562.520	868.000	
1	519730.510	7153307.500	877.060	
1	520116.220	7153534.130	856.090	
1	519826.530	7153299.830	869.400	

Observam-se cinco grupos de elementos do *GeoTerrain*, destacados pelos parênteses, a saber:

1º grupo - elemento *void*, primeiro vértice número 7 e a seqüência de vértices número 8;

2º grupo – elemento *contour*, primeiro vértice número 5 e a seqüência de vértices número 6;

3º grupo – elemento *boundary*, número 4;

4º grupo – elemento *break line*, primeiro vértice número 2 e a seqüência de vértices número 3;

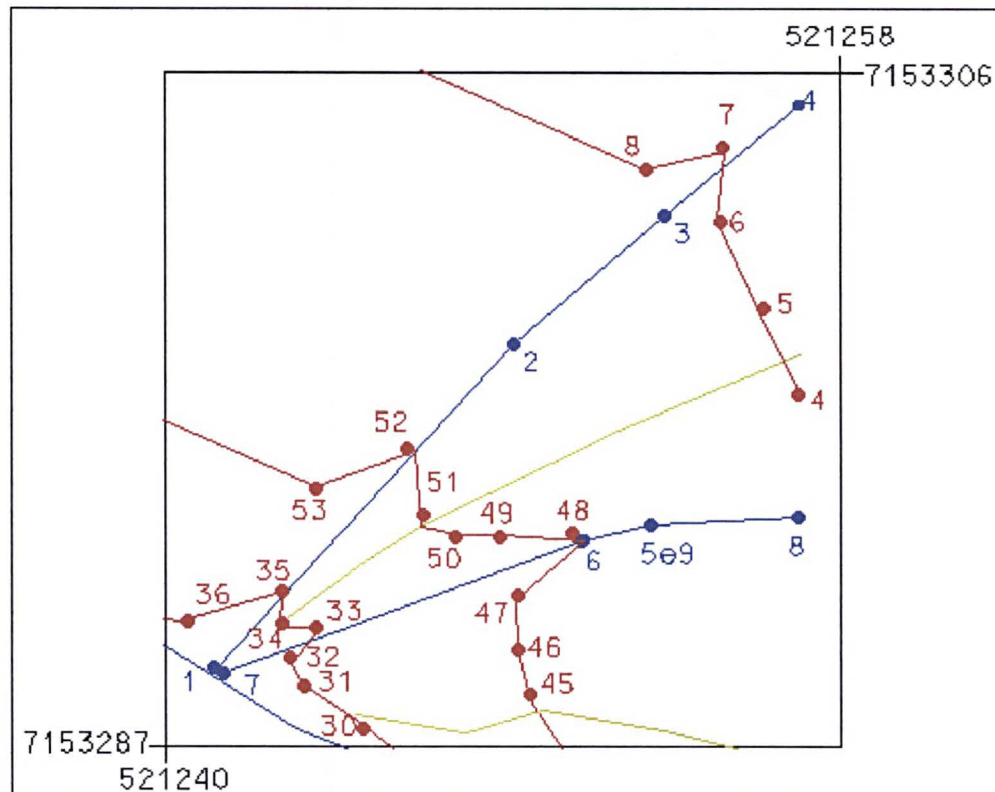
5º grupo – elemento *spot*, número 1.

## **APÊNDICE 4 – TESTE PARA DEFINIR O VALOR DA TOLERÂNCIA**

## 1 TESTE PARA DEFINIR O VALOR DA TOLERÂNCIA

Foram realizados testes para definir a tolerância utilizada no processo de junção de feições lineares. Os testes foram realizados utilizando tolerância de 0,1 m e 0,3 m. Na Figura 38, mostra-se a área de teste. Os vértices das curvas de nível e canais de drenagem estão numerados para possibilitar a compreensão do processo de junção.

FIGURA 38 – ÁREA DE TESTE



Legenda:

- Curvas de Nível
- Canais de Drenagem
- Divisores d'água

O *GeoTerrain*, organizou os dois canais de drenagem da seguinte forma:

- 1º segmento - vértices numerados de 1 a 4, pertencentes ao primeiro canal de drenagem, ou seja, o primeiro canal de drenagem é composto de um único segmento;
- 2º segmento – vértices 8 e 9;
- 3º segmento – vértices numerados de 5 a 7.



O segundo canal de drenagem é composto do segundo e terceiro segmentos. Os vértices 9 e 5 são vértices duplos (coincidentes), ou seja, possuem coordenadas N, E e altitude idênticas, estes vértices no processo de edição dos pontos duplicados não são eliminados porque pertencem a segmentos distintos, sua eliminação é realizada no processo de junção.

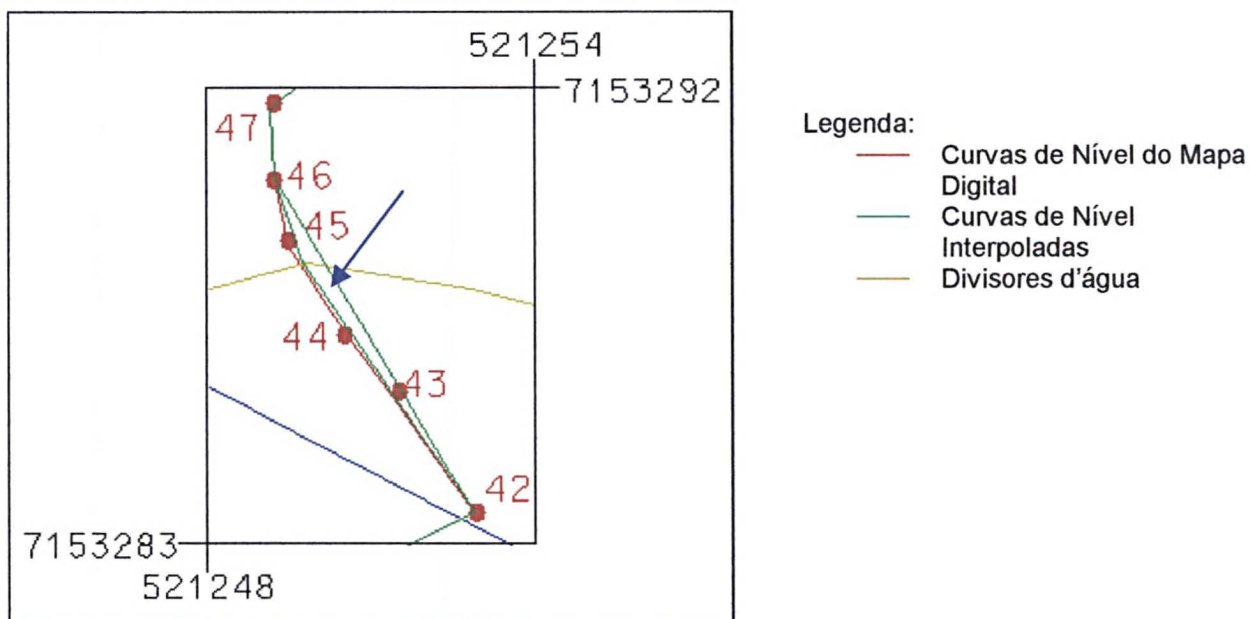
Quando o valor da tolerância é 0,3 m, os dois canais de drenagem são unidos, formando uma única feição, o que é incorreto. Com a utilização do valor 0,1 m para a tolerância, o segundo canal de drenagem, que era constituído de dois segmentos, ficou com um único segmento, sem introduzir erro. Não foram realizados mais testes porque o resultado encontrado neste foi satisfatório para este trabalho, não sendo indicado como um valor de referência, para outros trabalhos semelhantes aconselha-se a realização de mais testes. Desta maneira, adotou-se o valor de 0,1 m para a tolerância.

## **APÊNDICE 5 – PROCESSO DE FILTRAGEM**

## 1 – PROCESSO DE FILTRAGEM

Para determinar o valor da tolerância utilizado do processo de filtragem, foram realizados testes utilizando-se tolerância de 0,1 m (*default*); 0,2 m; 0,3 m; 0,4 m e 0,5 m. Na Figura 39, mostram-se as curvas de nível interpoladas do MDT sobrepostas às curvas de nível do mapa digital, utilizando-se uma tolerância de 0,5 m.

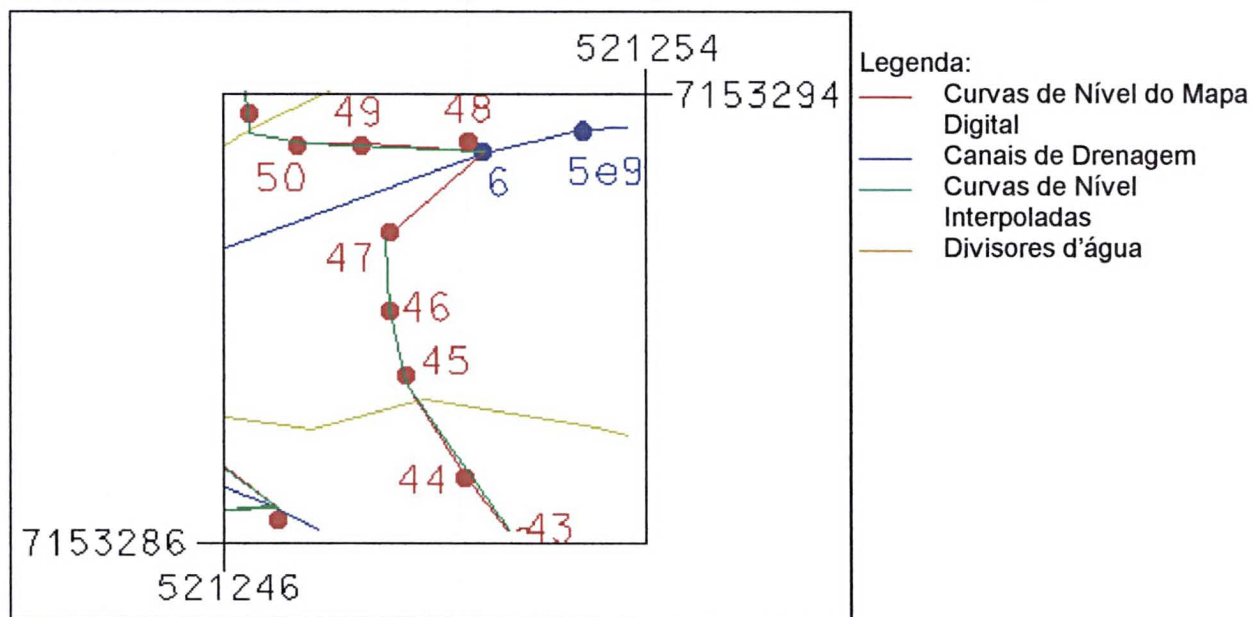
FIGURA 39 – RESULTADO DO PROCESSO DE FILTRAGEM COM TOLERÂNCIA 0,5 m



Pode-se verificar, na Figura 39, a existência de deslocamento na curva de nível interpolada, indicada com a seta azul. Nas demais tolerâncias, nenhum deslocamento foi detectado. Porém optou-se pela tolerância de 0,1 m por ser a *default* e também porque as curvas de nível interpoladas, após o processo de filtragem, não apresentaram nenhum deslocamento em relação às curvas de nível do mapa digital.

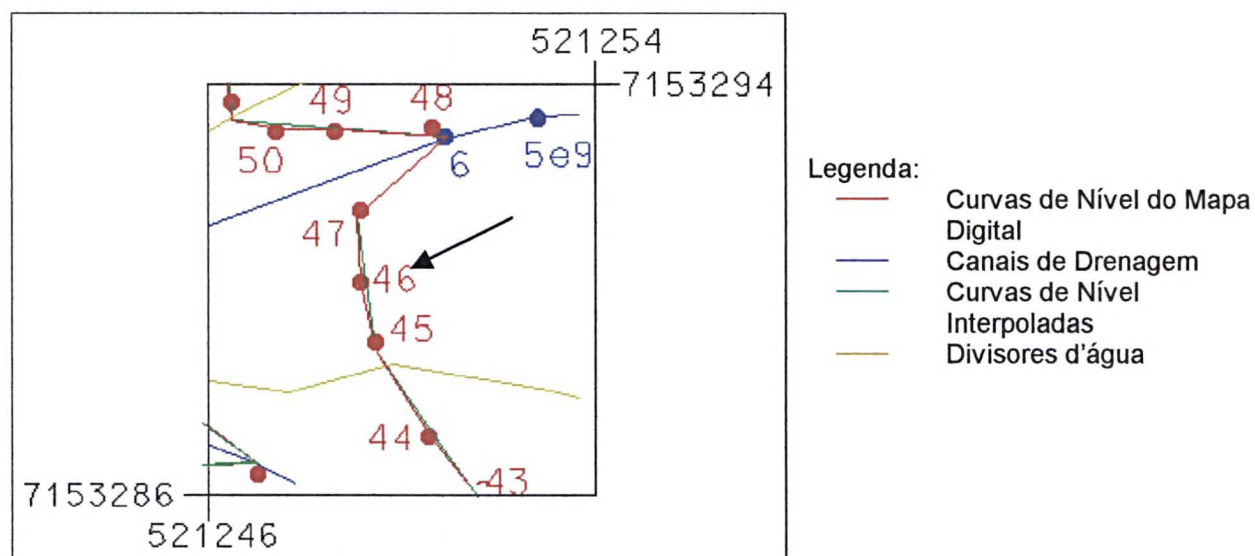
Na Figura 40, mostram-se as curvas de nível interpoladas sobrepostas às curvas do mapa digital após o processo de filtragem, utilizando-se uma tolerância de 0,1 m.

FIGURA 40 – RESULTADO DO PROCESSO DE FILTRAGEM COM TOLERÂNCIA 0,1 M



Na Figura 41, mostram-se as curvas de nível interpoladas após o processo de filtragem, utilizando-se tolerância de 0,2 m. Percebe-se que os vértices 46 e 50 foram filtrados e as curvas de nível interpoladas sofreram um deslocamento próximo aos mesmos.

FIGURA 41 – CURVAS DE NÍVEL INTERPOLADAS



## **APÊNDICE 6 – TESTE PARA REDUÇÃO DO ERRO ALTIMÉTRICO**

## 1 – TESTE PARA REDUÇÃO DO ERRO ALTIMÉTRICO

Na análise numérica do MDT “res5” da área-piloto, observou-se que 3% dos pontos de controle apresentaram erro altimétrico igual ou superior a  $\pm 1$  m. Foi realizado um teste com o intuito de reduzir tais deslocamentos.

Na Tabela 13, mostram-se os pontos de controle que apresentaram deslocamento altimétrico superior a  $\pm 1,0$  m.

TABELA 13 – PONTOS DE CONTROLE DO “RES5” DA ÁREA-PILOTO COM DESLOCAMENTO MAIOR QUE  $\pm 1$  m

FAIXA	PTO CONTROLE	ALTITUDE MAPA	ALTITUDE MDT	DESLOCAMENTO ALTIMÉTRICO	NOVA ALTITUDE	DESLOCAMENTO ALTIMÉTRICO CORRIGIDO
2	1	864,000	863,04	0,96	863,94	0,06
2	2	862,000	860,82	1,18	861,95	0,05
4	1	864,000	862,98	1,02	863,81	0,19
4	19	897,000	896,42	0,58	896,64	0,36
4	20	898,000	896,96	1,04	897,95	0,05
5	7	862,000	863,24	-1,24	862,36	-0,36
6	7	862,000	863,03	-1,03	862,51	-0,51
7	5	864,000	862,58	1,42	863,84	0,16

Nas primeira e segunda colunas, indica-se a faixa e o número dos pontos de controle, respectivamente. Nas terceira e quarta colunas, indica-se a altitude no mapa digital e a altitude no MDT dos pontos de controle. Na coluna “Nova Altitude”, indica-se a altitude dos pontos de controle após a inserção de feições topográficas estruturais. Nas colunas “Deslocamento Altimétrico” e “Deslocamento Altimétrico Corrigido”, mostra-se o deslocamento altimétrico antes e depois da inserção da feição topográfica estrutural, respectivamente.

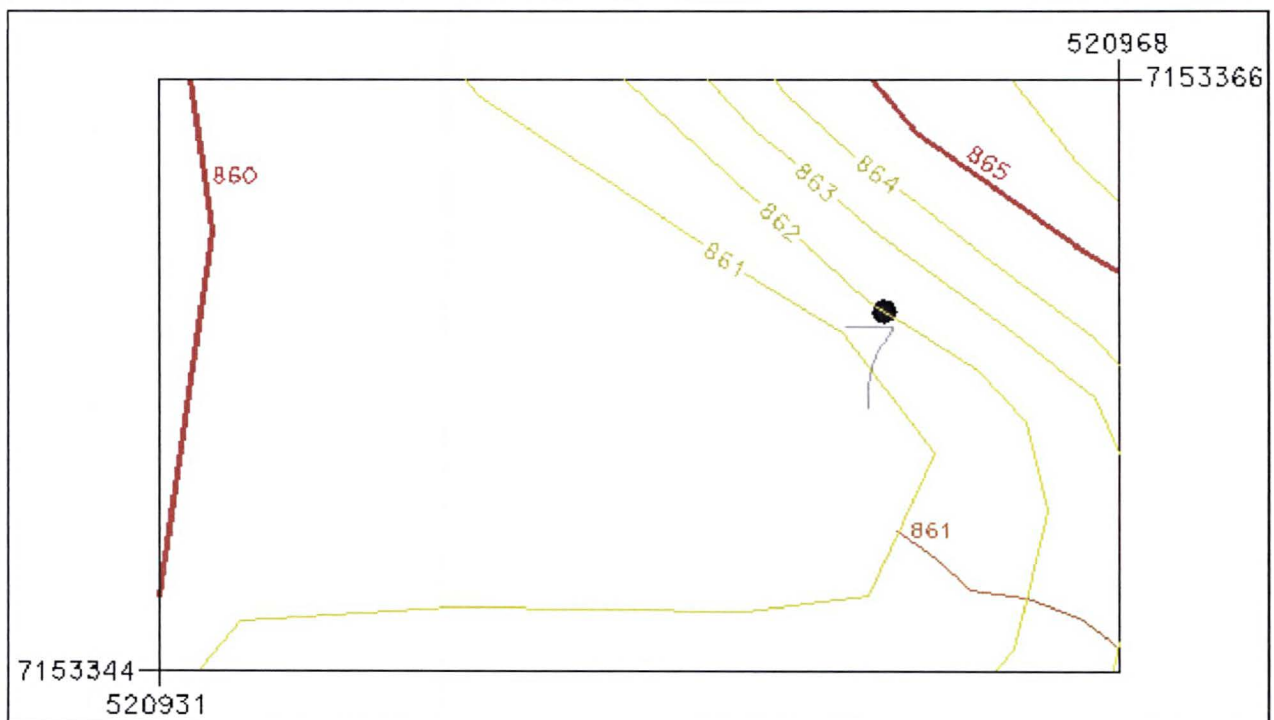
Alguns pontos de controle listados na tabela não apresentaram deslocamento altimétrico superior a  $\pm 1,0$  m. Porém, com a inserção da feição topográfica estrutural, os mesmos apresentaram alterações, reduzindo o deslocamento altimétrico apresentado.

Observando-se a Tabela 13, constata-se que a redução obtida nos deslocamentos altimétricos foi significativa, variando entre 93% (para o ponto de controle 1 da faixa 2) e 50% (para o ponto de controle 7 da faixa 6). Com estes

resultados, destaca-se a importância de inserção de feições topográficas estruturais no conjunto de dados amostrais do MDT.

Na Figura 42, mostra-se a região do ponto de controle nº7 da 5ª faixa. Observa-se que a região em que o ponto de controle nº 7 encontra-se não possui muitas informações altimétricas e que as curvas de nível intermediárias do mapa digital (em amarelo) não possuem espaçamento linear homogêneo. Ou seja, todas estão próximas à curva de nível mestra, existindo um grande espaço sem informação altimétrica até a próxima curva mestra, e as curvas de nível não apresentam um comportamento homogêneo.

FIGURA 42 – REGIÃO DO PONTO DE CONTROLE Nº 7

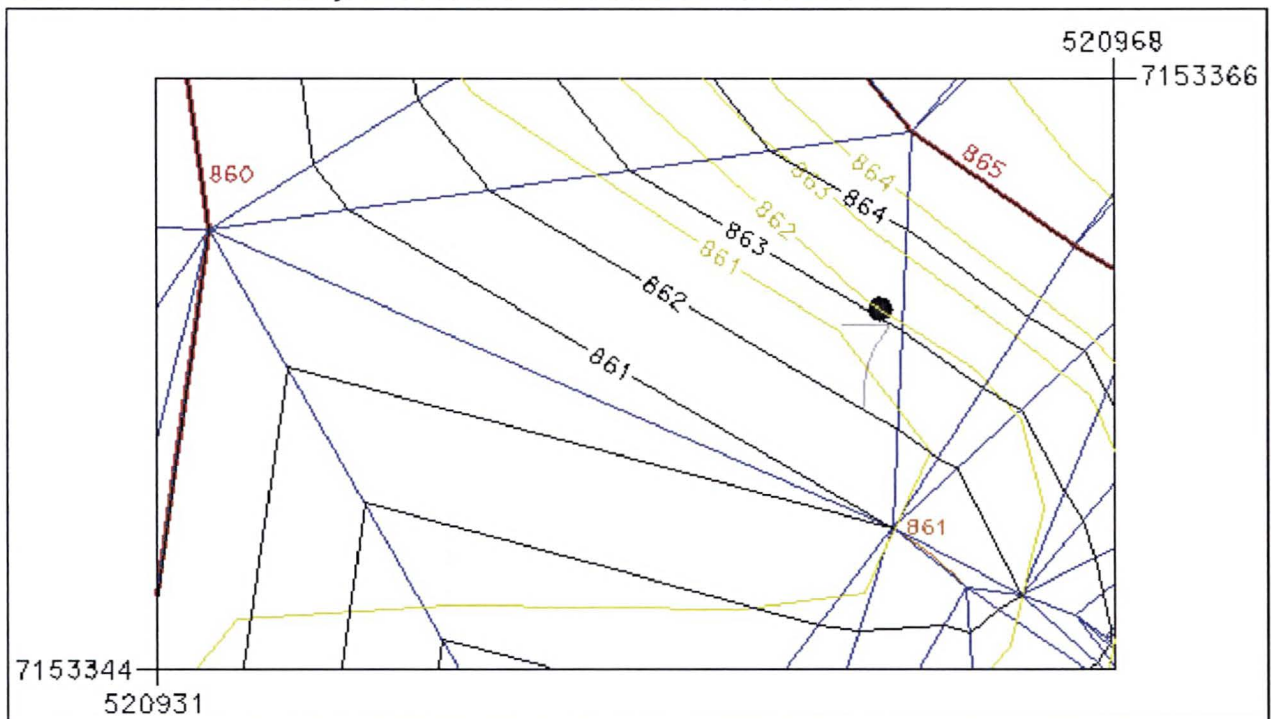


Legenda:

- Curvas de nível intermediárias do mapa digital
- Curvas de nível mestras do mapa digital
- Linha Característica

Na Figura 43, mostra-se a triangulação gerada na região do ponto de controle nº 103 (nº 7 da 5ª faixa). O deslocamento altimétrico apresentado por este ponto de controle foi de  $-1,24$  m. Em azul está o triângulo do *TIN*, que envolve o ponto de controle em questão. Neste modelo, existe uma feição topográfica estrutural (linha característica, indicada pela seta preta), que termina no vértice (861 m) do triângulo. Pelo fato da interpolação ser linear, as curvas de nível geradas a partir do *TIN* possuem um espaçamento linear constante entre elas, o que provocou uma representação incorreta da geomorfologia do terreno na região.

FIGURA 43 – TRIANGULAÇÃO SOBRE O PONTO DE CONTROLE Nº 7



Legenda:

- Curvas de nível intermediárias do mapa digital
- Curvas de nível mestras do mapa digital
- Triangulação
- Curvas de nível interpoladas



Na Figura 44, mostra-se a mesma área, porém neste modelo foram inseridas duas feições topográficas estruturais e modificada a feição topográfica estrutural já existente no primeiro modelo.

FIGURA 44 – REGIÃO DO PONTO DE CONTROLE Nº 7 COM INSERÇÃO DE LINHAS CARACTERÍSTICAS



Legenda:

- Curvas de nível intermediárias do mapa digital
- Curvas de nível mestras do mapa digital
- Linha Característica
- Curvas de nível interpoladas

Com a inserção das duas feições topográficas estruturais e a mudança de localização da terceira feição topográfica estrutural, o conjunto de dados amostrais do segundo modelo possui a informação necessária para manter a geomorfologia do terreno na região em questão. O ponto de controle nº 7 apresentou um deslocamento altimétrico de  $-0,36$  m, em confronto com o valor de  $-1,24$  m apresentado no primeiro modelo.