

JULIANO KERSTING

DERIVAÇÃO DE MODELOS DE SUPERFÍCIE EM MULTI-RESOLUÇÃO A PARTIR DOS DADOS DE LASER SCANNER AEROTRANSPORTADO

Dissertação apresentada ao Curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas, Setor de Ciências da Terra, Universidade Federal do Paraná, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Ciências Geodésicas.

Orientador: Prof. Dr. Quintino Dalmolin.

CURITIBA

2006

Kersting, Juliano

Derivação de modelos de superfície em multi-resolução a partir de dados laser scanner aerotransportado / Juliano Kersting. — Curitiba, 2006.

117 f.: il.; tab.

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Paraná. Setor de Ciências da Terra. Programa de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas.

Orientador: Quintino Dalmolin

1. Sensoriamento remoto. 2. Processamento de imagens – Técnicas digitais. I. Dalmolin, Quintino. II. Título.

CDD 22 256.982

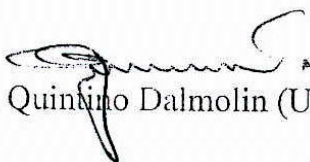
**“DERIVAÇÃO DE MODELOS DE SUPERFÍCIE EM MULTI-
RESOLUÇÃO A PARTIR DOS DADOS DE LASER SCANNER
AEROTRANSPORTADO ”**

POR

JULIANO KERSTING

Dissertação nº 194 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:

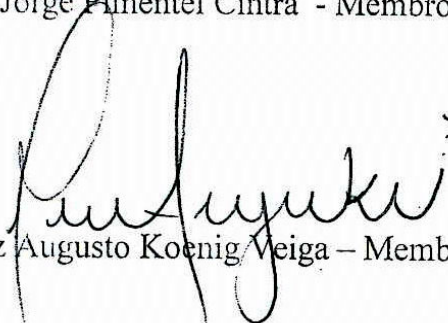
Curitiba, 25 de julho de 2006.



Prof. Dr. Quintino Dalmolin (UFPR) - Orientador e Presidente



Prof. Dr. Jorge Pimentel Cintra - Membro (USP)



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

Dedico este trabalho
a minha esposa Ana Paula e a minha mãe Sandra.
Sem elas não haveria razão nem forças para prosseguir.

AGRADECIMENTOS

Deixo aqui um intenso agradecimento a todas as pessoas que direta ou indiretamente auxiliaram para que fosse possível a elaboração deste trabalho.

Primeiramente ao meu orientador Prof. Dr. **Quintino Dalmolin**, pela excelente orientação científica, pelo incentivo e compreensão durante todas as etapas do trabalho e pela criteriosa revisão final.

A minha esposa Eng^a.Civil. **Ana Paula Baungarten Kersting** pela paciência, carinho, companheirismo, incentivo e pelas discussões teóricas altamente proveitosas.

A minha mãe Geól. Dra. **Sandra Boeira Guimarães** pelas valiosas dicas, pela colaboração na revisão do trabalho, pelo incentivo e compreensão dedicados.

Ao Prof. Dr. **Jorge Silva Centeno** pelas excelentes idéias e pelo empréstimo e consultas a relatórios, teses e artigos científicos.

Ao padrinho e amigo Eng. Cartógrafo **Ary Luiz Marques** pelo apoio, opiniões, discussões, e aconselhamentos.

A bibliotecária **Eliane Maria Stroparo** pela presteza e carinho dispensados no cumprimento de suas atividades.

A **UFPR** pela realização de seminários e palestras constantemente ativas no fomento a atividade científica.

A **Companhia Paranaense de Energia Elétrica - COPEL** pelo auxílio em todas as etapas de desenvolvimento deste estudo, como logística, fornecimento de materiais e equipamentos, acesso aos acervos técnicos e áreas de pesquisa e, principalmente o incentivo à pesquisa através da liberação em horários de trabalho, sem os quais não seria possível a realização deste projeto.

A todos que de forma direta ou indireta contribuíram seja pelo empréstimo de bibliografias ou pelas valiosas discussões, sugestões e contribuições durante a realização deste trabalho.

A minha família pela compreensão de minha ausência.

Muito grato.

Juliano Kersting

SUMÁRIO

FIGURAS.....	viii
TABELAS.....	x
ANEXOS.....	xi
RESUMO	xii
ABSTRACT.....	xiii
1 INTRODUÇÃO	1
1.1 CONSIDERAÇÕES GERAIS	1
1.2 OBJETIVO GERAL	2
1.3 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	2
1.4 JUSTIFICATIVA.....	3
1.5 APRESENTAÇÃO DA ESTRUTURA DO TRABALHO	4
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	5
2.1 MODELAGEM DIGITAL DE TERRENO	5
2.1.1 Definições.....	5
2.1.2 Características dos Modelos Digitais de Terreno.....	5
2.1.3 Modelagem.....	9
2.1.4 Grafos de Linhas Digitais.....	9
2.1.5 Modelos de Grade	10
2.1.6 Modelos de Grade Regular Retangular	11
2.1.7 Modelos de Grade Irregular Triangular	13
2.1.8 Triangulações	15
2.1.9 A Triangulação de Delaunay.....	17
2.2 SIMPLIFICAÇÃO DE SUPERFÍCIES	18
2.2.1 Caracterização dos Algoritmos	19
2.2.2 Características do Problema.....	19
2.2.3 Características do Algoritmo.....	20
2.2.4 Visão Geral das Áreas de Aplicação	21
2.2.5 Simplificação de Curvas.....	22
2.2.6 Simplificação de Superfícies.....	24
2.2.7 Métodos de Grades Regulares.....	25
2.2.8 Métodos de Subdivisões Hierárquicas	26
2.2.9 Métodos Baseados Em Feições	29
2.2.10 Métodos de Refinamento	30
2.2.11 Métodos de Decimação	34

2.3	AVALIAÇÃO DA QUALIDADE DOS MODELOS GENERALIZADOS	41
2.3.1	Similaridade Perceptível	42
2.3.2	Erro Geométrico	42
2.4	TECNOLOGIA DE MAPEAMENTO A LASER	45
2.4.1	Tipos de Sistemas LIDAR	45
2.4.2	LIDAR Batimétrico	45
2.4.3	LIDAR Topográfico	47
2.4.4	Sistema com Espelhos	50
2.4.5	Sistema com Fibras	50
2.4.6	Limitações de Precisão dos Sistemas LIDAR	51
2.4.7	Plataformas de Aquisição LIDAR	52
2.4.8	Precisões e Confiabilidade	53
2.4.9	Vantagens e Aplicações do LIDAR	54
2.4.10	Aspectos Conclusivos	57
3	METODOLOGIA	59
3.1	ÁREA DE ESTUDO	59
3.1.1	Definição da Área de Estudo	59
3.1.2	Características Fisiográficas	59
3.1.3	Descrição da Área de Estudo	60
3.2	PREPARAÇÃO DOS DADOS	61
3.2.1	Materiais e Métodos	61
3.2.2	Seleção das Sub-áreas	61
3.2.3	Geração das Triangulações Iniciais	68
3.3	PROGRAMAÇÃO EM ARCGIS UTILIZANDO ARCOBJECTS	68
3.3.1	Leitura Automatizada dos Dados	69
3.4	SIMPLIFICAÇÃO DOS MODELOS TRIANGULARES	70
3.5	ANÁLISE DOS ERROS	72
3.6	AJUSTAMENTO DE FAIXAS SOBREPOSTAS	72
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	73
5	CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	92
6	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	94
	ANEXOS	104

FIGURAS

FIGURA 2.1 - TIPOLOGIA DE UM MDT.....	8
FIGURA 2.2 - GRAFOS DE LINHAS DIGITAIS - <i>DLG</i>	10
FIGURA 2.3 - MODELO MDE (À ESQUERDA) E MODELO TIN (À DIREITA).....	11
FIGURA 2.4 - MODELO DIGITAL DE ELEVAÇÃO (MDE).....	12
FIGURA 2.5 - GRADE IRREGULAR TRIANGULAR (TIN).....	14
FIGURA 2.6 - ADIÇÃO DE UM VÉRTICE NA TRIANGULAÇÃO.....	15
FIGURA 2.7 – TROCA DE DIAGONAIS NA TRIANGULAÇÃO.....	16
FIGURA 2.8 – TRIÂNGULO DE DELAUNAY.....	17
FIGURA 2.9 – TRIANGULAÇÃO DE DELAUNAY.....	17
FIGURA 2.10 – DIAGRAMA DE VORONOI.....	18
FIGURA 2.11 - ALGORITMO DOUGLAS-PEUCKER (SIMPLIFICAÇÃO DE LINHAS)....	23
FIGURA 2.12 - EXEMPLO DE DIVISÃO DO PLANO EM UMA QUADTREE.....	27
FIGURA 2.13 - TRIANGULAÇÃO QUATERNÁRIA.....	27
FIGURA 2.14 - TRIANGULAÇÃO TERNÁRIA.....	28
FIGURA 2.15 – MODELOS DE SUBDIVISÃO PARA A TRIANGULAÇÃO HIERÁRQUICA DE SCARLATOS E PAVLIDIS.....	29
FIGURA 2.16 – TIPOS DE DECIMAÇÃO: (A) VÉRTICE; (B) LINHA; (C) TRIÂNGULO...35	35
FIGURA 2.17 - CONTRAÇÃO SIMPLES DE UMA LINHA.....	39
FIGURA 2.18 - CONTRAÇÃO DE PARES PELA UNIÃO DE VÉRTICES NÃO CONECTADOS.....	41
FIGURA 2.19 - LIDAR BATIMÉTRICO – SISTEMA SHOALS – ESQUEMA MOSTRANDO PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO.....	46
FIGURA 2.20 – COMPONENTES BÁSICOS DE UM SISTEMA LIDAR TOPOGRÁFICO.....	47
FIGURA 2.21 - PADRÃO DE VARREDURA DOS ESPELHOS OSCILANTES.....	48
FIGURA 2.22 - IMAGEM GERADA A PARTIR DA INTENSIDADE DE RETORNO DO PULSO LASER.....	49
FIGURA 2.23 - FUSÃO DA IMAGEM DE INTENSIDADE COM A ALTIMETRIA DOS OBJETOS.....	49
FIGURA 2.24 – DESENHO ESQUEMÁTICO DA VARREDURA DO SISTEMA POR ESPELHOS.....	50
FIGURA 2.25 – PRINCÍPIO DE OPERAÇÃO DE UM SISTEMA DE FIBRAS.....	51
FIGURA 2.26 – PADRÃO DE VARREDURA DO SISTEMA TOPOSYS.....	51
FIGURA 2.27 – MÚLTIPLOS RETORNOS DE PULSOS EMITIDOS.....	52

FIGURA 2.28 – SEQUÊNCIA QUADROS - SIMULAÇÃO DE ENCHENTE.	55
FIGURA 2.29 – PROJETO DE ENGENHARIA PARA CONTRUÇÃO DE RODOVIA.	55
FIGURA 2.30 – ELABORAÇÃO DE PLANOS DIRETORES (LOTEAMENTOS).....	56
FIGURA 2.31 - MODELOS DE TRECHOS EM TRÊS DIMENSÕES.	57
FIGURA 2.32 - IMAGENS DE INTENSIDADE DE RETORNO DOS FEIXES.....	57
FIGURA 3.1 - MAPA DE LOCALIZAÇÃO DA AREA DE ESTUDO.....	60
FIGURA 3.2 – LOCALIZAÇÃO DAS SUB-ÁREAS SELECIONADAS.	62
FIGURA 3.3 – IMAGEM HIPSOMETRICA DA SUBÁREA SELECIONADA 1.	63
FIGURA 3.4 – IMAGEM HIPSOMETRICA DA SUBÁREA SELECIONADA 2.	64
FIGURA 3.5 – IMAGEM HIPSOMETRICA DA SUBÁREA SELECIONADA 3.	64
FIGURA 3.6 – IMAGEM HIPSOMETRICA DA SUBÁREA SELECIONADA 4.	65
FIGURA 3.7 – IMAGEM HIPSOMETRICA DA SUBÁREA SELECIONADA 5.	65
FIGURA 3.8 – IMAGEM HIPSOMETRICA DA SUBÁREA SELECIONADA 6.	66
FIGURA 3.9 – IMAGEM HIPSOMETRICA DA SUBÁREA SELECIONADA 7.	67
FIGURA 3.10 – IMAGEM HIPSOMETRICA DA SUBÁREA SELECIONADA 8.	67
FIGURA 3.11 – IMAGEM HIPSOMETRICA DA SUBÁREA SELECIONADA 9.	68
FIGURA 3.12 – INTERFACE DO PROGRAMA PARA CARGA DE DADOS.....	69
FIGURA 3.13 – INTERFACE DO PROGRAMA DE GENERALIZAÇÃO.	70
FIGURA 3.14 - CRITÉRIO PARA REMOÇÃO DE UM VÉRTICE.....	71
FIGURA 4.1 – PROGRESSO DE SIMPLIFICAÇÃO DA MALHA DA ÁREA 1.....	74
FIGURA 4.2 – PROGRESSO DE SIMPLIFICAÇÃO DA MALHA DA ÁREA 2.....	76
FIGURA 4.3 – DETERMINAÇÃO DO ERRO (RMS) VERTICAL.....	77
FIGURA 4.4 – PROGRESSO DE SIMPLIFICAÇÃO DA MALHA DA ÁREA 3.....	78
FIGURA 4.5 – PROGRESSO DE SIMPLIFICAÇÃO DA MALHA DA ÁREA 4.....	79
FIGURA 4.6 – PROGRESSO DE SIMPLIFICAÇÃO DA MALHA DA ÁREA 5.....	81
FIGURA 4.7 – PROGRESSO DE SIMPLIFICAÇÃO DA MALHA DA ÁREA 6.....	82
FIGURA 4.8 – PROGRESSO DE SIMPLIFICAÇÃO DA MALHA DA ÁREA 7.....	84
FIGURA 4.9 – PROGRESSO DE SIMPLIFICAÇÃO DA MALHA DA ÁREA 8.....	85
FIGURA 4.10 – PROGRESSO DE SIMPLIFICAÇÃO DA MALHA DA ÁREA 9.....	87
FIGURA 4.11 – ACHATAMENTO DOS TELHADOS NOS MODELOS 3D DA ÁREA 9.	88
FIGURA 4.12 – ÁREAS SELECIONADAS PARA O COMPARATIVO.....	88
FIGURA 4.13 – GRÁFICO COMPARATIVO DA REDUÇÃO DE PONTOS.	89
FIGURA 4.14 – GRÁFICO COMPARATIVO DOS ERROS DERIVADOS.....	89
FIGURA 4.15 – GRÁFICO COMPARATIVO DO TEMPO DE PROCESSAMENTO.....	90

TABELAS

TABELA 3.1 – VÉRTICES DO POLÍGONO QUE DELIMITAM A ÁREA.....	60
TABELA 3.2 – DETALHES E CARACTERÍSTICAS DAS ÁREAS SELECIONADAS.	62
TABELA 4.1 – RESULTADOS DA SIMPLIFICAÇÃO PARA A ÁREA 1.	73
TABELA 4.2 – RESULTADOS DA SIMPLIFICAÇÃO PARA A ÁREA 2.	75
TABELA 4.3 – RESULTADOS DA SIMPLIFICAÇÃO PARA A ÁREA 3.	76
TABELA 4.4 – RESULTADOS DA SIMPLIFICAÇÃO PARA A ÁREA 4.	78
TABELA 4.5 – RESULTADOS DA SIMPLIFICAÇÃO PARA A ÁREA 5.	80
TABELA 4.6 – RESULTADOS DA SIMPLIFICAÇÃO PARA A ÁREA 6.	81
TABELA 4.7 – RESULTADOS DA SIMPLIFICAÇÃO PARA A ÁREA 7.	83
TABELA 4.8 – RESULTADOS DA SIMPLIFICAÇÃO PARA A ÁREA 8.	84
TABELA 4.9 – RESULTADOS DA SIMPLIFICAÇÃO PARA A ÁREA 9.	86

ANEXOS

ANEXO 1 – MÍDIA DIGITAL CONTENDO OS DADOS DA PESQUISA.....	104
--	-----

RESUMO

Uma das principais vantagens do sistema de varredura a laser é o alto grau de detalhe com o qual pode ser mapeada uma porção do terreno. Este detalhamento decorre da alta densidade de pontos medidos, o que facilita a identificação de objetos e da topografia. No entanto, a grande quantidade de medições torna-se redundante em regiões planas, onde a densidade de pontos necessária para descrever a superfície poderia ser menor. Neste trabalho, é apresentado um método de redução de pontos oriundos da aquisição de modelos digitais de superfície através da tecnologia LIDAR. O método se baseia na análise de superfícies poligonais definidas por uma rede irregular de triangulação onde, num processo iterativo, pontos considerados redundantes são eliminados pela análise da vizinhança imediata descrita pelos triângulos adjacentes. Para avaliar o desempenho do algoritmo e a qualidade final dos resultados, experimentos em áreas recobertas por dados de medições tridimensionais derivadas do LIDAR são apresentados.

ABSTRACT

One of the main advantages of airborne laser scanner systems is the high degree of detail that a portion of the land can be mapped. This detailed description of the surface is caused by the high density measurement of the points, which makes it easier to identify objects and describe the topography. However, the great amount of measurements becomes redundant in plain regions, where the density of points to describe the surface could be smaller. In this work, a method aimed at the reduction of the amount of points within a digital surface model produced using LIDAR is presented. The method is based on the analysis of polygon surfaces defined by a triangulation. The redundant points are eliminated by analyzing the neighborhood of each point, described by the adjacent triangles. To evaluate the performance of the algorithm, two tests, with three-dimensional measurements derived from subsets of a LIDAR survey are used for further discussion.

1 INTRODUÇÃO

1.1 CONSIDERAÇÕES GERAIS

Com o aumento crescente da disponibilização de dados provenientes de Laser Scanner e a utilização de técnicas de generalização cartográfica, métodos que permitam a geração de modelos digitais em multi-resolução vêm sendo cada vez mais necessários. No entanto, após a realização da filtragem de pontos em malhas triangulares, utilizando operações de simplificação, as características relevantes dos terrenos devem ser preservadas.

A importância deste assunto recairá sobre temas teóricos e polêmicos em que a filtragem de pontos para a modelagem de terreno na resolução adequada permite a representação, manipulação e visualização de grandes volumes de dados espaciais em resolução e precisão desejados, e com boa qualidade final em relação aos dados iniciais.

Esta é a principal questão que polariza usuários de dados digitais de Terreno, principalmente em técnicas provenientes de mapeamento topográfico por laser scanner (*LIDAR*), em níveis de detalhe e precisão desejados. Para muitas aplicações, uma aproximação pouco detalhada da superfície do terreno pode ser suficiente, e permitirá uma maior rapidez computacional. Por outro lado, funções polinomiais de maior ordem podem ser empregadas para a obtenção de uma representação realística de superfícies contínuas. Entretanto requerem maior capacidade e tempo de processamento.

DE FLORIANI *et al.* (1996) e DE BERG & DOBRINDT (1998) conceberam que a representação de uma superfície em um nível arbitrário de detalhe pode ser realizada tanto pela inserção de pontos significativos em um modelo com poucos detalhes, ou pela remoção de pontos menos significativos de um modelo com excesso de detalhes.

A maioria dos métodos de simplificação de superfícies encontrados na literatura pode ser classificada como métodos de refinamento, e decimação (PEDRINI, 2000). O método de refinamento principia com uma aproximação grosseira da superfície e repetidamente adiciona pontos na triangulação, até que o modelo satisfaça um critério de aproximação pré-especificado. O método de decimação reduz o nível de detalhamento do modelo completo, ou seja, contendo todo o conjunto de pontos e o simplifica iterativamente até que o critério de aproximação desejado seja atingido.

Muitos critérios foram propostos para avaliação da diferença entre o conjunto de dados originais em relação ao simplificado, entretanto os algoritmos que utilizam métricas de erros globais são geralmente lentos, enquanto os algoritmos que geram aproximações menos

compactas ou com qualidade mais baixa podem ser mais rápidos (HECKBERT & GARLAND, 1997). Esta é uma lacuna que ainda pode ser investigada no conhecimento científico.

A idéia principal do método proposto é produzir uma representação de baixa resolução tal que, para uma dada tolerância seja possível a extração de um modelo aproximado em um processo rápido e prático. A estrutura de dados deve armazenar apenas uma malha triangular e uma seqüência ordenada de vértices para a simplificação.

A proposição desta pesquisa está no sentido de realizar uma transição do que se sabe a respeito do assunto, para o que ainda pode estar obscuro no conhecimento científico onde o objetivo principal de um algoritmo de decimação é reduzir o número de triângulos de uma malha, preservando as principais feições com a melhor definição possível.

Esta pesquisa inicialmente descreve os principais métodos para a criação de um modelo de terreno. O método proposto é descrito em detalhe e aplicado a conjuntos de dados reais. Problemas sobre a implementação e os resultados experimentais obtidos são apresentados e discutidos. Além disso, algumas considerações são feitas sobre a caracterização da contribuição do trabalho.

1.2 OBJETIVO GERAL

Com a presente pesquisa tem-se como objetivo principal o desenvolvimento de um algoritmo para a flexibilização na geração de modelos de superfície em multi-resolução através da filtragem de pontos a partir de dados digitais auferidos com o sistema *laser¹ scanner²* aerotransportado.

Busca-se estabelecer uma área pré-selecionada, em território recoberto pelo mapeamento digital a laser scanner, aplicando técnicas de recorte conhecidas, com a finalidade de discernir a escolha de uma abordagem cujos parâmetros propiciem um balanço adequado entre a acuidade e o tempo necessário para a obtenção de modelos generalizados que atendam o fim proposto.

1.3 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Os resultados buscados são necessários para ampliar as condições de competitividade e sustentabilidade futuras deste importante segmento da Cartografia, permitindo maior

¹ Fonte de luz monocromática, muito intensa, coerente e colimada, na qual a emissão de radiação se faz pelo estímulo de um campo externo. Fonte: Novo Dicionário Eletrônico Aurélio versão 5.0, 2004.

² Qualquer aparelho capaz de captar imagens e convertê-las em um conjunto correspondente de sinais elétricos. Fonte: Novo Dicionário Eletrônico Aurélio versão 5.0, 2004.

democratização no uso dos dados topográficos digitais obtidos por laser scanner. O que se fará por meio dos seguintes objetivos específicos:

1. Desenvolver um algoritmo de generalização para derivação de modelos com menor número de pontos;
2. Aplicar a metodologia de redução de pontos em modelos formados por dados de diferentes áreas;
3. Ponderar sobre o efeito da existência de erros sistemáticos inerentes do sistema LIDAR com o emprego da metodologia;
4. Avaliar as precisões obtidas com os modelos resultantes da aplicação do método proposto em classes de redução (densidade) de pontos;
5. Comprovar a viabilidade da utilização das bibliotecas de programação concebidas e disponíveis em SIG (Sistema de Informações Geográficas);
6. Promover o uso dos dados da tecnologia Laser Scanner em pesquisas e projetos acadêmicos através da disponibilização do programas desenvolvidos.

1.4 JUSTIFICATIVA

O sistema aerotransportado de mapeamento a laser, denominado LIDAR - (*Light Detection And Ranging*), faz a rápida aquisição de um grande volume de dados sobre a variação da superfície de uma região sob a forma de pontos com coordenadas tridimensionais, permitindo a representação da superfície com alta precisão e detalhamento. No entanto, o uso de dados altimétricos provenientes do LIDAR, resulta em modelos digitais muito densos, podendo conter milhares de pontos. Esta grande quantidade de dados torna muito difícil a sua manipulação. Desta forma, em todas as aplicações, há uma relação paradoxal entre a precisão do modelo de superfície e a velocidade requerida para processamento e visualização (GARLAND, 1999a). Para a redução do tempo de resposta no processamento a um determinado nível, tendo em vista uma aplicação específica, aproximações do modelo original podem ser geradas. Para este propósito, diferentes algoritmos de simplificação de superfícies ou de malhas triangulares estão disponíveis.

A simplificação é especialmente útil para fazer com que os processos de armazenamento, de transmissão, de processamento e de visualização sejam mais eficientes. Uma aproximação compacta de uma feição pode reduzir os requisitos mínimos de memória e também aumentar significativamente a velocidade de transmissão de dados em rede (GARLAND & HECKBERT, 1997). Pode também acelerar diversos processamentos envolvendo informações sobre formato da superfície, tais como análise de elementos finitos, detecção de colisão, testes de

visibilidade, reconhecimento automático de feições e visualização. Durante o processo de simplificação, alguns objetos no Modelo Digital de Elevação (MDE) tornam-se descaracterizados e têm suas bordas suavizadas. Desta forma, métodos de redução de pontos apropriados devem ser aplicados, assegurando a manutenção das feições de interesse presentes no modelo.

Para maior efetividade do método de generalização dos dados e devido à importância e responsabilidade das aplicações envolvendo MDEs, faz-se necessário fornecer estes modelos com níveis de precisão adequados e conhecidos. Hoje em dia, algumas regras práticas disponíveis estão razoavelmente adequadas e testadas (KRAUS et al, 2004). Além disto, dado que os modelos são criados por programas que aplicam algoritmos que empregam o método dos mínimos quadrados, regras de propagação de erros baseadas nas variâncias e covariâncias podem ser utilizadas para determinar a qualidade dos modelos digitais após a simplificação.

1.5 APRESENTAÇÃO DA ESTRUTURA DO TRABALHO

O capítulo 2 tem por objetivo apresentar o estado da arte e a fundamentação teórica encontrada na literatura para nortear e definir os principais objetos de estudo deste trabalho. Este capítulo inicia-se com as definições de Modelo Digital de Terreno, mostrando os principais conceitos formadores da teoria da construção de modelos. Em seguida é apresentado o estado da arte dos principais métodos de simplificação de superfícies, desde seus primórdios com a simplificação de curvas seguindo-se até a apresentação dos métodos de simplificação de malhas triangulares onde as operações de refinamento e decimação são empregadas. Subseqüentemente os principais métodos encontrados na literatura para avaliação da qualidade dos modelos generalizados são apresentados e discutidos. Por fim é apresentada a Tecnologia de Mapeamento a Laser, com as precisões atingidas e as principais aplicações beneficiadas por esta tecnologia.

O capítulo 3 apresenta a metodologia empregada para a realização dos experimentos, iniciando-se pela apresentação e descrição da área de estudo e os critérios adotados para a sua adoção. Em seguida são apresentadas técnicas empregadas para a preparação e compilação dos dados, onde sub-áreas foram selecionadas para o trabalho e os materiais e métodos para o manuseio e geração das triangulações iniciais. Finalmente o objeto principal desta pesquisa é apresentado, seguido pelos critérios adotados para a avaliação e análise dos erros.

No capítulo 4, procedem-se a integração e avaliação dos resultados teóricos obtidos, sob o ponto de vista da sua validade científica e operacionalidade. Finalmente são apresentadas as conclusões e recomendações para trabalhos futuros no capítulo 5.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 MODELAGEM DIGITAL DE TERRENO

2.1.1 Definições

Terreno é o conjunto de características físicas de uma porção da terra e sua topografia é definida como as características naturais ou físicas e seus relacionamentos estruturais (ANDREWS, 1996). Se a crosta terrestre fosse regular, poderia ser perfeitamente modelada por funções matemáticas, mas é irregular e apesar de contínua, requer o uso de modelos baseados em amostras da superfície (KUMLER, 1994).

Um Modelo Digital de Terreno (MDT) é uma representação matemática computacional da distribuição de um fenômeno espacial que ocorre dentro de uma região da superfície terrestre (FELGUEIRAS, 1999). Dados de relevo, informações geológicas, levantamentos de profundidades do mar ou de um rio, estações de informação meteorológica e dados geofísicos e geoquímicos são exemplos típicos de fenômenos representados por um MDT.

Dentre alguns usos do MDT pode-se citar (BURROUGH, 1986):

- Armazenamento de dados de altimetria para gerar mapas topográficos;
- Análises de corte-aterro para projeto de estradas e barragens, seções transversais, áreas, volumes;
- Elaboração de mapas de declividade e exposição para apoio à análise de geomorfologia e erodibilidade;
- Análise de variáveis geofísicas e geoquímicas;
- Apresentação tridimensional (em combinação com outras variáveis).

2.1.2 Características dos Modelos Digitais de Terreno

Os seguintes parágrafos descrevem alguns dos problemas que podem ser resolvidos a partir dos MDT. A obtenção de várias características de um MDT pode ajudar na formulação da solução para muitos problemas nas engenharias. A estrutura de dados e procedimentos de um MDT pode oferecer o suporte necessário à computação destas características do terreno. Alguns exemplos de características são:

- Elevação
- Declividade (Gradiente)

- Aspecto (exposição)
- Visibilidade
- Drenagem

Declividade é a inclinação da superfície do terreno em relação ao plano horizontal. Considerando um modelo numérico de terreno (MNT) de dados altimétricos extraídos de uma carta topográfica e traçando um plano tangente a esta superfície num determinado ponto (P), a declividade em P corresponderá a inclinação deste plano em relação ao plano horizontal.

Em algumas aplicações geológicas, geomorfológicas entre outras, faz-se necessário encontrar regiões pouco acidentadas ou regiões que estejam expostas ao sol durante um determinado período do dia. Para responder estas questões um mapa de declividade conta com duas componentes: gradiente e aspecto.

O gradiente é a taxa máxima de variação no valor da elevação, pode ser medido em grau (0 a 90°) ou em porcentagem (%), e o aspecto (ou exposição) é a direção dessa variação medida em graus (0 a 360°).

As duas componentes de declividade (gradiente e aspecto) são calculadas a partir de derivadas parciais de primeira e segunda ordem obtidas de uma grade (retangular ou triangular) resultante dos valores de altitude da superfície. Para cada ponto desta grade são calculadas as derivadas parciais, computando-se os valores de altitude em uma janela de 3 x 3 pontos que se desloca sucessivamente sobre a grade. O resultado corresponde a duas novas grades, uma de gradiente e outra de exposição.

A declividade é calculada a partir da equação (FELGUEIRAS, 1999):

$$D = \arctan \sqrt{\left(\frac{\partial z}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial z}{\partial y}\right)^2} \quad (1)$$

Onde z é a altitude e x e y as coordenadas nos eixos cartesianos.

O aspecto é dado pela equação (FELGUEIRAS, 1999):

$$\tan A = \left(\frac{-\partial z}{\partial x} / \frac{\partial z}{\partial y} \right), (-\pi < A < \pi) \quad (2)$$

Estas derivadas parciais são calculadas diferentemente de acordo com o tipo de grade original.

HAMMOND (1964) notou que a declividade possui grande influência no uso do solo. Uma das variáveis empregadas na classificação da forma do terreno foi a frequência das baixas declividades. Sob um limite de declividade superior a 12%, o cultivo agrícola mecanizado se torna dificultado, os efeitos da erosão se tornam problemáticos e o movimento de tratores impedido devido à dificuldade de locomoção. Um MDT deve ser capaz de prover a declividade em um dado ponto e permitir a geração de mapas de declividade para toda a superfície em estudo.

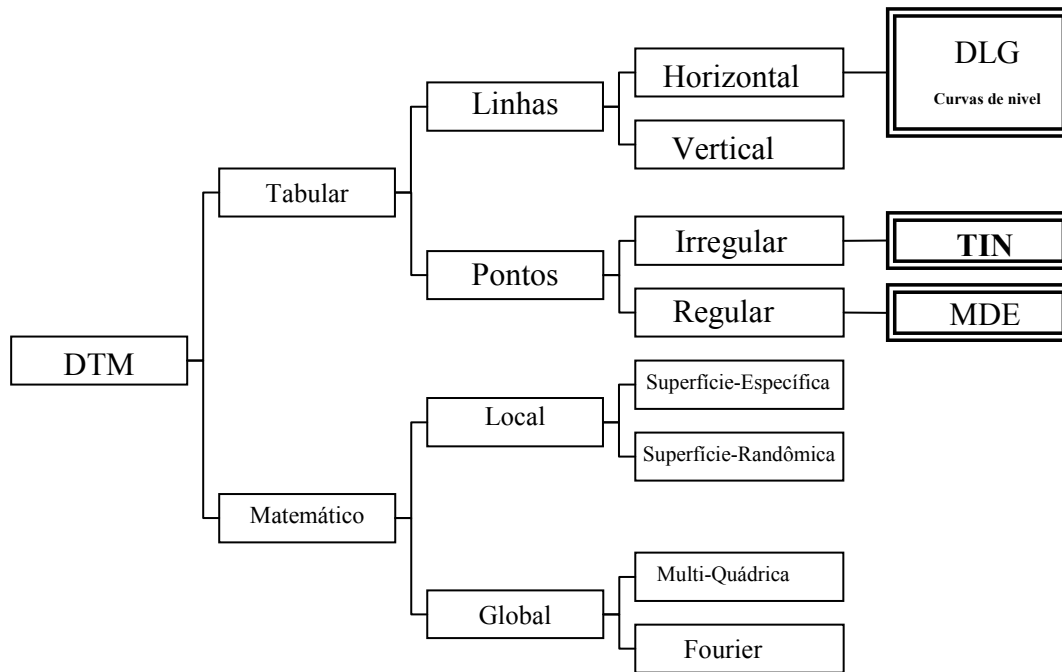
Segundo DE BERG e VAN KREVELD (1993), um mapa de elevações pode ser construído a partir de um MDT. Este mapa pode ser utilizado para trazer respostas através de pesquisas tais como encontrar rotas e melhores caminhos aplicando-se restrições de declividade. Uma rota que satisfaça restrições de elevação pode ser uma boa opção ao invés da utilização da menor distância Euclidiana isoladamente.

DE FLORIANI *et al.* (1994) concentraram esforços em estudos para solução de problemas relacionados a obstáculos em linhas de visada. Pesquisas para locação otimizada de torres de transmissão de microondas foram realizadas, para que o sinal não fosse obstruído, uma vez que o sinal se propaga em linha reta. Deste modo, é crucial que haja intervisibilidade entre os pontos, para a propagação das ondas, permitindo o envio e recebimento de sinais entre as torres.

O campo de visão (*viewshed*) de um ponto no terreno é a área do terreno que pode ser visível a partir do ponto considerado. FISHER (1994) considerou uma variante do campo de visão binário. A fumaça de uma floresta em chamas pode estar na área visível de uma torre de observação mesmo que o fogo não esteja na linha de visada. A mesma situação aplica-se à barreira criada por uma grande edificação construída abaixo da linha do horizonte. Este novo método é capaz de determinar a distância entre o horizonte e a superfície. A altura da fumaça de um incêndio florestal ou a altura de uma edificação pode ser comparada com esta distância para a obtenção mais precisa da área visível que um campo de visão simples utilizando somente a linha de visada.

MARK (1978) propôs uma tipologia para caracterização da estrutura de dados de um MDT com uma classificação inicial baseada no modo como os valores de elevação são obtidos. A FIGURA 2.1 reproduz esta tipologia.

FIGURA 2.1 - TIPOLOGIA DE UM MDT.



FONTE: ADAPTADO DE MARK, 1978.

As elevações no tipo discreto de estrutura de dados são obtidas pela interpolação entre os valores mais próximos no espaço, enquanto a estrutura de dados contínua obtém a elevação a partir da avaliação de uma função polinomial de modelagem no espaço. As duas primeiras subdivisões da árvore mostrada se assemelham bastante, já que as interpolações podem ser consideradas como resultantes da avaliação de uma função. A estrutura digital de uma função contínua é representada por um conjunto discreto de coeficientes (MARK, 1978).

Uma estrutura discreta de dados requer um método de interpolação. O método de interpolação depende da estrutura de dados e do grau de continuidade requerido. A escolha do método de interpolação pode afetar a continuidade da superfície e seus derivados. Por exemplo, o modelo de rede irregular triangular (TIN), permite um método de interpolação linear. A superfície deste modelo é discreta, porém a sua declividade é equivalente.

2.1.3 Modelagem

Para a representação de uma superfície real no computador é indispensável elaborar e criar um modelo digital, que possa ser descrito por equações analíticas ou por uma rede (grade) de pontos, de modo a transmitir ao usuário as suas características espaciais (FELGUEIRAS, 1999).

A criação de um modelo digital de terreno corresponde a uma nova maneira de enfocar o problema da elaboração e implantação de projetos. A partir dos modelos (grades) é possível calcular diretamente volumes, áreas, desenhar perfis e secções transversais, gerar imagens sombreadas ou em níveis de cinza, gerar mapas de declividade, gerar fatiamentos nos intervalos desejados e perspectivas tridimensionais.

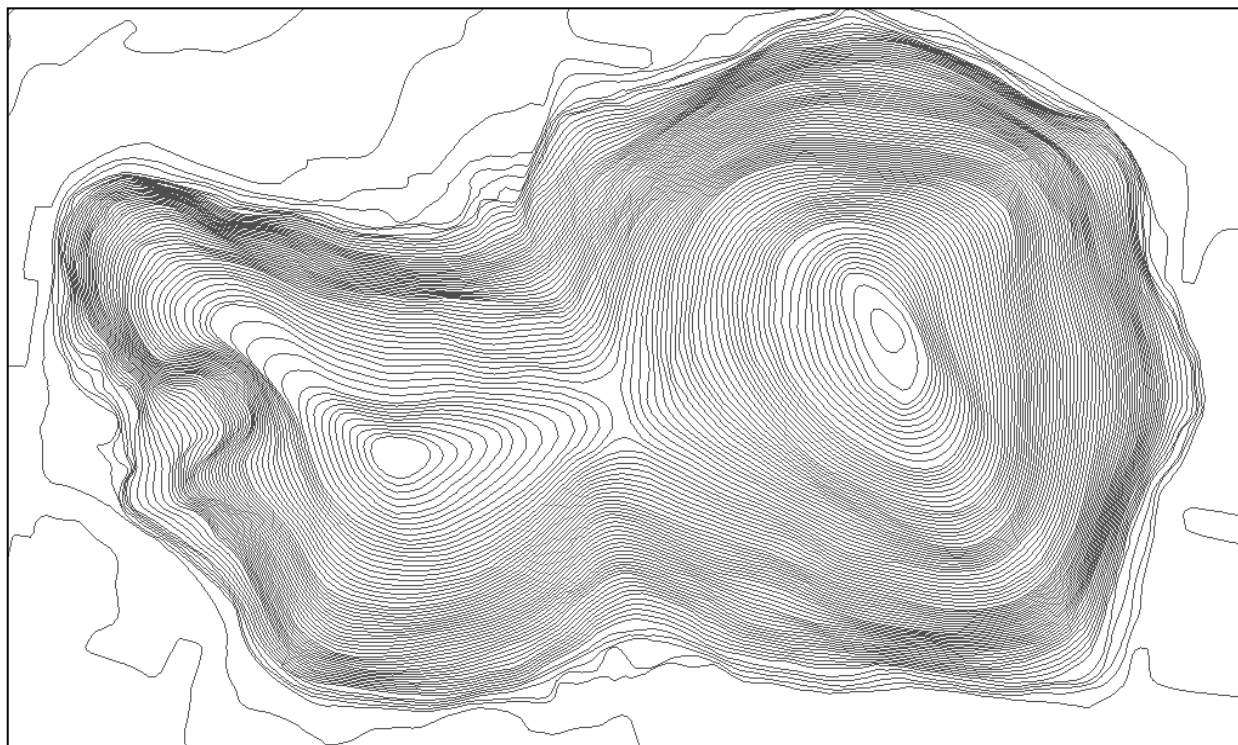
A modelagem envolve a criação de estruturas de dados e a definição de superfícies de ajuste para os elementos dessas estruturas, para obtenção de uma função que possa ser definida para toda a região de estudo. Essa função nem sempre é contínua e diferenciável para todos os pontos de seu domínio espacial. Por exemplo, dados de altimetria podem ter descontinuidades formadas por precipícios e, neste caso, é comum utilizar funções lineares ou funções definidas dentro de sub-regiões de interesse.

Daí a classificação dos modelos em globais ou locais. Os modelos globais são representados por uma função definida utilizando-se todos os elementos do conjunto amostral. Os modelos locais utilizam funções cujos coeficientes são definidos por elementos amostrais escolhidos dentro de uma região local de interesse. Essas regiões locais podem ser definidas por raios de influência ou por quantidade de amostras vizinhas.

2.1.4 Grafos de Linhas Digitais

O termo Grafos de Linhas Digitais vem do termo inglês *Digital Line Graphs* – DLG. Este modelo é composto por um conjunto de curvas de nível. A FIGURA 2.2 mostra uma vista em perspectiva de um DLG. Cada linha é uma lista de coordenadas x, y de vértices que possuem a mesma cota z (ANDREWS, 1996).

FIGURA 2.2 - GRAFOS DE LINHAS DIGITAIS - DLG



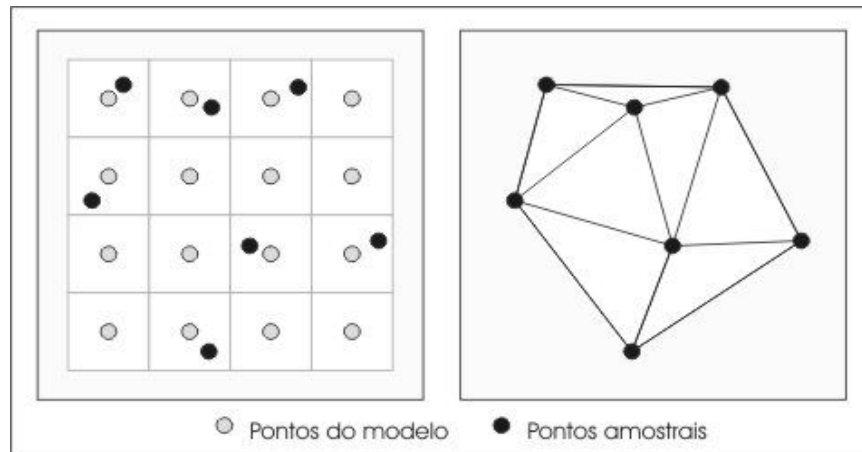
Informações da topografia e do terreno são comumente armazenadas de forma não automatizada em mapas em papel contendo curvas de nível (EVANS, 1972). Arquivos digitais contendo curvas de níveis são amplamente disponibilizados já que a digitalização de curvas de nível a partir de mapas analógicos existentes é um método de aquisição bastante empregado. Outros modelos de terrenos são construídos a partir de curvas de nível devido a sua disponibilidade. As curvas de nível podem ser construídas através de outros modelos digitais devido principalmente ao fato de que as curvas de nível são representações visuais familiares para a visualização da superfície topográfica (KUMLER, 1994).

As características intrínsecas do terreno podem ser determinadas facilmente se dependessem apenas de uma única curva de nível. Infelizmente grande parte destas características, como as mostradas anteriormente, é muito mais difícil de se obter por requerer a identificação das curvas de nível mais próximas (EVANS, 1972).

2.1.5 Modelos de Grade

Os modelos de grade mais utilizados para a geração de modelos digitais de elevação são: os de grade regular retangular, que são conhecidos como MDE, que vem do inglês DEM - *Digital Elevation Model* e os de grade irregular triangular. O termo TIN, iniciais de “*Triangular Irregular Network*”, é o mais usado para se referir ao modelo de grade irregular triangular.

FIGURA 2.3 - MODELO MDE (À ESQUERDA) E MODELO TIN (À DIREITA)

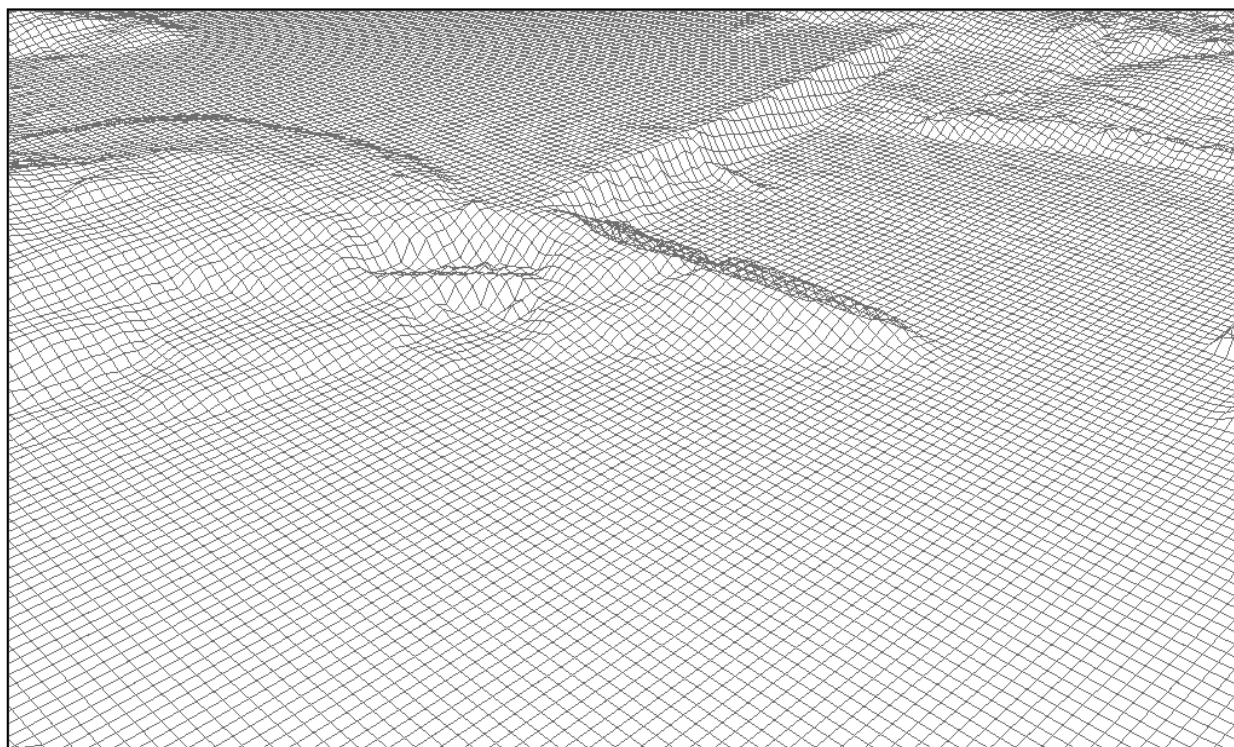


O processo de geração de um modelo de grade compreende a construção de uma malha, regular ou irregular, e a definição de funções locais de interpolação (FIGURA 2.3). Essas funções são definidas para cada elemento da malha. Assim para cada elemento básico da grade, retângulo ou triângulo, define-se uma função de interpolação que é válida para os pontos internos ao elemento. Esse processo é conhecido como ajuste de superfície (ANDREWS, 1999). Cada função de ajuste, geralmente um polinômio, é definida utilizando-se os vértices dos elementos e em muitos casos os vértices dos elementos vizinhos também. A seguir serão apresentados as definições e conceitos com relação aos modelos de grade retangular e triangular.

2.1.6 Modelos de Grade Regular Retangular

Um Modelo Digital de Elevação (MDE) ou grade regular retangular é uma matriz de pontos com coordenadas implícitas na grade (ANDREWS, 1999). Outras definições são encontradas para este tipo de modelo como a sugerida por FELGUEIRAS (1999) que define modelo de grade regular como sendo um poliedro de faces retangulares. A FIGURA 2.4 ilustra um MDE em vista perspectiva onde as linhas fazem a conexão entre os vértices vizinhos.

FIGURA 2.4 - MODELO DIGITAL DE ELEVAÇÃO (MDE)



As grades regulares são muito utilizadas pela sua conveniência tanto na programação como também no armazenamento em meio digital (MARK, 1978). Muitos problemas que requerem o uso dos modelos de grade regular se beneficiam da resolução espacial fixa nos dados de um MDE. As informações necessárias sobre uma área restrita ou uma vizinhança podem ser facilmente selecionadas uma vez que a sequência de armazenamento é conhecida (EVANS, 1972). Porém a resolução fixa é também uma desvantagem, pois pode impedir uma adequada representação em regiões de alta rugosidade além de se apresentar redundante em áreas planas.

O processo de geração de um MDE consiste em estimar a altitude de cada ponto da grade a partir do conjunto de amostras de entrada, onde cada vértice requer apenas o armazenamento da coordenada z . Quando se faz uso de todas as amostras para interpolar cada ponto da grade diz-se que a interpolação é global. Em geral o conjunto de amostras pode ser muito grande e não homogêneo, como é o caso dos dados adquiridos pelo LIDAR, que fornece facilmente milhões de pontos amostrais, tornando a interpolação global pouco apropriada em relação ao tempo de processamento computacional e precisão do modelo.

Assim é muito comum utilizar-se interpolação local para o cálculo da altitude de cada elemento da grade. Neste caso, o valor da altitude de cada elemento da grade é estimado a partir de uma quantidade preestabelecida de amostras vizinhas mais próximas do elemento.

Um modelo de grade regular retangular pode ser gerado a partir de um conjunto de amostras pontuais regularmente espaçadas. O processo de geração de uma grade regular retangular a partir de outra grade também regular retangular, objetivando uma melhora na resolução da grade, é conhecido como refinamento da grade.

Para a geração de grades regulares retangulares a partir de amostras irregularmente espaçadas é comum definir funções de interpolação simples e utilizá-las localmente. É importante notar que a estimativa da coordenada z de cada ponto da grade é realizada a partir de amostras vizinhas locais, mas uma análise global das amostras é sempre necessária para se encontrar essa vizinhança (FELGUEIRAS, 1999).

Os métodos interpoladores existentes para a geração de malhas regulares a partir de um conjunto de amostras irregulares podem ser classificados em dois grupos principais: Interpoladores de tendência e os de Média Móvel.

Os Interpoladores de Tendência representam as variações do fenômeno através de regressões polinomiais, ajustando uma superfície sobre todos os dados amostrais, minimizando-se o erro de ajuste global. Já os de Média móvel baseiam-se na média das cotas de amostras vizinhas. Este é um dos esquemas de interpolação mais simples para estimação dos valores de cotas dos pontos de uma grade retangular. Algumas variações deste esquema básico de interpolação podem ser encontradas, tais como: vizinho mais próximo; média simples; média ponderada; média ponderada por quadrante e; média ponderada por quadrante e por cota (FELGUEIRAS, 1999).

Muitas comparações recentes favoráveis entre MDE e outros tipos de MDT focaram na relação existente entre a velocidade de processamento e o custo de armazenagem. Mais tarde, outras comparações envolveram a precisão e o espaço de armazenamento (KUMLER, 1994).

2.1.7 Modelos de Grade Irregular Triangular

PEUCKER *et al.* (1978), foram motivados a desenvolver um modelo alternativo devido a problemas com o Modelo Digital de Elevações. Um MDE necessita de uma grade regular de alta resolução para modelar precisamente um terreno muito acidentado. Entretanto em regiões planas esta alta resolução pode gerar grande redundância. Além disto, a estrutura de dados de um MDE não corresponde a “estrutura do fenômeno” (MARK, 1978). O desenvolvimento de uma estrutura de dados para representação de um MDT deve refletir o terreno que representará. Diferente da estrutura MDE que foi concebida tendo em vista os problemas e os equipamentos disponíveis da época. Entretanto a vizinhança de um MDE pode ser reconstruída sem a

necessidade de busca no modelo como um todo. Para que qualquer alternativa possa ser bem sucedida deverá armazenar esta informação explicitamente.

Uma Grade Irregular Triangular (TIN) é um conjunto de vértices irregularmente distribuídos conectados por linhas retas para formar um conjunto de faces triangulares adjacentes não sobrepostas (MARK, 1978). Diferente da geração de grade regular, os valores da cota dos vértices dos triângulos que irão compor a malha triangular não necessitam de interpolações, entretanto cada vértice requer o armazenamento do valor de cada uma das três coordenadas das amostras originais. A FIGURA 2.5 mostra uma vista perspectiva de uma TIN.

FIGURA 2.5 - GRADE IRREGULAR TRIANGULAR (TIN)



PEUCKER *et al.* (1978) basearam a TIN em vértices específicos da superfície. Cristas e vales que conectam os picos das montanhas, depressões e trilhas formam o esqueleto da TIN. Alguns vértices adicionais foram acrescentados para aumentar a precisão em pontos específicos e este conjunto é então conectado em uma triangulação de Delaunay.

Apesar dos MDE possuírem uma maior continuidade na descrição das elevações e de haver uma maior disponibilidade, os modelos TIN têm as vantagens de sua eficiência no armazenamento e oferecerem um melhor suporte a análises de intervisibilidade e também na extração de feições hidrológicas (LEE, 1991).

Existem algumas variações dos modelos TIN com diferentes distribuições e critérios de triangulação. As seções seguintes farão uma breve revisão sobre triangulações e mais especificamente sobre a triangulação de Delaunay.

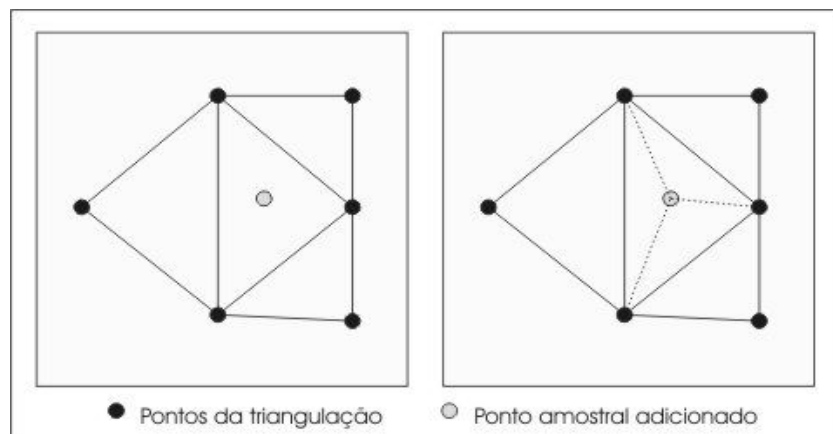
2.1.8 Triangulações

Uma triangulação de um conjunto de vértices V é um conjunto de triângulos fechados T formados por linhas que conectam pares de vértices em V satisfazendo as seguintes condições (DYN *et al*, 1990):

- O conjunto de todos os vértices dos triângulos em T é V ;
- Cada linha de um triângulo em T contém apenas 2 vértices em V ;
- A união de todos os triângulos em T é igual à extensão de V ;
- A interseção dos interiores de dois triângulos diferentes quaisquer em T é o conjunto vazio.

LEE & SCHACHTER (1980) apresentam um algoritmo iterativo para a construção de uma triangulação baseada em duas operações primitivas, adição de um vértice e substituição de uma diagonal. Na FIGURA 2.6, um novo vértice é conectado a cada um dos três vértices de seu triângulo envolvente na triangulação existente.

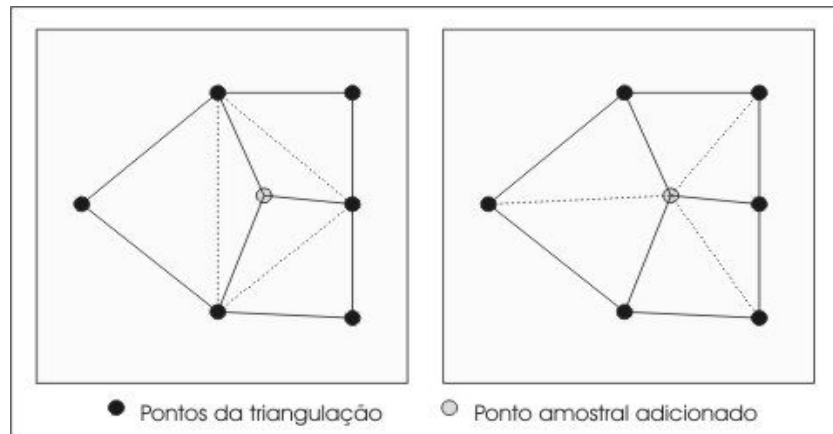
FIGURA 2.6 - ADIÇÃO DE UM VÉRTICE NA TRIANGULAÇÃO



FONTE: ADAPTADO DE ANDREWS, 1996.

Se o quadrilátero formado pela união de um novo triângulo e o seu vizinho é convexo, então este conterá uma diagonal alternativa. A linha diagonal deverá ser substituída pela alternativa quando necessário em um procedimento de otimização local. A FIGURA 2.7 mostra como a troca da diagonal é feita.

FIGURA 2.7 – TROCA DE DIAGONAIS NA TRIANGULAÇÃO



FONTE: ADAPTADO DE ANDREWS, 1996.

Diferentes triangulações podem ser definidas por procedimentos de otimização distintos. Se uma diagonal é substituída, dois novos triângulos são formados com quadriláteros que devem ser igualmente otimizados. Alguns dos muitos procedimentos para otimização local são listados a seguir:

- Minimizar a soma ou máxima do quadrado dos perímetros dividido pela área dos dois triângulos (LAWSON, 1972);
- Maximizar o ângulo mínimo nos dois triângulos (LEE & SCHACHTER, 1980);
- Minimizar o ângulo entre as normais dos dois triângulos (DYN *et al*, 1990);

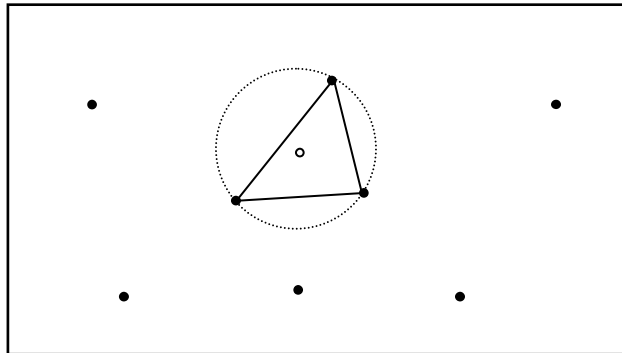
Uma função local em cada par de triângulos vizinhos pode ser utilizada como procedimento de otimização. Uma função global para a triangulação pode ser formada tanto pela utilização da máxima, quanto da soma das funções locais. Lawson provou que qualquer triangulação de um conjunto finito de vértices pode ser transformada em outra triangulação do mesmo conjunto através de um número finito de trocas de diagonais (LAWSON, 1972). Este teorema mostrou que qualquer triangulação pode ser transformada em uma triangulação que minimiza uma dada função de custo global. Entretanto, a minimização da função de custo local para cada diagonal não garante que a função de custo global será minimizada.

Há triangulações que não empregam um procedimento local de otimização. Um exemplo é a Triangulação de Peso Mínimo, que é originalmente chamada de *Minimum-Weight Triangulation* (PREPARATA & SHAMOS, 1985). Esta triangulação é formada pela minimização do comprimento total das linhas da triangulação. A minimização local do comprimento das linhas de cada par de triângulos não assegura a minimização do comprimento total.

2.1.9 A Triangulação de Delaunay

Um triângulo de Delaunay é um triângulo cujo círculo circunscrito não contém nenhum outro vértice em V . Esta propriedade é chamada de propriedade do círculo vazio. Uma triangulação de Delaunay é uma triangulação onde todo o triângulo em T é um triângulo de Delaunay. A FIGURA 2.8 ilustra a regra para criação de um triângulo de Delaunay.

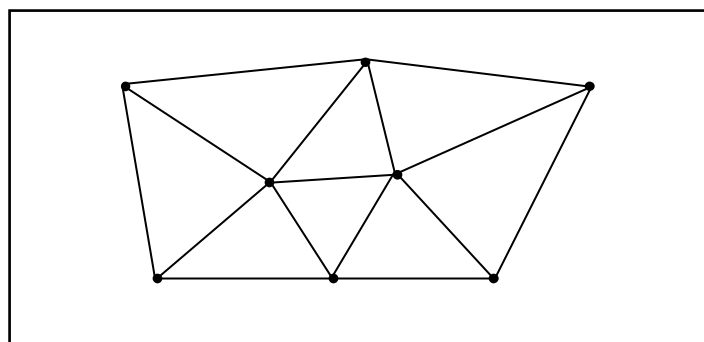
FIGURA 2.8 – TRIÂNGULO DE DELAUNAY



FONTE: ADAPTADO DE LEE & SCHACHTER, 1980.

Uma triangulação de Delaunay é baseada no diagrama de Voronoi. O diagrama de Voronoi para um conjunto de vértices V é um conjunto de células Voronoi, que são polígonos fechados, um para cada vértice. Cada célula de Voronoi contém todos os pontos mais próximos de seu centro que qualquer outro vértice em V . Por definição, uma linha entre duas células de Voronoi é eqüidistante de dois vértices. O ponto onde três linhas se encontram é eqüidistante de três vértices, ou seja, o seu baricentro (AURENHAMMER, 1991). A FIGURA 2.9 mostra uma triangulação de Delaunay para um dado conjunto de pontos.

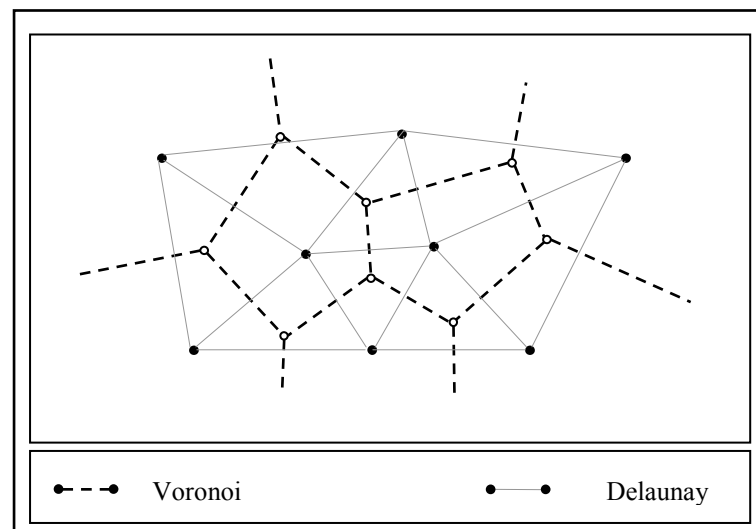
FIGURA 2.9 – TRIANGULAÇÃO DE DELAUNAY



FONTE: ADAPTADO DE LEE & SCHACHTER, 1980.

A triangulação de Delaunay é o grafo complementar do diagrama de Voronoi. Uma linha na triangulação de Delaunay faz a conexão dos vértices com as células de Voronoi adjacentes. Um triângulo na triangulação de Delaunay tem um circuncírculo com centro no ponto de encontro entre três linhas de Voronoi. Por definição, o diagrama de Voronoi é único para um dado conjunto de pontos. Como a triangulação de Delaunay é o complementar do diagrama de Voronoi, a triangulação de Delaunay também é única sob algumas hipóteses gerais de posição. A FIGURA 2.10 mostra o diagrama de Voronoi resultante para os mesmos pontos utilizado nos exemplos anteriores.

FIGURA 2.10 – DIAGRAMA DE VORONOI



FONTE: ADAPTADO DE LEE & SCHACHTER, 1980.

A triangulação de Delaunay pode ser construída através da utilização da regra do círculo vazio intrínseco na formação dos triângulos de Delaunay. Da mesma forma, pode ser construída empregando-se o procedimento de otimização local de maximização do ângulo mínimo em cada par de triângulos. Esta triangulação é utilizada para o ajuste de superfícies de faces triangulares em dados digitais de terreno, uma vez que minimiza o tempo de processamento e produz um resultado visual adequado (LEE & SCHACHTER, 1980). O modelo de triangulação resultante é apropriado para ser utilizado em aplicações que requerem a visualização de grandes volumes de dados em tempo real como em simuladores de voo.

2.2 SIMPLIFICAÇÃO DE SUPERFÍCIES

A simplificação de superfícies tem-se tornado mais importante já que nos dias atuais a obtenção de modelos com alto grau de detalhamento é uma realidade. Modelos com grande

quantidade de pontos e de detalhes são gerados em muitas áreas do conhecimento. Por exemplo, na visualização computacional, dados de elevações são adquiridos utilizando-se scanners; no sensoriamento remoto, dados de terreno são adquiridos por imagens de satélite ou sensores lasers aerotransportados; na computação gráfica e em projetos que empregam programas CAD, modelos poligonais são gerados pela subdivisão de superfícies paramétricas. Cada uma destas técnicas pode facilmente gerar modelos com milhões de polígonos.

Uma grande variedade de métodos de simplificação de superfícies tem sido explorada ao longo dos anos. Os trabalhos neste tópico são encontrados em muitas áreas de atuação, fazendo desafios à pesquisa científica. Estas áreas são: A Cartografia, Sistemas de Informações Geográficas (SIG), realidade virtual, visualização computacional, computação gráfica, visualização científica, projetos CAD, métodos dos elementos finitos, teorias de aproximação e geometria computacional, entre outras.

A seguir será mostrada uma revisão dos estudos que envolvem simplificação de superfícies que foram desenvolvidos ao longo dos anos. Maior ênfase será dada nos métodos que utilizam superfícies poligonais (triângulos planos) como dados de entrada e as devolvem como saída, embora seja comentada brevemente sobre a simplificação de linhas curvas, superfícies curvas paramétricas e técnicas volumétricas.

2.2.1 Caracterização dos Algoritmos

Segundo RECKBERT & GARLAND (1997) os métodos de simplificação de superfícies variam de acordo com a sua generalidade e aplicação, por exemplo: entre os métodos que tratam de superfícies, alguns se limitam a tratar de superfícies altimétricas, enquanto outros são aplicáveis a superfícies tridimensionais envolvendo outras grandezas em geral. Eles sugerem uma classificação taxonômica sistematizada para os métodos de simplificação de superfícies, onde os métodos serão agrupados de acordo com os problemas que cada método soluciona e os algoritmos aplicados. Algumas características primárias dos diferentes grupos são mostradas na lista a seguir.

2.2.2 Características do Problema

- Topologia e Geometria de entrada: Para as curvas, a entrada pode ser um conjunto de pontos, uma função $y(x)$, uma curva plana ou uma curva tridimensional. Em se tratando de superfícies os dados de entrada podem ser um conjunto de pontos, amostras de elevação $z(x,y)$ em uma grade regular ou irregular ou um conjunto de feições com topologia arbitrária.

- Outros Atributos da Entrada: Cor, textura e normais à superfície podem ser acrescentadas além da geometria.
- Domínio dos Vértices de Saída: Os vértices de saída podem ser subconjuntos dos pontos de entrada.
- Estrutura da Triangulação de Saída: As malhas podem ser grades regulares, elas podem ser originadas tanto de uma subdivisão hierárquica como uma *quadtree*, tanto como subdivisão geral como a triangulação de Delaunay.
- Elementos da Aproximação: Os elementos básicos da superfície ou curva podem ser lineares (poligonais), quadráticos, cúbicos, de polinômio de alto grau ou outros.
- Métrica de Erro: Geralmente o erro da aproximação é medido e minimizado em relação ao erro em L_2 ou L_∞ (ROWLAND, 2000). Distâncias podem ser medidas de várias maneiras, por exemplo, ao ponto mais próximo em um dado polígono, ou ponto mais próximo na superfície.
- Restrições ou Solução: Pode-se necessitar a aproximação mais precisa possível a partir de um dado conjunto de elementos (linha ou triângulos), ou então pode ser necessário que a solução utilize o menor número de elementos que satisfaça uma dada tolerância de erro. Alguns algoritmos não fornecem nenhuma dessas garantias, mas permitem apenas um controle indireto sobre a relação entre velocidade e qualidade.
- Outros limites possíveis são baseados em limites de tempo ou de memória disponível.

2.2.3 Características do Algoritmo

- Relação Velocidade-Qualidade: Os algoritmos ótimos (erro e tamanho mínimos) são tipicamente lentos, enquanto geralmente algoritmos que geram menor qualidade ou aproximações menos compactas são mais rápidos.
- Refinamento/Decimação: Muitos algoritmos podem ser caracterizados como utilizando tanto um *refinamento*, uma abordagem de qualidade incremental iniciando com uma aproximação mínima até outras com melhor qualidade, quanto uma *decimação*, uma abordagem de qualidade não incremental que inicia com um modelo original e remove detalhes para criação de aproximação menos precisas.

2.2.4 Visão Geral das Áreas de Aplicação

Na Cartografia, a simplificação é um método entre muitos para a “generalização” de informações geográficas (MCMASTER & SHEA, 1992). Nesta área de estudo, a simplificação de curvas é chamada de “generalização de linhas”. Pode ser muito útil simplificar representações de rios, ruas, linhas de costa entre outras feições quando mapas em escalas grandes a pequenas são produzidos. Isto é necessário para remoção de detalhes desnecessários por razões estéticas, economizar memória e espaço de armazenamento e redução do tempo de impressão. O principal tipo de superfície simplificada na Cartografia é o terreno. Nos primórdios a produção cartográfica era uma atividade lenta e realizada em ambientes isolados, sem conexão com a Internet. No entanto, atualmente vêm se tornando cada vez mais interativa, necessitando do desenvolvimento de melhores algoritmos de simplificação que permitam o intercâmbio dessas informações entre diferentes meios de comunicação muitas vezes distantes.

As métricas de erros ideais para a simplificação cartográfica envolvem a consideração do erro geométrico, interesse do usuário, e semântica dos dados. Estes assuntos serão tratados no escopo deste estudo. Os algoritmos que serão mostrados geralmente aplicam uma medida de erro geométrico baseada na distância euclidiana. Desta forma o problema se concentra na retenção de feições cujos tamanhos são considerados maiores que um limiar, geralmente determinado pelos limites de percepção do usuário, a resolução do display ou o tempo e memória disponível.

Na área de Fotogrametria e Sensoriamento Remoto, técnicas de aquisição de dados de altitude do terreno como a geração de modelos digitais de terreno a partir de pares estereoscópicos e mais atualmente a moderna tecnologia de mapeamento digital a laser scanner (LIDAR) podem facilmente produzir milhões de pontos planialtimétricos. Desta forma é desejável simplificar os modelos criados a partir destes dados para reduzir a redundância, economizar espaço em disco e aumentar a velocidade em operações de visualização e reconhecimento automatizado.

Na computação gráfica e áreas relacionadas com realidade virtual, projetos geométricos em sistemas CAD e visualização científica, armazenamento compacto e rápida visualização das informações das formas são vitais. Para aplicações interativas tais como simuladores de vôo militares, vídeo games e animações tridimensionais, o desempenho em tempo real é um objetivo fundamental. Em tais aplicações, a geometria pode ser simplificada e separada em múltiplos níveis de detalhe, podendo alternar ou combinar níveis de detalhes apropriados em função do tamanho de cada objeto em relação à tela (HECKBERT & GARLAND, 1994). Esta técnica é chamada de modelagem em multi-resolução.

Quando modelos com formas tridimensionais (3D) necessitam serem transmitidos, a compactação é muito importante. Isto se aplica onde o meio de comunicação possui baixas velocidades (modem com linha discada) ou mesmo em bandas largas e redes corporativas. O rápido desenvolvimento da Internet está estimulando muitos trabalhos envolvendo a simplificação de superfícies.

Algumas importantes aplicações na engenharia utilizam o método dos elementos finitos para análise estrutural de pontes, para simulação de fluxo de ar em aeronaves, para simulação de campos magnéticos entre outras. Uma das etapas do pré-processamento para as simulações é a “geração de malhas”. Para acelerar o tempo requerido, é necessário fazer com que as malhas sejam simples e permitam extrair as características físicas de interesse.

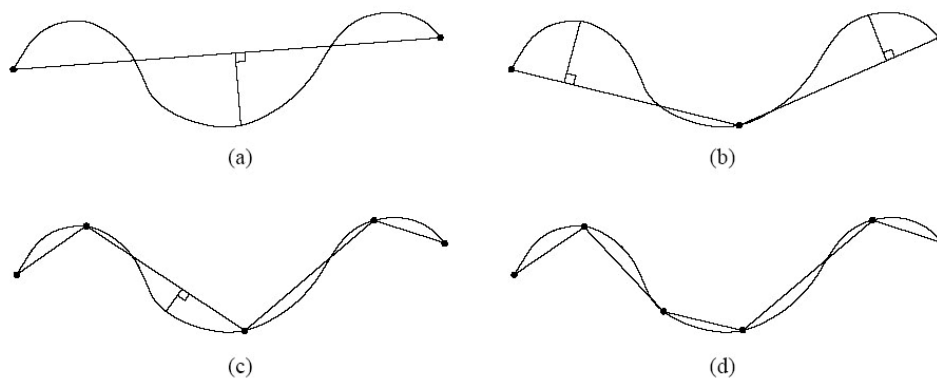
Existem diferentes terminologias relacionadas à simplificação de superfícies em áreas distintas. O que é chamado de terreno na Cartografia ou de modelo de elevações na computação gráfica é chamado de função bi-variada ou função de duas variáveis em outras áreas científicas. O objetivo na teoria da aproximação é geralmente a caracterização do erro no limite quando a precisão da malha se torna infinitamente grande. Na geometria computacional o objetivo está na busca por algoritmos que permitam a geração de aproximações otimizadas ou quase ótimas, quando comparadas com os erro derivados da compactação ou velocidade.

2.2.5 Simplificação de Curvas

Basicamente, a simplificação de curvas consiste em: dada uma linha poligonal de entrada com n vértices (uma cadeia de segmentos lineares ou “poli-linha”) gerar uma curva poligonal aproximada com m vértices de saída, onde $m < n$ (GARLAND & HECKBERT, 1997). Outro problema relacionado ao assunto é a simplificação de uma poli-linha com n vértices de acordo com uma tolerância de erro. As técnicas de simplificação de curvas têm sido empregadas nas áreas da Cartografia, Visualização Computacional, Computação Gráfica entre outras áreas.

DOUGLAS & PEUCKER (1973) apresentaram um método para simplificação de linhas. Este método heurístico conhecido como *Douglas-Peucker*, é o mais utilizado e permite a simplificação de poli-linhas com alta qualidade. Em cada passo o algoritmo realiza a simplificação dos pontos em cada segmento seqüencialmente, do primeiro ao último vértice. O ponto mais distante deste segmento de linha é encontrado e se a distância está abaixo do limiar a simplificação é aceita, caso contrário o algoritmo é aplicado recursivamente às subsequências anterior e posterior ao ponto escolhido (FIGURA 2.11). Este algoritmo, apesar de não ser otimizado é amplamente empregado para produzir aproximações de alta fidelidade, quando comparado com outros algoritmos heurísticos.

FIGURA 2.11 - ALGORITMO DOUGLAS-PEUCKER (SIMPLIFICAÇÃO DE LINHAS).



FONTE: ADAPTADO DE DOUGLAS & PEUCKER, 1973.

Uma das variantes derivadas do algoritmo *Douglas-Peucker*, quebra o segmento no ponto com maior erro ao longo do segmento em cada iteração (BALLARD & BROWN, 1982). Isto permite aproximações com melhor qualidade com um pequeno acréscimo no tempo requerido. Se esta árvore de subdivisão for salva, é possível a construção de uma aproximação dinamicamente para maiores erros de tolerância com maior rapidez (CROMLEY, 1991).

Existem alguns algoritmos mais rápidos que o *Douglas-Peucker*, porém apresentam menor qualidade (MCMASTER & SHEA, 1992). Um destes algoritmos é o método de re-amostragem regular, também conhecido na Cartografia como algoritmo do *n*-ésimo ponto, que simplesmente mantém cada *n*-ésimo ponto do segmento, descartando os demais. Este algoritmo tem boa performance, porém, pode levar a obtenção de resultados de baixa qualidade.

Enquanto o algoritmo *Douglas-Peucker* e outros derivados deste são baseados em métodos de refinamento, as poli-linhas podem ser simplificadas através de algoritmos de decimação. BOXER *et al.* (1993), descrevem dois algoritmos de simplificação de bordas de polígonos bidimensionais. O primeiro é tido como mais simples, considera os arcos das bordas em duas e três linhas, calculando para cada uma a distância máxima entre o arco e a corda que conecta os pontos em suas extremidades. Em seguida faz a seleção de um conjunto independente de arcos cujos desvios são menores que um limite pré-estabelecido e os substitui pelas suas cordas. O segundo algoritmo é uma versão aprimorada do exemplificado anteriormente e garante que a polilinha simplificada encontra-se sempre dentro de uma tolerância a partir da original.

Os algoritmos para a simplificação otimizada são menos utilizados que os métodos heurísticos por serem mais lentos e mais complicados no que tange à sua implementação (HECKBERT & GARLAND, 1997). O caso mais comum da simplificação ótima de poli-linhas é a busca pela simplificação em um dado tamanho com minimização do erro de acordo com

alguma metodologia para a determinação de erros. Geralmente estes métodos são restritos ao fornecimento de um subconjunto de vértices dos dados de entrada como resultado.

2.2.6 Simplificação de Superfícies

As superfícies são mais difíceis de simplificar do que as poli-linhas. Em áreas que necessitam alta velocidade de exibição em tempo real, tal como a de simuladores de vôo, modelos simplificados podem ser obtidos a partir de operações manuais (COSMAN & SHUMACKER, 1981). Os resultados podem ser excelentes, porém manualmente o processo pode durar meses. A automação deste processo é crucial na medida em que os dados podem ser de grande volume e necessitem apresentação de forma dinâmica.

Os algoritmos de simplificação de superfícies podem ser divididos em três classes principais, de acordo com os tipos de superfícies que são empregadas (HECKBERT & GARLAND, 1997).

A primeira e mais comum das classes de algoritmos de simplificação, se aplica onde a representação de um terreno pode ser realizada em modelos chamados *grades altimétricas* ou *superfícies paramétricas*. Estes são os tipos mais simples de superfícies, em geral apresentam uma distribuição orientada no espaço 2D. Em muitos casos, a simplificação nas superfícies desta classe recebe uma densa malha regular ou irregular, faz o processamento dos algoritmos de simplificação e retorna uma malha triangular irregular – TIN aproximada.

Outra categoria é a dos modelos de superfícies chamados de *manifold*, são tipos mais complexos de superfícies, tais como as triangulações contínuas, com ou sem fronteiras. Este tipo de superfícies é aquele formado de modo a não haverem linhas de borda, como por exemplo, uma esfera ou outro polígono fechado. Porém alguns *manifolds* podem ter uma formação arbitrária e serem não orientáveis. Nesta categoria a aplicação da triangulação de Delaunay pode se mostrar ineficiente, principalmente onde houver pontos com mesma coordenada x, y, mas com altitudes z diferentes o que significa que não há uma parametrização bidimensional na superfície.

Há ainda uma última classe mais geral de superfícies chamada de *non-manifold*, onde três ou mais triângulos podem compartilhar uma mesma linha vizinha, além de possuírem interseções arbitrárias entre os polígonos. Esta classe é pouco encontrada na literatura, pois devido a sua falta de restrição quanto à forma, poucos algoritmos de simplificação são capazes de manipulá-las.

Estas categorias podem ainda ser divididas em seis subclasses de acordo com a abordagem dos métodos de simplificação utilizados:

- Métodos de Grades Regulares;
- Métodos de Sub-Divisões Hierárquicas;
- Métodos de Feições;
- Métodos de Refinamento;
- Métodos de Decimação;
- Métodos Ótimos.

Das categorias apresentadas, é na primeira que se concentrarão os esforços dos estudos desta pesquisa, no entanto para uma melhor compreensão dos métodos, será apresentada uma revisão bibliográfica em ordem cronológica dos vários métodos realizados nos tipos de superfícies ora categorizados.

2.2.7 Métodos de Grades Regulares

O método mais simples de simplificação de grades regulares é a re-amostragem onde somente os pontos da cada k-ésima linha e coluna são mantidos formando uma nova grade regular simplificada, e os pontos restantes são descartados. Este modelo de grade regular, também chamado de DTM (*Digital Elevation Model*), é empregado quando se refere especificamente a um modelo de grade regular de terreno. A re-amostragem regular é simples e rápida, mas de baixa qualidade, já que os pontos descartados podem ser os mais importantes. Os resultados podem ser melhorados se um filtro Passa-Baixa é aplicado nos dados antes da re-amostragem, porém ainda assim persiste o problema básico deste método, já que não é de natureza não adaptativa (HAMMING, 1983).

Uma comparação extensiva entre os modelos das grades regulares (MDE) e das triangulações (TINs) e as relações espaço-erro entre eles foi feita por KUMLER (1994). Ele concluiu que para uma dada quantidade de espaço de armazenamento, as grades regulares são mais adequadas para a modelagem de terreno que as triangulações. Esta comparação pode ter sido influenciada por basear-se nas triangulações em geral, entretanto foram comparados modelos com mesmo tamanho de armazenamento em memória, ao invés da abordagem de mesmo tempo de renderização, além disto, os métodos de simplificação utilizados não são os melhores disponíveis (GARLAND & HECKBERT, 1997). Kumler assumiu que em geral, as triangulações requerem de três a dez vezes mais memória que uma grade regular com o mesmo número de vértices.

A re-amostragem regular pode ser feita de forma hierárquica, formando pirâmides de amostras (WILLIAMS, 1983 E TANIMOTO & PAVLIDIS, 1975). Apesar da poucas pesquisas

sobre as triangulações hierárquicas e TIN, os métodos piramidais são os mais utilizados na modelagem de terreno em multi-resolução nas comunidades de simulação (COSMAN *et al*, 1990 e COSMAN & SHUMACKER, 1981) e de visualização e animação (HUGHES, 1991), devido principalmente ao fato de ser simples e compactos.

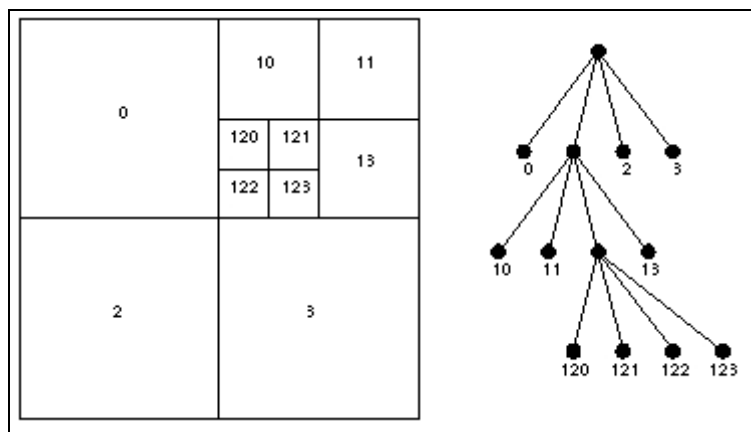
2.2.8 Métodos de Subdivisões Hierárquicas

Os métodos de subdivisões hierárquicas fazem a construção de uma triangulação através da subdivisão recursiva de uma dada superfície e podem ser consideradas formas adaptativas dos métodos piramidais. O padrão hierárquico da subdivisão, mesmo se não for armazenado explicitamente na estrutura de dados, forma uma árvore de cada ponto sendo que o ponto em questão não possuirá mais de um nível de origem na árvore (nível pai). Com a triangulação de Delaunay e outros algoritmos de triangulação em geral, a topologia é não hierárquica uma vez que um triângulo pode ter vários pais. Os métodos de subdivisão hierárquica são geralmente rápidos, simples além de facilitar a modelagem em multi-resolução (HECKBERT & GARLAND, 1997). Nas cenas em perspectiva, onde as porções do terreno mais próximas requerem maiores detalhes que as regiões distantes, a hierarquia auxilia na renderização dos diferentes níveis de detalhes. O problema advindo desta simplicidade e rapidez está no fato de que as subdivisões hierárquicas fornecem resultados de piores qualidades que as obtidas com outros métodos de triangulação.

Quadrees e k-d Trees

As superfícies paramétricas e de terreno são facilmente simplificadas com a utilização dos métodos adaptativos de subdivisão conhecidos como *quadrees* e *k-d trees* (SAMET, 1990). DEHAEMER & ZYDA (1991) utilizaram as *quadrees* e *k-d trees* fazendo a divisão no ponto de máximo erro em cada célula para simplificação de superfícies tridimensionais descritas por uma grade. Também foi encontrado um método similar voltado para modelos de terreno (TAYLOR & BARRETT, 1994). VON HERZEN & BARR (1987) apresentaram e discutiram um método adaptativo para triangulações, sem “buracos”, de superfícies paramétricas com a utilização de *quadrees*. GROSS *et al.* (1995) Utilizaram *wavelets* para a construção de aproximações *quadrees* de grades de elevação. A FIGURA 2.12 exemplifica a divisão de um plano usando Quadtree.

FIGURA 2.12 - EXEMPLO DE DIVISÃO DO PLANO EM UMA QUADTREE.

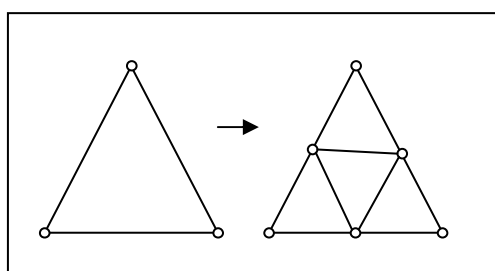


FONTE: ADAPTADO DE CHEN & TOBLER, 1986.

Triangulação Quaternária

Este método, que se baseia em uma triangulação quaternária foi desenvolvido para aproximação de grades de elevação (GÓMEZ & GUZMÁN, 1979). Neste método cada triângulo é subdividido recursivamente, formando quatro triângulos até que a tolerância máxima de erro seja atingida. Para a divisão de cada triângulo, um ponto “significante” próximo da mediatriz de cada lado é escolhido livremente e o triângulo é dividido em quatro triângulos aproximadamente congruentes (FIGURA 2.13). Devido à escolha dos novos vértices não se restringido a pontos nos lados dos triângulos, a superfície criada apresentará pequenas fendas, este método é inadequado para muitas aplicações.

FIGURA 2.13 - TRIANGULAÇÃO QUATERNÁRIA



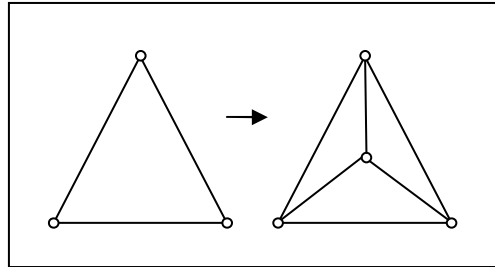
FONTE: ADAPTADO DE GÓMEZ & GUZMÁN, 1979.

Triangulação Ternária

Este método baseia-se na execução de uma triangulação ternária onde pontos são inseridos no interior dos triângulos e cada triângulo é dividido em três triângulos formados através da conexão entre os vértices (DE FLORIANI *et al.*, 1984). Nenhuma mudança nas

arestas é realizada (FIGURA 2.14). Consequentemente, todas as linhas originais permanecem na triangulação durante todo o processo.

FIGURA 2.14 - TRIANGULAÇÃO TERNÁRIA



FONTE: ADAPTADO DE FLORIANI *et al.*, 1984.

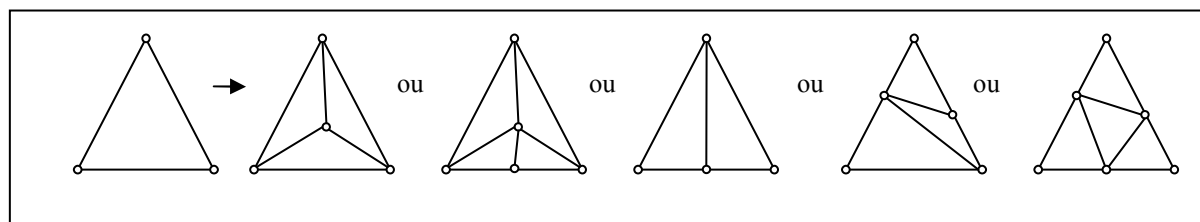
Deve ser considerado o fato de que as diagonais dentro de toda a grade retangular levam a formação de falsas cristas de montanhas e vales ao longo do terreno, fazendo com que este método seja inaceitável na proposta desta pesquisa.

Outros Métodos Hierárquicos

SCHMITT & GHOLIZADEH (1985) fizeram a simplificação de uma grade com topologia retangular em três dimensões através da utilização de uma superfície triangulada. Este método é similar ao proposto por FAUGERAS *et al.* (1984), que será descrito a seguir. Devido ao fato dos pontos de entrada estarem dispostos em uma grade, isto permite a realização da divisão dos pontos em triângulos num espaço paramétrico bidimensional.

SCARLATOS & PAVLIDIS (1992) e SCARLATOS (1993) apresentaram um algoritmo de triangulação hierárquica para grades de elevação que emprega uma abordagem de triangulação recursiva baseada em coerência cartográfica. Esta metodologia inicia com uma triangulação mínima (geralmente dois triângulos) como sendo o nível de detalhe 0. Para cada nível de detalhe na árvore, tolerâncias de erro são especificadas pelo usuário. Para a criação de um nível i de um $i-1$, o ponto de maior erro ao longo de cada aresta do triângulo e no interior de cada triângulo é encontrado. Os pontos com erro acima do limiar pré-estabelecido para nível i são adotados como novos vértices e, cada triângulo é re-triangulado a partir de um dos cinco modelos de subdivisão (FIGURA 2.15). Várias iterações de seleção de pontos e re-triangulação são efetuadas para cada nível i , até que nenhum ponto candidato em i seja encontrado.

FIGURA 2.15 – MODELOS DE SUBDIVISÃO PARA A TRIANGULAÇÃO HIERÁRQUICA DE SCARLATOS E PAVLIDIS



FONTE: ADAPTADO DE SCARLATOS E PAVLIDIS, 1992a.

Todos os níveis desta hierarquia são armazenados na estrutura de dados, facilitando a visualização adaptativa em qualquer nível de detalhe desejado. SCARLATOS & PAVLIDIS (1992a) sugerem em sua análise que o custo do algoritmo é $O(n \log n)$. Entretanto, HECKBERT & GARLAND (1997), apresentaram uma análise deste algoritmo, indicando que se a hierarquia for muito desbalanceada, o pior caso de custo computacional é $O(mn)$.

Um outro método, desenvolvido por DE FLORIANI & PUPPO (1992), apesar de similar ao supracitado, a subdivisão dos triângulos é mais geral. Para a subdivisão de um triângulo para um dado nível na hierarquia, um algoritmo de simplificação de poli-linhas (BALLARD & BROWN, 1982) é utilizado para adicionar novos vértices nas arestas. Em seguida pontos adicionais são inseridos no interior dos triângulos até que um limiar de erro seja atingido dentro do triângulo e o interior do triângulo é re-triangulado empregando-se a triangulação de Delaunay. Este método aparenta ter velocidade e flexibilidade quase idênticas em comparação com o método de SCARLATOS & PAVLIDIS (1992a), porém, de acordo com HECKBERT & GARLAND (1997). Este método pode fornecer uma simplificação de melhor qualidade para um dado limiar de erro.

2.2.9 Métodos Baseados Em Feições

Uma abordagem simples e intuitiva para a simplificação de grades de elevação é realizar uma passagem sobre os pontos de entrada, classificando cada um deles utilizando alguma métrica de “importância”, para selecionar os pontos mais importantes e então formar um conjunto de pontos necessários à construção da triangulação, geralmente a triangulação de Delaunay. Os métodos baseados em feições, muito populares na Cartografia, apresentam baixa qualidade quando comparados com outros métodos (HECKBERT & GARLAND, 1997).

Os pontos importantes, também conhecidos como feições ou pontos críticos e as arestas entre eles, chamadas de “*break lines*”, incluem tais feições topográficas como picos, rios, estradas, ferrovias, cristas, vales de montanhas, entre outros. A filosofia de muitas das

abordagens baseadas em feições é que o conhecimento sobre a natureza dos terrenos é essencial para uma boa simplificação (WEIBEL, 1992 e SCARLATOS & PAVLIDIS, 1992). Em uma abordagem baseada em feições, as feições de interesse são tomadas como o conjunto de vértices, e as *break lines*, quando necessárias, se tornam arestas em uma triangulação com restrições (BERN & EPPSTEIN, 1992). Os detectores de feições mais comumente utilizados são filtros lineares e não-lineares 2x2 e 3x3, às vezes seguidos por processos de extração das feições muito próximas, tais como uma seqüência de pontos sobre uma linha de crista. Tais abordagens foram aplicadas por DOUGLAS & PEUCKER (1973) e CHEN & GUEVARA (1987). Alguns métodos examinam grandes vizinhanças de pontos com o objetivo de obtenção de uma medida de importância mais global.

Um dos métodos baseados em feições mais interessantes utiliza o Laplaciano para medida da curvatura. O valor do Laplaciano em cada ponto é computado dentro de uma janela móvel, de maneira análoga ao filtro da mediana utilizado em processamento de imagens e todos os pontos com valor abaixo de um limiar são selecionados (SOUTHARD, 1991). Após a realização da triangulação de Delaunay com os pontos selecionados, uma re-triangulação dependente de dados é feita, trocando as arestas onde pode haver uma redução na soma dos erros absolutos sobre as linhas da malha triangular.

2.2.10 Métodos de Refinamento

Os métodos de refinamento são algoritmos iterativos de multipassagem que iniciam com uma aproximação inicial, inserindo em cada passagem um ou mais vértices à triangulação, repetidamente até que o erro ou o número total de pontos desejados sejam atingidos. Quando os dados de entrada encontram-se em forma de grades retangulares, a aproximação mínima é composta por dois triângulos; Para outras topologias de entrada de dados, a aproximação inicial pode ser mais complexa. Métodos incrementais são geralmente empregados na manutenção da triangulação durante os refinamentos.

Para a escolha de pontos, métricas de “importância” tais quais as dos métodos baseados em feições podem ser utilizadas. Enquanto os métodos baseados em feições geralmente utilizam métricas de importância independentes da simplificação, nos algoritmos de refinamento, a importância de um dado ponto é normalmente uma medida relacionada ao erro entre o ponto e o modelo simplificado. Para grades altimétricas, a métrica mais comum de erro é o valor absoluto máximo do erro vertical, a regra L_∞ . Esta é a métrica de erro que mais se assemelha ao algoritmo *Douglas-Peucker*.

Inserção Greedy

Os algoritmos de refinamento que inserem pontos de maior erro em cada passagem são chamados de algoritmos de Inserção *Greedy* (vorazes), este termo é utilizado, pois decisões irrevogáveis são feitas no decorrer do processamento (CORMEN *et al.*, 1990). Os métodos que inserem um ponto a cada passagem são chamados de Inserção *Greedy* seqüencial, enquanto aqueles que inserem múltiplos pontos em paralelo em cada passagem são chamados de Inserção *Greedy* Paralela. O termo paralelo não se refere à arquitetura do computador, mas sim aos processos de seleção e re-avaliação.

FOWLER & LITTLE (1979) publicaram um algoritmo híbrido que faz uma passagem inicial de seleção de feições usando um filtro 2x2 para “semear” a triangulação, seguida por múltiplas passagens de Inserção *Greedy* Paralela. Em cada uma das passagens, para cada triângulo, o ponto com maior erro, ou *ponto candidato*, é encontrado e todos os pontos candidatos com erro acima do limite pré-estabelecido são inseridos na triangulação.

Foi apresentado por DE FLORIANI *et al.* (1983) um algoritmo de Inserção *Greedy* Seqüencial. Este método é mais puro do que o apresentado por FOWLER & LITTLE (1979), uma vez que ele não “semeia” a triangulação utilizando pontos de feições e ainda faz a inserção de um ponto por vez ao invés de múltiplos pontos, apresentando uma maior qualidade final na simplificação (DE FLORIANI *et al.*, 1985). O ponto inserido em cada passagem é o ponto com maior erro absoluto do conjunto dos pontos de entrada.

FAUGERAS *et al.* (1984) desenvolveram uma técnica muito similar ao algoritmo de DE FLORIANI *et al.* (1984), mas sem ter as longas e contínuas arestas, a qual pode ser aplicada à simplificação de qualquer malha tridimensional de gênero 0, não apenas grades de elevação.

Em um trabalho seguinte, DE FLORIANI (1989) apresentou um algoritmo para a construção de uma “pirâmide de Delaunay”. Trata-se de uma hierarquia de triangulação de Delaunay, empregando uma variante do algoritmo de Inserção *Greedy* apresentado por DE FLORIANI *et al.* (1983) na construção de cada nível da pirâmide. Neste artigo, a Inserção *Greedy* é pormenorizada em maior detalhe que nas publicações anteriores.

Uma técnica híbrida, explorada por HELLER (1990) é chamada “filtragem adaptativa de malhas triangulares”. Esta técnica é muito parecida com a de FOWLER & LITTLE (1979), tendo como diferença principal o fato de que as feições são escolhidas não com um filtro local de tamanho fixo, mas através da verificação de uma vizinhança de tamanho variável para determinar se cada ponto é um extremo local, dentro de um limite pré-determinado. Este método de seleção de feições, apesar de mais oneroso em termos computacionais que o seu cognato, parece fornecer aproximações de boa qualidade.

Objetivando a segmentação de dados de varredura laser, adquiridos por sistemas de visão computacional, SCHMITT & CHEN (1991) utilizaram um processo de duplo estágio de dividir e mesclar, chamado de *split-and-merge* (PAVLIDIS, 1977). O estágio de divisão é uma forma de Inserção *Greedy* com triangulação de Delaunay similar ao apresentado por DE FLORIANI (1983). O estágio de mesclagem faz a união das regiões adjacentes com normais similares, no decorrer do processo que vai destruindo a triangulação, mas permitindo a segmentação da imagem.

RIPPA (1992) realizou a generalização do algoritmo de inserção *Greedy* proposto por DE FLORIANI (1983) de modo a explorar a triangulação dependente de dados e o ajustamento por mínimos quadrados. Alternativamente à triangulação de Delaunay incremental, este algoritmo computa uma triangulação dependente de dados usando uma versão da otimização local proposta por LAWSON (1977), trocando repetidamente as arestas sobre um novo vértice até que o erro global seja minimizado localmente. Lawson testou duas variantes para definição do erro global. A primeira, puramente geométrica, baseia-se na soma dos valores absolutos dos ângulos das normais entre todos os triângulos adjacentes. A segunda, uma simples medida baseada na regra L_2 , é a soma dos quadrados dos erros verticais absolutos entre todos os pontos de entrada.

Dos experimentos com as triangulações de Delaunay dependente de dados em várias funções sintéticas de suavização, RIPA (1992) concluiu que a triangulação dependente de dados geralmente fornece melhor precisão nas aproximações para um dado número de vértices que a triangulação de Delaunay. O critério de ângulo teve um bom desempenho na maioria dos casos, sendo desta forma pouco recomendado, tendo em vista a métrica L_2 e a triangulação de Delaunay. Ele também observou que o critério L_2 ocasionalmente resultou na presença de alguns triângulos extremamente longos e afinados que não se ajustaram adequadamente à superfície para permanecer na triangulação. O algoritmo falhou na eliminação destes triângulos devido a eles se apresentarem tão finos que não contiveram nenhum ponto de entrada, contribuindo para um erro igual a zero na utilização da métrica L_2 como critério.

O critério angular também resultou em algumas más escolhas em alguns casos, desta forma RIPA (1992) testou um esquema híbrido que comparava em cada passada os erros resultantes das triangulações de Delaunay e dependente de dados com um mesmo critério angular, atualizando a triangulação usando o que apresentava menor erro global. O esquema híbrido forneceu aproximações generalizadas de grande qualidade de maneira mais consistente que os métodos testados por ele anteriormente.

RIPA (1992) também explorou métodos dos mínimos quadrados que aproximavam os dados de entrada ao invés de sua interpolação. As coordenadas (x, y) dos vértices são fixadas, mas permitindo suas alturas variarem. A combinação das elevações que minimizam a soma

global dos erros ao quadrado é encontrada. Isto envolveu na solução de um grande, esperso, sistema de equações lineares com dimensões $m \times n$. Ele descobriu que resultados satisfatórios podem ser obtidos de forma eficiente usando dados com pouco ruído, se o ajuste por mínimos quadrados for empregado como pós-processamento à inserção *Greedy*. Em geral seus métodos apresentaram-se um pouco dispendiosos (em particular a triangulação dependente de dados), porém resultando em generalizações de mais alta qualidade ante os que empregam os métodos puros de inserções *Greedy*. A técnica de mínimos quadrados apresentou-se como uma boa opção para o melhoramento da generalização.

POLIS & MCKEOWN (1993) exploraram uma variação paralela do método de inserção *Greedy*. O algoritmo proposto por eles, calculava em cada passagem o valor do erro absoluto sob cada ponto de entrada. O conjunto de pontos com erro absoluto máximo é encontrado e estes pontos são inseridos no modelo de uma única vez, eliminando os que estão dentro de uma distância de tolerância dos vértices que já estão na triangulação.

FRANKLIN (1993) disponibilizou um programa para um algoritmo de inserção *Greedy* sequencial. Com cada triângulo, ele armazenou um ponteiro candidato e atualiza apenas os candidatos de triângulos novos ou que tenham sido modificados em cada passo. Uma matriz de pontos de entrada em cada triângulo é armazenada, desta forma o algoritmo é mais geral, porém mais lento que outros algoritmos de simplificação de superfícies.

PUPPO *et al.* (1994) fizeram alguns experimentos com algoritmos de generalização que se caracterizam por ser paralelos, tanto na arquitetura dos sistemas empregados como no método de inserção *Greedy*. O algoritmo deles é muito similar ao apresentado por DE FLORIANI (1983) exceto por inserirem, em cada passo, todos os pontos candidatos com erro acima do limiar pré-estabelecido.

CHEN & SCHMITT (1993) apresentaram uma abordagem híbrida de feição e refinamento para aplicar em dados derivados de sistemas computacionais de varredura de distâncias. Para melhor generalização das discontinuidades típicas em sistemas de varredura como degraus e declives, inicialmente eles empregaram um filtro de detecção de bordas para a identificação das feições de discontinuidades significantes. Estas feições foram adotadas como barreiras de restrição durante a inserção *Greedy* de vértices adicionais, usando a triangulação de Delaunay com restrições e a triangulação dependente de dados. Eles notaram que para feições com direção definida, como cilindros, a triangulação dependente de dados resultou em uma melhor simplificação.

Um método relacionado com a simplificação de superfícies poligonais orientadas foi desenvolvido por DELINGETTE (1994). Ele ajustou superfícies em conjuntos de pontos tridimensionais através da minimização de uma função de energia que é a soma de um termo de

erro, um termo de comprimento de aresta e um termo de curvatura. O algoritmo inicia com uma triangulação inicial que é o dual de um icosaedro subdividido. Em seguida, a geometria é ajustada iterativamente, buscando minimizar a função de energia (DELINGETTE *et al.*, 1992).

GARLAND & HECKBERT (1995) apresentaram um método de otimização baseado na forma mais simples da inserção *Greedy* similar à apresentada por DE FLORIANI *et al.* (1983). Inicialmente foi explorado o caráter local das trocas de arestas nas malhas triangulares e foram calculados apenas os erros nos pontos de entrada que causaram alterações na malha, em seguida utilizaram uma pilha³ para permitir que o ponto de maior erro seja encontrado mais facilmente.

Outro método, também apresentado por GARLAND & HECKBERT (1997), é baseado na inserção *Greedy* dependente de dados muito similar ao método de RIPPA (1992). Eles desenvolveram um algoritmo que forneceu uma solução com 88% do erro alcançado na inserção *Greedy* com triangulação de Delaunay com um desempenho de três a quatro vezes melhor.

O sistema de informações geográficas conhecido como ArcInfo, que é comercializado pelo Instituto de Pesquisa de Sistemas Ambientais (ESRI) possui uma ferramenta que faz a generalização de modelos de terreno sob a forma de grades regulares. O comando “*Laticetin*” emprega uma abordagem híbrida de simplificação por feição e por refinamento que inicia com uma grade regular triangular cujos triângulos são refinados através de inserção *Greedy* paralela (KUMLER, 1994 e POLIS & MCKEOWN, 1993).

Um método de duplo estágio para a modelagem *wavelet* em multi-resolução de um poliedro triangulado arbitrário foi desenvolvido por LOUNSBERY (1994) e ECK *et al.* (1995). Esta metodologia não se limita a modelos de elevação ou esferas formadas por malhas triangulares, mas é aplicável a qualquer modelo triangular com limites. A abordagem inicialmente constrói uma malha-base a qual é um poliedro triangulado que com a mesma topologia da superfície de entrada. Distâncias geodésicas são empregadas nesta etapa, similares às do método de FAUGERAS *et al.* (1984). Em seguida faz subdivisões quaternárias da malha inicial repetidamente para a construção de uma nova malha que se aproxima muito da superfície original. Um modelo em multi-resolução da nova malha é criado a partir de técnicas de *wavelets*, isto posto, nova aproximações com qualquer nível de erro podem ser facilmente geradas.

2.2.11 Métodos de Decimação

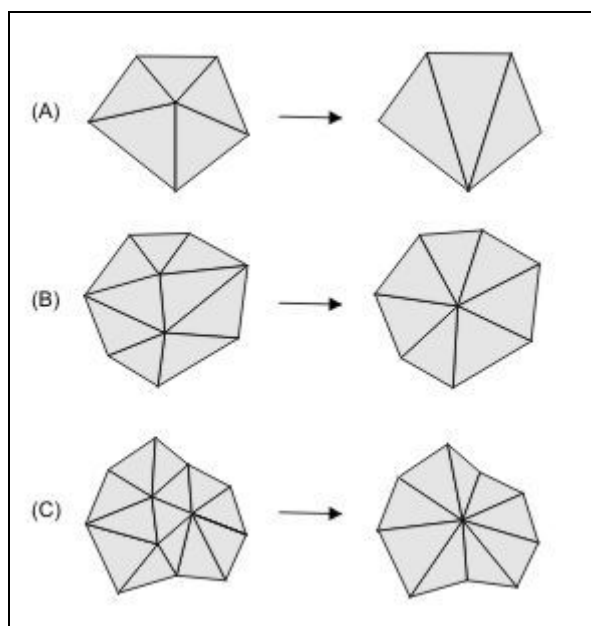
Esta classe de algoritmos de simplificação de superfícies se refere aos métodos de decimação. Os métodos de decimação são métodos que iniciam com uma malha poligonal (geralmente uma triangulação) e sucessivamente a simplifica até que um nível desejado de

³ Termo usado na informática que se refere a uma área especial da memória do computador usada para armazenar recursos importantes.

aproximação seja atingido. Segundo PEDRINI (2001), os algoritmos de decimação podem ainda ser classificados em uma das seguintes categorias, de acordo com os elementos removidos na simplificação (FIGURA 2.16):

- A. **Métodos de decimação de pontos:** remove um vértice e re-triangula a sua vizinhança;
- B. **Métodos de decimação de linhas:** remove uma linha e dois triângulos e uma linha e dois vértices;
- C. **Métodos de decimação de triângulos:** remove um triângulo e três linhas, une três vértices e re-triangula a vizinhança;
- D. **Métodos de decimação de grupos:** remove vários triângulos adjacentes e re-triangula seus limites.

FIGURA 2.16 – TIPOS DE DECIMAÇÃO: (A) VÉRTICE; (B) LINHA; (C) TRIÂNGULO.



FONTE: ADAPTADO DE PEDRINI, 2001.

Muitas variantes das técnicas de decimação vêm sendo empregadas na solução do problema concernente à simplificação de superfícies poligonais, principalmente para a redução do volume dos dados gerados por algoritmos de construção de superfícies poligonais regulares. Alguns destes métodos acrescentam informações não existentes no conjunto de dados originais, como é o caso da decimação por triângulo onde um vértice é adicionado na mediatriz do vértice que é removido.

LEE (1989) propôs um método chamado *drop heuristic* para simplificação de modelos digitais de terreno baseada na decimação de vértices, através da remoção de um vértice em cada ciclo. O algoritmo recebe uma grade de elevação como dado de entrada e cria uma triangulação inicial na qual cada quadrado 2x2 entre pontos de entrada vizinhos é segmentado em dois triângulos. Em cada passo, o erro de cada vértice é calculado e que fornecer o menor erro é removido. Para a determinação do erro vertical em um dado vértice, é feita a remoção temporária dos vértices da triangulação, seguida de uma re-triangulação de Delaunay, medindo-se então a distância vertical do vértice até o seu triângulo continente. O processo prossegue até que o erro exceda o nível de erro ou o número de vértices desejados (KAO *et al*, 1991).

KALVIN *et al.* (1991) desenvolveu um método de duas fases para a criação de superfícies a partir de dados médicos. A primeira fase faz a aproximação de uma superfície com pequenos polígonos empregando um algoritmo muito parecido com o *marching cubes* (NING & BLOOMENTHAL, 1993).

SHROEDER *et al.* (1992) desenvolveram um algoritmo genérico de decimação de vértices primariamente para uso em visualização científica. Este método não se restringe ao uso apenas em grades de elevações e toma qualquer superfície triangulada em sua entrada, geralmente uma malha poligonal com limites. O algoritmo realiza múltiplas passagens pelos dados até que o erro vertical máximo permitido seja alcançado. Em cada passo, todos os vértices que não estão dentro de um limite ou apresentam erro abaixo do limiar são removidos e os polígonos vizinhos são re-triangulados. Neste método, o erro de um vértice é dado pela distância do ponto até o plano da superfície aproximada dos vértices vizinhos. Como os erros são medidos através das aproximações obtidas em passos anteriores, os erros podem se acumular, porém esta falha foi identificada pelo seu criador e corrigida nas versões mais recentes.

SOUKY & LAURENDEAU (1992) também desenvolveram um algoritmo para a simplificação de superfícies através da decimação de vértices para aplicação em superfícies poligonais. A sua aplicação foi baseada na construção de modelos de superfície a partir de múltiplos varredores de distâncias. Em cada passo o vértice com erro mínimo é removido e sua vizinhança é re-triangulada. O processo para quando o erro supera o valor da tolerância especificada ou o modelo atinge o tamanho desejado.

Para encontrar os limites de erros com maior exatidão, um conjunto de pontos removidos, chamados de ancestrais, é armazenado em cada triângulo. Para calcular o erro em um vértice, uma deleção temporária de um ponto e re-triangulação é feita. Desta forma o erro do vértice é o erro que poderia resultar de sua remoção. Mais precisamente, o erro é definido como sendo a máxima distância entre o seu ancestral vizinho ou entre o vértice e a superfície re-triangulada. A remoção de um vértice pertencente ao limite da superfície é considerada legal se

os triângulos vizinhos puderem ser projetados em 2D sem que haja a ocorrência de sobreposições ou dobras.

Outro método de simplificação de superfícies poligonais com limites foi apresentado por TURK (1992). Este algoritmo não é um método de decimação como os apresentados anteriormente, mas será apresentado aqui, pois inicia com uma triangulação completa para proceder à simplificação.

Este algoritmo toma uma triangulação inicial de entrada, espalha aleatoriamente um número pré-definido de pontos sobre estes triângulos e utiliza um procedimento iterativo de repulsão para uniformizar a disposição destes pontos. Os pontos permanecem enquanto são movimentados na superfície. Após estes pontos serem inseridos na triangulação, os pontos originais são excluídos um a um, fazendo com que a superfície simplificada possua a mesma topologia da superfície de entrada.

SCARLATOS & PAVLIDIS (1992) exploraram um método para ajuste de uma triangulação com a finalidade de equalizar a curvatura dos dados de entrada dentro de cada triângulo. Este algoritmo toma uma triangulação preliminar e procede a aplicação de três passos subseqüentes: retração de triângulos com alta curvatura, fusão de triângulos adjacentes coplanares e trocas de linhas para aprimorar o ajuste e a forma do triângulo.

Além do método de subdivisão recursiva apresentado anteriormente, SCARLATOS (1993) também desenvolveu um método de decimação de vértices para a construção de triangulações hierárquicas a partir de grades altimétricas. Para a geração de cada nível da hierarquia, o método principia com uma triangulação elementar e calcula a “significância” de cada ponto, deletando os vértices mais significativos até que não haja mais deleções necessárias. Neste caso a significância é uma função de erro entre um vértice e uma média ponderada de seus vizinhos e o grau de um vértice.

HINKER & HANSEN (1993) apresentou um algoritmo de decimação de grupos de polígonos para uso em sistemas de visualização científica. Este é um método com passagem única que inicialmente localiza os triângulos vizinhos que possuem normais aproximadamente paralelas e procede à re-triangulação de cada grupo. Este método não é efetivo quando as superfícies de entrada apresentam regiões de alta curvatura.

HOPPE *et al.* (1993) desenvolveram um algoritmo baseado em otimização para a simplificação de superfícies 3D. Este método recebe um conjunto de pontos e uma aproximação inicial da superfície triangulada a partir destes pontos de entrada e calcula uma triangulação grosseira dos pontos com mesma topologia que a malha de entrada. O método busca a minimização da medida de energia global consistindo de três termos: um termo de complexidade que penaliza as malhas com muitos vértices, um termo de erro que penaliza a distância

geométrica da superfície até os pontos de entrada e termo flexível que penaliza as linhas longas na triangulação. O método procede em três estruturas de repetição aninhadas (*loops*), sendo que na mais externa o termo flexível é decrescido, a do meio faz uma otimização sobre as topologias da malha e a mais interna faz uma otimização sobre as geometrias. A otimização topológica utiliza seleções randômicas e heurísticas para a seleção de uma linha tanto para sua remoção, divisão ou troca. A otimização geométrica emprega técnicas de otimização não lineares para encontrar as posições dos vértices que minimizam o erro global para uma dada topologia. As alterações na topologia são mantidas se reduzirem o erro global, caso contrário são descartadas.

Ao contrário da maioria dos métodos de simplificação este método não faz restrições para que os pontos de saída sejam subconjuntos dos pontos de entrada. Este método parece ser menos sensível à ruídos nos pontos de entrada que outros métodos apresentados devido a sua liberdade na escolha de vértices e também dado que a métrica de erro geométrico utiliza a regra L_2 ao invés da regra L_∞ .

SCHRODER F. & ROBBACH (1994) descreveram um algoritmo de decimação onde a importância de um vértice é avaliada de acordo com a medida de rugosidade do terreno naquele vértice. Um vértice é removido da malha caso não haja mudança significativa na representação geral e a área ao redor do ponto removido é re-triangulada.

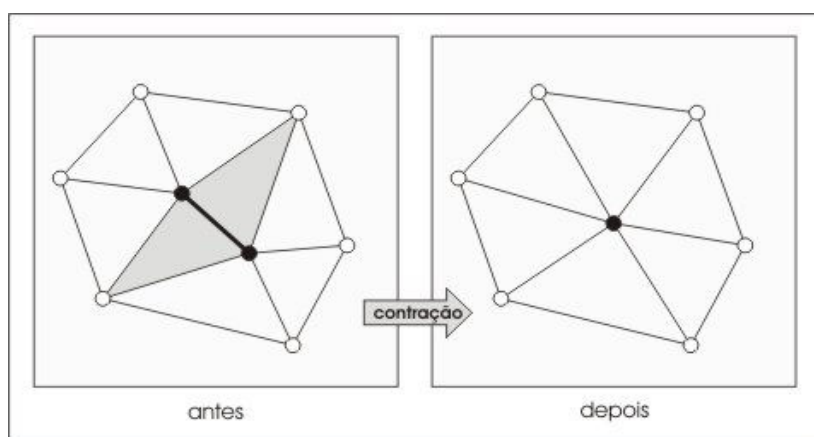
Um método de decimação de triângulos foi proposto por HAMANN (1994). Neste algoritmo, triângulos são excluídos em ordem crescente de peso, que é obtido através do produto da equiangularidade e curvatura. Desta forma, os triângulos muito afinados e com baixa curvatura são removidos em primeira instância. O método parece ser complexo devido tanto a utilização de um segundo ajuste de superfícies no posicionamento dos novos vértices e também por ser requerido um grande numero de verificações geométricas na prevenção de alterações topológicas.

KALVIN & TAYLOR (1994) desenvolveram um método de decimação de conjuntos de polígonos chamado de “*superfaces*” para a simplificação de malhas poligonais com uma dada tolerância de erro. O algoritmo opera em um único passo, que consiste de três fases distintas. A primeira fase segmenta a superfície em conjuntos de faces poligonais aproximadamente coplanares. Cada conjunto de faces poligonais é encontrado através da escolha aleatória de uma face e unindo-a com as faces adjacentes até que as faces não possam ser ajustadas em um plano dentro da tolerância de erro. Testes adicionais podem ser empregados para prevenir a formação de conjuntos muito alongados. A segunda fase simplifica as curvas de fronteira entre os conjuntos de faces adjacentes utilizando o algoritmo *Douglas-Peucker*. A terceira fase re-triangula os conjuntos de faces pela sua subdivisão em polígonos estelares, que são então triangulados.

Empregando técnicas de visibilidade oriundas de geometria computacional, VARSHNEY (1994) desenvolveu um algoritmo de decimação de conjuntos de faces poligonais para a simplificação de superfícies poligonais com limites orientáveis. O método possui erro limitado, que ao invés de simplificar de maneira rápida (*greedy*), como os demais métodos de decimação apresentados, ele exige muito mais esforço e muitos testes para encontrar o maior triângulo a ser inserido em cada passagem.

GUÉZIEC & HUMMEL (1995) desenvolveram um método para a simplificação de superfícies poligonais orientáveis que aplicam um método de decimação de linhas. É definido um operador de redução ou contração de linha para exclusão de uma aresta e união de seus dois pontos em um único vértice (FIGURA 2.17).

FIGURA 2.17 - CONTRAÇÃO SIMPLES DE UMA LINHA.



FONTE: ADAPTADO DE HOPPE *et al.*, 1993.

Este algoritmo ordena as linhas por “importância” e realiza uma única passagem pelo conjunto de arestas de cada face em ordem crescente de importância, fazendo a contração das linhas quando permitido. A contração de uma linha é permitida quando obedecidas quatro condições básicas: a topologia da superfície deve ser preservada, as normais das faces modificadas devem ser pouco alteradas, os novos triângulos devem possuir formas adequadas (não afinados), o raio de erro para os novos vértices deve estar abaixo do limiar de erro.

GOURDON (1995) explorou um método para simplificação de malhas poligonais resultantes de reconstrução de outras superfícies. Este algoritmo difere de quase todos os demais algoritmos de simplificação já que não assume que a malha de superfície seja uma triangulação. O algoritmo foi projetado para preservar a característica de Euler⁴ do modelo, o que implica na

⁴ A característica de Euler de um modelo é definida como $x = F - E + V$ onde F , E e V são, respectivamente o número de faces, linhas e vértices.

preservação da topologia. O algoritmo remove vértices iterativamente, baseado em um critério de curvatura não especificado. Devido ao algoritmo suportar faces não triangulares, faz-se desnecessário proceder à reconstrução da malha.

HUGHES *et al.* (1996) descreveram um algoritmo focado na simplificação de malhas globais de iluminação resultantes de sistemas radiométricos. Consequentemente o algoritmo deve realizar a simplificação tanto da geometria da malha como também dos valores de cores associados com cada ponto da malha. A escolha do método de simplificação levou em conta a característica descontínua da variação do fenômeno da radiação. Desta forma foi adotada uma combinação de decimação local de vértices e envelopes de simplificação (COHEN *et al.*, 1996, VARSHNEY, 1994).

KLEIN *et al.* (1996) apresentaram um algoritmo muito semelhante ao método de SOUCY & LAURENDEAU (1996). Este algoritmo faz a simplificação de uma malha poligonal através da remoção iterativa de um vértice re-triangulando por Delaunay o espaço vazio resultante. Cada vértice removido é relacionado à face mais próxima na aproximação. Estes relacionamentos são utilizados para o cálculo da distância entre a superfície original e a sua aproximação. Para selecionar um vértice à remoção, cada vértice é removido e o erro adicional introduzido pela deleção é calculado. O vértice que introduz o erro mínimo é selecionado para remoção. Após o vértice removido, os relacionamentos e os erros adicionais entre a sua vizinhança devem ser re-computados.

ALGORRI & SCHMITT (1996) desenvolveram um algoritmo para a simplificação de triangulações densas e fechadas, resultantes de re-construção de superfícies. Este algoritmo inicia com uma fase de pré-processamento que suaviza a triangulação inicial através da alteração das linhas de conexão baseada em um critério de continuidade G' (DYN *et al.*, 1990).

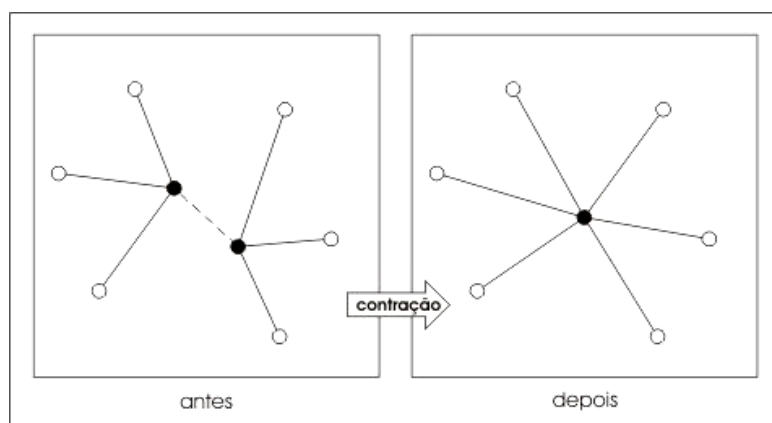
Outro algoritmo baseado na contração de arestas foi descrito por RONFARD & ROSSIGNAC (1996). A principal observação referente ao método por eles apresentado é que os vértices nos modelos originais se encontram sobre as intersecções de um conjunto de planos, em particular os planos das faces compartilhadas pelos vértices em questão. Eles associam um conjunto de planos com cada vértice, chamadas de “zona do vértice”. O erro a cada vértice é medido pela máxima distância entre os vértices e os planos de suas zonas. Quando uma linha é contraída, a zona do vértice resultante é a união das zonas dos pontos pertencentes a cada linha. O erro do vértice resultante caracteriza o custo da linha contraída. Em cada iteração, a linha de menor custo é selecionada e contraída.

O algoritmo de simplificação apresentado por HOPPE (1996) para a construção de malhas progressivas é uma versão simplificada do algoritmo anterior publicado pelo mesmo autor em 1993. Ao invés de realizar uma busca mais geral, seleciona uma seqüência de linhas

para contrações. O algoritmo usa praticamente a mesma formulação de erro do método anterior, entretanto é ampliado para lidar com atributos da superfície tais como as cores.

GARLAND & HECKBERT (1997) desenvolveram um algoritmo para simplificação de superfícies quaisquer, baseada em contrações iterativas de vértices. A contração de um par é uma generalização natural da contração de linhas onde o par de vértices não necessita estar conectado por uma linha (FIGURA 2.18). Uma matriz simétrica Q_i de dimensão 4×4 é associada com cada vértice v_i . O erro no vértice é definido como $v^T Q v$, e quando um par é contraído, as suas matrizes são agrupadas para formar a matriz para os vértices resultantes. Estas matrizes foram derivadas para calcular a soma do quadrado das distâncias do vértice até um conjunto de planos, similar à métrica de erro de ROPNFARD E ROSSIGNAC (1996).

FIGURA 2.18 - CONTRAÇÃO DE PARES PELA UNIÃO DE VÉRTICES NÃO CONECTADOS.



FONTE: ADAPTADO DE ROPNFARD & ROSSIGNAC, 1996.

2.3 AVALIAÇÃO DA QUALIDADE DOS MODELOS GENERALIZADOS

A importância e responsabilidade das aplicações que usam os modelos digitais derivados do sistema LIDAR aumenta ainda mais a importância em fornecer os MDEs com uma correta medida de qualidade. Quando o modelo original é derivado por algoritmos de mínimos quadrados, regras para propagação de erros baseada nas variâncias e co-variâncias podem ser aplicadas para estimar a acurácia dos modelos derivados dos dados originais. A aplicação deste método isoladamente possui a desvantagem de fornecer uma medida detalhada de acurácia, entretanto sem qualquer informação sobre a influência dos fatores individuais sobre a análise.

Existem muitas maneiras para a avaliação da qualidade de um modelo digital de terreno. Diferentes aplicações possuem diferentes requerimentos. Desta forma, as métricas destes métodos para determinar a similaridade entre o modelo simplificado e o original são também

diferentes. Alguns podem utilizar uma das métricas, enquanto outros podem combinar várias delas.

A seguir serão mostradas algumas métricas utilizadas para a determinação do grau de fidelidade entre o MDE original, $f(x,y)$, e $f'(x,y)$ que é o MDE generalizado derivado da original.

2.3.1 Similaridade Perceptível

Quando a finalidade de um modelo simplificado é apenas para renderização, então a aparência visual é o aspecto que mais interessa. Tanto uma generalização supersimplificada quanto uma topologia alterada causará uma degradação visual do modelo simplificado. Uma maneira muito simples de mensurar esta similaridade é através da comparação da diferença de níveis de cinza entre as imagens geradas com o modelo antes e depois da generalização. Para um ponto de vista fixo, considerando a imagem do modelo original I_o e do modelo simplificado I_s , e supondo que o tamanho da imagem seja $n \times m$, e $I(u, v)$ é o vetor intensidade (RGB) de um ponto (u,v) na imagem I , considerando-se $\| I_o(u, v) - I_s(u, v) \|$ como a diferença dos valores entre os dois valores de intensidade ou vetores RGB (regra L_2) $I_o(u,v)$ e $I_s(u,v)$, logo a medida de similaridade perceptível entre as duas imagens pode ser dada pela equação (SCHROEDER *et al.*, 1992):

$$E_{img} = \| I_o - I_s \| = \frac{1}{n \times m} \sum_u \sum_v \| I_o(u, v) - I_s(u, v) \|^2 \quad (3)$$

É importante notar que, erro na imagem (E_{img}) depende do ponto de vista, então para o mesmo par de modelos (original e simplificado), a medida do erro é diferente para pontos de vista distintos. Se um modelo simplificado é utilizado para a exibição em todas as direções, então é necessária uma métrica de erro que considere todos os diferentes pontos de vista, no entanto a seleção de um conjunto que contenha todos os pontos de vista para a aplicação desta métrica é impraticável e permanece como um problema a ser resolvido.

2.3.2 Erro Geométrico

A similaridade perceptiva definida anteriormente é aplicável apenas em aplicações de renderização e visualização. Para outras aplicações tal como detecção automática de feições é essencial uma correta avaliação da similaridade geométrica.

2.3.2.1 Erro Médio Quadrático Vertical

Na Matemática, o erro médio quadrático ou RMS (do inglês *Root Mean Square error*) é uma medida estatística da magnitude ou dispersão de uma quantidade variável. Pode ser calculada para uma série de valores discretos ou para uma função variável contínua. O nome deriva do fato de que é a raiz quadrada da média aritmética dos quadrados dos valores.

O erro médio quadrático vertical para um modelo de superfície generalizado é como a regra L_2 para aproximação de funções. Para uma função $f(t)$ e a sua aproximação $f'(t)$, a regra L_2 é dada pela equação:

$$\|f - f'\| = \sqrt{\int_a^b (f(t) - f'(t))^2 dt} \quad (4)$$

Para medir o erro do TIN simplificado (TIN_s), comparado ao modelo TIN original (TIN_o) contendo n pontos, assumindo que a simplificação do terreno é realizada sob um modelo TIN gerado a partir dos dados originais, o Erro Médio Quadrático Vertical ou VRMS pode ser obtido pela equação proposta por ANDREWS (1996) e adaptada nesta pesquisa para atender os requisitos propostos, conforme abaixo:

$$\|TIN_s - TIN_o\| = \frac{1}{n} \sqrt{\sum_n [H_{TIN_s}(x, y) - H_{TIN_o}(n)]^2} \quad (5)$$

A definição do H_{TIN_s} é dada pela equação:

$$H_{TIN_s} = \begin{cases} z & \text{se } (x, y) \text{ é um vértice no TIN e } z \text{ é a altura deste ponto;} \\ -\frac{(ax + by + d)}{c} & \text{se } (x, y) \text{ não é um vértice, mas está em um triângulo} \\ & \text{com equação do plano } ax + by + cz + d = 0 \end{cases} \quad (6)$$

2.3.2.2 Erro Vertical Máximo (L_∞)

O erro máximo vertical é uma métrica de erro que fornece um controle de erro delimitado sobre toda a superfície simplificada. Isto limita a simplificação da superfície dentro de duas superfícies limitantes. O erro vertical máximo para a generalização do modelo é similar à regra L_∞ para aproximação e ajuste de funções.

Esta medida de erro foi definida por GARLAND & HECKBERT (1995) e indica a maior diferença absoluta entre o modelo original e o generalizado. Quanto menor for esta medida, mais

o modelo resultante se aproxima do modelo original. A regra L_∞ é uma métrica de Erro Máximo entre uma função $f(t)$ e a sua aproximação $f'(t)$, que pode ser definida pela Equação:

$$\| f - f' \|_\infty = \text{Max}_{a \leq t \leq b} | f(t) - f'(t) | \quad (7)$$

2.3.2.3 Erro Vertical Absoluto Médio

Erro vertical absoluto médio ou VMAE (*Vertical Mean Absolute Error*) é também uma métrica de erro para avaliação da acurácia dos modelos simplificados. Esta métrica fornece a média dos valores absolutos das diferenças de elevações (JÜENGER & SNOEYINK, 1998). O VMAE entre um modelo digital de elevação D_o com suas altitudes H_D e o seu TIN generalizado TIN_s cujos vértices possuem altitudes H_{TIN} , é dado pela Equação:

$$\| TIN_s - D_o \|_{VMAE} = \frac{1}{n \times m} \left(\sum_u \sum_v | H_{TIN}(u, v) - H_D(u, v) | \right) \quad (8)$$

2.3.2.4 Comparação Entre as Métricas de Erro

Atualmente não há métrica de erro ideal que se proponha a refletir totalmente o grau de fidelidade dos modelos generalizados. Então é necessário o conhecimento dos pontos fortes e fracos das medidas de erros atualmente disponíveis.

Verifica-se nas definições encontradas na literatura, que o erro vertical máximo é uma métrica consistente uma vez que fornece um limiar global de erro sobre o modelo simplificado. Isto garante que o desvio entre o modelo aproximado e o original não será maior que esta tolerância. Comparado ao erro máximo vertical, o erro médio quadrático RMS vertical não apresenta as mesmas características, uma vez que permite o surgimento de grandes erros locais e o erro RMS vertical é mais robusto com relação ao ruído do que o erro máximo vertical (GARLAND, 1999). Isto é uma boa métrica para a qualidade geral de ajuste do modelo simplificado e do original.

JÜENGER & SNOEYINK (1998) concluíram que VMAE é uma boa métrica de erro, pois é menos suscetível a erros isolados e a erros grandes pouco freqüentes, devido ao VMAE dar a mesma importância sobre todos os erros igualmente, enquanto erro médio quadrático tende a enfatizar os grandes erros.

2.4 TECNOLOGIA DE MAPEAMENTO A LASER

O sistema de sensoriamento remoto ativo, baseado na tecnologia laser para a aquisição de dados topográficos densos e precisos recebe, entre outras designações, a de LIDAR (*Light Detection And Ranging*) denominação pela qual este procedimento é internacionalmente conhecido. Funcionalmente, LIDAR é um único sistema onde se integram três tecnologias que combinadas permitem o posicionamento das projeções dos feixes de laser nos objetos da superfície, com alto grau de precisão e com a capacidade de adquirir dados para a produção de um ou mais Modelos Digitais de Elevação (MDE). Estas tecnologias são:

- Sistema de Emissão de Feixes de Laser;
- Sistemas de Posicionamento Global (GPS) e
- Sistemas de Navegação Inercial (INS – *Inertial Navigation System*).

O uso da tecnologia laser em equipamentos eletrônicos para a determinação de distâncias é bastante familiar aos topógrafos com o uso de distanciômetros eletrônicos, desde 1970 e em estações totais a partir de 1980, embora a utilização de laser para medição de distâncias vem sendo empregada desde a década de 60. Na década de 90, com o desenvolvimento de técnicas de GPS avançadas, sistemas de medição inercial, ou IMU (*Inertial Measurement Unit*) pequenos e relativamente de menor custo e computadores portáteis tornaram possível a comercialização da tecnologia, bem como a obtenção de maior precisão e consistência na aquisição de dados em plataformas aéreas.

2.4.1 Tipos de Sistemas LIDAR

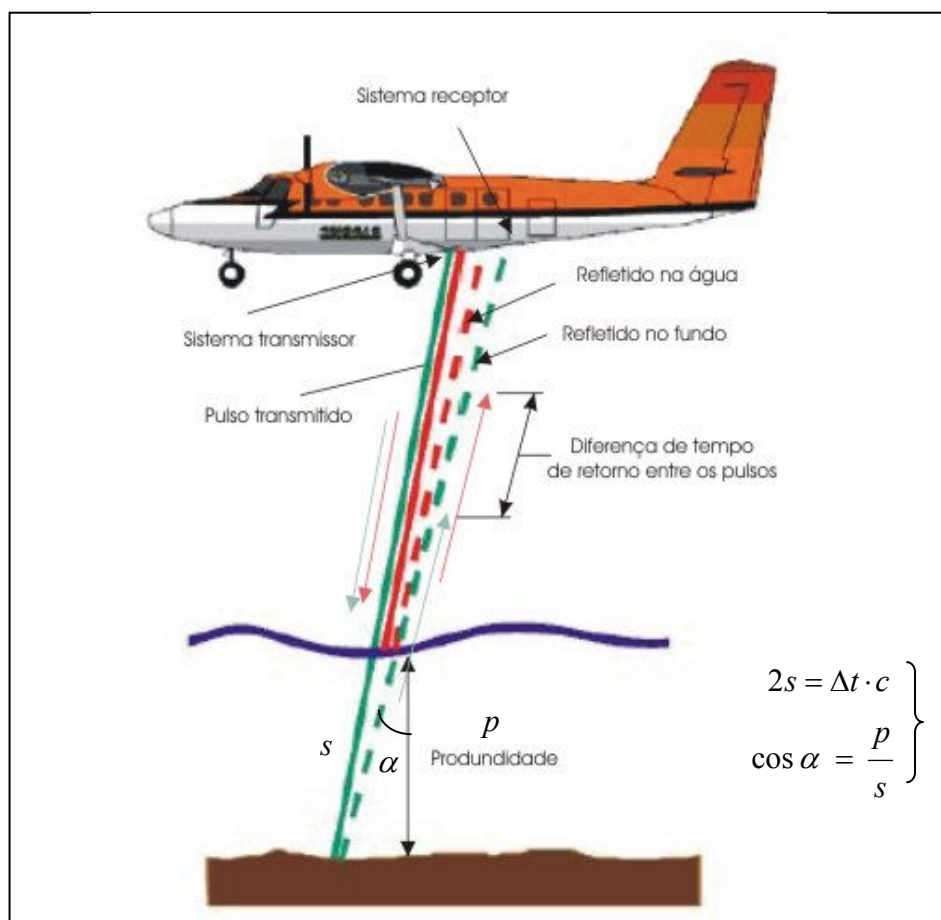
Todos os sistemas LIDAR determinam de alguma maneira a distância entre o sensor e o ponto iluminado na superfície do terreno (WEHR & LOHR, 1999), porém têm-se diversos tipos de sistemas LIDAR e entre estes serão destacados os seguintes:

2.4.2 LIDAR Batimétrico

Este sistema aerotransportado desenvolveu-se em meados dos anos 60. Atualmente existem alguns sistemas em operação, sendo que um dos mais avançados e confiáveis é o *Scanning Hydrographic Operational Airborne LIDAR Survey*, conhecido como sistema SHOALS, que foi concebido como um dos sistemas LIDAR aquáticos mais versáteis em uso no mundo. O sistema SHOALS usa feixes de comprimento de onda da cor vermelho (infravermelho), o qual é completamente refletido na superfície da água e detectado pelo sensor,

bem como um feixe de comprimento de onda de cor azul-verde, que penetra na superfície da água e é refletido pelo fundo (FIGURA 2.19). O LIDAR hidrográfico dispara sob a água, pulsos de laser co-alinhados de dois comprimentos de onda diferentes. A profundidade da água é calculada pela diferença de tempo entre os dois sinais. Outra diferença importante entre os sistemas é a frequência dos raios-laser emitidos.

FIGURA 2.19 - LIDAR BATIMÉTRICO – SISTEMA SHOALS – ESQUEMA MOSTRANDO PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO.



FONTE: SITE DA OPTECH (<http://www.optech.ca/shoalssys.htm>).

Em aplicações práticas desta tecnologia, parte da energia do laser é perdida devido à refração, dispersão e absorção na superfície da água, no fundo e ao longo da profundidade. A turbidez e limpidez da água e o tipo do fundo são os fatores que mais limitam a profundidade de detecção (IRISH & LILLYCROP, 1999). Geralmente, um LIDAR marinho pode medir comprimentos de até cerca de 50 metros profundidade, dependendo de quão turva ou límpida a água se encontre. A combinação destes efeitos define a intensidade de retorno do fundo limitando a profundidade máxima detectável.

2.4.3 LIDAR Topográfico

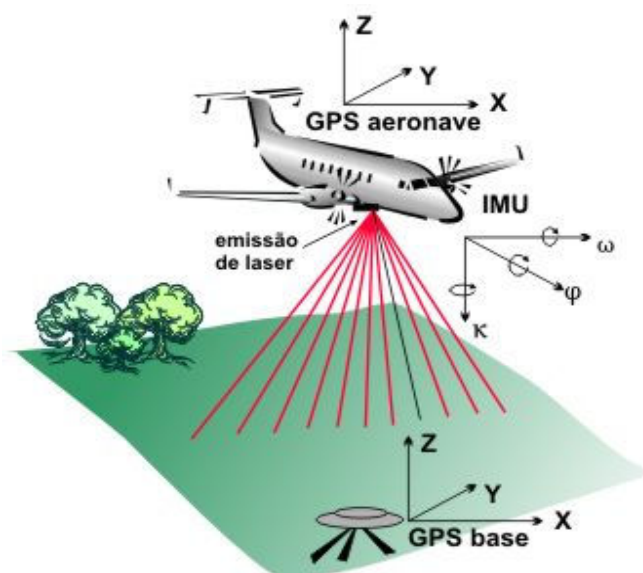
A maioria dos sistemas LIDAR do tipo topográfico usa raios na faixa do infravermelho próximo que se refletem na maioria dos objetos através da emissão de pulsos de alta potência que podem ser emitidas em curtos intervalos de tempo em espectro óptico estreito. Enquanto o sistema terrestre emite feixes com a taxa de 30.000 Hz, o sistema SHOALS é relativamente de baixa frequência, emitindo pulsos a 400 Hz.

O sistema LIDAR se tornou possível inicialmente através de lasers pulsados (sistema-pulso) operando na região do infravermelho próximo, que permitiu claramente o registro do retorno dos sinais depois da reflexão e difusão no terreno. Sistemas de ondas contínuas também têm sido usados, os quais obtêm distâncias a partir de medidas de diferença de fase (ACKERMANN, 1999). O tempo de viagem é registrado com uma precisão de 10^{-10} s e convertido para distância.

Este sistema pode ser basicamente subdividido em duas unidades:

- A unidade de medição laser que compreende os mecanismos de geração, emissão e recepção do feixe laser;
- E a unidade de posicionamento e orientação que é composta de um sistema de posicionamento global (GPS) e uma unidade de medição inercial (IMU) (FIGURA 2.20).

FIGURA 2.20 – COMPONENTES BÁSICOS DE UM SISTEMA LIDAR TOPOGRÁFICO.



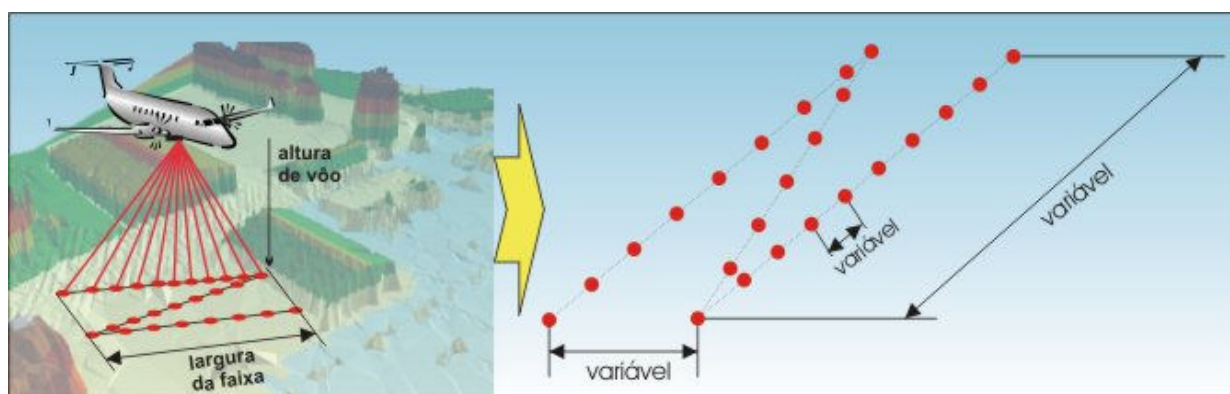
O sistema de posicionamento global provê informação de tempo e de posição. Juntamente com o registro de cada pulso de laser emitido é registrado o horário usando o relógio do receptor GPS de dupla frequência (L1/L2) (que possua geralmente uma taxa de medição

posicional de 1Hz - uma observação por segundo) para posterior correlação com a informação posicional do GPS. Os receptores nas estações de apoio terrestre para posterior correção diferencial devem possuir as mesmas características. A unidade de medição inercial determina, a uma taxa da ordem de 200 Hz, a orientação do sensor em relação aos eixos X, Y, Z. Esses valores combinados com a informação posicional do sensor proveniente do GPS, e os dados de distância e ângulo da unidade de medição laser, bem como parâmetros de calibração tornam possível a determinação das coordenadas X, Y e Z de cada ponto coletado. Em medições de distâncias realizadas com laser, dois princípios podem ser aplicados: o princípio baseado em pulsos de laser e sistemas baseados em ondas contínuas através da medição da diferença de fase entre o sinal emitido e o refletido de um objeto na superfície da terra (WEHR & LOHR, 1999). O método da diferença de fase é aplicado com lasers que emitem a luz continuamente.

Existem diversos mecanismos de varredura empregados em equipamentos laser, dentre eles polígonos de rotação, varredura Palmer e espelhos oscilantes (WEHR & LOHR, 1999 *op cit*). Esses diferentes mecanismos provêm de distintos padrões de escaneamento. Os espelhos oscilantes, que abrangem a grande maioria dos equipamentos laser aerotransportados existentes, produzem um padrão de linha em “zig-zag” (FIGURA 2.21). Neste tipo de mecanismo o espelho serve como defletor do feixe laser e sua direção muda de acordo com a taxa especificada pelo operador. Com este sistema obtêm-se linhas quase perpendiculares à direção de voo. A largura das faixas produzidas varia em função da altitude de voo (h) e do ângulo de abertura da varredura (θ) sendo facilmente calculadas através da equação:

$$SW = 2h \tan\left(\frac{\theta}{2}\right) \quad (9)$$

FIGURA 2.21 - PADRÃO DE VARREDURA DOS ESPELHOS OSCILANTES.



- Devido ao fato de que o feixe de laser incide na superfície do terreno com certo diâmetro, é possível que o feixe encontre em seu percurso mais de um objeto

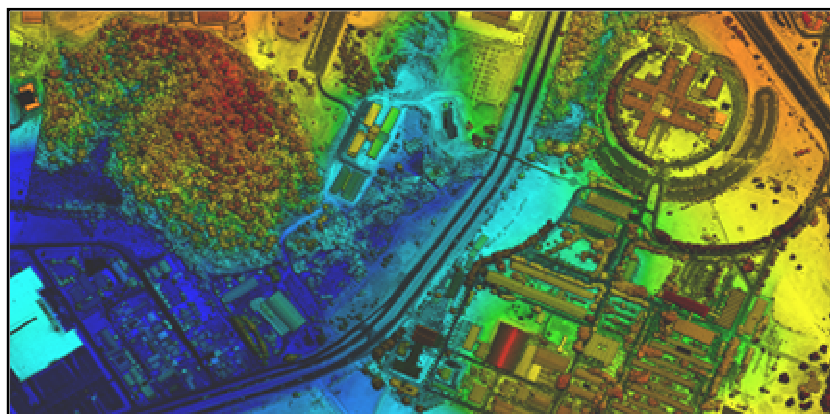
gerando múltiplos retornos para um mesmo pulso emitido. Alguns sistemas têm a capacidade de registrar o primeiro e o último retorno para cada feixe emitido.

- Além da informação posicional alguns sistemas são capazes de registrar a intensidade de retorno do feixe laser, ou seja, a informação da refletância dos objetos mapeados na região do infravermelho próximo do espectro eletromagnético (1064nm). A intensidade é definida como a razão entre a energia refletida e a emitida (SONG *et al*, 2002) constituindo informação adicional no processo de identificação dos objetos (FIGURA 2.22). A fusão da informação de altimetria com a informação de intensidade promove imagem onde os objetos podem ser mais facilmente identificados (FIGURA 2.23) (SONG *et al*, 2000).

FIGURA 2.22 - IMAGEM GERADA A PARTIR DA INTENSIDADE DE RETORNO DO PULSO LASER



FIGURA 2.23 - FUSÃO DA IMAGEM DE INTENSIDADE COM A ALTIMETRIA DOS OBJETOS

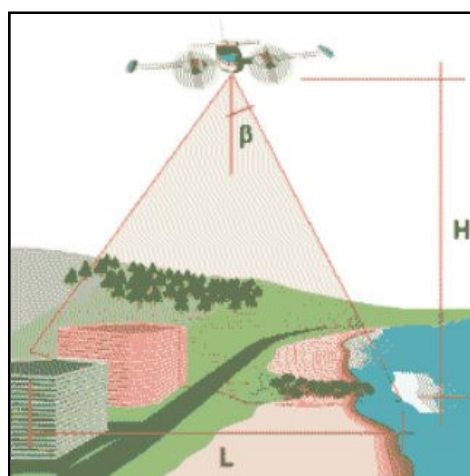


A informação da elevação é indicada pela escala de cores que vai desde o Azul escuro, que representa as áreas com menores elevações, até o vermelho que representa as mais elevadas.

2.4.4 Sistema com Espelhos

O intervalo de tempo decorrido desde a emissão do feixe até a recepção do sinal retornado pela reflexão no solo é medido e, baseando-se na velocidade da luz conhecida, a distância do sensor até o solo pode ser determinada (FIGURA 2.24).

FIGURA 2.24 – DESENHO ESQUEMÁTICO DA VARREDURA DO SISTEMA POR ESPELHOS.



O sistema lança pulsos de luz que um espelho aponta para o solo. Durante o levantamento, o sistema varre o plano do terreno sob a aeronave, e registra a distância até o solo para cada um dos pulsos expedidos, sendo armazenado, também, o respectivo ângulo de inclinação de cada pulso, em relação à vertical transformada. Neste caso as pulsações óticas refletidas no solo são coletadas pelo receptor e são decompostas de sinal ótico, para eletrônico. A varredura da área pretendida é transversal à direção de voo (determinando assim a largura da faixa abrangida) com um ângulo de abertura especificado pelo operador.

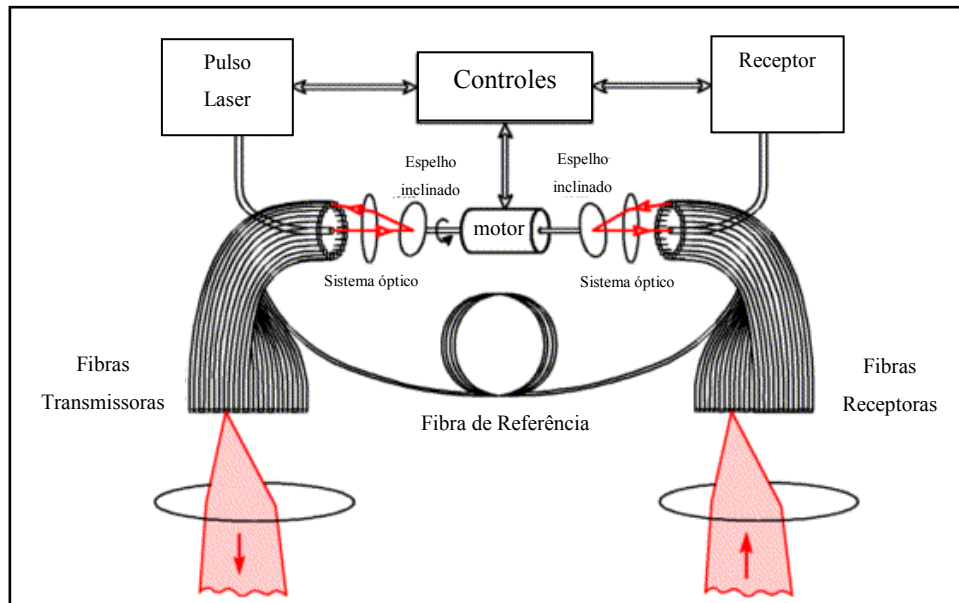
2.4.5 Sistema com Fibras

A característica deste sistema é a colocação de fibras óticas no lugar dos espelhos para a emissão dos pulsos laser (reflexão em diversos ângulos).

São utilizadas 127 fibras com ângulo fixo entre elas ($\cong 7^\circ$) para que seja realizada a varredura da superfície terrestre. Ao todo são 128 fibras, sendo que uma delas é tida como fibra de referência. Este tipo de sistema foi desenvolvido e é utilizado pela empresa alemã *TopoSys*.

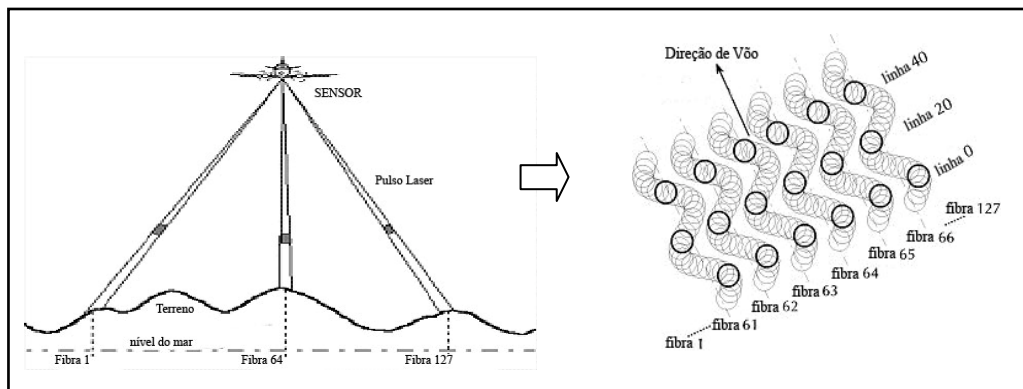
O arranjo fixo das fibras produz um modelo regular e invariável de varredura (FIGURA 2.25 e FIGURA 2.26).

FIGURA 2.25 – PRINCÍPIO DE OPERAÇÃO DE UM SISTEMA DE FIBRAS.



FONTE: SITE DA TOPOSYS (www.toposys.com).

FIGURA 2.26 – PADRÃO DE VARREDURA DO SISTEMA TOPOSYS.



FONTE: SITE DA TOPOSYS (www.toposys.com).

2.4.6 Limitações de Precisão dos Sistemas LIDAR

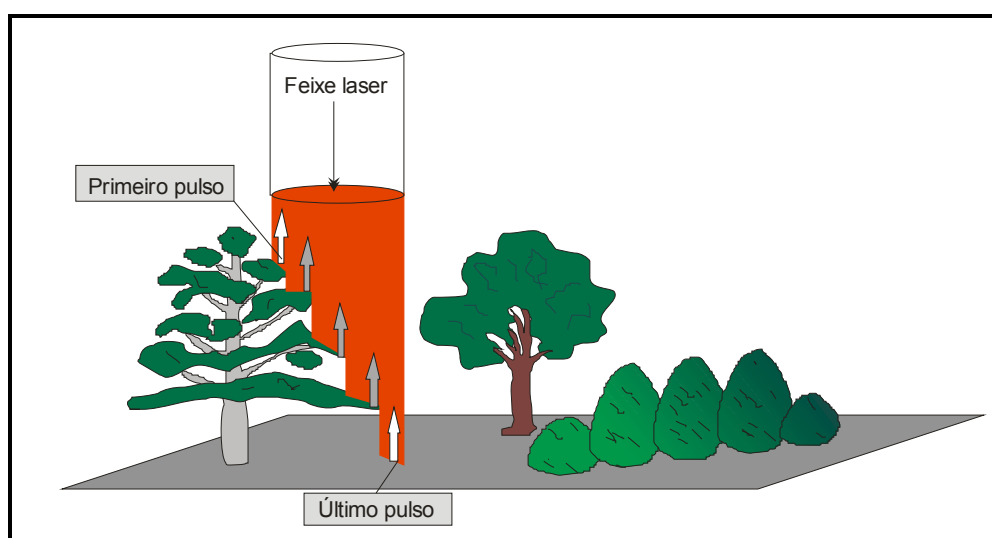
Existem muitos fatores que afetam a precisão atingida por um sistema LIDAR. As principais limitações de precisão devem-se aos componentes do sistema GPS e IMU. Os raios laser são muito precisos quanto às suas trajetórias e podem fornecer distâncias acuradas de até 3cm (MOSAIC, 1999).

Atualmente é possível obter dados com alta precisão empregando o LIDAR em sistemas móveis e aerotransportados, isto graças ao aumento da disponibilidade dos sistemas GPS e IMU.

O LIDAR combina o envio de um feixe de laser com um sistema receptor, onde existem pulsos ópticos, que são emitidos, refletidos e regressam ao receptor, o qual mede com exatidão o tempo decorrido entre a emissão e a resposta do sinal. Isto porque a velocidade da luz é conhecida, o tempo de trajeto do pulso pode ser transformado em distância. O receptor capta o retorno da reflexão do pulso antes mesmo do próximo pulso ser emitido, pois o pulso laser se move na velocidade da luz. Associando-se estes dois fatores, (posição GPS do laser e a orientação do sistema dado pelo IMU) coordenadas acuradas (x, y, e z) podem ser calculadas para cada pulso de laser (SMITH & WEST, 1999). Desta forma as taxas de emissão destes raios podem variar de poucos até dezenas de milhares de pulsos por segundo e grandes volumes de pontos são coletados. Por exemplo, um laser emitindo pulsos a 10.000 vezes por segundo gerará 600.000 pontos por minuto.

Na maioria das vezes o espaçamento típico de um ponto varia entre 2 e 4 metros. Pode haver um armazenamento de múltiplos retornos de um mesmo pulso em alguns sistemas LIDAR. Nestes, o raio pode atingir as folhas da copa de uma árvore, enquanto outra parte atravessa e atinge outras folhas abaixo ou galhos inferiores. Parte do feixe provavelmente atingirá o solo sendo refletido até o receptor, formando um conjunto de múltiplos retornos armazenados, cada um com coordenadas x, y, z para cada posição (FIGURA 2.27).

FIGURA 2.27 – MÚLTIPLOS RETORNOS DE PULSOS EMITIDOS.



2.4.7 Plataformas de Aquisição LIDAR

Grande parte dos sistemas LIDAR é usada em aviões de pequeno a médio porte. Há um grande número de sistemas LIDAR terrestres que podem ser apropriados para operar em helicópteros e muitos deles foram projetados para o uso exclusivo neste tipo de aeronave.

O sistema SHOALS demanda uma plataforma de maior porte para realização do levantamento. Geralmente as aeronaves utilizadas podem ser desde um avião de grande porte até um helicóptero como, por exemplo, o Bell 212. Em geral, ao demandar um avião maior, mais alto será o custo de operação.

2.4.8 Precisões e Confiabilidade

Todos os componentes do sistema tais como o GPS, a unidade de medidas inerciais (IMU) e o Laser, possuem limitações intrínsecas na precisão, que são em sua maioria, conhecidas e podem ser previstas.

Para a realização de um levantamento por sistema LIDAR deve-se manter grande preocupação na estimativa dos fatores ao se realizar o planejamento e também a execução dos projetos. É fundamental, que as empresas que agenciam tais serviços estabeleçam um plano de controle de qualidade durante a fase de contratação, incluindo pontos de apoio para verificação das precisões atingidas.

A precisão dos dados depende de fatores que vão desde:

- i. O planejamento e condições de voo;
- ii. Os efeitos atmosféricos;
- iii. A ondulação do terreno e a cobertura vegetal.

Em termos de variação do terreno e vegetação, a seguinte precisão de pontos é possibilitada (MOSAIC, 1999): Grau de confiança de 95%.

Precisão Vertical Absoluta:

- +/- 0,15 m em Superfícies Sólidas e Campo Aberto;
- +/- 0,25 m em Superfícies com Média Cobertura Vegetal (terreno plano a ondulado);
- +/- 0,30 a 0,50 m em Superfícies com Média Cobertura Vegetal (terreno montanhoso).

Precisão Horizontal Absoluta:

- +/- 0,50 a 0,75 m em todos os tipos de terreno, com exceção dos extremamente montanhosos (depende da altura de voo e ângulo de abertura dos raios).

Em áreas de vegetação muito densa, como florestas de secundárias e ou florestas tropicais densas, a porcentagem de pontos que penetram até atingir o solo decresce e isto afeta a precisão do modelo digital resultante. Alguns cuidados simples nos levantamentos são

necessários para assegurar confiabilidade nos modelos digitais resultantes gerados sob estas condições.

2.4.9 Vantagens e Aplicações do LIDAR

Uma característica natural do sistema LIDAR é que os dados são adquiridos, processados e entregues em formato digital, facilitando a forma de trabalho e derivação de produtos e abrangendo uma grande variedade de aplicações. A forma mais simples do dado adquirido com o sistema LIDAR é um arquivo em formato ASCII (*American Standard Code for Information Interchange*) contendo os valores das coordenadas x, y e z. Este valor corresponde a uma posição geográfica tridimensional da reflexão do feixe no objeto atingido e os arquivos com as coordenadas x, y e z podem ser importados por vários *softwares* disponíveis no mercado tais como os SIG (*Geographic Information Systems*, cujo acrônimo inglês é GIS).

A manipulação dos dados LIDAR pode gerar uma grande variedade de produtos, os quais podem ser enriquecidos ou combinados com outros tipos de dados. Considerando-se os exemplos a seguir:

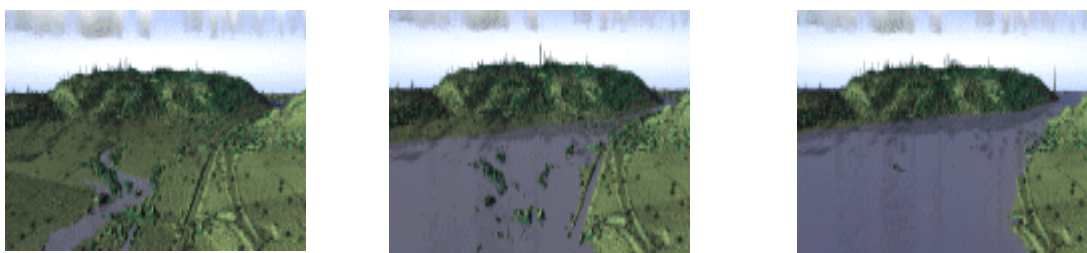
- É possível importar os pontos com coordenadas x, y e z para um SIG e criar um MDE permitindo a criação de superfícies sombreadas extremamente realísticas (RENSLOW, 2000);
- Com o mesmo MDE é possível a criação de mapas retificados (ortofotocartas) através da combinação dos dados LIDAR com imagens adquiridas por aerofotogrametria convencional ou imagens provenientes de câmeras digitais.
- Para uma visualização menos precisa a maioria dos sistemas faz o imageamento de vídeos no formato VHS ou SVHS. Estes podem ser visualizados separadamente ou em combinação com o MDE, produzindo um produto com baixa precisão, porém interessante.
- Em alguns programas de mercado, existe a possibilidade de carregar uma série de mapas, imagens aéreas e modelos digitais para criar videocliques animados em PC. Estes cliques podem conceder grande capacidade de visualização para a apresentação ou estudo, como por exemplo, descrever uma rodovia, o vale de um rio, um centro urbano ou uma floresta.

Animações gráficas tridimensionais e outros recursos computacionais podem ser acrescidos ao voo virtual, criando efeitos diferenciados tais como vistas panorâmicas e efeitos especiais como neblina, luminosidade, etc., aumentando ainda mais o realismo típico nas aplicações de Realidade Virtual.

Programas como AutoCad, ArcGIS e ERDAS, são capazes de realizar a importação e exportação dos dados LIDAR de um formato para outro, sendo que o maior obstáculo destes é a limitação quanto ao número de pontos que se pode manipular.

Utilizando-se os modelos digitais derivados do LIDAR, é possível prever as áreas de abrangência em planos de mitigação e estratégias de reparo em caso de catástrofes (FOWLER, 2000). A confiabilidade do mapeamento de risco de enchente e modelos hidrológicos é dependente da precisão da elevação do terreno empregada (FIGURA 2.28).

FIGURA 2.28 – SEQUÊNCIA QUADROS - SIMULAÇÃO DE ENCHENTE.



Com o LIDAR como ferramenta de levantamento, poucas áreas necessitam de intervenção humana. Nas áreas de proteção ambiental, os custos com derrubada de árvores para permitir o acesso aos locais nos levantamentos convencionais podem ser muito altos, inviabilizando muitos empreendimentos, como os que dependem de dados precisos de elevação para levantamentos de rodovias, barragens entre outros projetos de construção civil (FIGURA 2.29).

FIGURA 2.29 – PROJETO DE ENGENHARIA PARA CONTRUÇÃO DE RODOVIA.



FONTE: ADAPTADO DE (BERG & FERGUSON , 2001).

Através do uso dos Modelos Digitais de Elevação (MDE) os cálculos de volumes de corte-aterro podem ser realizados de forma rápida e precisa durante a fase de planejamento, quando comparados com os levantamentos de campo ou técnicas fotogramétricas. O MDE pode também ser utilizado em conjunto com sistemas GIS e CAD possibilitando desta forma o planejamento e modelagem da melhor rota ou localização para uma futura construção.

Levantamento com *laser scanner* aerotransportado oferece aos planejadores um modo efetivo e relativamente barato de elaboração de planos diretores ou imobiliários, com mínima presença humana no campo. O uso combinado dos dados LIDAR com ortofotos digitais de alta resolução fornece todos os subsídios necessários à locação de novas infra-estruturas (FIGURA 2.30).

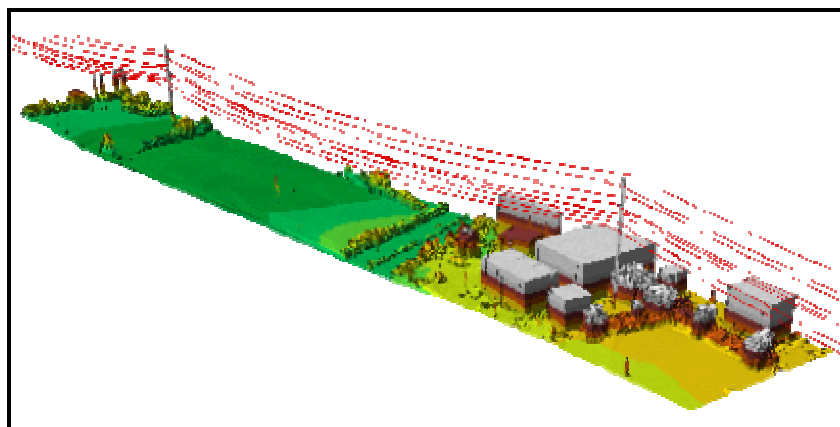
FIGURA 2.30 – ELABORAÇÃO DE PLANOS DIRETORES (LOTEAMENTOS).



FONTE: ADAPTADO DE MOSAIC (1999).

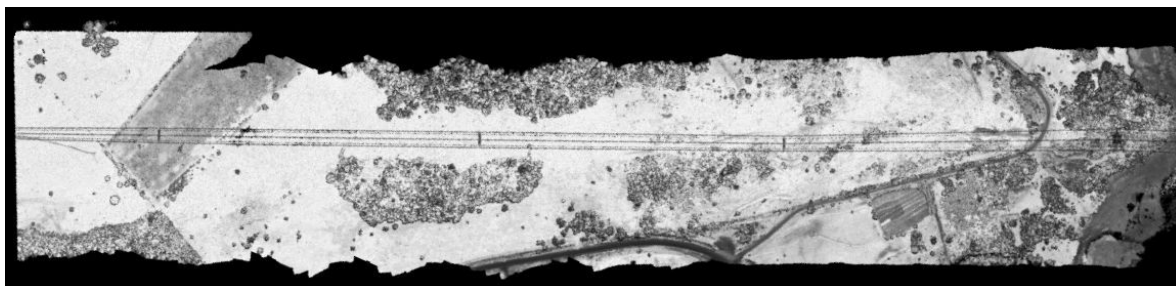
A tecnologia LIDAR é particularmente apropriada para levantamento de linhas de transmissão (FIGURA 2.31). O uso de aeronaves de baixa velocidade como os helicópteros, em mapeamentos do tipo “corredor” pode ser muito vantajoso comparado àqueles realizados com aviões de vôos fotogramétricos que pode enfrentar dificuldades para sobrevoar no traçado das linhas. Além disto, o recobrimento por helicóptero pode assegurar também um conjunto de dados seja levantado com maior segurança, já que tanto a velocidade quanto a altitude podem ser facilmente ajustadas quando necessário e durante o vôo.

FIGURA 2.31 - MODELOS DE TRECHOS EM TRÊS DIMENSÕES.



Serviços de mapeamento para fins de inventário e inspeção de linhas podem ser realizados simultaneamente com a adição de uma câmera digital, de uma câmera de vídeo VHS, ou outros sensores na fuselagem junto ao sistema LIDAR (FIGURA 2.32).

FIGURA 2.32 - IMAGENS DE INTENSIDADE DE RETORNO DOS FEIXES.



Uma das primeiras e principais áreas de pesquisa para aplicações comerciais do LIDAR foi a da indústria florestal onde informações precisas do terreno e topografia abaixo da copa das árvores são extremamente importantes.

A alta confiabilidade na determinação da altitude e densidade das árvores provê informações muito importantes, as quais seriam de difícil obtenção com as técnicas convencionais (FERGUSON, 2001). Além disto, os dados podem derivar simultaneamente do mapeamento do solo abaixo da vegetação e da copa das árvores, de onde se pode derivar facilmente a altura da vegetação (FERGUSON, 2000).

2.4.10 Aspectos Conclusivos

Esta é uma tecnologia moderna que tem permitido que dados antes difíceis, ou quase impossíveis de se obter, sejam coletados. Conclusões podem ser tiradas uma vez que a

tecnologia LIDAR causa grande impacto nos levantamentos tradicionais da indústria cartográfica, entretanto são muitos os benefícios econômicos e sociais que se acumulam com o seu uso.

O LIDAR hidrográfico está revolucionando o mercado de levantamento e mapeamento, pois é capaz de fornecer mais informações do que qualquer outro método com esta finalidade. Em termos práticos, o sistema do tipo hidrográfico tem sido uma ferramenta viável de levantamento no exterior desde 1980.

A velocidade com que os dados podem ser coletados e processados é relativamente alta quando comparada com outras tecnologias. Isto permite aos usuários a aquisição dos produtos mais rapidamente e com prazo de entrega reduzido. Em muitos casos o tempo poupado com levantamento de campo e mapeamento se traduz em ganhos econômicos consideráveis.

A tecnologia LIDAR oferece flexibilidade, embora isso possa ser dito com os dados coletados via outros sistemas, os dados coletados são extremamente versáteis, já que podem ser utilizados para muitos fins. Este fato se deve não somente à grande quantidade de pontos adquiridos, mas à sua precisão, pela capacidade dos raios laser penetrarem por entre as folhagens até atingir o solo em áreas florestais densas, e pela possibilidade de fornecer imagens digitais da intensidade de retorno na faixa do espectro infravermelho próximo (0,8 μ m a 1,1 μ m).

Fatores técnicos, econômicos e de sustentabilidade devem ser considerados em projetos de Cartografia, os quais são contemplados pela tecnologia LIDAR, uma vez que a premissa da viabilidade da utilização deste sistema é verdadeira para um número crescente de usuários do setor.

3 METODOLOGIA

3.1 ÁREA DE ESTUDO

3.1.1 Definição da Área de Estudo

A Companhia Paranaense de Energia Elétrica - COPEL participa ativamente com Planos de Ação Emergencial (PAE) na usina hidrelétrica Governador Bento Munhoz da Rocha Neto, conhecida popularmente como Foz do Areia. Nesta usina, a operação em emergência é caracterizada pela situação em que, devido ao aumento da afluência, há perspectiva do remanso do seu reservatório exercer influência na inundação das cidades de União da Vitória e Porto União (ONS, 2004).

A referida região apresenta um histórico de estudos decorrentes da problemática relacionada a enchentes, que afetam a população ribeirinha do rio Iguaçu e de seus afluentes. A grande maioria dos estudos nesta área se concentra na ciência da hidrologia e hidráulica, que necessita de modelos digitais de elevação precisos para que seja possível a derivação de informações necessárias aos estudos, porém devido a grande quantidade e densidade dos dados disponíveis, a sua utilização é impossibilitada.

É neste contexto, que a escolha das áreas de estudo recaiu sobre a Região Urbana de União da Vitória (RUUV), uma vez que os dados necessários para o desenvolvimento do trabalho foram disponibilizados o que permitirá avaliar os objetivos propostos.

3.1.2 Características Fisiográficas

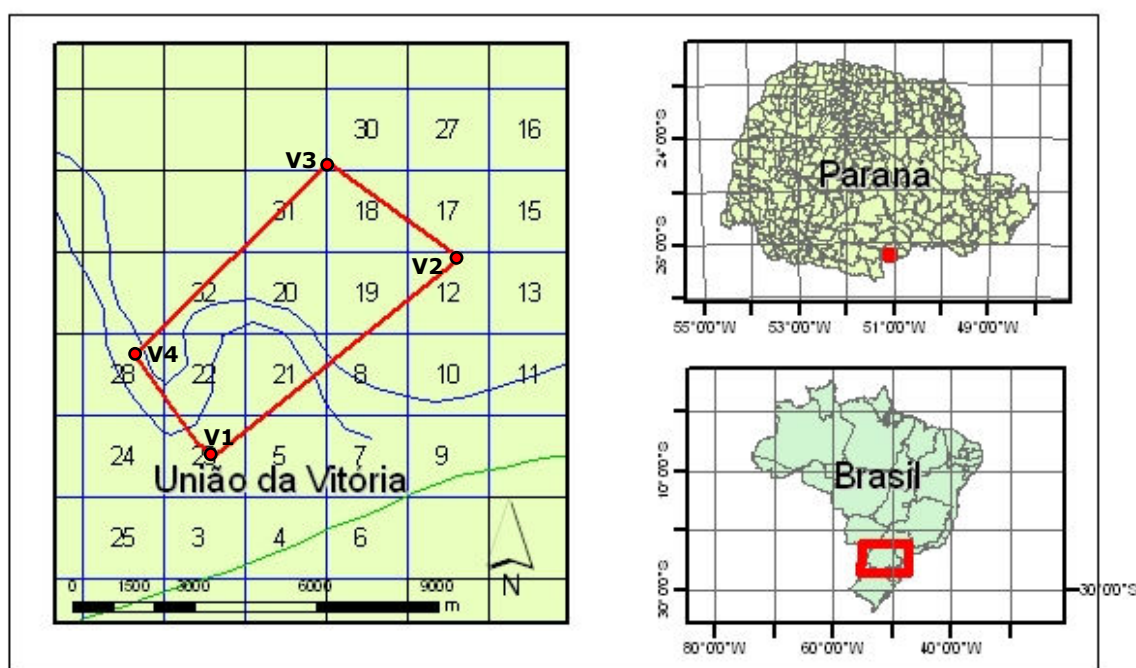
A área situa-se na mesorregião sudeste do Estado do Paraná no Município de União da Vitória a aproximadamente 200 km a sudoeste da capital Curitiba, e perfaz uma superfície de 45,45 km² em um perímetro de 29,5 Km (FIGURA 4.1). O polígono que delimita a área está situado ao sul da Folha de UNIÃO DA VITÓRIA (SG-22-Y-B-III) sendo formado pelos vértices e respectivas coordenadas UTM (Sistema de Referência SAD 69 – *South American Datum 1969*: zona 22S) conforme TABELA 3.1.

TABELA 3.1 – VÉRTICES DO POLÍGONO QUE DELIMITAM A ÁREA.

Vértices	UTM E (m)	UTM N (m)	Distância (m)	Azimute
V ₁	485.900,16	7.096.261,73	10.958,15	47°57'11"
V ₂	494.000,99	7.103.529,50	3.617,24	131°35'36"
V ₃	496.701,27	7.101.059,03	10.771,46	225°48'13"
V ₄	489.002,61	7.093.561,45	4.140,65	311°06'22"

Para o acesso à área, partindo-se de Curitiba, o acesso à região de estudo dá-se através da rodovia federal BR 476. Durante o percurso passa-se pelos Municípios de Araucária, Contenda, Lapa e São Mateus do Sul. No interior da área de União da Vitória, temos a Região de Estudo (FIGURA 3.1).

FIGURA 3.1 - MAPA DE LOCALIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO.



3.1.3 Descrição da Área de Estudo

A região em estudo está inserida no Planalto das Araucárias (Primeiro Planalto Paranaense) e é considerada como uma zona de eversão entre a Serra do Mar e a Escarpa Devoniana, que constitui o limite oriental dos sedimentos da Bacia do Paraná a oeste (MAACK, 1947). Essa unidade apresenta-se distinta quanto à morfologia, pois a região corresponde a

Superfície de Erosão Iguaçu modelada pela Bacia Hidrográfica do Alto Iguaçu, onde sofreu influência decisiva do entalhamento daquele rio e de seus afluentes. A área é cortada pelos rios Iguaçu e Rio Vermelho e alguns córregos de menor expressividade.

3.2 PREPARAÇÃO DOS DADOS

Os dados foram adquiridos através de um levantamento com *laser scanner* realizado pelo Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento (LACTEC). Este levantamento foi especificado em contrato de compra de dados firmado entre o LACTEC e a Companhia Paranaense de Energia Elétrica (COPEL) no ano de 2002. Várias áreas de reservatórios de usina hidrelétricas e também outras áreas específicas foram recobertas com o uso da tecnologia LIDAR, e se destinaram a subsidiar estudos de recursos hídricos e de potencial hidráulico na área de engenharia civil, áreas de meio ambiente e outras áreas da COPEL.

3.2.1 Materiais e Métodos

Os dados necessários para a realização deste trabalho estão reunidos em três mídias digitais (3 CDs), divididos em 36 quadrículas de 3 Km de lado, cada uma armazenada em arquivo no formato texto (ASCII) onde coordenadas (x, y, z, i) dos pontos de cada um dos retornos do laser. Com base nos dados disponíveis, nove sub-áreas foram selecionadas para a execução dos experimentos.

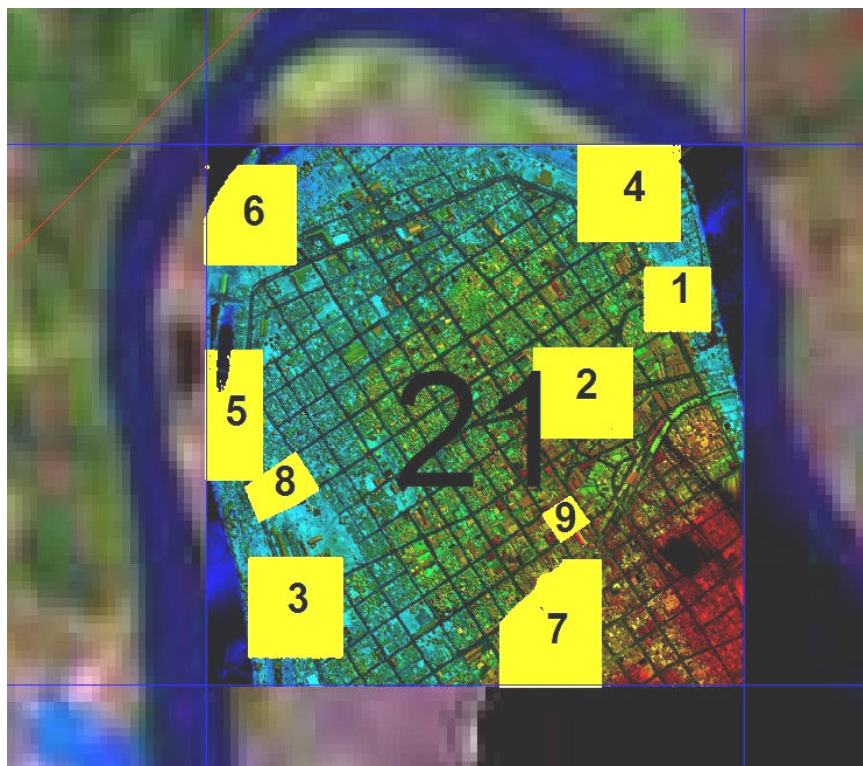
Para a realização deste projeto foram utilizados os dados originais levantados com o uso da tecnologia do LIDAR. Nestes dados, somente o processamento inicial foi realizado de maneira a prover uma massa de pontos dentro do sistema geográfico de referência conhecido, neste caso em coordenadas UTM no Datum SAD1969.

As operações computacionais necessárias à execução de todas as atividades deste projeto foram realizadas em microcomputador de mesa com processador Intel Pentium 4 de 2,8GHz e 1Gb de memória RAM.

3.2.2 Seleção das Sub-áreas

Para a realização das simplificações, nove sub-áreas foram selecionadas, cada uma contendo em média 100.000 pontos tridimensionais, permitindo assim a aplicação da metodologia proposta e subsequente avaliação dos resultados. Estas sub-áreas encontram-se dentro da quadrícula de número 21, interior à área de estudo apresentada anteriormente. Estas sub-áreas são dispostas conforme a FIGURA 3.2.

FIGURA 3.2 – LOCALIZAÇÃO DAS SUB-ÁREAS SELECIONADAS.



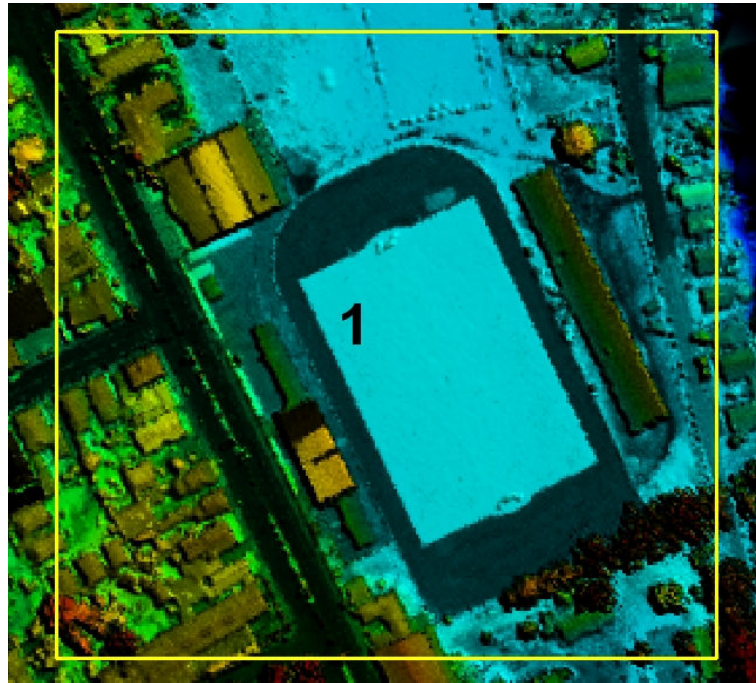
As sub-áreas foram selecionadas de modo que solo que propiciasse uma massa de dados heterogênea com relação a diversidade de feições presentes nos diferentes usos do solo. A TABELA 3.2 fornece maiores detalhes sobre cada uma das áreas selecionadas.

TABELA 3.2 – DETALHES E CARACTERÍSTICAS DAS ÁREAS SELECIONADAS.

N.º	Nome	N.º Pontos	N.º Triângulos	Elevação (z)	
				Mín (m)	Máx (m)
1	selecao_1_campo	42.789	85.544	747,00	775,79
2	selecao_2_praca	95.886	191.737	754,92	811,11
3	selecao_3_beira_rio	96.519	192.991	746,34	777,71
4	selecao_4_ponte	96.667	193.296	746,34	775,88
5	selecao_5_lagoinha	71.154	142.269	746,34	773,13
6	selecao_6_praia	73.512	146.992	746,39	772,67
7	selecao_7_ferrovia	118.490	236.936	754,18	791,21
8	selecao_8_prefeitura	26.811	53.589	748,90	771,60
9	selecao_9_quadra	11.714	23.406	756,63	807,09

A primeira subárea selecionada refere-se a uma região onde há o contraste entre feições planas com uma vizinhança de elevações variáveis. Nesta região há um campo de futebol em uma área relativamente plana com vegetação de campo rasteiro (FIGURA 3.3).

FIGURA 3.3 – IMAGEM HIPSOMETRICA DA SUBÁREA SELECIONADA 1.

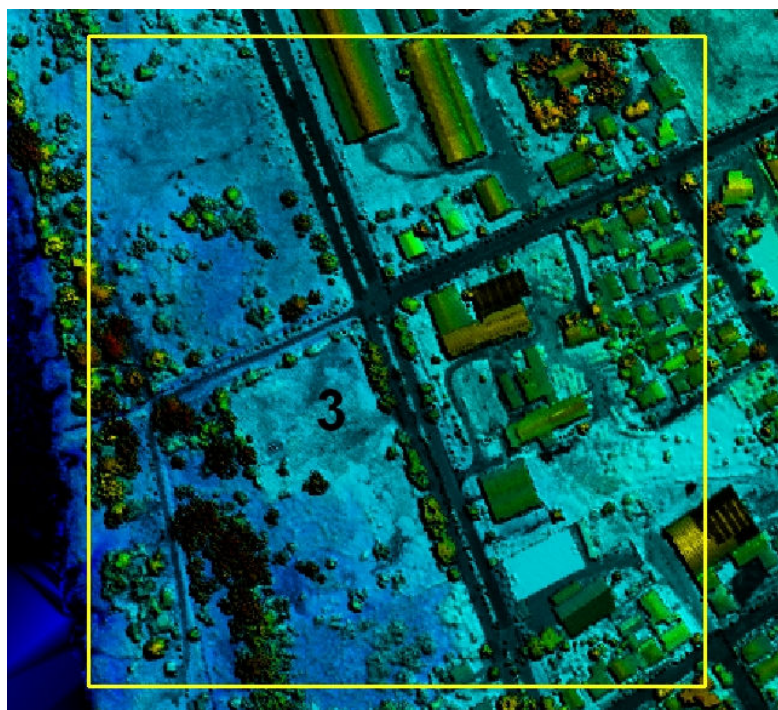


Entre os objetivos deste trabalho estava a necessidade da realização de testes do método proposto em diversas áreas com diferentes tipos de feições. A FIGURA 3.4 mostra a subárea número 2, selecionada para a realização dos experimentos. Esta área caracteriza-se por seu caráter urbano com arruamento bem definido delineando feições geométricas o que permitirá avaliar o comportamento do algoritmo quando aplicado em áreas urbanas residenciais.

FIGURA 3.4 – IMAGEM HIPSOMETRICA DA SUBÁREA SELECIONADA 2.



FIGURA 3.5 – IMAGEM HIPSOMETRICA DA SUBÁREA SELECIONADA 3.

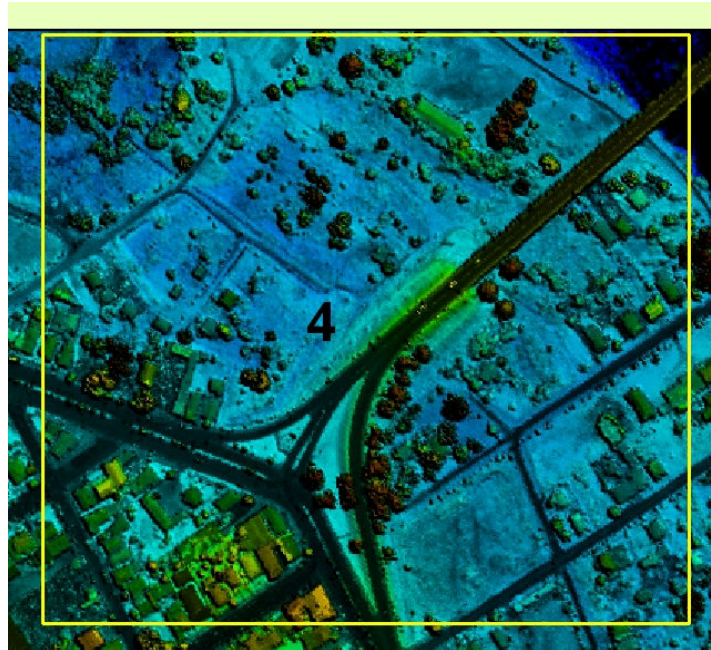


A terceira subárea selecionada encontra-se na margem do rio Iguaçu, onde há a presença de feições que denotam uma morfologia plana com edificações na forma de barracões e algumas árvores esparsas (FIGURA 3.5).

A FIGURA 3.6 apresenta a subárea número quatro. Esta subárea caracteriza-se pelo contraste entre áreas planas com vegetação rasteira e áreas estritamente urbanas. Além disto, a presença de

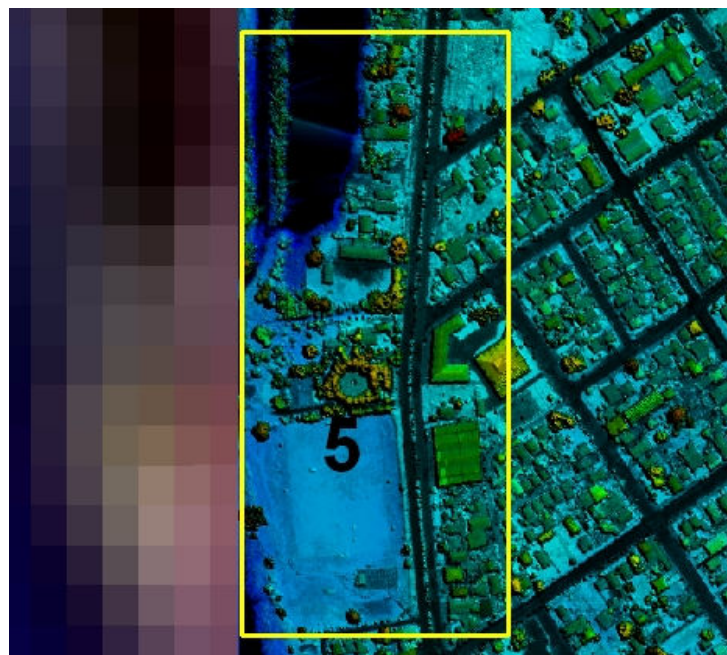
uma ponte faz desta uma área interessante para o estudo já que as elevações nas bordas da via apresentaram um contraste acentuado com relação às áreas planas laterais.

FIGURA 3.6 – IMAGEM HIPSOMETRICA DA SUBÁREA SELECIONADA 4.



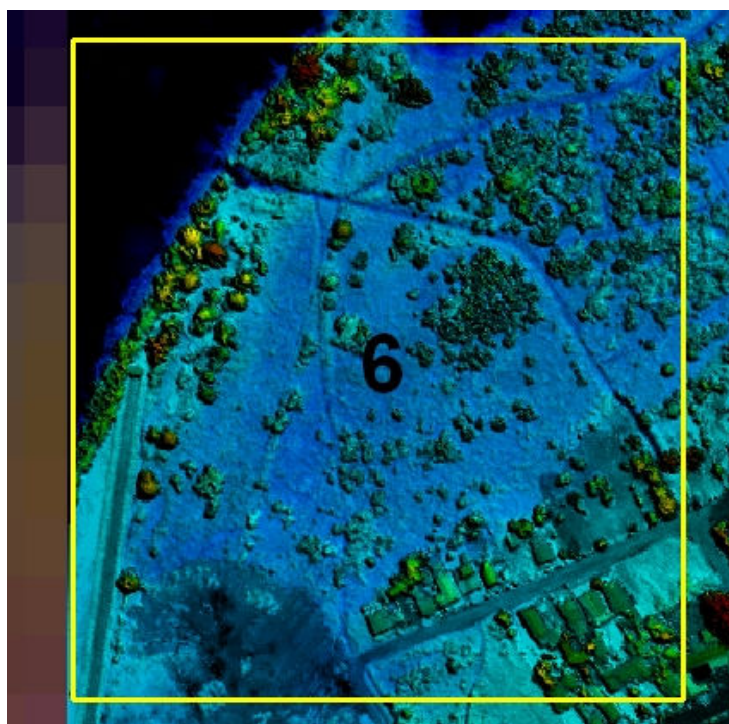
A FIGURA 3.7 apresenta a quinta subárea selecionada, que se caracteriza pela presença de um pequeno lago na parte superior. Este lago apresenta-se como uma nova variável no estudo, uma vez que os raios do LIDAR não foram capazes de penetrar até a superfície do fundo deste lago.

FIGURA 3.7 – IMAGEM HIPSOMETRICA DA SUBÁREA SELECIONADA 5.



A FIGURA 3.8 mostra em detalhes a subárea selecionada número seis. Este subconjunto é caracterizado pelo seu caráter de várzea, uma vez que é uma área ribeirinha com vegetação pouco densa e algumas áreas de drenagem cortando o seu interior até desaguar no rio Iguaçu.

FIGURA 3.8 – IMAGEM HIPSOMETRICA DA SUBÁREA SELECIONADA 6.



A subárea selecionada que apresenta o maior número de pontos em seu interior é exibida na FIGURA 3.9. Esta área caracteriza-se pela presença de uma estação ferroviária em meio a um cenário urbano. Tais características ajudarão na avaliação do método de simplificação em áreas contendo feições geométricas lineares de baixa elevação, como é o caso dos trilhos que compõe a linha férrea.

FIGURA 3.9 – IMAGEM HIPSOMETRICA DA SUBÁREA SELECIONADA 7.

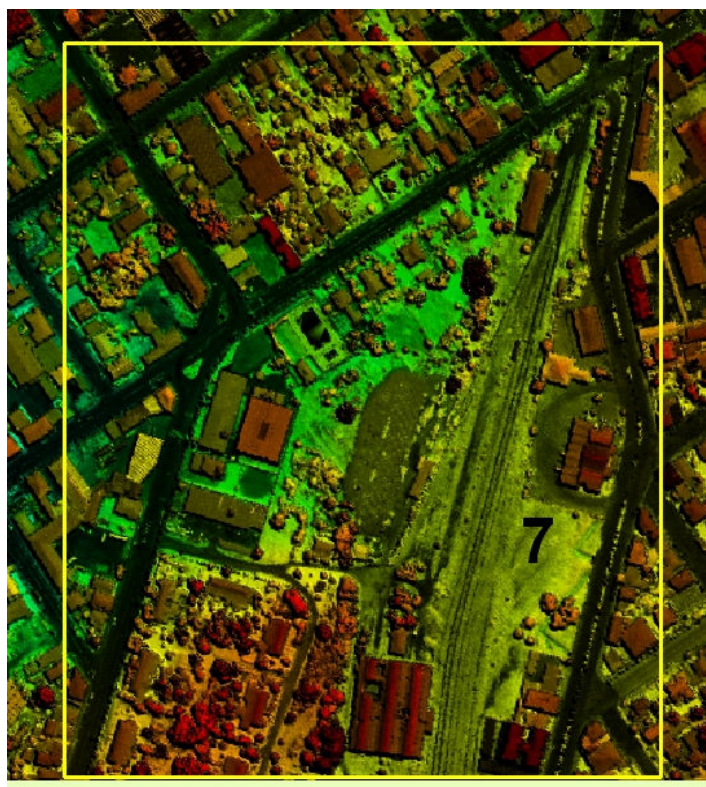
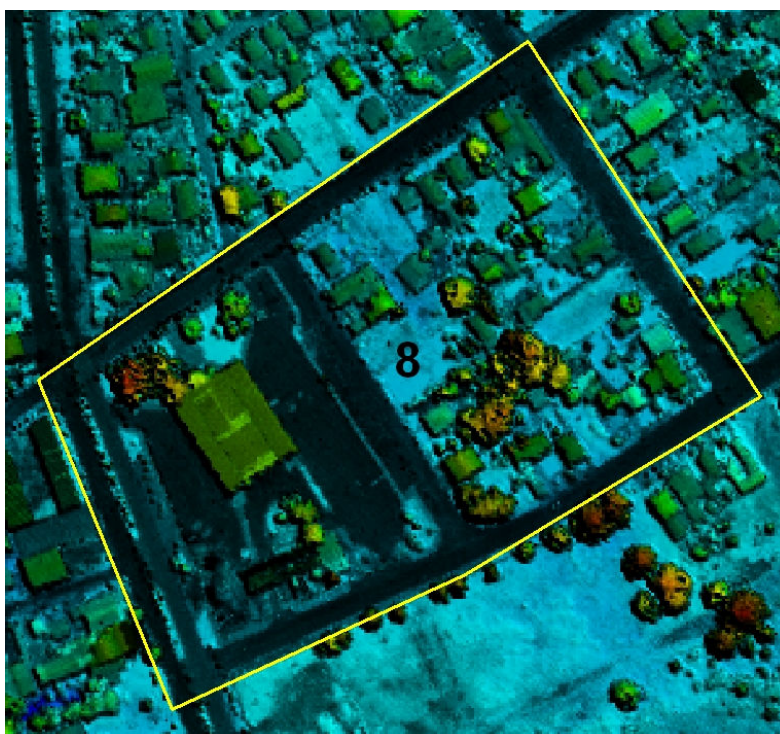


FIGURA 3.10 – IMAGEM HIPSOMETRICA DA SUBÁREA SELECIONADA 8.

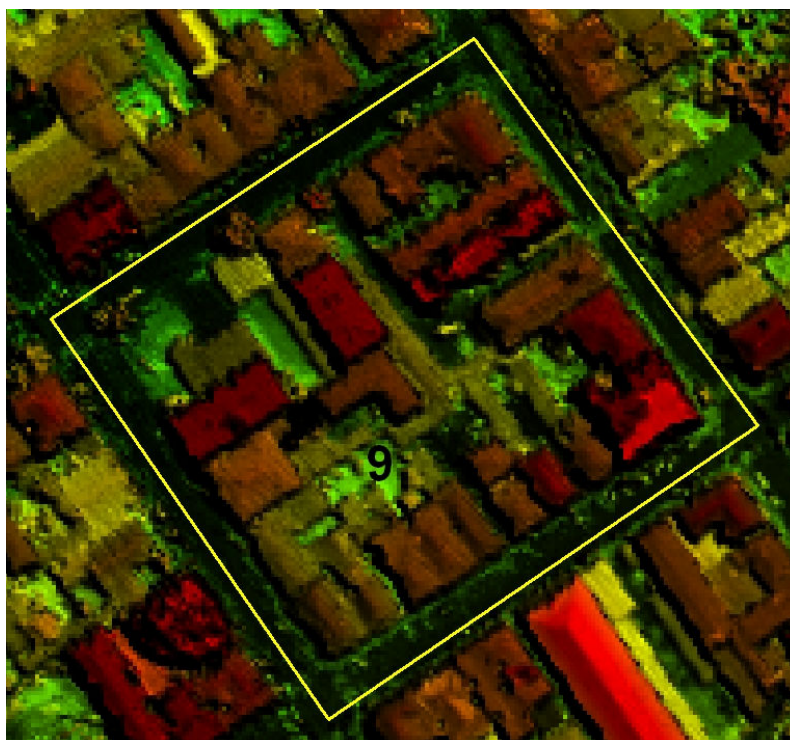


A FIGURA 3.10 mostra a oitava subárea que se diferencia das demais devido à presença de uma grande edificação que representa a sede de um dos prédios públicos da cidade

de união da Vitória. Além disto, esta área foi selecionada utilizando-se um polígono irregular formado pelas vias que delimitam a região para o recorte da área.

A última subárea teste selecionada para avaliação da metodologia é mostrada na FIGURA 3.11. Esta pequena área foi selecionada uma vez que compreende um conjunto de lotes urbanos que apresentam uma grande diversidade de edificações no que se refere à forma e até mesmo a elevação das construções.

FIGURA 3.11 – IMAGEM HIPSOMETRICA DA SUBÁREA SELECIONADA 9.



3.2.3 Geração das Triangulações Iniciais

Para a geração das triangulações iniciais foi empregado o programa ESRI *ArcGIS Desktop* versão 9.1 através do comando *generate TIN from features*, disponível na extensão *3D Analyst* do mesmo aplicativo, onde os modelos *TIN* são gerados mediante a utilização do conjunto de pontos referentes a cada uma das sub-áreas selecionadas respectivamente.

3.3 PROGRAMAÇÃO EM ARCGIS UTILIZANDO ARCOBJECTS

Para a avaliação da metodologia, foi necessário o desenvolvimento de programas computacionais. Estes programas foram desenvolvidos na linguagem *c# (C Sharp)* utilizando a ferramenta *Microsoft Visual Studio .Net* com a utilização dos objetos e rotinas disponíveis para o desenvolvimento das aplicações requeridas.

Este conjunto de objetos, denominados ArcObjects, é um conjunto de classes no padrão COM (*Common Object Model*) que estão disponíveis através de um kit de desenvolvimento que acompanha o pacote de instalação do produto ArcGIS Desktop. Através do uso de uma linguagem de programação como a C#, é possível o desenvolvimento de programas computacionais e extensões personalizadas utilizando as funções e classes disponíveis no sistema ArcGIS, que é a plataforma padrão de geoprocessamento utilizada pela empresa COPEL (KERSTING & KERSTING, 2005).

3.3.1 Leitura Automatizada dos Dados

O programa inicialmente desenvolvido baseia-se em uma interface para realizar a carga dos dados dos pontos que estão dispostos nos arquivos ASCII, representando os dados altimétricos do levantamento a laser (ANEXO 2). Este programa permitirá a visualização dos dados de entrada, bem como a seleção adequada das sub-áreas para posteriormente realizar o processo da triangulação (FIGURA 3.12).

FIGURA 3.12 – INTERFACE DO PROGRAMA PARA CARGA DE DADOS.

Carregar Nuvem de Pontos LIDAR

Local do Arquivo de Pontos:

Resumo do Arquivo
 Total de Pontos: 00000000 Espaço em Disco (Kb): 00000000

Configurações dos Campos:

	Min	Max
X	00000000	00000000
Y	00000000	00000000
Z	00000000	00000000
I	00000000	00000000

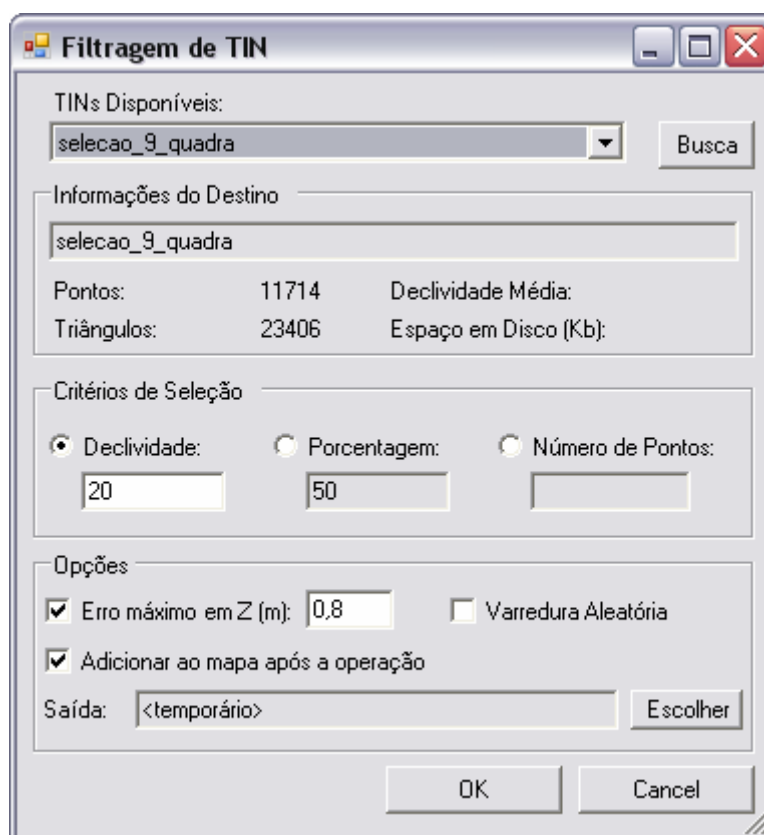
☐ A primeira linha contém nomes de campos
☐ Usar os valores de Intensidade como TAG

Local do Arquivo de Saída:

☒ Adicionar ao Mapa após operação

O programa principal desenvolvido neste trabalho é aquele que faz o emprego do método de simplificação (ANEXO 1). Este programa possui uma interface amigável onde os parâmetros necessários são informados de modo a permitir a geração do modelo superfície simplificada de maneira fácil e intuitiva. Permite ainda que o resultado da simplificação seja visualizado no sistema ArcGIS, de forma integrada com outros sistemas que atuam em diferentes áreas de processamento de dados proveniente de Sensoriamento Remoto, Fotogrametria, entre outras áreas com os SIG (FIGURA 3.13).

FIGURA 3.13 – INTERFACE DO PROGRAMA DE GENERALIZAÇÃO.



3.4 SIMPLIFICAÇÃO DOS MODELOS TRIANGULARES

A motivação principal para a aplicação da metodologia proposta foi a produção de uma representação simplificada segundo uma dada tolerância de erro, através de um processo rápido e prático, sendo que o modelo resultante da simplificação deve ser um subconjunto do modelo original, ou seja sem alteração dos dados originais adquiridos com a tecnologia LIDAR.

A primeira etapa é a geração de uma malha inicial, utilizando a triangulação de Delaunay para assegurar que somente triângulos com geometria consistente sejam criados a partir dos dados iniciais. Esta triangulação completa será generalizada iterativamente através da remoção

de vértices considerados pouco importantes para a manutenção das características topológicas presentes no modelo, tais como picos, depressões, montanhas, além das várias feições que podem ser encontradas em ambientes urbanos tais como edificações, árvores, pontes, etc.

Um algoritmo iterativo de decimação foi empregado para a derivação de malhas triangulares generalizadas a partir dos dados iniciais, através de um conjunto de operações de remoção de vértices. Em cada iteração os vértices de menor importância são removidos e o processo segue até o final onde uma nova triangulação é gerada com os pontos remanescentes. Este processo se repete com a nova malha triangular até que a tolerância do erro máximo vertical especificado seja atingida.

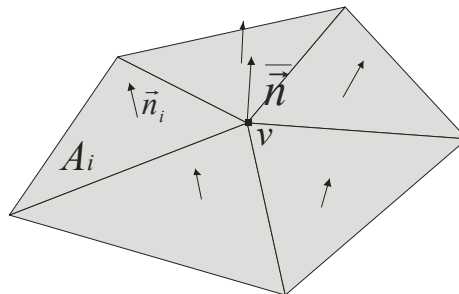
O critério para a seleção de vértices é crucial durante o processo de simplificação da triangulação já que pode determinar a qualidade e precisão da malha resultante. A determinação da importância de um vértice v é baseada na curvatura da superfície no ponto analisado, através de uma métrica que indica a variabilidade local dos dados. Esta medida é obtida através da diferença de inclinação (ângulo máximo, $\alpha_{\text{máx}}$) entre o vetor normal médio, $\bar{n}$, que é dado pela média das normais n_i , dos triângulos que circundam v , duplamente ponderada pelos valores das áreas A_i das faces triangulares (FIGURA 3.14) e as normais $\bar{n}_i$ dos i -ésimos triângulos dependentes de v (EQUAÇÕES 10 e 11).

$$\alpha_{\text{max}} = \max \left(\arccos \frac{\bar{n} \cdot \bar{n}_i}{|\bar{n}| |\bar{n}_i|} \right) \quad (10)$$

onde

$$\bar{n} = \frac{\sum \bar{n}_i \cdot A_i}{\sum A_i} \quad , \text{e} \quad 0 \leq \bar{n}_i \leq \pi \quad (11)$$

FIGURA 3.14 - CRITÉRIO PARA REMOÇÃO DE UM VÉRTICE.



Cada vértice v será marcado para remoção durante o processo de decimação caso os valores dos ângulos formados entre cada uma das normais n_i de cada triângulo e a normal média $\bar{n}$ sejam menores que um limiar de ângulo máximo especificado. O modelo será triangulado

novamente ao fim da avaliação de todos seus pontos e o processo seguirá até que nenhum ponto seja selecionado para remoção, ou até que um limite máximo de erro seja atingido.

3.5 ANÁLISE DOS ERROS

A métrica de análise de erro mais comumente empregada é conhecida como regra L_∞ , que é baseada na diferença máxima entre os pontos do modelo de elevação original e o modelo generalizado. Esta diferença corresponde a uma medida local de erro. Outra métrica comum é a regra L_2 , que fornece o erro médio quadrático vertical entre o modelo original e o aproximado. A regra L_2 produz uma medida do erro global, entretanto os algoritmos são mais lentos e devem ser executados ao final do processo, ao contrário da utilização de métricas locais.

Uma variação da métrica convencional de análise de erro foi proposta neste trabalho. Neste método, a análise de erros é possível pela determinação do erro global de forma iterativa, através da operação da distância euclidiana entre os pontos do modelo original até o modelo gerado com os pontos resultantes da simplificação. Esta diferença é obtida para cada ponto analisado e no final, o erro médio quadrático (*RMS*) entre estas observações será determinado. Isto permite que o processo se mantenha dentro de um limiar de erro vertical máximo conhecido e desejado.

3.6 AJUSTAMENTO DE FAIXAS SOBREPOSTAS

Um problema verificado quando feitas às simplificações refere-se à área de sobreposição de faixas dos dados adquiridos pela plataforma de varredura a laser. No entanto, para reduzir o escopo deste trabalho, este assunto não será aqui estudado.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

A seguir serão apresentados os resultados obtidos pela aplicação do método de generalização nos modelos gerados com os dados originais nas áreas selecionadas, em uma iteração simples, utilizando valores de $\alpha_{\text{máx}}$ de 5, 15 e 30 graus.

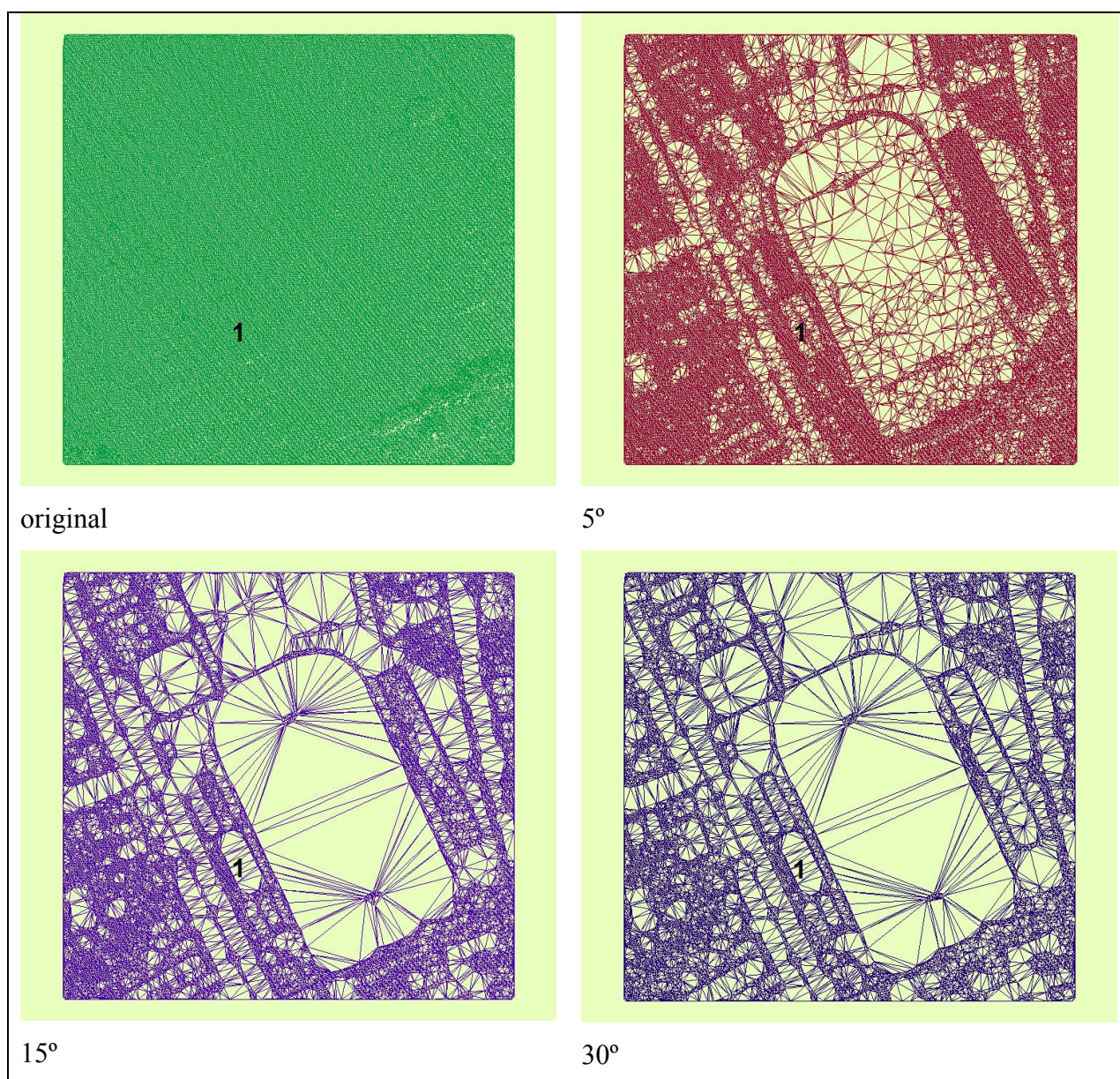
Os resultados da aplicação do método na massa de dados original da primeira área mostram que quanto maior o limiar de ângulo $\alpha_{\text{máx}}$ o grau de simplificação do terreno aumenta significativamente. Apesar disto os valores dos erros RMS (verticais) são mantidos em uma escala não proporcional à do percentual de redução dos pontos (TABELA 4.1).

TABELA 4.1 – RESULTADOS DA SIMPLIFICAÇÃO PARA A ÁREA 1.

$\alpha_{\text{máx}}$	N.º Pontos	N.º Triângulos	Elevação Máx z (m)	Elevação Mín z (m)	Percent. Redução	Tempo CPU (hh:mm)	Erro RMS Vertical
-	42.789	85.544	747	775,79	0	-	-
5°	21764	43494	747	775,79	49%	00:30,62	1,68m
15°	11714	23394	747	747,00	69%	00:28,44	1,86m
30°	9993	19952	747	775,79	77%	00:54,43	1,92m

Os resultados das simplificações podem ser verificados através da observação das imagens dos modelos gerados em cada uma das etapas de simplificação. A FIGURA 4.1 mostra a evolução da generalização através das imagens do modelo de triangulação gerado com a massa de dados disponível em cada uma das etapas, desde a original, até o caso mais simplificado.

FIGURA 4.1 – PROGRESSO DE SIMPLIFICAÇÃO DA MALHA DA ÁREA 1.



A análise das imagens geradas permite a verificação de uma diferença visual significativa entre as fases de simplificação de 5 °, 15 ° e 30°, e mesmo na relação entre a original e a primeira mostrando que mesmo em áreas cujos modelos são bem irregulares a aplicação do algoritmo é benéfica para a resolução das redundâncias.

Os resultados da aplicação do método na massa de dados original da área 2 são mostrados na TABELA 4.2. Nesta área observou-se uma menor eficiência do método na generalização do modelo original onde se pode verificar uma redução máxima de 63% com a utilização do maior limiar. Entretanto, apesar do erro global entre os modelos: original e simplificado terem apresentado uma maior amplitude, o comportamento entre as diferentes

classes foi similar àqueles verificados no primeiro caso crescendo de maneira proporcional à maior generalização.

TABELA 4.2 – RESULTADOS DA SIMPLIFICAÇÃO PARA A ÁREA 2.

$\alpha_{\text{máx}}$	N.º Pontos	N.º Triângulos	Elevação Máx z (m)	Elevação Mín z (m)	Percent. Redução	Tempo CPU (hh:mm)	Erro RMS Vertical
-	95.886	191.737	754,92	811,11	0	-	-
5°	64503	128971	754,92	811,11	33%	01:14,30	1,89m
15°	44767	89499	754,92	811,11	53%	01:36,31	2,07m
30°	34965	69895	754,92	811,11	63%	01:37,37	2,18m

Nesta área pode-se observar uma maior homogeneidade nas imagens resultantes da simplificação, isto se deve ao fato de que esta é uma área predominantemente urbana onde as vias públicas são os locais que apresentam a principal ocorrência de áreas planas, e por consequência um maior aproveitamento do algoritmo com relação à redução do número de pontos (FIGURA 4.2).

FIGURA 4.2 – PROGRESSO DE SIMPLIFICAÇÃO DA MALHA DA ÁREA 2.

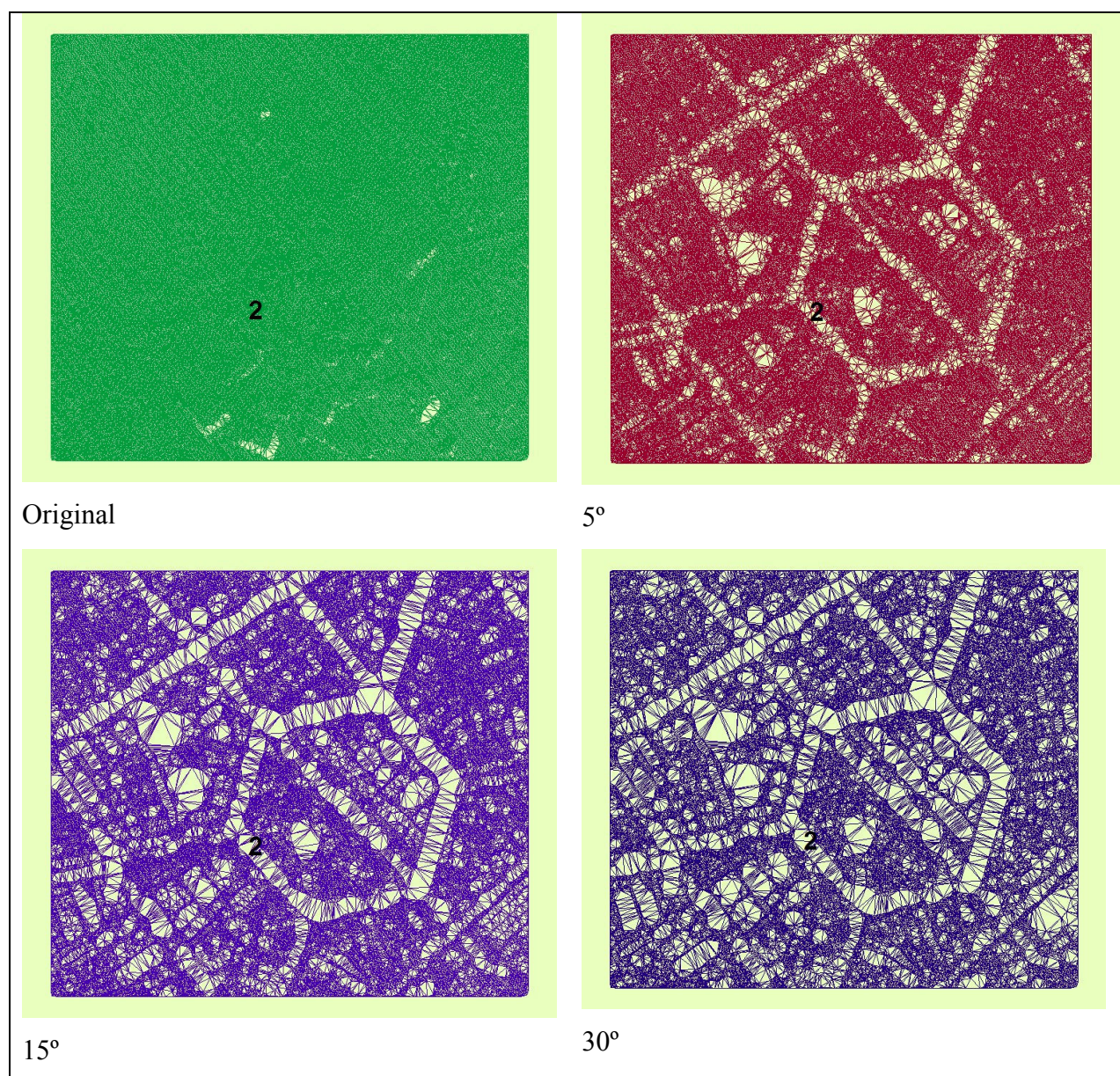


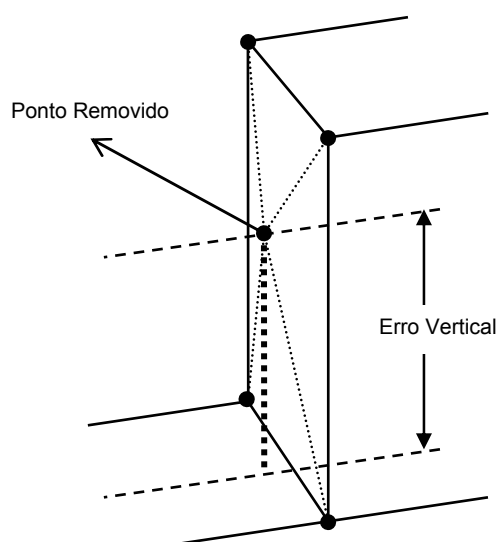
TABELA 4.3 – RESULTADOS DA SIMPLIFICAÇÃO PARA A ÁREA 3.

$\alpha_{\text{máx}}$	N.º Pontos	N.º Triângulos	Elevação Máx z (m)	Elevação Mín z (m)	Percent. Redução	Tempo CPU (hh:mm)	Erro RMS Vertical
-	96.519	192.991	746,34	777,71	0	-	-
5°	69344	138641	746,34	777,71	28%	01:12,11	2,35m
15°	42350	84653	746,34	777,71	56%	01:38,89	2,52m
30°	28083	56119	746,38	776,73	71%	01:30,67	2,60m

A TABELA 4.3 mostra os resultados da execução do algoritmo de simplificação na terceira área-teste selecionada.

Apesar dos valores dos erros verificados nesta área estarem no domínio entre 2,35 e 2,60m, deve-se considerar que a medida de erro empregada avalia as diferenças verticais entre o modelo original e a massa de dados generalizada em cada uma das etapas. Entretanto, deve-se considerar também que nesta região estão dispostas algumas edificações com grande elevação. Muitas vezes alguns feixes de laser incidem nas suas paredes laterais, sacada, etc., o que pode ocasionar problemas, onde pontos que compartilham triângulos vizinhos coplanares, são removidos, causando uma discrepância maior no erro vertical (FIGURA 4.3).

FIGURA 4.3 – DETERMINAÇÃO DO ERRO (RMS) VERTICAL.



Levando em conta o limiar inicial de 5°, esta área apresenta um percentual de redução de pontos de 28%, o que pode ser considerado pequeno quando comparado aos dados originais, entretanto nas demais etapas o mesmo não é verificado, apresentando um aproveitamento maior nos limiares de 15° e 30°, onde se pode verificar o dobro da generalização inicial. Isto acontece não somente por esta área estar dentre as mais heterogêneas com relação às elevações das feições presentes, mas principalmente porque poucas áreas planas ou com declividade constante (abaixo de 5°) foram encontradas.

A FIGURA 4.4 apresenta a sequência de imagens da área três. Elas mostram uma grande diferença visual, principalmente nas áreas onde a vizinhança dos triângulos dos pontos considerados apresentou inclinações similares.

FIGURA 4.4 – PROGRESSO DE SIMPLIFICAÇÃO DA MALHA DA ÁREA 3.

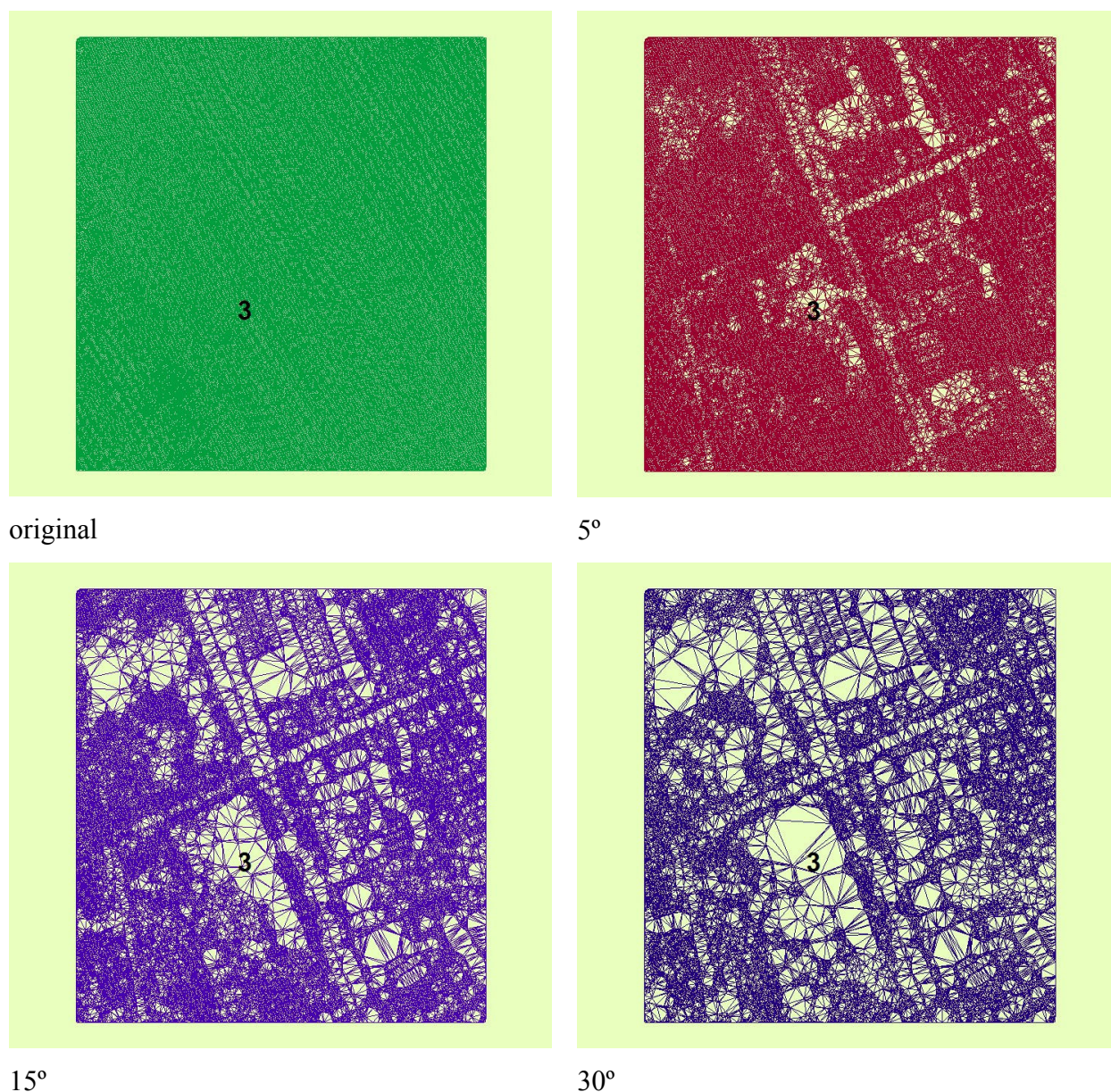


TABELA 4.4 – RESULTADOS DA SIMPLIFICAÇÃO PARA A ÁREA 4.

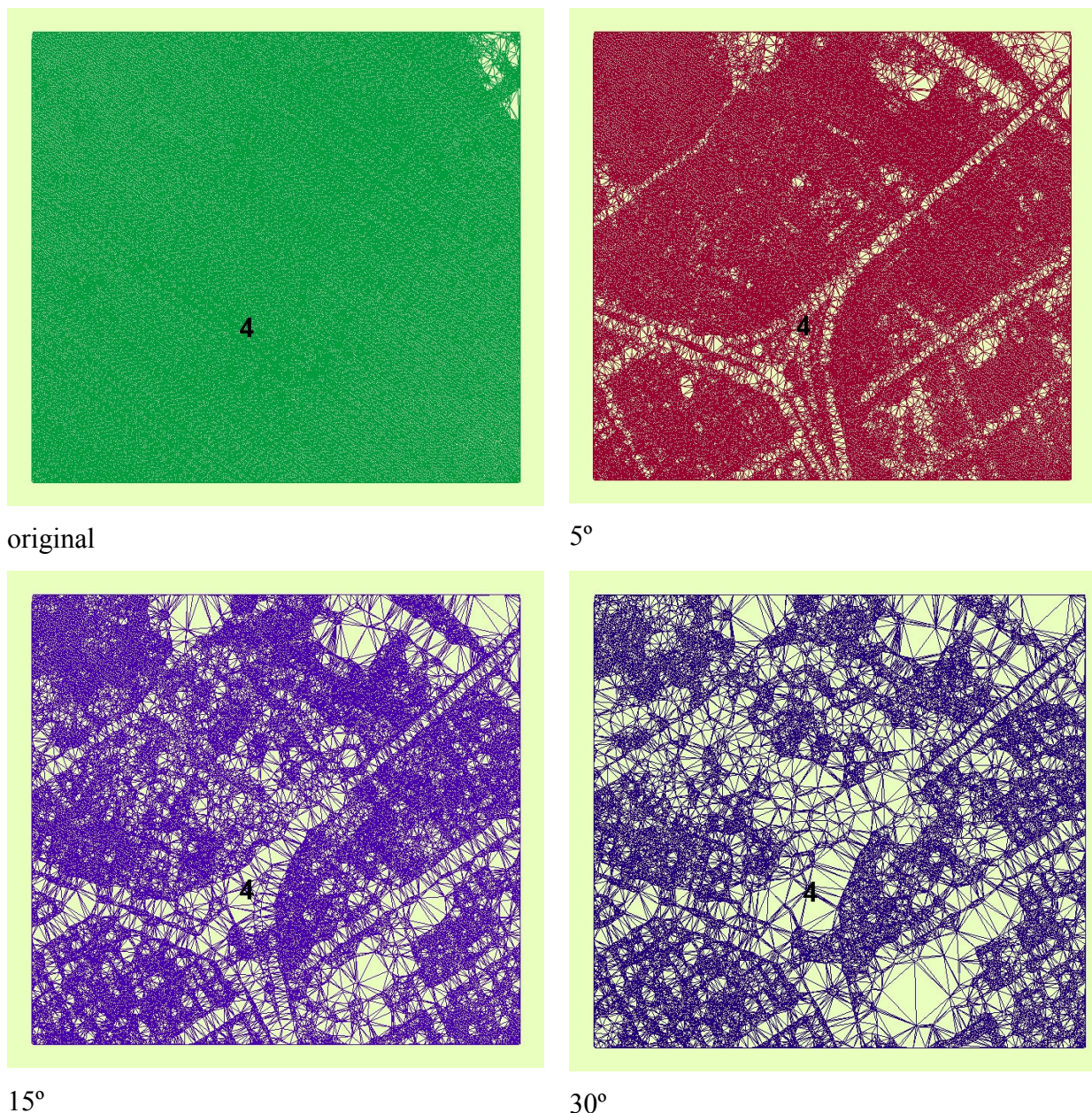
$\alpha_{\text{máx}}$	N.º Pontos	N.º Triângulos	Elevação Máx z (m)	Elevação Mín z (m)	Percent. Redução	Tempo CPU (hh:mm)	Erro RMS Vertical
-	96.667	193.296	746,34	775,88	0	-	-
5°	71207	142376	746,35	775,88	26%	01:27,30	1,27m
15°	43343	86648	746,41	775,88	55%	01:38,51	1,46m
30°	26910	53782	746,43	775,88	72%	01:27,78	1,56m

A TABELA 4.4 mostra os resultados obtidos na quarta subárea. Os resultados mostram uma redução mínima de 27% no primeiro caso ($\alpha_{\text{máx}}=5^\circ$) e máxima de 72% no último caso ($\alpha_{\text{máx}}=15^\circ$). O aproveitamento do algoritmo em termos da taxa de simplificação, do tempo de

processamento (CPU) e do pequeno erro vertical, neste caso pode ser atribuído às características da própria região.

Na FIGURA 4.5 pode-se notar o efeito que a vegetação rasteira causa nos modelos gerados pelo LIDAR, onde múltiplos retornos de um feixe emitido podem ser captados, gerando um efeito de rugosidade, uma vez que pontos da parte superior das folhagens de vegetação e do solo em um campo podem ser formados. Este fato decorre em uma conseqüente necessidade de múltiplas iterações, até que sejam removidos estes "falsos" pontos.

FIGURA 4.5 – PROGRESSO DE SIMPLIFICAÇÃO DA MALHA DA ÁREA 4.



A TABELA 4.5 apresenta os resultados obtidos na quinta subárea, onde se pode perceber um comportamento semelhante às áreas anteriores. Entretanto deve ser ressaltado que houve uma eficácia na generalização já na primeira etapa.

TABELA 4.5 – RESULTADOS DA SIMPLIFICAÇÃO PARA A ÁREA 5.

$\alpha_{\text{máx}}$	N.º Pontos	N.º Triângulos	Elevação Máx z (m)	Elevação Mín z (m)	Percent. Redução	Tempo CPU (hh:mm)	Erro RMS Vertical
-	71.154	142.269	746,34	773,13	0	-	-
5°	44246	88453	746,35	773,13	38%	01:18,80	1,22m
15°	28802	57565	746,36	773,13	59%	01:22,70	1,45m
30°	20133	40227	746,36	773,08	71%	01:05,12	1,56m

A FIGURA 4.6 apresenta as etapas de simplificação da subárea selecionada de número cinco. Nesta pode-se confirmar a premissa relativa ao efeito causado pela vegetação na eficácia da generalização, uma vez que há uma área plana, de formato retangular com cobertura vegetal rasteira (gramado) onde já na primeira etapa, observa-se um bom aproveitamento do algoritmo com uma eliminação considerável dos pontos em seu interior. Apesar de haver um “vazio” de dados devido à presença de um lago na parte superior, não houve alteração significativa nos resultados da simplificação nesta região. Entretanto a forma do lago foi mantida, uma vez que foram mantidos os pontos que o delineiam.

FIGURA 4.6 – PROGRESSO DE SIMPLIFICAÇÃO DA MALHA DA ÁREA 5.

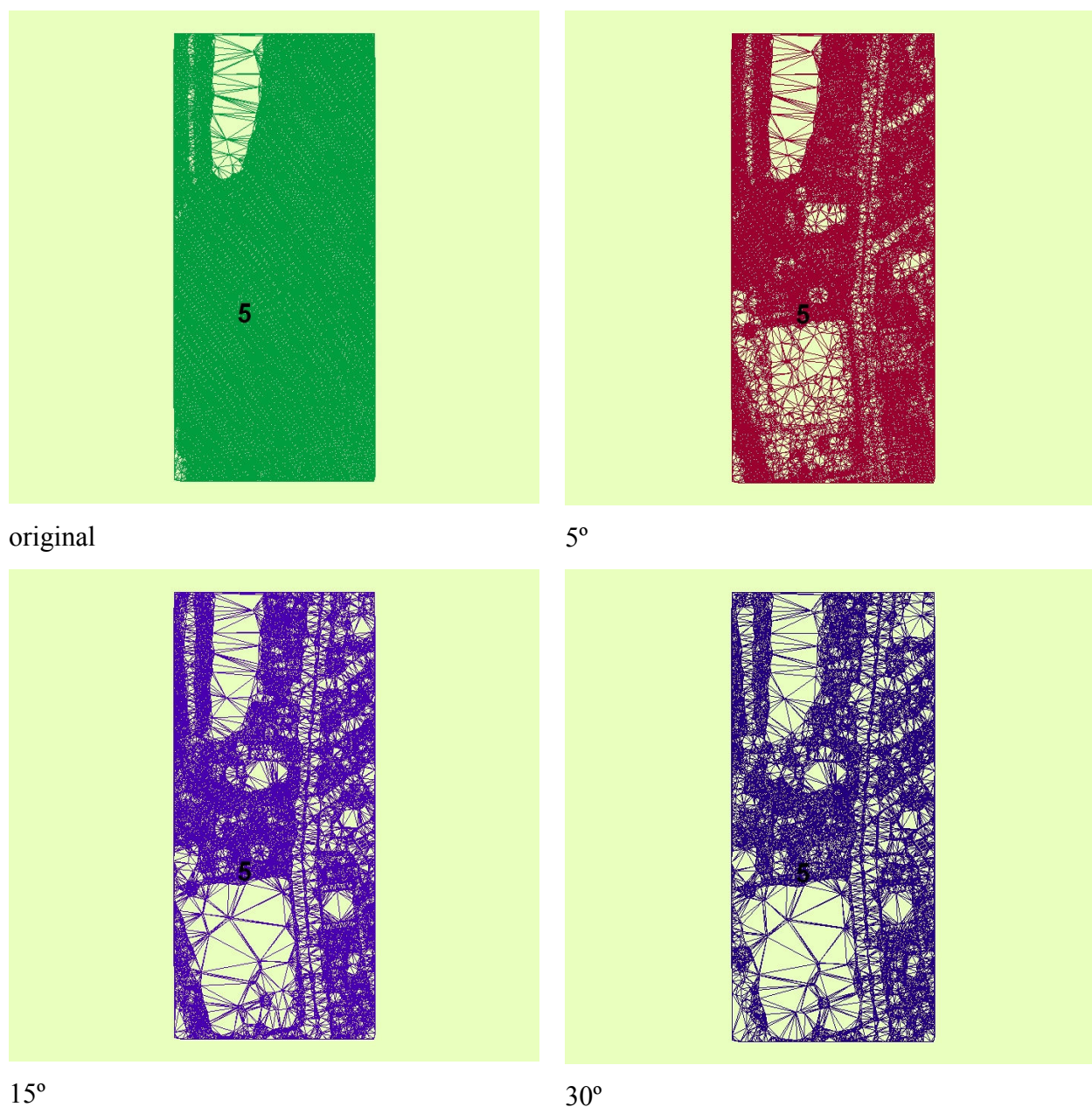


TABELA 4.6 – RESULTADOS DA SIMPLIFICAÇÃO PARA A ÁREA 6.

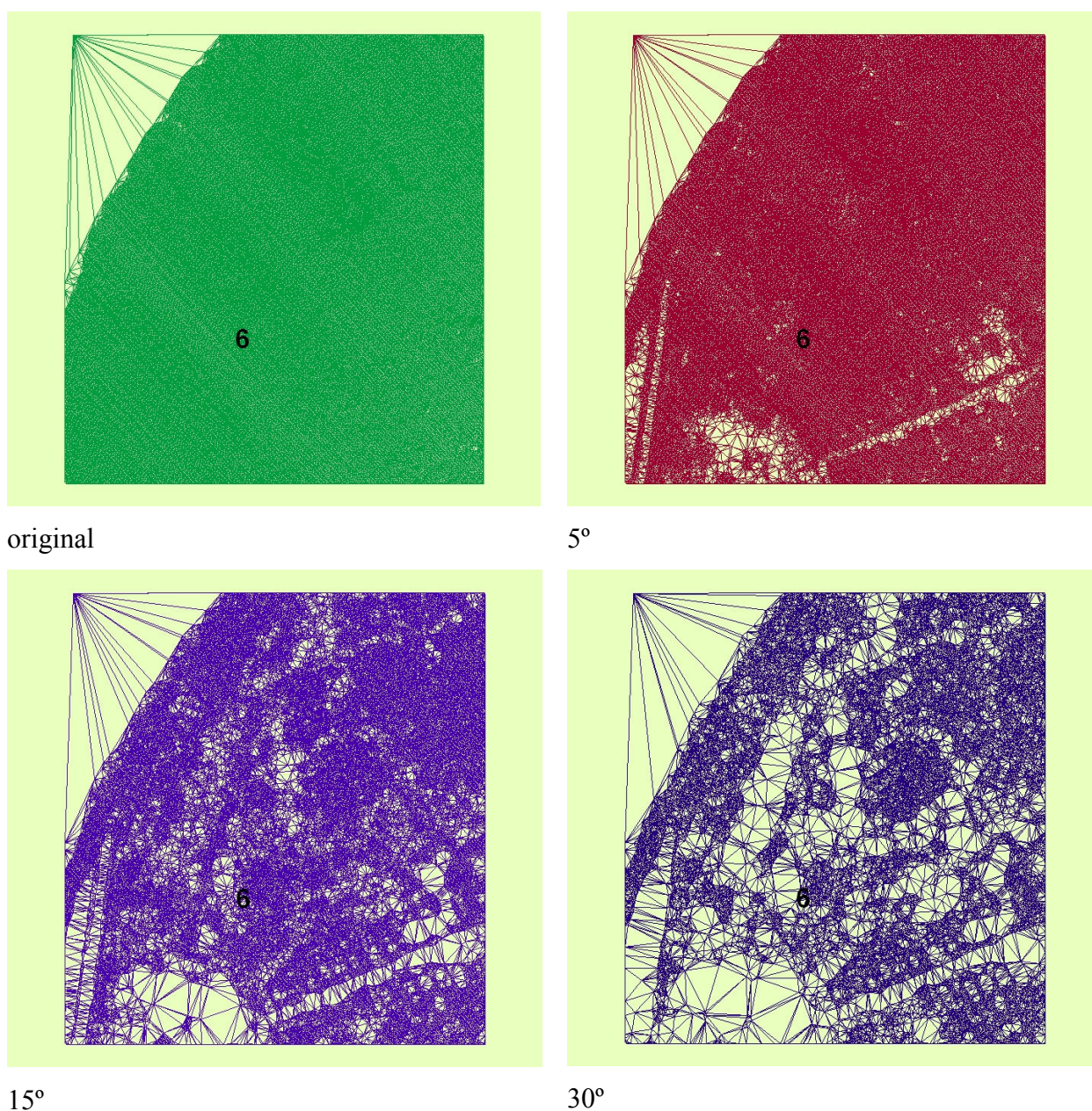
$\alpha_{\text{máx}}$	N.º Pontos	N.º Triângulos	Elevação Máx z (m)	Elevação Mín z (m)	Percent. Redução	Tempo CPU (hh:mm)	Erro RMS Vertical
-	73.512	146.992	746,39	772,67	0	-	-
5°	63779	127526	746,39	772,67	13%	01:23,42	0,82m
15°	41022	82012	746,39	772,67	42%	01:21,86	1,10m
30°	22354	44676	746,39	772,35	70%	01:14,40	1,21m

Os resultados da simplificação para a área numero 6 são apresentados na TABELA 4.6. Estes resultados mostram uma redução de somente 13% na primeira etapa de simplificação, o

que pode ser considerado um valor baixo. Isto se deve à morfologia da subárea em questão que apresenta uma vegetação rasteira esparsa. Este efeito já fora detectado anteriormente, porém nesta área houve uma acentuação no efeito da rugosidade.

Os efeitos da rugosidade podem ser mais facilmente verificados na FIGURA 4.7. As imagens das etapas de simplificação mostram de forma clara que as superfícies vegetais que foram alteradas, sejam por podas ou mesmo pela formação de trilhas, apresentaram uma maior redução de pontos que as demais.

FIGURA 4.7 – PROGRESSO DE SIMPLIFICAÇÃO DA MALHA DA ÁREA 6.



A TABELA 4.7 apresenta os resultados encontrados na área 7. Esta área apresentou os maiores tempos necessários para completar a remoção dos pontos, o que se deve principalmente por ser a subárea com maior número de pontos. Os erros obtidos apresentam uma porcentagem de remoção de pontos. No entanto deve-se ressaltar novamente o efeito da vegetação sobre os resultados do algoritmo, especialmente nos limiares ($\alpha_{\text{máx}}$) abaixo de 5°.

TABELA 4.7 – RESULTADOS DA SIMPLIFICAÇÃO PARA A ÁREA 7.

$\alpha_{\text{máx}}$	N.º Pontos	N.º Triângulos	Elevação Máx z (m)	Elevação Mín z (m)	Percent. Redução	Tempo CPU (hh:mm)	Erro RMS Vertical
-	118.490	236.936	754,18	791,21	0	-	-
5°	84152	168260	754,18	791,21	29%	02:12,86	1,09m
15°	52609	105174	754,18	788,80	56%	01:58,64	1,32m
30°	7429	74814	754,21	786,00	68%	02:03,61	1,43m

A FIGURA 4.8, apresenta as imagens das malhas triangulares na área sete, onde a derivação de modelos simplificados a partir do MDE original se caracterizou por uma maior redução de pontos em áreas coplanares e o aparecimento de feições bem definidas na região onde se encontram os trilhos da linha férrea. Com o aumento do limiar angular de simplificação ($\alpha_{\text{máx}}$), algumas áreas apresentaram uma maior redução, com um grande número de pontos removidos.

FIGURA 4.8 – PROGRESSO DE SIMPLIFICAÇÃO DA MALHA DA ÁREA 7.

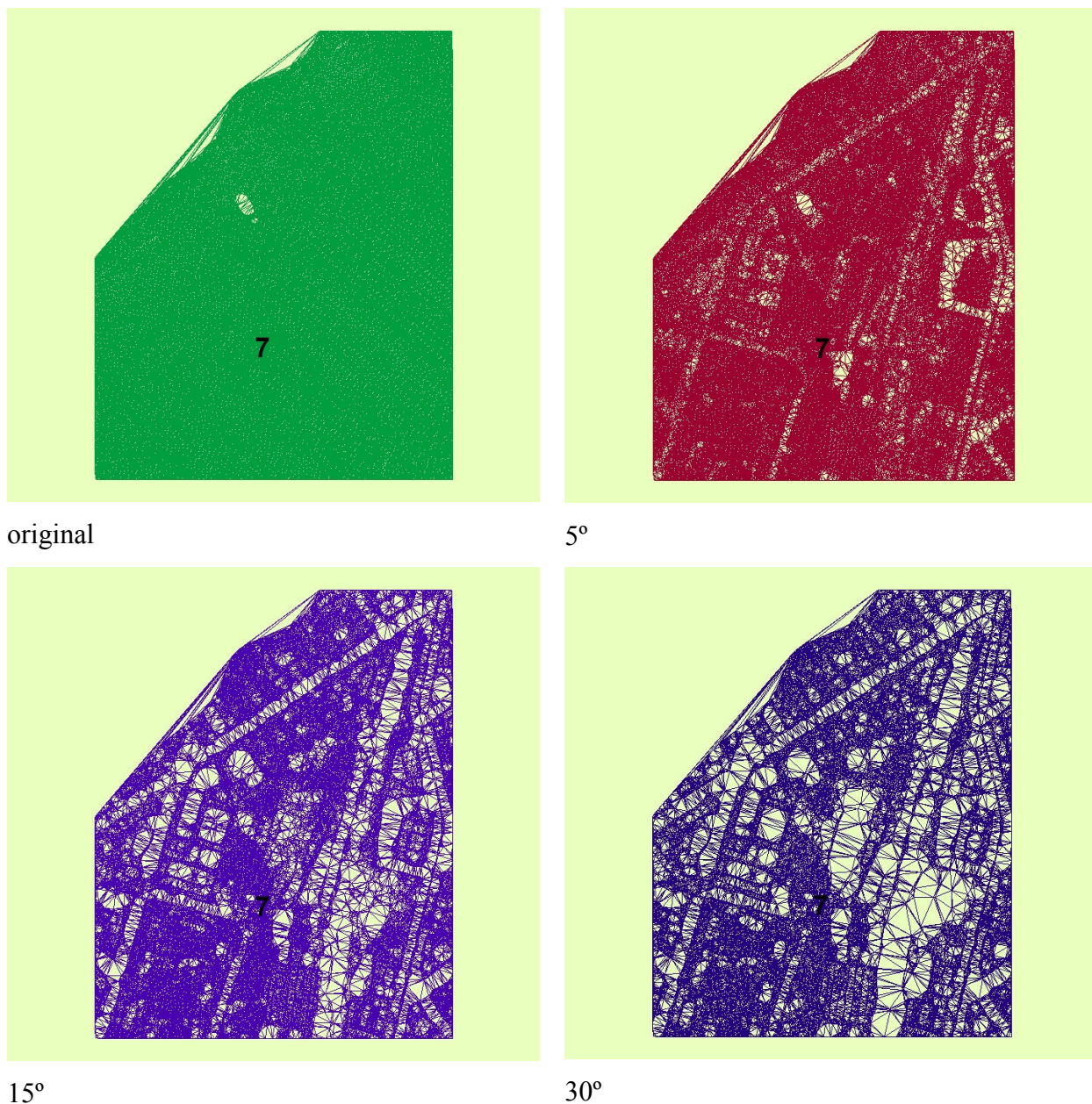


TABELA 4.8 – RESULTADOS DA SIMPLIFICAÇÃO PARA A ÁREA 8.

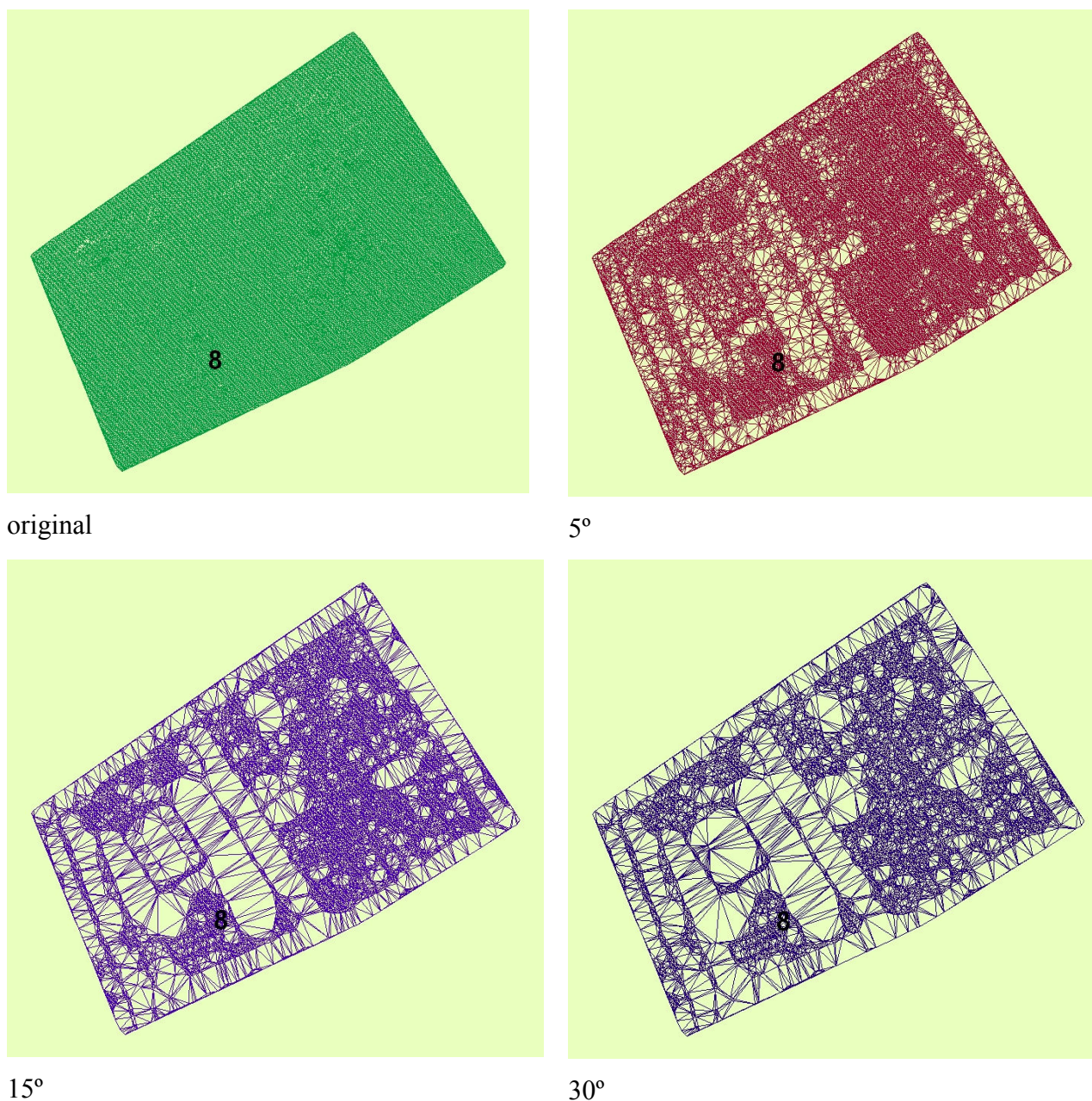
$\alpha_{\text{máx}}$	N.º Pontos	N.º Triângulos	Elevação Máx z (m)	Elevação Mín z (m)	Percent. Redução	Tempo CPU (hh:mm)	Erro RMS Vertical
-	26.811	53589	748,90	771,60	0	-	-
5°	16090	32147	748,90	771,60	40%	00:31,75	1,21m
15°	9794	19555	748,90	771,60	63%	00:32,62	1,47m
30°	7682	15331	748,90	771,60	71%	00:36,95	1,54m

Os resultados obtidos pela aplicação do método proposto são mostrados na TABELA 4.8. Nesta área, devido a presença de uma morfologia favorável, houve um bom aproveitamento

do algoritmo já com o primeiro limiar ($\alpha_{\text{máx}}$), onde é verificada uma redução de 40% no volume inicial de dados. Por ser um modelo que contém poucos pontos, os tempos de execução foram pequenos, no entanto o erro RMS vertical apresenta-se relativamente alto.

As imagens das malhas triangulares em cada uma das etapas da oitava subárea são mostradas na FIGURA 4.9. Nestas imagens pode-se verificar o impacto causado pelas áreas planas como estacionamentos, arruamentos, etc. podem causar na qualidade visual das malhas triangulares ao final do processamento.

FIGURA 4.9 – PROGRESSO DE SIMPLIFICAÇÃO DA MALHA DA ÁREA 8.



Na TABELA 4.9 são tabulados os resultados obtido com o processamento do algoritmo de simplificação na última subárea selecionada para testar a eficiência do método. Esta área foi

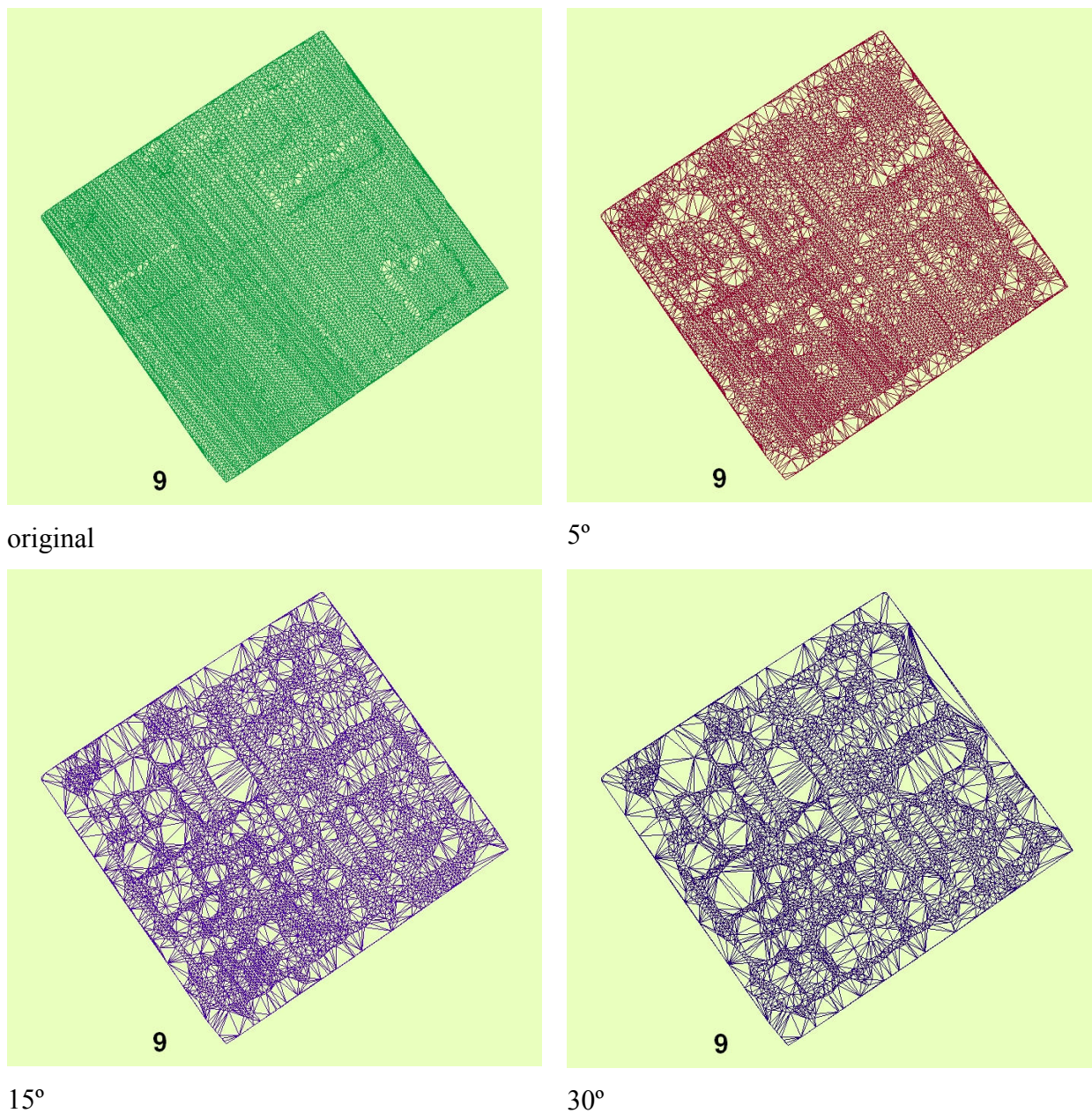
selecionada para avaliação dos resultados no ambiente estritamente urbano que geralmente é composto por edificações de várias altitudes e formas de telhados. Apesar do pequeno numero de pontos, o que resultou em um baixo tempo de processamento, esta área apresenta valores RMS entre 1,91m e 2,25m, que podem ser considerados valores altos. Isto se deve principalmente à deficiência da utilização do erro médio vertical na avaliação do resultado da simplificação de modelos nas áreas urbanas.

TABELA 4.9 – RESULTADOS DA SIMPLIFICAÇÃO PARA A ÁREA 9.

$\alpha_{\text{máx}}$	N.º Pontos	N.º Triângulos	Elevação Máx z (m)	Elevação Mín z (m)	Percent. Redução	Tempo CPU (hh:mm)	Erro RMS Vertical
-	11.714	23406	756,63	807,09	0	-	-
5°	8190	16358	756,63	807,09	30%	00:16,32	1,91m
15°	5478	10934	756,66	807,09	53%	00:19,42	2,18m
30°	4161	8300	756,66	806,80	65%	00:18,33	2,25m

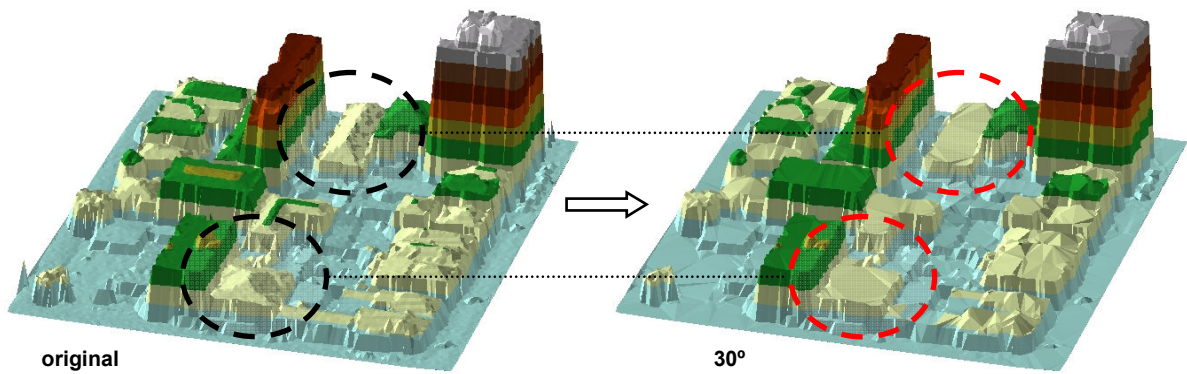
A FIGURA 4.10 mostra os resultados da simplificação obtidos com diferentes limiares de simplificação ($\alpha_{\text{máx}}$) no modelo que representa a área número nove. Nas diferentes imagens da malha triangular derivada da malha original, observa-se a eficiência do método para derivação de modelos simplificados cujas formas das feições presentes apresentam grande similaridade em relação à original.

FIGURA 4.10 – PROGRESSO DE SIMPLIFICAÇÃO DA MALHA DA ÁREA 9.



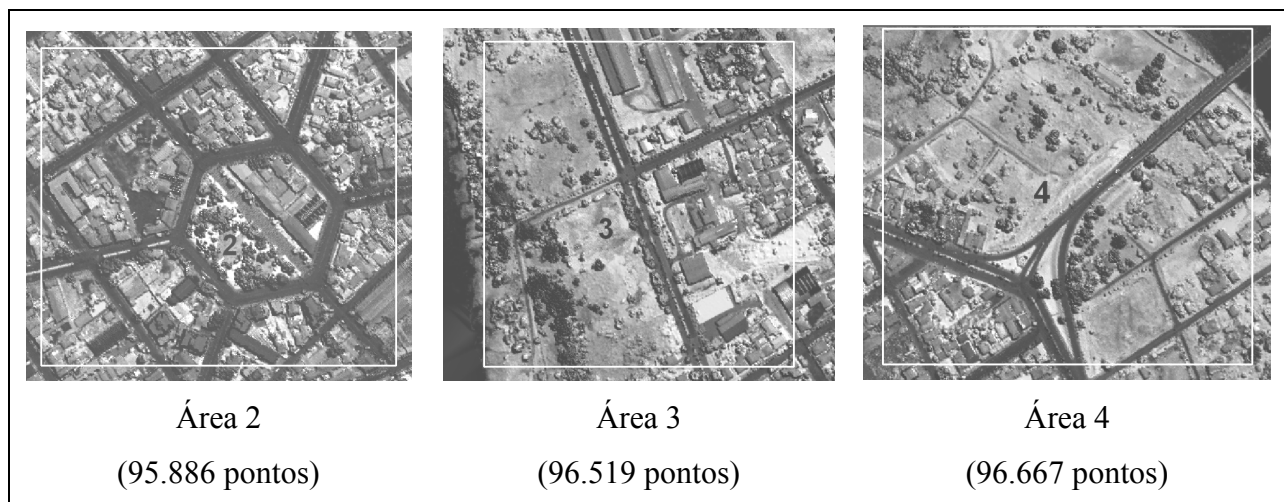
Um fato que deve ser considerado refere-se ao aumento do limiar ($\alpha_{\text{máx}}$) que pode causar um achatamento na a cobertura (telhados) das edificações devido aos altos ângulos de coplanaridade causando um aumento considerável nos erros RMS encontrados. Este efeito é mostrado em detalhes na FIGURA 4.11.

FIGURA 4.11 – ACHATAMENTO DOS TELHADOS NOS MODELOS 3D DA ÁREA 9.



Um comparativo com os resultados obtidos entre três das nove sub-áreas apresentadas anteriormente pode ser realizado, uma vez que estas áreas apresentam inicialmente quase o mesmo número de pontos. A FIGURA 4.12 mostra as imagens das áreas selecionadas.

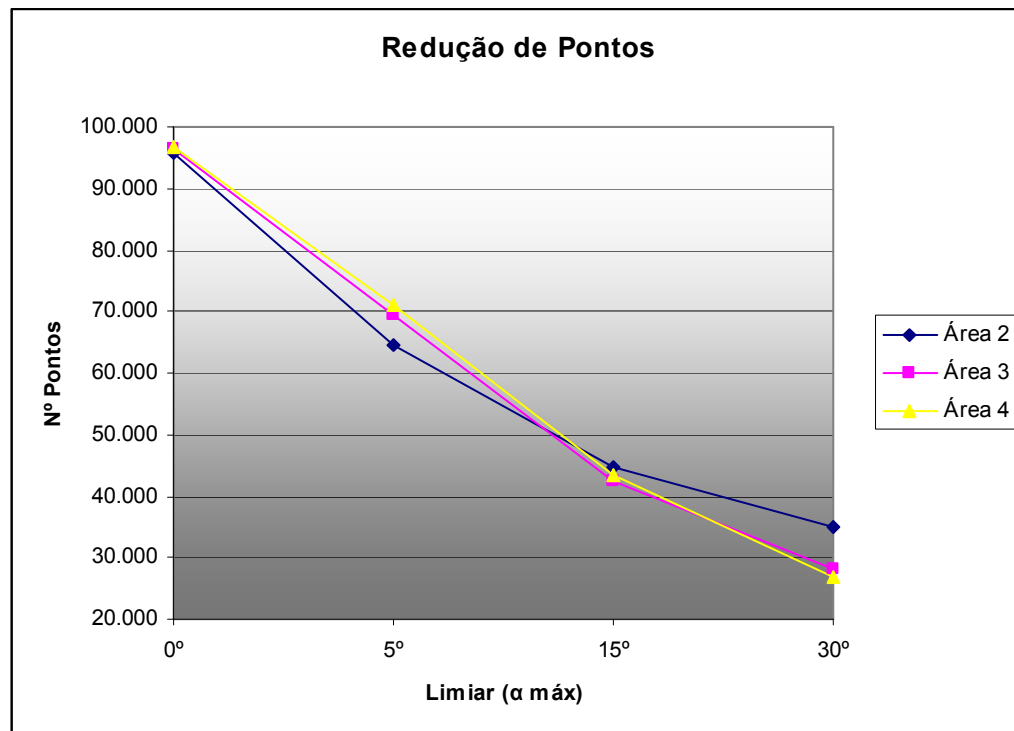
FIGURA 4.12 – ÁREAS SELECIONADAS PARA O COMPARATIVO.



Para melhor elucidação, os comparativos são apresentados em forma de gráficos. A FIGURA 4.13 mostra o comportamento da redução de pontos nas Áreas 2, 3 e 4, onde os limiares $\alpha_{\text{máx}}$ de coplanaridade estão dispostos no eixo x enquanto o eixo y exibe o número de pontos resultantes.

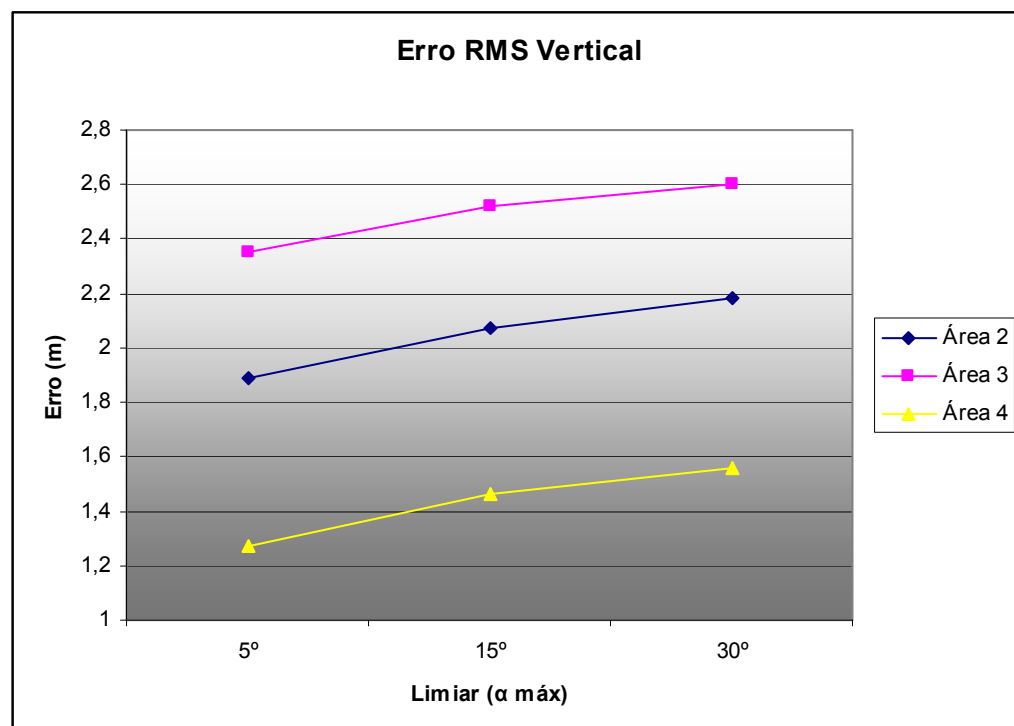
Neste gráfico verifica-se um comportamento proporcional entre o número de pontos resultantes principalmente nas áreas 3 e 4, entretanto a Área 2 apresenta pequenas discrepâncias no limiar de 5°, onde há maior redução (aproximadamente 5.000 pontos) e no limiar de 30° há uma inversão deste patamar onde a Área 2 apresenta uma redução menos expressiva, com aproximadamente 8.000 pontos a mais que as demais áreas.

FIGURA 4.13 – GRÁFICO COMPARATIVO DA REDUÇÃO DE PONTOS.



A FIGURA 4.14 apresenta o comportamento dos erros dos modelos resultantes nas Áreas 2, 3 e 4, onde os erros RMS são dispostos no eixo y e os limiares são exibidos no eixo x.

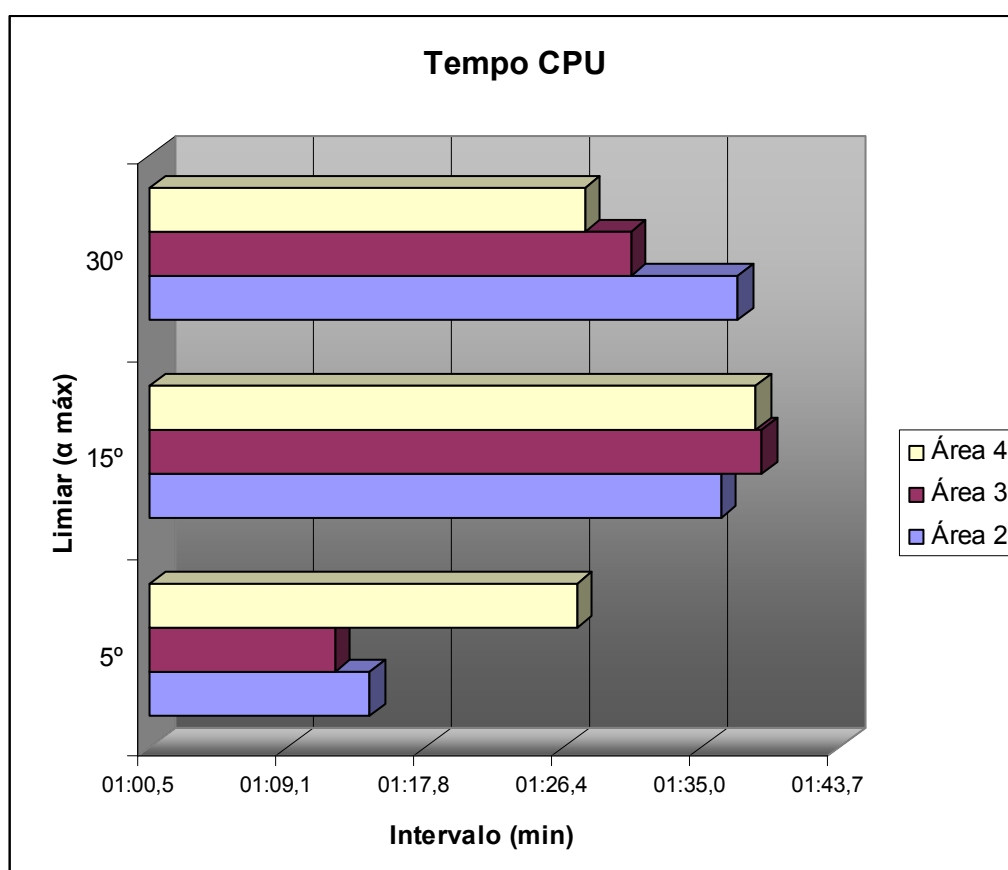
FIGURA 4.14 – GRÁFICO COMPARATIVO DOS ERROS DERIVADOS.



Este gráfico explicita de maneira clara a relação intrínseca entre a forma e a qualidade final dos modelos simplificados. A Área 4 é a que apresenta o menor erro porque apresenta poucas formas geométricas em seu domínio, sendo composta apenas de uma extensa área de campo com apenas alguns arruamentos e o início da cabeceira de uma ponte que por ser uma estrutura relativamente vertical, exerceu pouca influência no erro resultante; Já na Área 2 e principalmente na área 3 observa-se o oposto onde a forte presença de vegetação de maior porte e algumas edificações típicas em ambientes urbanos causaram um efeito significativo na determinação da qualidade final do modelo simplificado.

A FIGURA 4.15 apresenta os resultados obtidos com a simplificação dos modelos nas sub-áreas selecionadas sob a óptica dos recursos computacionais necessários para atender os requisitos de tempo, que podem determinar o insucesso de muitas aplicações.

FIGURA 4.15 – GRÁFICO COMPARATIVO DO TEMPO DE PROCESSAMENTO.



Este gráfico ajuda a evidenciar a relação entre o tempo de processamento e o número de pontos selecionados removidos. No limiar de 5° foi evidente uma menor carga de esforço para remoção dos pontos em todas as áreas. Neste limiar, com exceção da Área 4 que possui mais áreas planas que as demais e levou 1'26,4" para completar o processamento, as duas demais áreas (Áreas 3 e 2) se comportaram de forma equivalente e rápida, onde o processamento

completo demorou cerca de 1'13". No limiar de 15° pode-se notar um maior esforço, relativamente aos demais, em todas as áreas submetidas ao processo de simplificação, o que se deve ao grande número de pontos removidos, uma vez que este limiar é um valor médio e é facilmente encontrado nas áreas em geral. No limiar de maior grau, verifica-se uma inversão nos esforços de processamento onde novamente há uma pequena diminuição nos tempos decorridos. Convém destacar o comportamento da Área 2 que com o aumento do limiar houve um acréscimo proporcional no tempo necessário para generalização do seu modelo original, enquanto as Áreas 3 e 4 se comportaram de maneira parabólica com pico de esforço concentrado nas áreas de média coplanaridade.

5 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Com o método desenvolvido e aplicado neste trabalho possibilitou-se uma grande flexibilidade na extração de modelos de elevação sob a forma de malhas triangulares com diferentes níveis de detalhamento a partir de um conjunto de dados iniciais derivados do sistema LIDAR, através de operações de generalização.

Através dos experimentos realizados em modelos formados por dados de diferentes áreas, observou-se que a diminuição da resolução do produto final, acarreta em erros que podem não ser considerados representativos face aos benefícios que a técnica oferece permitindo o uso dos dados do LIDAR em aplicações que vão desde geração de malhas triangulares em multi-resolução para aplicações de visualização científica em tempo real, projetos de engenharia que fazem cálculos de custos que dependem da precisão dos dados.

Os erros detectados, em sua maioria, se devem ao método de determinação dos desvios dos modelos generalizados em relação aos originais que utiliza distância vertical absoluta do ponto no modelo original até o modelo derivado.

Os erros sistemáticos que podem estar presentes nos dados oriundos da tecnologia LIDAR afetam diretamente a eficiência do algoritmo, não somente em relação à qualidade, onde as simplificações tornam-se menos reduzidas em relação às originais, mas também sob o ponto de vista computacional que pode ser sobrecarregado, com um conseqüente um aumento no tempo de processamento (KERSTING *et al.*, 2003). Além disto, recomenda-se uma avaliação futura do método em áreas com sobreposição de diferentes faixas de vôo de levantamento que é um assunto extenso e poderá apresentar-se relevante.

O algoritmo desenvolvido apresentou-se capaz de realizar diferentes graus de simplificação, o que pode ser muito proveitoso principalmente à medida que a aplicação requer uma maior generalização.

A análise dos erros obtidos nas simplificações foi satisfatória, uma vez que forneceu uma métrica para avaliação da qualidade dos modelos derivados das simplificações. Entretanto, os erros podem se apresentar maiores ou menores dependendo do nível de simplificação ou redução de pontos executada, e em casos de simplificação extremas as aproximações inadequadas para algumas aplicações de engenharia, entretanto quando se prima pelo desempenho em aplicações de visualização em tempo real, este fator torna-se positivo e deve ser relevado.

Verificou-se que a velocidade de processamento dos dados foi proporcional à complexidade do modelo considerado. Após as operações de simplificação os dados apresentaram uma maior otimização, diminuindo os requerimentos de *hardware*, seja em relação

ao espaço de armazenamento ou mesmo aumentando a velocidade das operações de visualização, manipulação e análise dos dados.

Os programas e bibliotecas computacionais disponibilizados em anexo (ANEXO 1) servirão não somente para futuras derivações de modelos simplificados de acordo com a necessidade, mas também para utilização no desenvolvimento de novos estudos e pesquisas que venham requerer a integração de modelos de elevações tridimensionais simplificados com os ambientes de Sistemas de informações Geográficas (RENSLOW, 2000), onde áreas menos relevantes (áreas planas) de um terreno podem ser descritas através de uma representação de menor resolução (menos pontos), enquanto alta resolução pode ser utilizada apenas em áreas específicas de interesse.

Com esta técnica outras aplicações poderão ser viabilizadas, principalmente onde os recursos computacionais são críticos como em micro computadores, aparelhos portáteis do tipo *handhelds*, aparelhos celulares ou até mesmo permitindo a disseminação do uso de modelos tridimensionais através da Internet, tecnologias estas que estão em constante evolução.

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ACKERMANN, F. - *Airborne laser scanning – present status and future expectations*. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 54(1), pp. 64-67, 1999.
- ALGORRI, M. E., SCHMITT, F. - *Mesh simplification*. Computer Graphics Forum, 15(3), Aug. 1996. Proc. Eurographics '96.
- ANDREWS, D.S., 1996 – *Simplifying Terrain Models and Measuring Terrain Model Accuracy*. Msc. Thesis. Tech Report, 96-05, Department of Computer Science, University of British Columbia, Canada.
- AURENHAMMER, F. - *Voronoi Diagrams - A Survey of a Fundamental Geometric Data Structure*. ACM Computing Surveys, 23(3):345-405, 1991
- BALLARD, D. H., BROWN, C. M. - *Computer Vision*. Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ, 1982
- BERG. R., & FERGUSON. J. – *Airborne Laser Mapping for Highway Engineering applications* – ASPRS AGM 2001, St. Louis MS, April, 2001.
- BERN, M. E EPPSTEIN, D. - *Mesh Generation and Optimal Triangulation*. Computing in Euclidean Geometry (Ding-Zhu Du and Frank Hwang, editors), Lecture Notes Series on Computing, volume 1, pages 23--90. World Scientific, Singapore, 1992.
- BOXER, L., CHANG, C., MILLER, R. E RAU-CHAPLIN, A. - *Polygonal approximation by boundary reduction*, Pattern Recognition Letters, 14(2):111-119, February 1993.
- BURROUGH, P. A. - *Digital Elevation Models: Principles of Geographical Information System for Land Ressources Assessment*. Monographs on Soil and Ressources Survey. Oxford, 1986.
- CHEN Z. & GUEVARA J.A.. - *Systematic selection of very important points (VIP) from digital terrain model for constructing triangular irregular networks*. In: Eighth International Symposium on Computer-Assisted Cartography - Auto-Carto 8, Baltimore, Maryland, USA, Proceedings, p. 50-56., 1987

- CHEN Z.T. & TOBLER W.R. - *Quadtree representation of digital terrain*, In: Auto-Carto, London, England, Proceedings, p. 475-484., 1986.
- CHEN, X., SCHMITT, F. - *Adaptive range data approximation by constrained surface triangulation*. In B. Falcidieno and T. Kunii, editors, Modeling in Computer Graphics: Methods and Applications, pages 95-- 113. Springer-Verlag, Berlin, 1993.
- COHEN, J., VARSHNEY, A., MANOCHA, D., TURK, G., WEBER, H., AGARWAL, P., BROOKS, F., WRIGHT, W. - *Simplification envelopes*. In SIGGRAPH '96 Proc., pages 119--128, Aug. 1996. <http://www.cs.unc.edu/~geom/envelope.html>.
- CORMEN, T. H., LEISERSON, C. E., RIVEST, R. L. E STEIN, C. - *Introduction to algorithms*. Cambridge, MA, MIT Press, 1990.
- COSMAN, M. A., MATHISEN, A. E., AND ROBINSON, J. A. - *A New Visual System to Support Advanced Requirements*. In Proceedings, IMAGE V Conference, June 1990, pp. 370--380.
- COSMAN, M., SCHUMACKER, R. - *"System Strategies to Optimize CIG Image Content"*. Proceedings Image II Conference, Scottsdale, Arizona, 1981.
- CROMLEY, R. G. - *Hierarchical methods of line simplification*. Cartography and Geographic Information Systems, 18(2):125--131, 1991.
- D. S. ANDREWS. - *Simplifying terrain models and measuring terrain model accuracy*, Msc. Thesis. Tech. Report 9605, Dept. of CS, UBC, 1996
- DE BERG M. & DOBRINDT K.T.G. - *On levels of detail in terrains*, Graphical Models and Image Processing, 60:1 -12., 1998.
- DE BERG, M. e VAN KREVELD, M.. - *Trekking in the Alps without freezing or getting tired*. In Algorithms - ESA '93, Lecture Notes in Computer Science 726, pages 121--132, 1993.
- DE FLORIANI L., MARZANO P., PUPPO E. - *Line-of-sight Communication on Terrain Models*. International Journal of Geographic Information Systems 8(4): 329-342. 1994.
- DE FLORIANI L., MARZANO P., PUPPO E. - *Multiresolution models for topographic surface description*, The Visual Computer, 12:317-345., 1996.

- DE FLORIANI, L. - *A pyramidal data structure for triangle-based surface description*. IEEE Computer Graphics & Applications, 9(2):67--78, 1989.
- DE FLORIANI, L., FALCIDIENO, B. E PIENOVI, C. - *A Delaunay-based method for surface approximation*. In Eurographics '83, pages 333--350. Elsevier Science, 1983.
- DE FLORIANI, L., FALCIDIENO, B. E PIENOVI, C. - *A Delaunay-based representation of surfaces defined over arbitrarily-shaped domains*. Computer Vision, Graphics and Image Processing, 32:127--140, 1985.
- DE FLORIANI, L., FALCIDIENO, B., NAGY, G., PIENOVI, C., - *A hierarchical structure for surface approximation*, Computer and Graphics, 8(2): 183-193, 1984.
- DE FLORIANI, L., PUPPO, E. - *"A Hierarchical Triangle-Based Model for Terrain Description."* In Theories and Methods of Spatio-Temporal Reasoning in Geographic Space, ed. Frank, A.U., I. Campari, & U. Formentini. 236-251. Heidelberg-Berlin: Springer Verlag, 1992.
- DEHAEMER, M. & ZYDA, M. - *"Simplification of Objects Rendered by Polygonal Approximations"*. Computer & Graphics, 15(2): pages 175-184, 1991.
- DELINGETTE, H. - *Simplex meshes: a general representation for 3d shape reconstruction*. Technical Report 2214, INRIA, Mar. 1994.
- DELINGETTE, H., HEBERT, M., KEUCHI, K. I. - *Shape representation and image segmentation using deformable surfaces*. Image and Vision Computing, 10(3):132--144, Apr. 1992.
- DOUGLAS D., PEUCKER T. - *"Algorithms for the reduction of the number of points required to represent a line or its caricature."* The Canadian Cartographer, vol. 10, no. 2, 112--122, 1973
- DYN, N., LEVIN, D. E RIPPA, S. - *Data dependent triangulations for piecewise linear interpolation*, IMA Journal of Numerical Analysis, 10:137--154, 1990
- ECK, M., DEROSE, T., DUCHAMP, T., HOPPE, H., LOUNSBERRY, M., AND STUETZLE, W. *Multiresolution Analysis of Arbitrary Meshes*. Computer Graphics, SIGGRAPH '95 Proceedings, 1995, p 173--182.
- EVANS, I.S. - *General geomorphometry, derivatives of altitude, and descriptive statistics.*, in Spatial analysis in geomorphology, R.J. Chorley, Editor., Mathuen & Co Ltd. p. 17-92. 1972

FAUGERAS, D. D., HERBERT, M., MUSSI, P. E BOISSONNAT, J. D. - *Polyhedral approximation of 3D objects without holes*. Computer Vision, Graphics, and Image Processing, 26:169--183, February 1984.

FELGUEIRAS, C. - *Modelagem Ambiental com Tratamento de Incertezas em Sistemas de Informação Geográfica: O Paradigma Geoestatístico por Indição*. - PhD Thesis in Computer Science, INPE. 1999.

FERGUSON J. - Draft *LIDAR Guidelines*, ASPRS LIDAR Committee Presentation - International LIDAR Mapping Forum, Denver Colorado, February 2001.

FERGUSON J. - *Vegetation Identification and Classification Using LIDAR data* - ASPRS/ACSM Rhode Island Workshops, Providence Rhode Island, December 2000.

FISHER, P. - *Stretching the viewshed*. In Proceedings of the Sixth International Symposium on Spatial Data Handling, volume 2, pages 725--738, 1994.

FOWLER R. - *Using LIDAR for Flood Mapping* - ASPRS AGM 2000, Washington DC., May 2000.

FOWLER, R. J. E LITTLE, J. J. - *"Automatic Extraction of Irregular Network Digital Terrain Models,"* Computer Graphics, Vol. 13, No. 2, pp. 199-207, 1979.

FRANKLIN, W. R. - *tin.c*, 1993. C code, <ftp://ftp.cs.rpi.edu/pub/franklin/tin.tar.gz>

GARLAND, M. & HECKBERT, P. S. - *"Fast Triangular Approximation of Terrains and Height Fields"*, submitted for publication, In SIGGRAPH '97 Course Notes, 1997.

GARLAND, M. - *Multiresolution Modeling: Survey & Future Opportunities*. Eurographics '99, State of Art Reports, pp. 111-131., 1999a.

GARLAND, M. - *Quadric-Based Polygonal Surface Simplification*. PhD thesis, Carnegie Mellon University, May 1999.

GARLAND, M., HECKBERT, P. S. - *Surface simplification using quadric error metrics*. In SIGGRAPH '97 Proc., August 1997. To appear. <http://www.cs.cmu.edu/~garland/>.

GOMEZ, D., GUZMAN, A. - *Digital model for three-dimensional surface representation*. Geo-Processing, 1:53-70, 1979.

- GOURDON, A. - *Simplification of irregular surface meshes in 3D medical images*. In Computer Vision, Virtual Reality, and Robotics in Medicine (CVRMed '95), pages 413–419, Apr. 1995.
- GROSS, M. H., GATTI, R., STAADT, O. - *Fast multiresolution surface meshing*. In: Nielson, G. M. and Silver, D. (Eds.) Visualization '95, IEEE Computer Society Press, Los Alamitos, CA, 135—142, 1995.
- GUÉZIEC A. & HUMMEL R. - *Exploiting triangulated surface extraction using tetrahedral decomposition*. IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, 1:328-342., 1995.
- HAMANN, B. - *A data reduction scheme for triangulated surfaces*. Computer-Aided Geometric Design, 11:197– 214, 1994.
- HAMMING, R. W. - *Digital Filters*. Prentice Hall, Englewood Cliffs, New Jersey, 1989.
- HAMMOND, E. H. - *Analysis of properties in land form geography: An application to broadscale land form mapping*. Annals of the Association of American Geographers, 54(1):11--19, 1964.
- HECKBERT, P.; GARLAND, M. - *Multiresolution Modeling for Fast Rendering*. Graphics Interface '94, pp. 4350, 1994
- HELLER, M. - *Triangulation algorithms for adaptive terrain modeling*. In Proc. 4th Internat. Sympos. Spatial Data Handling, pages 163--174, 1990.
- HINKER, P., HANSEN, C. - *Geometric Optimization*. In Proc. Visualization '93, pages 189–195, San Jose, CA, October 1993. <http://www.acl.lanl.gov/Viz/vis93/abstract.html>.
- HOPPE H., DEROSE T., DUCHAMP T., MCDONALD J., STUETZLE W. - *Mesh optimization*. In: SIGGRAPH'93 Conference, Anaheim, California, USA, Proceedings, p. 19-26., 1993. <http://www.research.microsoft.com/research/graphics/hoppe/>.
- HOPPE, H. - *Progressive meshes*. In SIGGRAPH '96 Proc., pages 99–108, Aug. 1996. <http://www.research.microsoft.com/research/graphics/hoppe/>.
- HUGHES, M., LASTRA, A. A., SAXE, E. - *Simplification of global-illumination meshes*. Computer Graphics Forum, 15(3):339–345, August 1996. Proc. Eurographics, 1996.
- HUGHES, P. - *Building a terrain renderer*. Computers in Physics, pages 434--437, 1991.

IRISH, J.L. & LILLYCROP, W.J. - *Scanning laser mapping of the coastal zone: The SHOALS system*. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing. 54 123–129, 1999.

JÜENGER, B. & SNOEYINK, J. - *Selecting independent vertices for terrain simplification*. In WSCG '98, pages 157–164, Plzen, Cz, 1998.

KALVIN, A. D. & TAYLOR, R. H. - *Surfaces: Polyhedral approximation with bounded error*. In *Medical Imaging: Image Capture, Formatting, and Display*, volume 2164, pages 2–13. SPIE, Feb. 1994. (Also IBM Watson Research Center tech report RC 19135).

KALVIN, A. D., CUTTING, C. B. HADDAD, B., NOZ, M. E. - *Constructing topologically connected surfaces for the comprehensive analysis of 3D medical structures*. In *Medical Imaging V: Image Processing*, volume 1445, pages 247–258. SPIE, Feb. 1991.

KAO, T., MOUNT, D. M., SAALFELD, A. - *Dynamic maintenance of Delaunay triangulations*. Technical report, CS Dept., U. of Maryland at College Park, Jan. 1991. CS-TR-2585.

KERSTING, J., CENTENO, J. A. S., MACHADO, A. M. L., PEDRO, P. C. - *Filtragem de Modelos Digitais de Superfície Derivados da Varredura a Laser Usando A Triangulação de Dalaunay*, 1º Simpósio Brasileiro de Geociências e Tecnologia de Informação. Anais do congresso. Recife, Pernambuco, Brasil, 2003

KERSTING, J., KERSTING, A. P. B. - *LIDAR Data Points Filtering Using Arcgis' 3d And Spatial Analyst*, 25th ESRI USER CONFERENCE. Conference Proceedings. San Diego, California, USA, 2005.

KLEIN, R., LIEBICH, G., STRÄßER, W. - *Mesh reduction with error control*. In *Proceedings of Visualization '96*, pages 311–318, October 1996.

KRAUS K., BRIESE C., ATTWENGER M., PFEIFER N. - *Quality Measures for Digital Terrain Models*, XXth ISPRS Congress, p. 119 ff., Istanbul, Turkey, 2004

KUMLER, M. P. - *An intensive comparison of triangulated irregular networks (TINs) and digital elevation models (DEMs)*. Cartographica, 31(2), Summer 1994. Monograph 45.

LAWSON, C. L. - *Software for C1 surface interpolation*. In John R. Rice, editor, *Mathematical Software III*, pages 161–194. Academic Press, NY, 1977. (Proc. of symp., Madison, WI, Mar. 1977).

LAWSON, C. L. - *Transforming Triangulations*. Discrete Mathematics, Vol. 3, pp. 365-372, 1972

LEE J. - *A drop heuristic conversion method for extracting irregular network for digital elevation models*. In: GIS/LIS'89, American Congress on Surveying and Mapping, Proceedings, Vol. 1, p. 30-39. 1989.

LEE, D. T., SCHACHTER, B. - *Two algorithms for constructing Delaunay triangulations*. International Journal of Computers and Information Science, 9(3) 219-242, 1980

LEE, J. - *Comparison of existing methods for building triangular irregular network models of terrain from grid digital elevation models*. International Journal of Geographical Information Systems, 5,3, pp.267-285. 1991.

LOUNSBERY, J.A. - *Multiresolution Analysis for Surfaces of Arbitrary Topological Type*. Phd. Dissertation, University of Washington, 1994.

MAACK, R. - *Breves notícias sobre a Geologia dos Estados do Paraná e Santa Catarina*. IBPT Curitiba, Arq. Biol. e Tecn., vol. II, Art. 7, 1947.

MARK, D. M. - *Concepts of "data structure" for digital terrain models*. In Proceedings of the Digital Terrain Models (DTM) Symposium, pages 24--31, 1978.

MCMASTER, R. B., SHEA, K. S. - *Generalization in Digital Cartography*. Association of American Geographers, 1992.

MOSAIC MAPPING SYSTEMS INC. – *Internal documentation LaRoque, P.E., West, G.R. - Airborne Laser Hydrography: An Introduction* – Proceedings, ROPME/PERSGA/IHB Workshop on Hydrographic Activities in the ROPME Sea Area and Red Sea, Kuwait City, October 1999.

NING, P. e BLOOMENTHAL, J. - *An evaluation of implicit surface tilers*. Computer Graphics and Applications, pages 33–41, Nov. 1993.

ONS – 2004 - *Diretrizes para as regras de operação de controle de cheias Bacia do rio Iguaçu* – resolução: RE 3/119/2004 da Organização Nacional do Sistema - ONS – Brasil

PAVLIDIS, T. - *Structural Pattern Recognition*, Springer-Verlag, Berlin, 1977.

PEDRINI, H. - An Adaptive Method for Terrain Surface Approximation based on Triangular Meshes. Rensselaer Polytechnic Institute, Troy, NY, USA, PhD Thesis, 46 p., 2000.

PEDRINI, H. - *An improved refinement and decimation method for adaptive terrain surface approximation*. In: 9th International Conference in Central Europe on Computer Graphics, Visualization and Computer Vision, Plzen, Czech Republic, Proceedings, p. 103-109., 2001.

PEUCKER, T. K., FOWLER, R. J., LITTLE, J. J., AND MARK, D. M. - *The Triangulated Irregular Network*. In Proc. of the Digital Terrain Models Symposium., pages 516-532, St. Louis, MO, 1978.

POLIS, M. F., MCKEOWN, JR. D. M. - *Issues in iterative TIN generation to support large scale simulations*. In Proc. of Auto-Carto 11 (Eleventh Intl. Symp. on Computer-Assisted Cartography), pages 267–277, November 1993. <http://www.cs.cmu.edu/~MAPSLab>.

PREPARATA F. P., SHAMOS M. I. - *Computational Geometry: An Introduction*, Springer, 1985.

PUPPO, E., DAVIS, L., DEMENTHON, D., TENG, Y. A. - *Parallel terrain triangulation*. Intl. J. of Geographical Information Systems, 8(2):105--128, 1994.

RENSLOW, M. - *Utilization/Integration of LIDAR in Mapping and GIS Programs – ASPRS/ACSM Rhode Island Workshops*, Providence Rhode Island, December 2000.

RIPPA, S. - *Adaptive approximation by piecewise linear polynomials on triangulations of subsets of scattered data*. SIAM J. Sci. Stat. Comput., 13(5):1123–1141, Sept. 1992.

RONFARD, R. & ROSSIGNAC, J. - *Full-range approximation of triangulated polyhedra*. Computer Graphics Forum, 15(3), Aug. 1996. Proc. Eurographics, 1996.

ROWLAND, T. - "L2-Function." From MathWorld-A Wolfram Web Resource, created by Eric W. Weisstein. <http://mathworld.wolfram.com/L2-Function.html>. em 19/07/2000.

SAMET, H. - *The Design and Analysis of Spatial Data Structures*. Addison-Wesley, Reading, MA, 1990.

SCARLATOS, L. L. - *"Spatial Data Representations for Rapid Visualization and Analysis."* Ph.D. Dissertation, Department of Computer Science, State University of New York at Stony Brook, 1993.

SCARLATOS, L. L., PAVLIDIS, T. - *"Hierarchical Triangulation Using Cartographic Coherence"* CVGIP: Graphical Models and Image Processing, vol. 54, no. 2, pp. 147-161, 1992.

SCARLATOS, L. L., PAVLIDIS, T. - *Optimizing triangulations by curvature equalization*. In Proc. Visualization '92, pages 333–339. IEEE Computing. Society. Press, 1992a.

SCHMITT, F. E CHEN, X. - *Fast segmentation of range images into planar regions*. In Proc. of International Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR'91), pages 710--711, 1991.

SCHMITT, F., GHOLIZADEH, B. - *Adaptative polyhedral approximation of digitized surfaces*. In Computer Vision for Robots, volume 595, pages 101--108. SPIE, 1985.

SCHRODER, F., ROBBACH, P. - *Managing the complexity of digital terrain models*. Computer & Graphics, 18:775-783., 1994.

SCHROEDER, W. J., ZARGE, J. A., LORENSEN, W. E. - *Decimation of triangle meshes*. Computer Graphics (SIGGRAPH '92 Proc.), 26(2):65–70, July 1992.

SITE DA OPTECH – www.optech.on.ca – Acessado em 10/05/2005.

SITE DA TOPOSYS – <http://www.toposys.com> – Acessado em 10/05/2005.

SMITH, R.A., WEST, G.R. – *Airborne LIDAR: A Surveying Tool for the New Millenium* - Proceedings, Oceans '99 MTS/IEEE, Seattle Washington, September 1999.

SONG, J.H., HAN, S.H., YU, K., KIM, Y. - *Assessing the possibility of land-cover classification using lidar intensity data*, IAPRS, 9-13 September, Graz, vol. 34, 4 p, 2002.

SOUCY, M., LAURENDEAU, D. - *Multiresolution surface modeling based on hierarchical triangulation*. Computer Vision and Image Understanding, 63(1):1–14, 1996.

SOUCY, M., LAURENDEAU, D. - *Multi-resolution surface modeling from multiple range views*. In Conf. on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR '92), pages 348–353, June 1992.

SOUTHARD, D. A. - *Piecewise Planar Surface Models from Sampled Data*. In Proc. Computer Graphics International '91), pp. 667--680, 1991.

TANIMOTO, S., PAVLIDIS, T. - *A hierarchical data structure for picture processing*, Computer Graphics and Image Processing 4, pp. 104-119, 1975.

TAYLOR, D. C., BARRETT, W. A. - *An Algorithm for Continuous Resolution Polygonalizations of a Discrete Surface*. In Proceedings of Graphics Interface '94, pages 33--42, 1994.

TURK, G. - *Re-Tiling Polygonal Surfaces*. Computer Graphics (SIGGRAPH '92 Proc.), 26(2):55--64, July 1992.

VARSHNEY, A. - *Hierarchical Geometric Approximations*. PhD thesis, Dept. of CS, U. of North Carolina, Chapel Hill, 1994. TR-050.

VON HERZEN, B. V., BARR, A. H. - *Accurate Triangulations of Deformed, Intersecting Surfaces*. Computer Graphics, Vol. 21, Num. 4, pp. 103-110, Siggraph Jul. 1987.

WEHR A. & LOHR U. - *Airborne Laser Scanning – An Introduction and Overview*. ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing, pp. 68-82., 1999.

WEIBEL, R. - *Models and experiments for adaptive computer-assisted terrain generalization*. Cartography and Geographic Information Systems, 19(3):133-- 153, 1992.

WILLIAMS, L. J. - *Pyramidal parametrics*. Computer Graphics, 17(3):1--11. Also Proceedings of the SIGGRAPH'83 Conference, Detroit, 1983.

ANEXOS

ANEXO 1 – MÍDIA DIGITAL CONTENDO OS DADOS DA PESQUISA

Conteúdo do CD:

1. pacote de instalação dos programas desenvolvidos;
2. códigos-fonte; e
3. dados LiDAR (amostras) das sub-áreas.

