

DEPARTAMENTO DE CARTOGRAFIA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS CARTOGRÁFICAS

**Edgar Nogueira Demarqui**

*Pós-graduação*

**DETERMINAÇÃO AUTOMÁTICA DA ALTURA DE  
EDIFÍCIOS EM IMAGENS AÉREAS**

*Ciências Cartográficas*

Presidente Prudente

Março de 2007

**Edgar Nogueira Demarqui**

**DETERMINAÇÃO AUTOMÁTICA DA ALTURA DE  
EDIFÍCIOS EM IMAGENS AÉREAS**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Cartográficas da Faculdade de Ciências e Tecnologia – UNESP, como parte dos requisitos necessários para a obtenção do título de Mestre em Ciências Cartográficas.

**Orientador:** Prof. Dr. Júlio K. Hasegawa

**Co-Orientador:** Prof. Dr. Maurício Galol

**Presidente Prudente**

**Março de 2007**

**Edgar Nogueira Demarqui**

**DETERMINAÇÃO AUTOMÁTICA DA ALTURA DE  
EDIFÍCIOS EM IMAGENS AÉREAS**

**BANCA EXAMINADORA  
DEFESA DA DISSERTAÇÃO DE MESTRADO**

---

**Prof. Dr. Júlio K. Hasegawa**

*Presidente e Orientador*

---

**Prof. Dr. Sergio Donizete Farias**

*2º Exanimador*

---

**Prof. Dr. Antônio Maria Garcia Tommaselli**

*3º Exanimador*

Presidente Prudente, \_\_\_\_\_ de \_\_\_\_\_ de 2007.

**DADOS CURRICULARES**  
**Edgar Nogueira Demarqui**

Nascimento: 01/12/1980 – Birigui – SP

Filiação: Mário Luiz Demarqui  
Lavínia Marcolino Nogueira Demarqui

1999 – 2003: Curso de Graduação  
Bacharelado em Engenharia Cartográfica  
Faculdade de Ciências e Tecnologia – UNESP

2004 – 2006: Curso de Pós-Graduação  
Especialização em Planejamento e Gestão Municipal  
Faculdade de Ciências e Tecnologia – UNESP

2004 – 2007: Curso de Pós-Graduação  
Mestrado em Ciências Cartográficas  
Faculdade de Ciências e Tecnologia – UNESP

## DEDICATÓRIA

Aos meus pais, por proporcionarem os meios para chegar até aqui, e pelo  
exemplo de pessoas que são para mim.

Ao meu irmão, pelo incentivo que sempre me deu nesta caminhada.

Aos verdadeiros amigos que sempre estiveram torcendo por mim.

## AGRADECIMENTOS

Desejo agradecer às seguintes entidades e pessoas relacionadas abaixo:

- Aos professores Júlio K. Hasegawa e Maurício Galo, que desde a graduação me orientam em pesquisas científicas, pela confiança, paciência e dedicada orientação;
- A todos os professores do PPGCC e do Departamento de Cartografia, que contribuíram em minha formação acadêmica;
- A todos os funcionários de forma geral, em especial à secretária do Departamento de Cartografia, Maria das Graças Teixeira Mestriner;
- Às funcionárias da seção de Pós-Graduação pela sempre presteza no atendimento;
- Aos grandes amigos e companheiros da pós-graduação Daniela Souza dos Anjos, Edmur Azevedo Pugliese, José Carlos Rosatti, José Roberto Fernandes Galindo, João Paulo Magma Júnior, Luiz Fernando A. Dalbelo, Marcelo Leandro Holzschuh, Nilcilene das Graças Medeiros, Regina Ishibashi, Roberto Ruano Dalaqua, Rodrigo Bezerra de Araújo Gallis, Roberto da Silva Ruy, Rodrigo Bruno Zanin, Wesley G. C. Polezel, William Rodrigo Dal Poz, pelos vários momentos de amizade;
- Ao grande amigo Mário Luiz Lopes Reiss, o qual prestou grande contribuição na implementação dos algoritmos;
- À minha namorada Lígia Mancini de Oliveira Barros pelo seu companheirismo, carinho e conselhos;
- Aos demais amigos que fiz durante a minha permanência no Programa de Pós-Graduação em Ciências Cartográficas pelas conversas durante as pausas para o café;
- Aos muitos amigos que fiz durante todos estes anos na FCT-UNESP pelos momentos de amizade e descontração, em especial a todos os

amigos que passaram pelo “predinho azul”, assim como para os amigos dos tempos de graduação;

- A todos aqueles que direta ou indiretamente contribuíram durante a realização deste trabalho;
- À Coordenadoria de Aperfeiçoamento de Pessoal, CAPES, pelo auxílio financeiro dado a essa pesquisa por meio da concessão de uma bolsa;
- Aos membros da banca examinadora pelas valiosas sugestões com o intuito de melhorar este trabalho.

## EPÍGRAFE

*“Se eu acertei ou se errei, fiz isso da minha maneira...”*

Trecho da música *My way* de Frank Sinatra

*“Na vida... tudo é questão de referencial...”*

## RESUMO

Este trabalho propõe uma metodologia monoscópica para a determinação automática da altura de edifícios em fotografias aéreas digitais, baseando-se no deslocamento radial dos pontos projetados no plano imagem e na geometria formada no momento de obtenção da fotografia aérea. O conhecimento da altura de edifícios pode ser utilizado para a modelagem da superfície em áreas urbanas, estudos para a instalação de antenas de transmissão de sinais, planejamento de rotas para aeronaves, geração de “*true-orthophoto*” etc.. A metodologia emprega um conjunto de etapas para a detecção das bordas dispostas radialmente em relação ao sistema de coordenadas fotogramétrico, sendo que estas bordas representam as arestas laterais dos edifícios registradas na fotografia. Na primeira etapa realiza-se a redução do espaço de busca através da detecção das sombras projetadas pelos edifícios, gerando sub-imagens das áreas no entorno de cada sombra detectada. Na seqüência, é realizada a extração de bordas e conexão dos pixels destas sub-imagens. As bordas são analisadas individualmente para identificar qual par, dentre os pontos que compõem a borda, melhor corresponde aos extremos da aresta lateral do edifício. Os critérios utilizados para a seleção dos pares de pontos são os seguintes: análise do coeficiente linear da equação da reta formada pelo par de pontos; distância entre os pontos; e grau de sobreposição com a borda rotulada. Deste modo, a partir da seleção das arestas laterais, assim como o conhecimento da altura de vôo, são calculadas as alturas destes edifícios. Os resultados alcançados nos testes realizados com imagens reais se mostraram promissores para a identificação das arestas e cálculo da altura de edifícios.

Palavras-chave: altura de edifícios, deslocamento devido ao relevo, detecção de sombras, PDI.

## **ABSTRACT**

This work proposes an automatic extraction of buildings height in digital images through a monoscopic methodology. Surface modeling of urban areas planning of aircraft routes, true-orthophoto and so on, can be performed by knowing the buildings heights. In photographs taken from an aircraft the buildings edges appear as radial lines due to the relief displacement, which occurs radially from the principal point. The first step of the methodology consists on the sub-images creation with the aim to reduce the search space on image. Thus, its used a shadows extraction procedure, by selecting only those with the biggest area (projected at ground) according to threshold. The edge extraction and pixels connection are performed for each sub-image produced and analyzed individually in order to identify if they belong to a building. The adopted criteria are based on the linear coefficient of straight line, the distance and the overlapping degree with regard to the labeled edge. With the lateral edges selected and the knowledge of the flight height, the buildings heights can be calculated. The experimental results obtained with real images show that the proposed approach is suitable to perform the automatic identification of the buildings height in digital images.

Keywords: height of buildings, relief displacement, shadows detection, IDP.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Exemplo do sistema de coordenadas associado à imagem digital. ....	16
Figura 2 – Cubo de cores RGB. ....	18
Figura 3 – Triângulo de cores HSI (em cinza) a partir do particionamento do cubo RGB. ....	20
Figura 4 – Ponto P em relação ao triângulo de cores HSI. ....	21
Figura 5 – Ocorrência de sombra provocada por edifício em uma imagem aérea. ....	22
Figura 6 – Representação do filtro SAD proposto por Santos et al. (2006). ....	23
Figura 7 – Exemplo de histograma de uma imagem em tons de cinza. ....	27
Figura 8 – Resultado do processo de equalização de histograma da imagem da Figura 7. ....	27
Figura 9 – Exemplo da aplicação do filtro da mediana. ....	29
Figura 10 – Representação gráfica da magnitude e do ângulo de direções dos gradientes. ....	30
Figura 11 – Máscaras utilizadas no operador de Sobel. ....	31
Figura 12 – Máscaras utilizadas pelo operador de Nevatia e Babu. ....	32
Figura 13 – Efeito provocado pela projeção com perspectiva central numa imagem de uma área urbana. ....	39
Figura 14 – Representação do comportamento radial das arestas laterais de edifícios em uma imagem aérea vertical. ....	40
Figura 15 – Representação geométrica da tomada de uma fotografia aérea (vertical) de uma área com a presença de um edifício. ....	41
Figura 16 – Diferenças de tamanho na representação da aresta lateral de um edifício em relação a diferentes valores de distância focal. ....	43
Figura 17 – Sistema de coordenadas fiducial. ....	44

Figura 18 – Sistema de coordenadas fotogramétricas. ....	46
Figura 19 – Representação da geometria do processo de retificação. ....	51
Figura 20 – Representação da não correspondência dos <i>pixels</i> da imagem retificada com a imagem original. ....	53
Figura 21 – Representação ilustrativa de um modelo do terreno. ....	55
Figura 22 – Representação do plano epipolar e das linhas epipolares. ....	58
Figura 23 – Geometria da redução do espaço de busca com o uso das linhas epipolares e de informações altimétricas. ....	59
Figura 24 – Fases da metodologia proposta. ....	63
Figura 25 – Fluxograma das etapas para a geração das sub-imagens. ....	65
Figura 26 – Esquema da seleção das regiões representando sombras. ....	67
Figura 27 – Esquema de geração das sub-imagens. ....	68
Figura 28 – Exemplo de três casos onde as sub-imagens ultrapassam os limites da imagem original. ....	70
Figura 29 – Sub-imagens redefinidas para não exceder os limites da imagem original. ....	71
Figura 30 – Seqüência dos processamentos realizados nas sub-imagens para a extração das bordas. ....	72
Figura 31 – Fluxograma das etapas para a seleção das bordas das arestas laterais. ....	73
Figura 32 – a) Imagem de um edifício em uma fotografia aérea; b) Resultado da extração de bordas. ....	74
Figura 33 – a) Representação de uma borda; b) Borda generalizada. ....	75
Figura 34 – Resultado da eliminação das bordas pequenas da imagem da Figura 32b. ....	76

Figura 35 – a) Sub-imagem; b) Bordas detectadas; c) <i>Pixels</i> rotulados das bordas.	76
Figura 36 – Esquema da eliminação dos conjuntos de pontos de borda. ....	77
Figura 37 – Seqüência de pares de pontos analisados para o caso uma borda com 4 <i>pixels</i> .....	79
Figura 38 – Fluxograma dos critérios de seleção para os pontos de interesse.....	83
Figura 39 – Imagem aérea com ocorrência de sombras. ....	88
Figura 40 – Imagem resultante da aplicação do filtro SAD na imagem da Figura 39. ....	89
Figura 41 – Resultado da aplicação do índice SDW na imagem da Figura 39. ....	90
Figura 42 – Conjunto de edifícios obstruindo a visualização.....	91
Figura 43 – Casos das sombras de edifícios que não estão visíveis. ....	91
Figura 44 – Casos de sombras parcialmente visualizadas. ....	92
Figura 45 – Regiões selecionadas (azul) na imagem da Figura 40 após aplicação do limiar de 130 m <sup>2</sup> . ....	93
Figura 46 – Algumas das sub-imagens geradas a partir da imagem da Figura 45. ..	93
Figura 47 – (a) Imagem aérea com ocorrência de vegetação 1; (b) Vegetação selecionada através do filtro SAD; (c) Vegetação selecionada pelo uso do índice SDW.....	94
Figura 48 – a) Recorte de uma imagem aérea do levantamento 1; b) Sombras extraídas pelo uso do filtro SAD; c) Sombras extraídas pelo uso do índice SDW. ....	95
Figura 49 – Sub-imagens geradas a partir da imagem da Figura 48. ....	96
Figura 50 – a) Recorte de uma das imagens do levantamento 2; b) Sombras extraídas pelo uso do filtro SAD; c) Sombras extraídas pelo uso do índice SDW. ....	97

Figura 51 – Sub-imagens dispostas em suas posições reais no recorte da imagem, antes da aplicação do limiar de corte.....	98
Figura 52 – Sub-imagens dispostas em suas posições reais no recorte da imagem, após a aplicação do limiar de corte.....	99
Figura 53 – a) Sub-imagem 12; b) Extração das bordas; c) Imagem rotulada. ....	100
Figura 54 – a) Sub-imagem 15; b) Extração das bordas; c) Imagem rotulada. ....	101
Figura 55 – a) Sub-imagem 16; b) Extração das bordas; c) Imagem rotulada. ....	102
Figura 56 – a) Sub-imagem 19; b) Extração das bordas; c) Imagem rotulada. ....	103
Figura 57 – a) Aresta determinada no edifício da sub-imagem 1; b) Detalhe da aresta 1A.....	104
Figura 58 – a) Aresta determinada no edifício da sub-imagem 2; b) Detalhe da aresta 2A; c) Detalhe da aresta 2B; d) Detalhe da aresta 2C. ....	105
Figura 59 – a) Aresta determinada no edifício da sub-imagem 3; b) Detalhe da aresta 3A.....	106
Figura 60 – a) Aresta determinada no edifício da sub-imagem 4; b) Detalhe da aresta 2A; c) Detalhe da aresta 2B; d) Detalhe da aresta 2C. ....	107
Figura 61 – a) Edifício da sub-imagem 5; b) Detalhe da aresta 5B; c) Detalhe da aresta 5A.....	108
Figura 62 – a) Aresta determinada no edifício da sub-imagem 8; b) Detalhe da aresta 8A.....	109
Figura 63 – a) Edifício representado na sub-imagem 13; b) Detalhe da aresta 13A. ....	110
Figura 64 – a) Edifício na sub-imagem 18; b) Detalhe da aresta 18A.....	111
Figura 65 – a) Edifício da sub-imagem 21; b) Detalhe da aresta 21A.....	112
Figura 66 – a) Edifício na sub-imagem 24; b) Detalhe da aresta 24A.....	113

Figura 67 – a) Aresta determinada do edifício presente na sub-imagem 26; b) Detalhe da aresta 26A. ....	114
Figura 68 – a) Edifício presente na sub-imagem 20; b) Detalhe da aresta 20A; c) Detalhe da aresta 20B; d) Detalhe da aresta 20C.....	115
Figura 69 – a) Edifício da sub-imagem 23; b) detalhe da aresta 23A; c) detalhe da aresta 23B; d) detalhe da aresta 23C; e) detalhe da aresta 23D. ....	116
Figura 70 – a) Edifício representado na sub-imagem 27; b) Detalhe da aresta 27A. ....	117
Figura 71 – a) Sub-imagem 28; b) Detalhe da aresta 28A determinada. ....	118
Figura 72 – a) Sub-imagem 22; b) Detalhe da aresta determinada.....	119
Figura 73 – a) Sub-imagem 29; b) Detalhe da aresta 29A determinada; c) Detalhe da aresta 29B determinada.....	120
Figura 74 – a) Sub-imagem 14; b) Detalhe da aresta 14A determinada. ....	121
Figura 75 – Gráfico referente aos valores calculados para $\Delta r$ .....	123
Figura 76 – Gráfico referente aos valores calculados para $\Delta r$ .....	123
Figura 77 – Exemplo do deslocamento medido entre os pontos extremos das arestas selecionadas de forma manual e automática. ....	126
Figura 78 – Gráfico dos deslocamentos em relação aos pontos extremos das arestas obtidos de forma manual com seus respectivos pontos obtidos automaticamente.....	128
Figura 79 – Gráfico das diferenças de alturas calculadas.....	130
Figura 80 – Aresta radial extraída na sub-imagem 11.....	134
Figura 81 – Aresta radial identificada na sub-imagem 15. ....	135

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Comparação entre os pontos extremos das arestas selecionadas de modo automático e manual. ....	122
Tabela 2 – Valores calculados para $\sigma_{rr'}$ a partir de diferentes valores de $\sigma_{xy}$ . ....	125
Tabela 3 – Deslocamento dos pontos extremos das arestas obtidas de forma manual e automática.....	127
Tabela 4 – Alturas calculadas dos edifícios através da extração automática e manual das arestas.....	129
Tabela 5 – Estimativa de $\sigma_{\Delta h}$ para diferentes valores $\sigma_z$ . ....	131
Tabela 6 – Influência da variação de $\sigma_{xy}$ em $\sigma_{rr'}$ e $\sigma_{\Delta h}$ .....	132
Tabela 7 – Comparação entre os valores calculados automaticamente e os medidos por meio de restituição em estação fotogramétrica digital. ....	133
Tabela 8 – Porcentagem de dh em relação a $h_m$ .....	134

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO</b>	<b>12</b>
1.2 Justificativa	13
1.3 Objetivos	14
1.4 Estrutura do Trabalho	15
<b>2 ASPECTOS SOBRE PROCESSAMENTO DIGITAL DE IMAGEM</b>	<b>16</b>
2.1 Imagem Digital	16
2.2 Modelo de Cores	17
2.2.1 Modelo de Cores RGB	18
2.2.2 Modelo de Cores HSI	19
2.2.3 Conversão entre os Modelos RGB e HSI	21
2.3 Extração de Regiões com Sombra em Imagens Digitais	22
2.4 Extração de Feições em Imagens Digitais	24
2.4.1 Melhoramento do Contraste	26
2.4.1.2 Equalização do Histograma	26
2.4.2 Suavização	28
2.4.2.1 Filtragem pela Mediana	28
2.4.3 Detectores de Borda	29
2.4.3.1 Operador de Sobel	31
2.4.3.2 Operador de Nevatia e Babu	31
2.4.4 Limiarização	33
2.4.4.1 Método de Otsu	34
2.4.5 Afinamento de Bordas	35
2.4.5.1 Método da Supressão Não-Máxima	36
2.4.6 Crescimento de Regiões	36

<b>3 CONCEITOS DE FOTOGRAMETRIA</b>	<b>38</b>
3.1 Geometria de uma Fotografia Aérea	38
3.1.1 Fotografias Verticais	38
3.1.2 Fotografias Inclínadas	43
3.1.3 Sistema de Coordenadas Fiduciais	44
3.1.4 Sistema de Coordenadas Fotogramétricas	45
3.1.5 Correção dos Erros Sistemáticos	46
3.2 Retificação de Fotografias	50
3.3 Modelagem do Terreno	54
3.4 Correspondência em Imagens Digitais	56
3.4.1 Correlação de Imagens Digitais	57
<b>4 METODOLOGIA PROPOSTA</b>	<b>62</b>
4.1 Definição Geral da Metodologia	62
4.2 Delimitação do Espaço de Busca	63
4.2.1 Extração das Regiões de Sombra	65
4.2.2 Crescimento de Regiões nas Áreas com Presença de Sombras	66
4.2.3 Seleção das Sombras de Interesse	67
4.2.4 Definição das Áreas de Busca	68
4.2.5 Extração Geral de Bordas das Sub-Imagens	71
4.3 Seleção das Bordas das Feições de Interesse	73
4.3.1 Considerações Sobre a Disposição das Bordas	74
4.3.2 Crescimento de Regiões das Bordas Extraídas	76
4.3.3 Reamostragem dos Pixels das Bordas	77
4.3.4 Transformação para o Sistema Fotogramétrico e Correção dos Erros Sistemáticos	78

4.3.5 Retificação das Coordenadas _____	78
4.3.6 Determinação das Arestas dos Edifícios _____	79
4.4 Cálculo da Altura dos Edifícios _____	84
<b>5 EXPERIMENTOS E ANÁLISES DOS RESULTADOS _____</b>	<b>86</b>
5.1 Materiais e Dados Utilizados _____	86
5.2 Experimentos Realizados _____	87
5.2.1 Extração de Áreas com Sombras e Delimitação do Espaço de Busca ___	87
5.2.2 Determinação das Arestas dos Edifícios _____	100
5.2.3 Cálculo da Altura dos Edifícios a partir das Arestas Seleccionadas _____	128
<b>6 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES _____</b>	<b>136</b>
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS _____</b>	<b>138</b>
<b>APÊNDICE A _____</b>	<b>145</b>

## 1 INTRODUÇÃO

A Fotogrametria tradicionalmente tem sido definida como o processo de obter informações métricas sobre um objeto através de observações feitas em fotografias do mesmo objeto (MIKHAIL et al., 2001). Desde sua origem a Fotogrametria se destaca como uma das tecnologias para a geração de produtos cartográficos, tendo evoluído paralelamente com os avanços nas áreas de aquisição de imagens e tecnologias computacionais, e atualmente têm-se a fase denominada como Fotogrametria Digital. Esta fase começou a se difundir a partir da década de 1990 (ATKINSON, 1996), observando-se um intensivo uso de imagens digitais e das modernas estações fotogramétricas digitais (*softcopy workstation*).

A revolução promovida pela Fotogrametria Digital baseia-se no sucesso da automação de várias etapas do processo de produção fotogramétrico (WALKER, 1997). Deste modo, muitas das pesquisas em Fotogrametria Digital têm se concentrado neste objetivo (HEIPKE, 1997; TOMMASELLI, 1998; ACKERMANN e KRZYSTEK, 1997; MENA, 2003; SANTOS, 2005; MACHADO, 2006) visando uma redução do custo/tempo dos produtos gerados. A automação de processos fotogramétricos também é abordada em muitos dos trabalhos desenvolvidos no PPGCC (ARTERO, 1999; SANTOS, 2002; VALE, 2003; RUY, 2004; GALLIS, 2006).

Também em pesquisas para a produção dos chamados Modelos Digitais do Terreno (MDT) por meio de processos fotogramétricos (ZHANG et al., 2006; COSTA, 2006; HABIB et al. 2003; SCHENK, 1996) a automação na fotogrametria se mostrou muito útil, reduzindo o trabalho dos operadores.

As estações fotogramétricas digitais, através da utilização de técnicas de correspondência em imagens, tornaram a geração de Modelos Digitais do Terreno (MDT) mais rápida e eficiente. Entretanto, para o caso de áreas urbanas o modelo gerado representa os topos das feições naturais (vegetação) e artificiais (edificações) presentes nas imagens, obtendo-se, assim, o chamado Modelo Digital de Superfície (MDS) para estas áreas. Deste modo, para determinação do MDT é necessário que o operador faça a edição do modelo, para a obtenção da diferença entre a altitude na base da edificação e o seu topo (altura da edificação).

Os sistemas *laserscanning* (DALMOLIN e SANTOS, 2003; e ACKERMANN, 1997) proporcionam modelos de representação do terreno com

grandes amostras de pontos com coordenadas tridimensionais sobre uma superfície em um curto espaço de tempo. Estes sistemas têm a capacidade de penetrar na vegetação, possibilitando a determinação acurada da elevação do terreno (DALMOLIN e SANTOS, 2003). Entretanto, isto implicaria na utilização desse sistema durante o levantamento aerofotogramétrico, ou em vôo à parte, tornando os custos mais altos.

A altura de edificações também pode ser calculada através de medições manuais em modelos estereoscópicos, utilizando estações fotogramétricas digitais, calculando a diferença entre a altitude medida no topo e na base do edifício. Entretanto, no caso de uma grande quantidade de edificações, estas medições se tornam cansativas para o operador.

Neste contexto, um processo monoscópico que utilizasse apenas as fotografias aéreas do levantamento para a determinação das alturas das maiores edificações, se mostra como uma alternativa interessante e menos onerosa, embora com uma quantidade menor de feições representadas.

A metodologia proposta neste trabalho tem como etapa principal a seleção automática das arestas laterais dos edifícios presentes em fotografias aéreas, baseando-se para isso no fato destas arestas aparecem na fotografia como segmentos de reta radiais. O conhecimento da posição dos pontos extremos destas arestas, de forma a representar a base e topo do edifício, juntamente com os valores dos parâmetros de orientação e a altura de vôo, possibilita o cálculo da altura do edifício.

## 1.2 Justificativa

A determinação das alturas de edifícios em fotografias aéreas pode ser utilizada na modelagem da superfície em áreas urbanas, assim como na reconstrução tridimensional das edificações, podendo contribuir inclusive em outros processos como, por exemplo, na geração de ortoimagens (mais especificamente com a geração de “*true-orthophoto*”).

Também o conhecimento do valor da altura dos edifícios, representados em uma fotografia aérea, pode ser aplicado nas seguintes finalidades:

- Planejamento e cadastro urbano;
- Estudos para instalação de antenas de TV ou de celular;
- Definição de rotas aéreas para aeronaves nos grande centros urbanos.

Além disso, a identificação das arestas dos edifícios pode contribuir com o processo de correlação de imagens, uma vez que a determinação destas arestas em um modelo estereoscópico irá proporcionar a localização aproximada de pontos homólogos nas fotografias do referido modelo, de forma a restringir o espaço de busca no processo de correlação.

Desta maneira, se mostra pertinente a proposta de uma metodologia que possibilite a determinação da altura de edifícios, de modo monoscópico, através da extração automática das arestas laterais destes em imagens aéreas digitais, com a mínima intervenção do operador.

### **1.3 Objetivos**

Considerando-se o crescente uso das tecnologias digitais e computacionais, as quais estão substituindo os antigos processos fotogramétricos convencionais, e as possibilidades de aplicações relacionadas com o conhecimento do valor da altura dos edifícios presentes em imagens, têm-se como objetivos deste trabalho os seguintes pontos:

- Proposta e implementação de uma metodologia que possibilite a determinação automática da altura de edifícios representados em imagens aéreas digitais, de forma monoscópica, através de técnicas de PDI e conceitos de Fotogrametria;
- Aplicação da metodologia em dados reais;
- Realização de testes e análises qualitativas das alturas calculadas em comparação com alturas obtidas manualmente.

## **1.4 Estrutura do Trabalho**

O presente trabalho é estruturado em 6 seções. Na primeira seção é realizada uma exposição sobre o problema, assim como o objetivo e a justificativa para o trabalho. Na Seção 2 são abordados os conceitos e técnicas de PDI utilizados, enquanto que a Seção 3 abrange os conceitos e processos fotogramétricos estudados durante a execução do trabalho. Na Seção 4 é feita a exposição da metodologia para a determinação automática da altura de edifícios presentes em fotografias aéreas. Os experimentos realizados e as análises dos resultados alcançados são tratados na Seção 5. Finalmente na Seção 6 são feitas as conclusões e recomendações baseadas nos resultados dos experimentos.

## 2 ASPECTOS SOBRE PROCESSAMENTO DIGITAL DE IMAGEM

Nesta seção serão abordados os conceitos e técnicas de processamento digital de imagens utilizado na metodologia proposta.

### 2.1 Imagem Digital

Uma imagem digital é uma função  $f(x,y)$  discretizada tanto em coordenadas espaciais quanto em brilho. Uma imagem digital pode ser considerada como sendo uma matriz cujos índices de linhas e colunas identificam as coordenadas de um ponto na imagem, e o correspondente valor do elemento da matriz determina o nível de cinza naquele ponto. Os elementos dessa matriz são chamados *pixels*, abreviação de *picture elements* (GONZALEZ e WOODS, 2000).

Conforme pode ser visto na Figura 1, o sistema de coordenadas de uma imagem digital tem sua origem no canto superior esquerdo, sendo a contagem dos elementos da matriz realizada da esquerda para a direita e de cima para baixo.

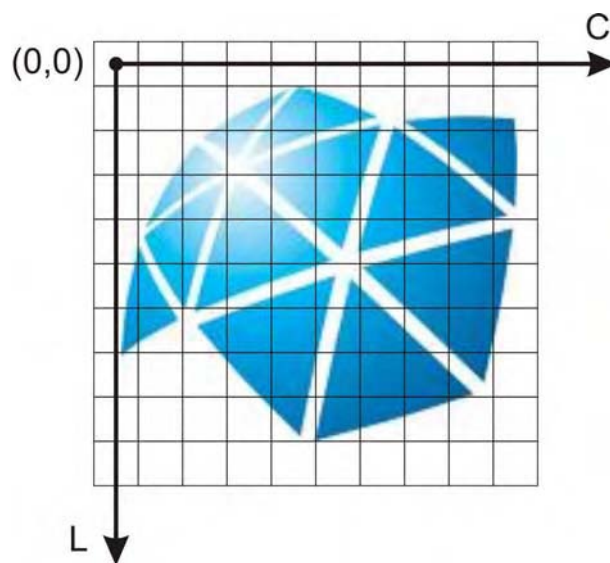


Figura 1 – Exemplo do sistema de coordenadas associado à imagem digital.

Cada elemento da matriz possui um atributo, o qual é um valor numérico que corresponde ao valor de brilho ou nível de cinza. A qualidade de uma imagem está relacionada com a sua resolução espacial e radiométrica (SONKA, et al., 1999).

Segundo Atkinson (1996), algumas das vantagens no uso de imagens digitais são:

- As imagens podem ser visualizadas e medidas em monitores de computadores, e deste modo não há a necessidade de equipamentos ópticos ou mecânicos;
- Sistemas de medidas são estáveis e não necessitam de calibração mecânica;
- Aplicação de técnicas para melhoramento do contraste das imagens;
- Possibilidade de automação de processos;
- As operações podem ser realizadas em tempo real ou quase real.

## 2.2 Modelo de Cores

O estudo das cores é importante para o projeto e desenvolvimento de sistemas de visão colorida (JAIN, 1989), sendo a cores uma propriedade de enorme importância para a percepção visual humana (SONKA et al., 1999).

De acordo com Gonzalez e Woods (2000), o propósito de um modelo de cores é facilitar a especificação das cores em alguma forma padrão e de aceitação geral. Essencialmente, um modelo de cor é uma especificação de um sistema de coordenadas tridimensionais e um subespaço dentro deste sistema, onde cada cor é representada por um único ponto.

Estes modelos são utilizados para classificar as cores e para qualificá-las de acordo com alguns atributos: tonalidade, saturação e luminosidade ou brilho. Os modelos de cores mais utilizados para o processamento de imagens digitais são: RGB (*red, green, blue* – vermelho, verde, azul) e o HSI (*hue, saturation, intensity* – matiz, saturação, intensidade).

Também podem ser citados o modelo CMY (*cyan, magenta, yellow* – ciano, magenta, amarelo), o qual é baseado nas cores secundárias, e o modelo YIQ

(também chamado de IYQ), este último utilizado nas transmissões de TV, dentre outros.

### 2.2.1 Modelo de Cores RGB

Segundo Gonzales e Woods (2000), no modelo RGB cada cor aparece nos seus componentes espectrais primários (vermelho, verde e azul), sendo que esse modelo baseia-se num sistema de coordenadas cartesianas. Este sistema é representado pelo cubo de cores RGB (Figura 2), onde, por conveniência, todos os valores foram normalizados no intervalo de 0 a 1.

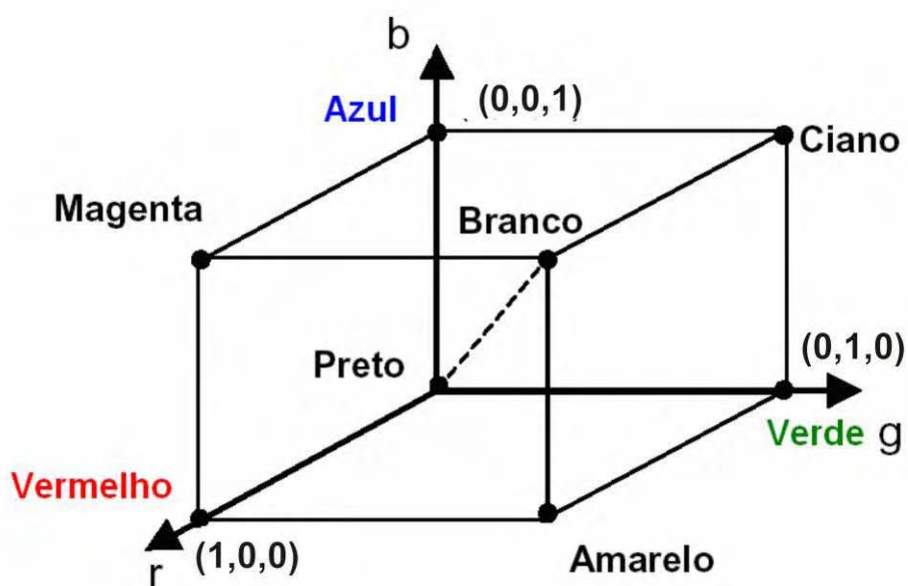


Figura 2 – Cubo de cores RGB.

Fonte: Adaptado de Gonzales e Woods (2000).

Como são mostrados na Figura 2, os valores das componentes RGB estão representados em três dos oito cantos do cubo, sendo que a partir da soma destes (sempre aos pares) é que se obtêm as cores magenta, ciano e amarelo, as quais estão localizadas em outros três cantos do cubo. Nos dois cantos restantes, formando a diagonal principal, tem-se o valores de cinza, cuja origem se faz na cor

preta (valores de RGB iguais a 0) passando gradativamente para a cor branca no outro extremo (valores iguais a 1).

Deste modo tem-se que imagens no modelo de cores RGB consistem em três planos de imagens independentes, um para cada cor primária (GONZALEZ e WOODS, 2000).

### **2.2.2 Modelo de Cores HSI**

No modelo HSI as cores de uma imagem são definidas através das componentes: matiz, saturação e intensidade ou brilho (SONKA et al., 1999).

De acordo com Gonzales e Woods (2000), matiz é um atributo que descreve uma cor pura (amarelo puro, laranja, ou vermelho), enquanto saturação dá uma medida do grau de diluição de uma cor pura por luz branca. Já a intensidade se caracteriza como a quantidade de luz refletida. Cor e saturação juntas são denominadas de cromaticidade.

Ainda segundo estes autores, o modelo de cor HSI possui duas características fundamentais que o torna uma ferramenta ideal para o desenvolvimento de algoritmos de processamento de imagens baseados em algumas das propriedades do sistema visual humano:

- O componente de intensidade é desacoplado da informação de cor na imagem;
- Os componentes de matiz e saturação são intimamente relacionados à percepção humana de cores.

A representação gráfica deste modelo de cores pode ser derivada do cubo de cores RGB (Figura 3), onde o cubo é transformado em um triângulo.

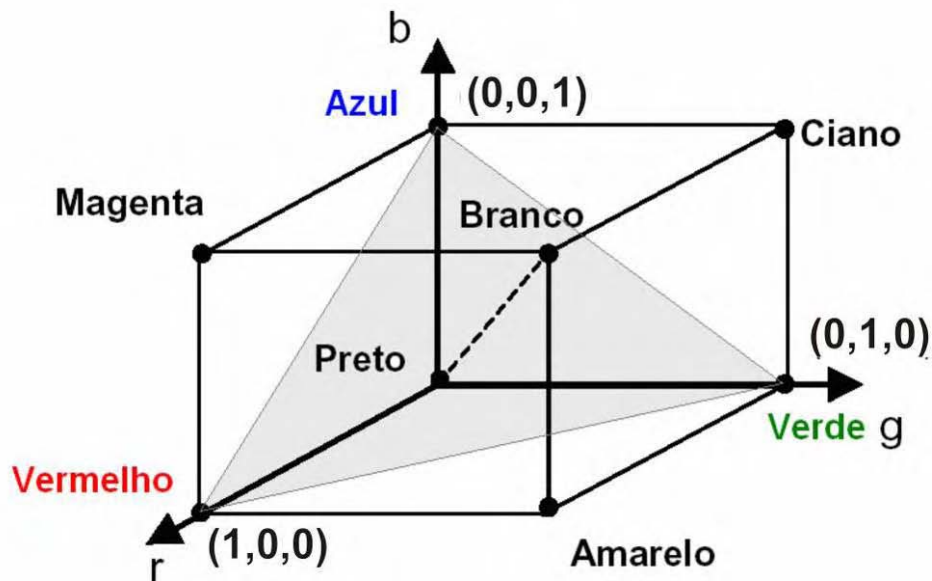


Figura 3 – Triângulo de cores HSI (em cinza) a partir do particionamento do cubo RGB.

Fonte: Adaptado de Gonzales e Woods (2000).

Pela Figura 4 nota-se que o matiz  $H$  do ponto  $P$  é o ângulo do vetor mostrado com respeito ao eixo vermelho; a saturação  $s$ , do ponto de cor  $P$  é o grau em que a cor não está diluída pelo branco e é proporcional à distância de  $P$  ao centro do triângulo (quanto mais perto  $P$  for do centro do triângulo, mais saturada será a cor); já a intensidade no modelo HSI é medida com respeito a uma linha perpendicular ao triângulo, passando através do seu centro, sendo que as intensidades ao longo dessa linha que ficam abaixo do triângulo tendem ao escuro até preto, e acima do triângulo tendem do claro ao branco (GONZALEZ e WOODS, 2000).

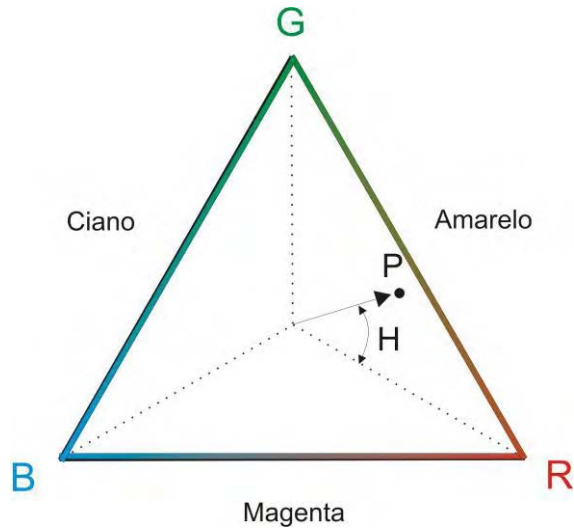


Figura 4 – Ponto P em relação ao triângulo de cores HSI.

Fonte: Adaptado de Gonzales e Woods (2000).

### 2.2.3 Conversão entre os Modelos RGB e HSI

A conversão do modelo de cores RGB para o modelo HSI pode ser encontrada em diversas literaturas sobre o tema (por exemplo: GONZALEZ & WOODS, 2000; SONKA et al., 1999; PRATT, 1991), sendo que há diversas maneiras de se proceder com esta operação.

Gonzalez e Woods (2000) descrevem o seguinte conjunto de equações para realizar a conversão do modelo RGB para o modelo HSI:

$$S = 1 - \frac{3}{(R + G + B)} [\min(R, G, B)] \quad (1)$$

$$I = \frac{1}{3} * (R + G + B) \quad (2)$$

$$H = \cos^{-1} \left\{ \frac{\frac{1}{2} * [(R - G) + (R - B)]}{\left[ (R - G)^2 + (R - B) * (G - B) \right]^{\frac{1}{2}}} \right\} \quad (3)$$

sendo  $H = 360^\circ - H$ , se  $\left(\frac{B}{I}\right) > \left(\frac{G}{I}\right)$ .

### 2.3 Extração de Regiões com Sombra em Imagens Digitais

Pode-se definir uma sombra como o resultado do bloqueio da luz incidente sobre um objeto, devido à existência de um segundo objeto entre estes. A intensidade de uma sombra irá depender da natureza do objeto que a está provocando e da fonte de luz sobre o mesmo. Na Figura 5 pode ser visto um exemplo de sombra, onde o edifício bloqueia a luz solar que incide sobre o solo, formando assim a sombra do edifício.



Figura 5 – Ocorrência de sombra provocada por edifício em uma imagem aérea.

No campo da Fotogrametria e do Sensoriamento Remoto, a presença de áreas com presença de sombra acarreta perda de informação de uma porção do terreno representado na imagem, sendo motivo de pesquisas (LI et al., 2004; MADHAVAN et al., 2004; SALVADOR, et al., 2004), visando a obtenção de metodologias eficientes para a determinação automática destas áreas.

Santos et al. (2006) propõem o uso de uma técnica baseada na aplicação de um filtro (Figura 6) para a detecção de sombras em imagens monocromáticas, tendo apresentado resultados positivos. Este filtro, denominado como SAD (*Shadow Automatic Detection*), prioriza os objetos que possuem baixo valor de cinza é mostrado na Figura 6.

	-1	-1	-1
1/8 *	-1	32	-1
	-1	-1	-1

Figura 6 – Representação do filtro SAD proposto por Santos et al. (2006).

Para que o filtro tenha maior influência sobre as respostas de menor valor de cinza os autores determinaram como valor central da máscara do filtro proposto um valor 4 vezes maior que a soma dos coeficientes que definem a máscara. Ou seja, o valor central da máscara do filtro proposto tem como objetivo extrapolar os valores que não correspondam a uma região de sombra (SANTOS et al., 2006).

Nos casos de imagens coloridas, Polidório et al. (2003) propõem uma metodologia baseada nas características radiométricas e atributos de cor das regiões de sombra. Segundo estes autores, as regiões afetadas por sombras realçam o efeito do espalhamento atmosférico de Rayleigh, no qual pequenas partículas em suspensão na atmosfera desviam, mais intensamente, ondas eletromagnéticas de pequeno comprimento, correspondente ao azul e violeta, saturando a região sombreada com essas cores (este é o fenômeno que causa a aparência azul do céu).

Com isto, as áreas sombreadas apresentarem pouco brilho e alta saturação em imagens digitais, e pode-se definir um índice para a detecção de sombras. Polidório et al. (2003) propõem o índice SDW (**ShADoW**), no qual é subtraído da componente I (intensidade) o valor da componente S (saturação).

As sombras são determinadas para os casos em que o valor de SDW for menor ou igual a um limiar (k) pré-estabelecido, conforme pode ser visto na Equação 4.

$$SDW = \begin{cases} 1, & \text{se } I - S \leq k \\ 0, & \text{caso contrário} \end{cases} \quad (4)$$

onde: SDW = 1 indica região de sombra e SDW = 0 indica região sem sombra.

O valor de k é dependente das características e da altitude do sensor utilizado para a obtenção das imagens analisadas. Como resultado final gera-se uma imagem binária com as áreas de sombra em branco e o restante em preto (POLIDÓRIO et al., 2003).

## 2.4 Extração de Feições em Imagens Digitais

O processo de extração de feições em imagens digitais constitui-se como uma tarefa de difícil solução, constituindo ainda um problema não totalmente resolvido e fonte de inúmeros trabalhos científicos.

Técnicas capazes de extrair feições de imagens digitais são de grande interesse para a Fotogrametria Digital, sendo de grande valia principalmente para a fase de restituição. Por exemplo, em um projeto fotogramétrico de uma área urbana, a grande maioria das feições de interesse serão linhas retas (faces de quadras, edificações, vias etc.).

O processo de extração de feições pode ser realizado de várias maneiras. Paine e Lodwick (1989) definem a seguinte seqüência de etapas:

- **Suavização:** tem como objetivo reduzir algumas variações exageradas, que produzem bordas falsas na imagem (nesta etapa a utilização de filtros capazes de suavizar a imagem, preservando as bordas verdadeiras, precisa ser investigada). Filtros comuns do tipo passa-baixa são de fácil implementação, porém, não atendem à necessidade de preservação de bordas, e alguma

variação se torna necessária. Exemplos: suavização pela média, pela mediana, etc;

- Detecção de Bordas: Consiste na aplicação de um detector de bordas, que normalmente é baseado na aplicação de operações de detecção de variações de brilho na imagem (normalmente uma diferenciação na região é a solução adotada). Exemplos: Operador de Sobel, Transformada de Hough, Operador de Prewitt, Operador de Laplace, Canny, Operador de Nevatia e Babu;
- Limiarização: Esta operação é normalmente utilizada para eliminar algumas das bordas detectadas, as quais apresentam uma baixa magnitude, objetivando simplificar o processamento posterior;
- Afinamento de bordas: Etapa em que as bordas com uma espessura de mais de um pixel precisam ser afinadas, para uma melhor definição de sua verdadeira localização, sendo que o resultado deve ser uma borda com a largura de um *pixel*.

As etapas listadas acima possuem uma extensa variedade de métodos que podem ser utilizados, o que torna difícil uma abordagem completa sobre todas as técnicas existentes. Além disso, mesmo a seqüência apresentada acima também é passível de modificações. Por exemplo, no caso do Operador de Canny (PARKER, 1996) as etapas de suavização, detecção e afinamento são consideradas como sendo uma única etapa (detecção). Em alguns casos podem, ainda, ser aplicadas técnicas para realizar o melhoramento do contraste da imagem.

Também podem ser citadas as técnicas para extração de intersecções de segmentos de retas em bordas (quinas), existindo na literatura diversos operadores utilizados para esta finalidade. Como exemplo pode-se citar os seguintes operadores: de Moravec (MORAVEC<sup>1</sup>, 1977 apud GALO, 2004), operador de Fostner (FÖSTNER<sup>2</sup>, 1986 e ROHR<sup>3</sup>, 1997 apud GALO, 2004), operador de SUSAN (SMITH e BRADY<sup>4</sup>, 1995 apud GALO, 2004), entre outros.

---

<sup>1</sup> MORAVEC, H. P. Towards Automatic Visual Obstacle Avoidance. In: Proc. **Of the 5<sup>th</sup> Int. Joint Conf. On Artificial Intelligence**. Cambridge, August, 1977.

<sup>2</sup> FÖSTNER, W. A feature based correspondence algorithm for image matching. In: **IAPRS – International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing**, v. XXVI (3/3), p. 150-160.

<sup>3</sup> ROHR, K. On 3D differential operators for detecting point landmarks. **Image and Vision Computintg**, v. 15, p. 219-233, 1997.

<sup>4</sup> SMITH, S. M.; BRADY, J. M. **SUSAN – A New Approach to Low Level Image Processing**. DRA – Defense Research Agency, Technical Report TR95SM1c, Hampshire UK, 1995.

### 2.4.1 Melhoramento do Contraste

O contraste se caracteriza pela mudança local de brilho e é definido como a razão entre o brilho médio de um objeto e o brilho do fundo. Segundo Gonzalez e Woods (2000), imagens de baixo contraste podem resultar de iluminação insuficiente, limitações de escala dinâmica no sensor de imageamento, ou mesmo do incorreto estabelecimento da abertura da lente durante a aquisição da imagem.

Com isto, técnicas objetivando o realce do contraste da imagem se fazem necessárias, de modo a adequar a imagem para determinada aplicação. Também pode apenas ter como objetivo melhorar a qualidade das imagens para a visualização pelo usuário.

Existem diversos métodos para realizar o melhoramento do contraste, dentre os quais podem ser citados: equalização do histograma, realce linear, realce local, entre outros.

#### 2.4.1.2 Equalização do Histograma

O histograma de uma imagem fornece a frequência dos valores de brilho dos *pixels*. Para Gonzalez e Woods (2000), a forma do histograma de uma imagem propicia informação importante sobre a possibilidade para realce do contraste. Na Figura 7 pode ser visto um exemplo de histograma.

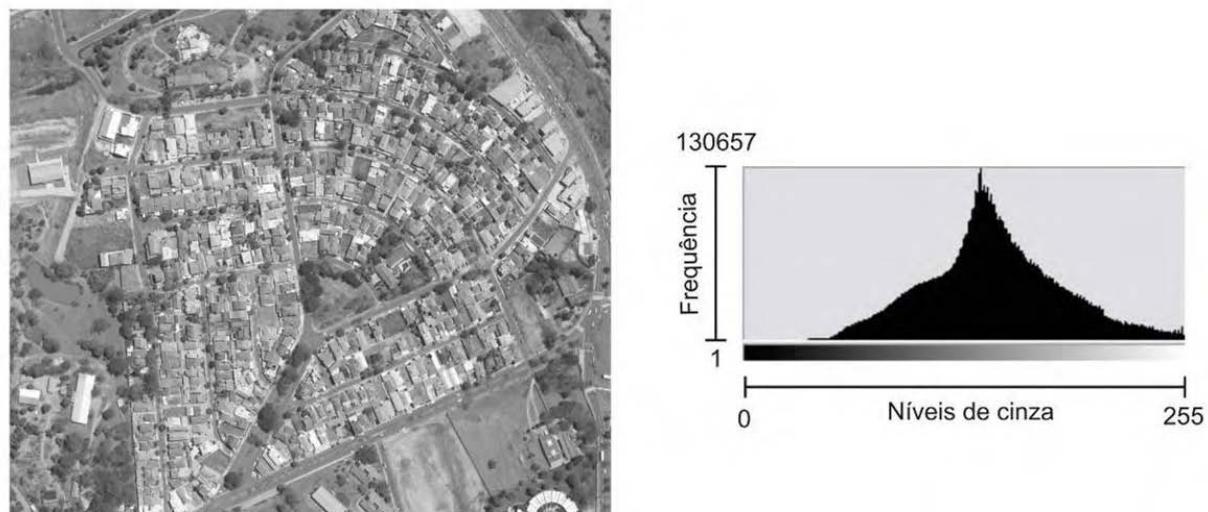


Figura 7 – Exemplo de histograma de uma imagem em tons de cinza.

O processo de equalização de histograma visa criar uma imagem com os níveis de cinza distribuídos uniformemente sobre a escala de brilho (SONKA *et al.*, 1999).

Normalmente é empregado para realçar diferenças de tonalidade na imagem, resultando em um aumento significativo no nível de detalhes perceptíveis. Na Figura 8 é apresentada a imagem aérea da Figura 7 após ser aplicado o processo de equalização do histograma com o seu respectivo histograma.

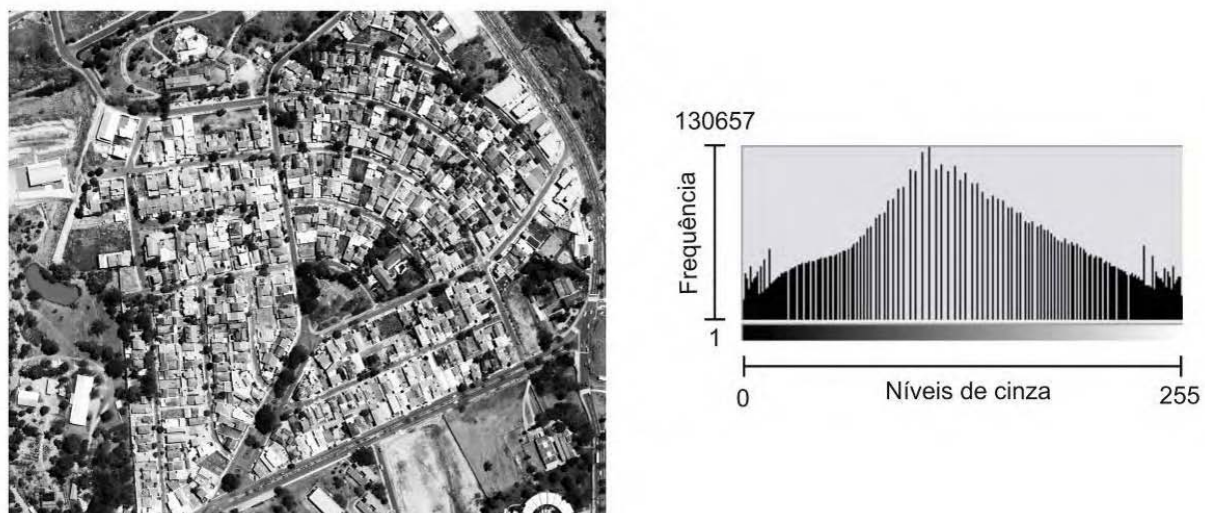


Figura 8 – Resultado do processo de equalização de histograma da imagem da Figura 7.

Esse processo aumenta a escala dinâmica dos níveis de cinza e, conseqüentemente, produz um aumento no contraste da imagem.

## 2.4.2 Suavização

Os filtros de suavização são usados para borramento e redução de ruído. O efeito de borramento é utilizado no pré-processamento para remoção de pequenos detalhes de uma imagem, antes da extração de objetos (grandes), e conexão de pequenas descontinuidades em linhas e curvas. A redução de ruídos pode ser conseguida pelo borramento com filtro linear, assim como por filtragem não-linear (GONZALEZ e WOODS, 2000).

Existem várias técnicas de filtragem para a suavização, dentre as quais podem ser citadas: filtro da média, filtro da mediana. Pelas características que possui, neste trabalho é de interesse a filtragem pela mediana, sendo esta resumidamente descrita a seguir.

### 2.4.2.1 Filtragem pela Mediana

Trata-se de um método de suavização não-linear, que reduz os ruídos presentes na imagem sem borrar a borda (SONKA et al., 1999).

Neste filtro, o nível de cinza de cada *pixel* é substituído pela mediana dos níveis de cinza na vizinhança daquele *pixel*. A mediana  $m$  de um conjunto de valores será tal que metade dos valores no conjunto será menor do que  $m$  e a outra metade maior (GONZALEZ e WOODS, 2000).

Na Figura 9 é ilustrado o principio do filtro, onde os tons de cinza dos *pixels* contidos na janela de busca são ordenados e o valor da mediana definido.

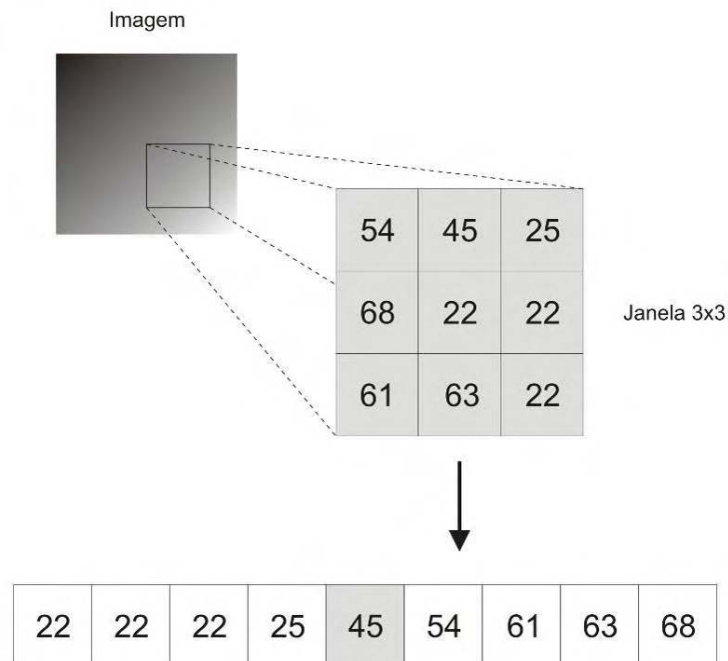


Figura 9 – Exemplo da aplicação do filtro da mediana.

Aplicando este filtro, pontos isolados na imagem assemelham-se ao nível de brilho dos seus *pixels* vizinhos.

### 2.4.3 Detectores de Borda

Para Jain (1989) a detecção de bordas é um problema de fundamental importância em análises de imagem. Uma borda é o limite entre duas regiões com propriedades relativamente distintas de nível de cinza (GONZALEZ e WOODS, 2000). Com isto, os detectores de borda se baseiam nestas mudanças do nível de nível de cinza do *pixel* em relação aos seus vizinhos.

A borda representando uma feição possui dois atributos, sua magnitude e sua direção, podendo ser descritos pelo gradiente do *pixel* nas direções  $x$  e  $y$  ( $G_x$ ,  $G_y$ ). Segundo Gonzalez e Woods (2000), o gradiente ( $\nabla f$ ) de uma imagem  $f(x,y)$  na posição  $(x,y)$  é expresso pela seguinte equação.

$$\nabla f = \begin{bmatrix} G_x \\ G_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial f}{\partial x} \\ \frac{\partial f}{\partial y} \end{bmatrix} \quad (5)$$

Com isto, pode-se calcular o valor da magnitude do gradiente através da Equação 6, enquanto que, por meio da Equação 7, determina-se a direção do gradiente, ou seja, a direção de máxima variação da intensidade.

$$\|\nabla f\| = \sqrt{G_x^2 + G_y^2} \quad (6)$$

$$\alpha(x, y) = \tan^{-1}\left(\frac{G_y}{G_x}\right) \quad (7)$$

Através da Figura 10 podem ser percebidas as grandezas geométricas calculadas nas Equações 6 e 7.

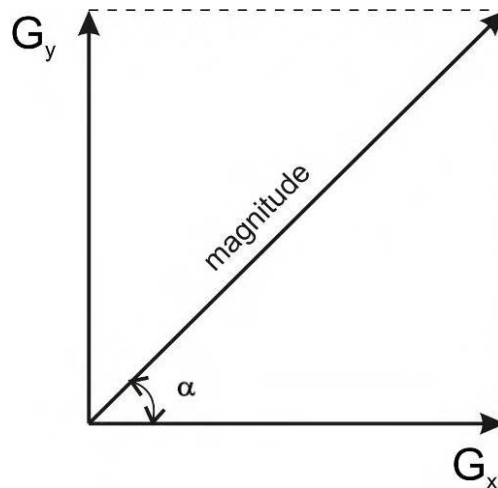


Figura 10 – Representação gráfica da magnitude e do ângulo de direções dos gradientes.

Neste trabalho, para realizar a detecção de bordas foram utilizados os operadores de Sobel e de Nevatia&Babu, os quais são descritos a seguir.

### 2.4.3.1 Operador de Sobel

Segundo Schenk (1999), o operador de Sobel tem uma boa performance para imagens com ruídos, pois realça linhas verticais e horizontais mais escuras que o fundo da imagem, sem realçar pontos isolados. Além disso, a direção dos vizinhos mais próximos tem um alto peso.

Os gradientes em x e y ( $G_x$  e  $G_y$ , respectivamente) são determinados a partir da convolução sobre a imagem, respectivamente das máscaras (a) e (b) visualizadas na Figura 11.

$$\begin{bmatrix} -1 & 0 & 1 \\ -2 & 0 & 2 \\ -1 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

(a)

$$\begin{bmatrix} -1 & -2 & -1 \\ 0 & 0 & 0 \\ 1 & 2 & 1 \end{bmatrix}$$

(b)

Figura 11 – Máscaras utilizadas no operador de Sobel.

Fonte: Gonzalez e Woods (2000).

### 2.4.3.2 Operador de Nevatia e Babu

O operador de Nevatia e Babu permite a detecção de bordas por meio de um conjunto de máscaras, construídas de forma a apresentar uma maior resposta para linhas com determinados ângulos de inclinação variando de 30° em 30°, iniciando com 0° e finalizando em 330°. A Figura 12 mostra o conjunto de 12 máscaras.

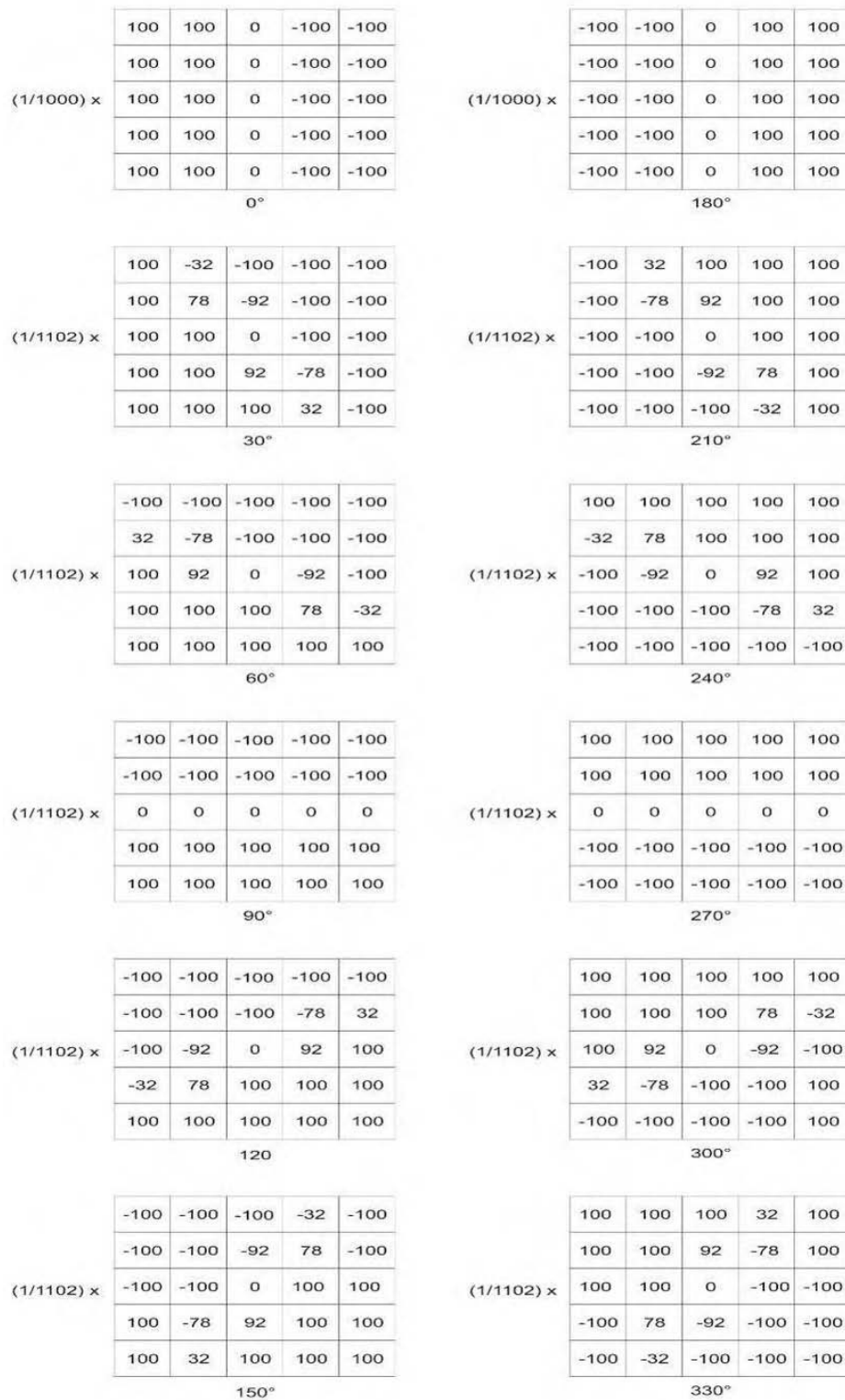


Figura 12 – Máscaras utilizadas pelo operador de Nevatia e Babu.

Fonte: Adaptado de Pratt (1991).

Como pode ser visto na Figura 12, as máscaras utilizadas para detectar bordas com direção  $\alpha$  e  $(\alpha + \pi)$  são similares, tendo como única diferença a troca dos sinais.

#### 2.4.4 Limiarização

Limiarização constitui-se como uma importante operação para a segmentação de imagens (GONZALEZ e WOODS, 2000).

Artero (1999) cita que um método eficiente de limiarização deve ser capaz de fornecer automaticamente um valor (limiar), para o qual todos os pixels com valor de brilho inferior a este limiar devam ser eliminados (magnitude igual a zero, e sem direção).

Uma imagem  $f(x,y)$  é transformada em uma imagem binarizada  $g(x,y)$  fazendo:

$$g(x,y) = \begin{cases} 1 & \text{se } f(x,y) > T \\ 0 & \text{se } f(x,y) < T \end{cases} \quad (8)$$

onde  $T$  é o valor do limiar.

A definição do limiar  $T$  é uma tarefa delicada e empírica, sendo dependente da qualidade e natureza da imagem, e da qualidade dos contrastes.

O processo de limiarização pode ser realizado através de técnicas globais e locais. As técnicas globais caracterizam-se pelo uso de um único limiar para toda a imagem, tendo como vantagem sua simplicidade de implementação e pouca necessidade de memória do sistema computacional utilizado. Já as técnicas locais fazem uso de um limiar para cada região da imagem, ou seja, o limiar muda continuamente através da imagem.

Existem diversos métodos de limiarização de imagens, tais como Otsu, Pun, Triângulo, T-Pile, Johannsen e Bille, entre outros. Neste trabalho foi utilizado o método de Otsu.

### 2.4.4.1 Método de Otsu

Este método se baseia na análise discriminante e o valor do limiar é obtido supondo que os pixels da imagem podem ser classificados em duas classes ( $C_1$  e  $C_2$ ), as quais são o objeto e o fundo (SAHOO<sup>5</sup>, 1988 apud ARTERO, 1999). Com isto, objetiva-se encontrar um limiar que minimiza a variância da intensidade dentro de cada classe, e que as maximiza entre as classes.

Considerando uma imagem como uma função bidimensional de tons de cinza, e contendo  $N$  *pixels* com níveis de cinza variando de 1 até  $L$ . A quantidade de *pixels* com  $i$  níveis de cinza é definida como  $f_i$ , sendo a sua probabilidade de ocorrência dada por (OTSU, 1979):

$$p_i = \frac{f_i}{N} \quad (9)$$

A classe  $C_1$  é aquela com níveis de cinza  $[1, \dots, t]$  e  $C_2$  aquela com níveis de cinza  $[t+1, \dots, L]$ . Neste caso a distribuição de probabilidade para as duas classes é:

$$C_1 : \frac{p_1}{\omega_1(t)}, \dots, \frac{p_t}{\omega_1(t)} \quad (10)$$

$$C_2 : \frac{p_{t+1}}{\omega_2(t)}, \frac{p_{t+2}}{\omega_2(t)}, \dots, \frac{p_L}{\omega_2(t)} \quad (11)$$

sendo os termos  $\omega_1(t)$  e  $\omega_2(t)$  dados por:

$$\omega_1(t) = \sum_{i=1}^t p_i \quad (12)$$

$$\omega_2(t) = \sum_{i=t+1}^L p_i \quad (13)$$

---

<sup>5</sup> SAHOO, P. K.; SOLTANI, S.; WONG, A. K. C., **An Survey of Thresholding Techniques**, Computer Vision, Graphics and Image Processing, n. 41, pp. 233 – 260, 1988.

As médias para as classes  $C_1$  e  $C_2$  são obtidas por:

$$\mu_1 = \sum_{i=1}^t \frac{i \cdot p_i}{\omega_1(t)} \quad (14)$$

$$\mu_2(t) = \sum_{i=t+1}^L \frac{i \cdot p_i}{\omega_2(t)} \quad (15)$$

Sendo  $\mu_T$  a intensidade média para toda a imagem, então:

$$\mu_T = \omega_1(t)\mu_1 + \omega_2(t)\mu_2 \quad (16)$$

e

$$\omega_1(t) + \omega_2(t) = 1 \quad (17)$$

Por meio da análise discriminante, Otsu (1979) define a variância entre as classes da imagem limiarizada como sendo:

$$\sigma_B^2 = \omega_1(t)(\mu_1 - \mu_T)^2 + \omega_2(t)(\mu_2 - \mu_T)^2 \quad (18)$$

Com isto, o limiar ótimo  $t^*$  é definido como sendo aquele cuja variância  $\sigma_B^2$  entre as classes  $C_1$  e  $C_2$  seja máxima:

$$t^* = \max\{\sigma_B^2(t), 1 \leq t \leq L\} \quad (19)$$

#### 2.4.5 Afinamento de Bordas

O processo de afinamento de borda se caracteriza pelo descarte dos *pixels* que formam uma borda espessa, preservando apenas os *pixels* necessários para definir a forma da borda (seu eixo médio).

Quando a imagem a ser processada não é binária, sendo composta por *pixels* com valor de brilho variado (diferenças de magnitude), e ainda se verifica que o valor do brilho é maior de acordo com a proximidade do mesmo em relação a borda, os métodos de afinamento não são adequados (ARTERO, 1999).

#### **2.4.5.1 Método da Supressão Não-Máxima**

Neste método a eliminação dos *pixels* é realizada perpendicularmente à direção da borda em 8 direções (vizinhança 8 do *pixel*). Esta discretização dos ângulos (a cada 45°) não provoca problemas nos resultados obtidos e o afinamento se desenvolve com uma comparação entre os *pixels*, de forma a manter apenas o de maior magnitude (ARTERO, 1999).

Para casos de bordas verticais o *pixel* é comparado com seus vizinhos horizontais, enquanto que para os casos de bordas horizontais a comparação é realizada com os vizinhos verticais.

#### **2.4.6 Crescimento de Regiões**

As técnicas de crescimento de regiões agrupam *pixels* ou sub-regiões em regiões maiores. Segundo a literatura especializada existem diversas técnicas para a conexão, como: conexão simples, conexão híbrida, *splint and merge*, técnicas combinadas, watershed (divisor de águas), etc.

Uma abordagem simples é a agregação de *pixels*, a qual começa com um conjunto de pontos sementes e, a partir deles, cresce as regiões anexando a cada ponto semente aqueles *pixels* que possuam propriedades similares, como nível de cinza, textura ou cor (GONZALEZ e WOODS, 2000). Como técnica de agrupamento de dados, na qual somente as regiões adjacentes espacialmente

podem ser agrupadas, esta técnica baseia-se na análise da vizinhança de um *pixel*, considerando 4 ou 8 vizinhos para cada *pixel*.

A escolha de um critério de similaridade depende não apenas do problema em questão, mas também das características das imagens analisadas, influenciando assim na seleção das propriedades requeridas para a inclusão de *pixels* na região. Por exemplo, na análise de imagens infravermelhas para aplicações militares, os alvos de interesses são geralmente mais quentes (aparecendo mais claros na imagem) que o fundo. Deste modo é estabelecido como critério de seleção os tons de cinza mais claros, enquanto que para análise de imageamento por satélite o critério de seleção depende da cor do objeto a ser detectado (GONZALEZ e WOODS, 2000).

Gonzalez e Woods (2000) citam que um problema adicional no crescimento de regiões é o estabelecimento de uma condição de parada, ou seja, para estabelecer um critério para finalizar o processo de crescimento. Para o caso de imagens binárias, a determinação dos critérios (tanto de similaridade como de parada) fica mais fácil.

De forma geral, podem ser considerados os seguintes aspectos para a determinação do critério de parada:

- Mudanças bruscas nos níveis de cinza;
- Linhas e bordas na imagem.

### 3 CONCEITOS DE FOTOGRAMETRIA

Nesta seção serão abordados alguns conceitos básicos de Fotogrametria, os quais proporcionam o embasamento teórico no qual se baseia a metodologia proposta nesta dissertação.

#### 3.1 Geometria de uma Fotografia Aérea

Nas seções subseqüentes serão apresentados aspectos relativos às fotografias verticais e inclinadas. Também serão descritas características dos sistemas de referência fiducial e fotogramétrico, assim como as correções referentes aos erros sistemáticos.

##### 3.1.1 Fotografias Verticais

Segundo Wolf e Prewitt (2000), uma fotografia obtida a partir de um avião e com uma câmara que possua o eixo óptico o mais próximo possível da vertical é denominada de *fotografia vertical*. Se o eixo óptico for exatamente vertical, é possível usar o termo *verdadeiramente vertical* para a fotografia resultante.

Uma fotografia aérea (analógica ou digital) possui projeção perspectiva central em que o ponto de vista é centro do conjunto óptico da câmara fotográfica (TAVARES e FAGUNDES, 1991). Considerando uma fotografia vertical, a projeção perspectiva e o relevo fazem com que as feições de edifícios apareçam deslocadas, possibilitando a observação de suas laterais. Este deslocamento não ocorre nas feições localizadas próximas do ponto.

Aumentando a distância entre o ponto principal e uma feição representada na imagem, esta última tende a apresentar-se com uma inclinação maior. O deslocamento também apresenta um comportamento proporcional em

relação a altura das feições na imagem, ou seja, quanto maior a altura dos objetos maior será o deslocamento na imagem. Já com o aumento da altura de vôo os efeitos do deslocamento são menores.

A Figura 13 mostra uma imagem aérea de uma região urbana, na qual se observa que não é possível visualizar os lados dos edifícios posicionados no centro da imagem (próximos ao ponto principal), enquanto que os edifícios próximos às bordas apresentam uma inclinação na direção radial que possibilita a visualização de suas laterais.



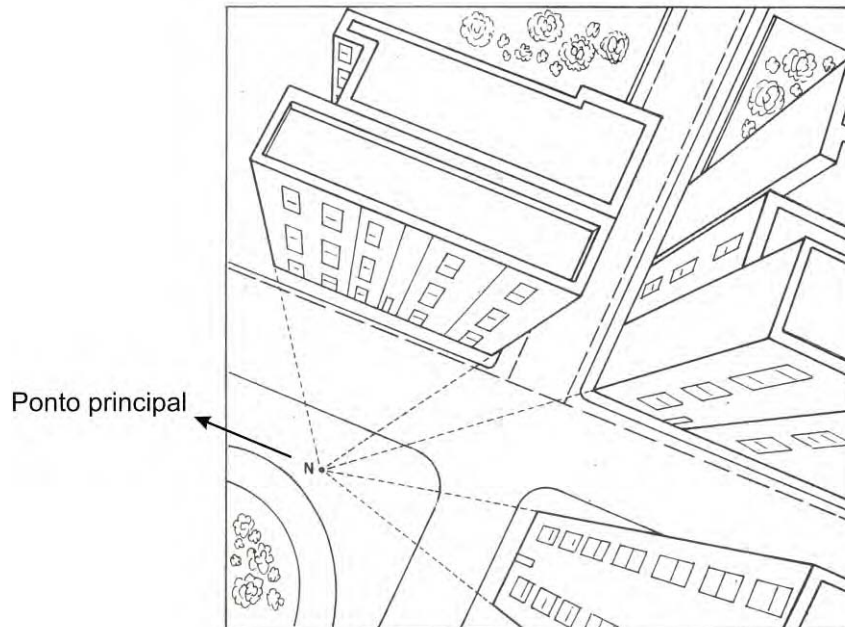
**Figura 13 – Efeito provocado pela projeção com perspectiva central numa imagem de uma área urbana.**

**Fonte: Wolf e Dewitt (2000).**

Esta inclinação das feições é acentuada conforme se aumenta a distância em relação ao ponto principal da imagem, ou seja, é diretamente proporcional à distância do mesmo ao centro da imagem. A altura do edifício também influi em sua própria inclinação, sendo mais acentuada para edifícios mais altos e menos acentuada para os edifícios baixos.

É importante notar que as linhas que definem as bordas dos edifícios são radiais e que, quando prolongadas, convergem para o ponto principal na

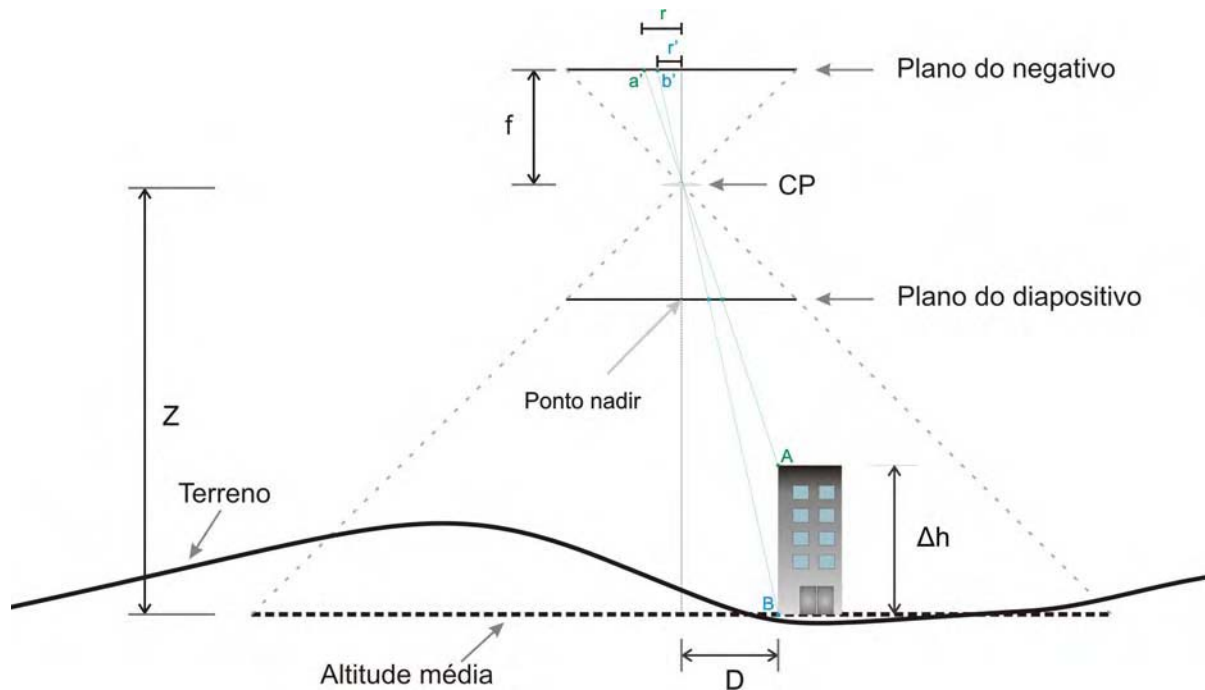
imagem (Figura 14). Estas situações envolvendo edifícios serão exploradas neste trabalho, objetivando extrair as arestas radiais dos mesmos.



**Figura 14 – Representação do comportamento radial das arestas laterais de edifícios em uma imagem aérea vertical.**

**Fonte: Adaptado de Tavares e Fagundes (1991).**

Sendo assim, uma vez determinados os tamanhos destes segmentos de retas torna-se possível o cálculo da altura dos edifícios, conforme o princípio mostrado na Figura 15.



**Figura 15 – Representação geométrica da tomada de uma fotografia aérea (vertical) de uma área com a presença de um edifício.**

Na Figura 15, os elementos correspondem a:

CP - centro perspectivo da câmara;

D - distância, no terreno, entre a projeção do ponto nadir e o edifício;

$\Delta h$  - altura do edifício;

Z - altura de vôo, em relação ao ponto B (base do edifício);

f - distância focal da câmara;

r - distância radial, na imagem, entre o ponto nadir e o topo do edifício;

r' - distância radial, na imagem, entre o ponto nadir e a base do edifício.

A Figura 15 ilustra a geometria formada pelo feixe de luz em relação a um edifício no momento da tomada de uma fotografia, onde os pontos A e B representam o topo e a base do edifício, respectivamente. A partir da geometria apresentada, considerando a fotografia aérea como vertical, e da semelhança de alguns triângulos, as seguintes equações podem ser escritas:

$$\frac{D}{Z} = \frac{r'}{f} \quad (20)$$

$$\frac{D}{Z - \Delta h} = \frac{r}{f} \quad (21)$$

Isolando  $\Delta h$  na Equação 21 e considerando o valor de  $D$  da Equação 20 obtém-se a altura do edifício:

$$\Delta h = \frac{Z}{r}(r - r') = \frac{Z}{r} dr \quad (22)$$

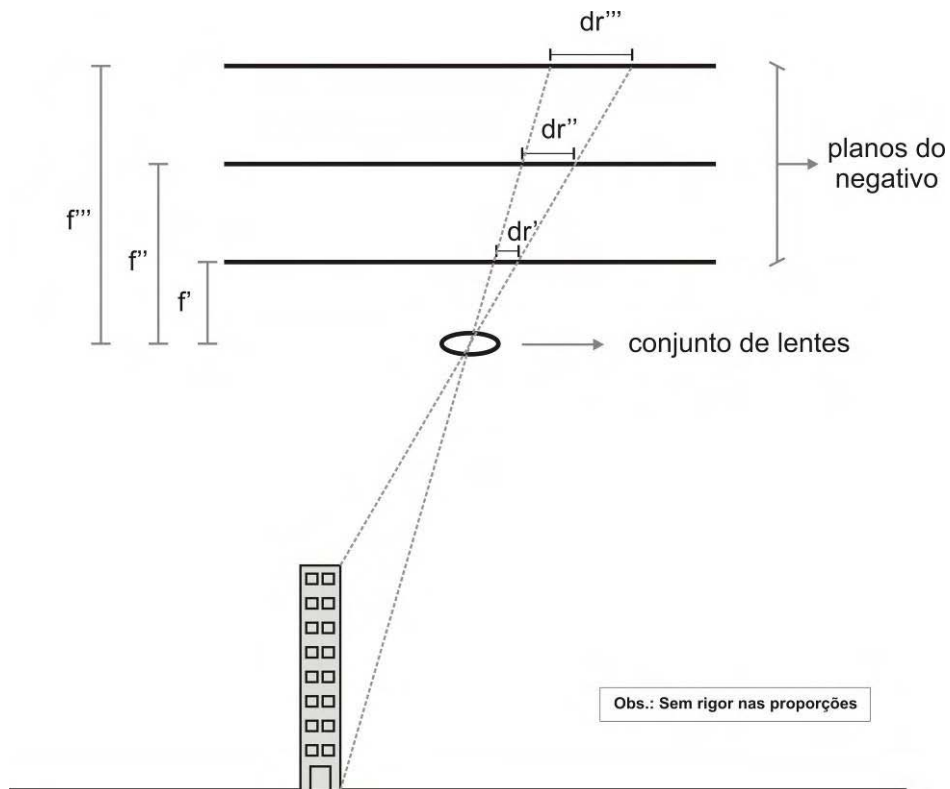
A partir da Equação 22 e com o valor da altura de vôo pode-se calcular a altura do edifício ( $\Delta h$ ). Deste modo, a determinação da altura (no espaço-objeto) de feições em uma imagem pode ser feita com informações simples: altura de vôo e medidas sobre a imagem ( $r$  e  $r'$ ). No trabalho realizado por Mikhail et al. (2001), assim como em Wolf e Dewitt (2000), também são demonstradas as expressões para a determinação da altura de edificações em fotografias verticais a partir do relacionamento geométrico visualizado na Figura 15.

Aplica-se a Equação 22 considerando-se a fotografia perfeitamente vertical. Em casos reais, possíveis inclinações nas fotografias aéreas podem ser corrigidas retificando-se a imagem ou retificando as coordenadas dos pontos coletados, sendo que neste trabalho utiliza-se a segunda opção.

Deste modo, as fontes de possíveis erros envolvidos no cálculo da Equação 22 estão relacionadas com os parâmetros de orientação das imagens analisadas (utilizados no processo de retificação), o valor da altitude média do terreno e a altura de vôo, assim como as medidas sobre a imagem para a obtenção das distâncias  $r$  e  $r'$ .

Outro fator que tem influência no deslocamento das feições presentes na imagem está relacionado com o valor da distância focal, pois quanto maior o seu valor, maior será o tamanho da aresta da lateral de um edifício, como também a área imageada para uma mesma altura de vôo. Já para câmaras com distância focal menor, como as lentes grande angular e super grande angular, as arestas terão tamanhos menores.

Na Figura 15 são mostrados os deslocamentos devido à altura de um edifício (permitindo a visualização da sua lateral) provocados por diferentes valores de distância focal de uma cena sem se alterar a altura de vôo.



**Figura 16 – Diferenças de tamanho na representação da aresta lateral de um edifício em relação a diferentes valores de distância focal.**

Conforme pode ser observado na Figura 15, os elementos  $d'$ ,  $d''$  e  $d'''$  representam os diferentes tamanhos da aresta lateral de um edifício na imagem em relação aos respectivos valores para a distância focal:  $f'$ ,  $f''$  e  $f'''$ . Também diferentes alturas de vôo, para uma mesma distância focal, acarretam em diferentes tamanhos de uma aresta representada em uma fotografia aérea, sendo o valor da altura de vôo inversamente proporcional ao tamanho da aresta de um edifício na imagem.

### 3.1.2 Fotografias Inclinadas

Apesar do uso de equipamentos para estabilizar o berço da câmara, na prática é impossível manter o eixo ótico da câmara exatamente na vertical (WOLF e DEWITT, 2000). Outro aspecto das fotografias inclinadas é que o seu ponto principal não coincide com o ponto nadir, sendo necessária a translação para corrigi-lo.

Seis parâmetros independentes chamados de elementos de orientação exterior expressam a posição espacial e os ângulos que definem a atitude da fotografia. A posição espacial é normalmente dada pelas coordenadas  $X_0$ ,  $Y_0$ ,  $Z_0$  do centro perspectivo da câmara, no sistema de coordenadas do terreno.

A orientação angular corresponde à direção da inclinação da fotografia, sendo três ângulos suficientes para definir a orientação:  $\omega$ ,  $\phi$ ,  $\kappa$ , respectivamente para os eixos X, Y, Z.

### 3.1.3 Sistema de Coordenadas Fiduciais

Em fotografias aéreas tomadas com câmaras métricas, as marcas fiduciais (que podem estar dispostas nas laterais e/ou nos cantos) proporcionam a materialização do sistema de coordenadas fiducial (Figura 17). A qualidade das medições realizadas neste sistema depende, dentre outros fatores, da correta execução da calibração da câmara, assim como do seu uso adequado.

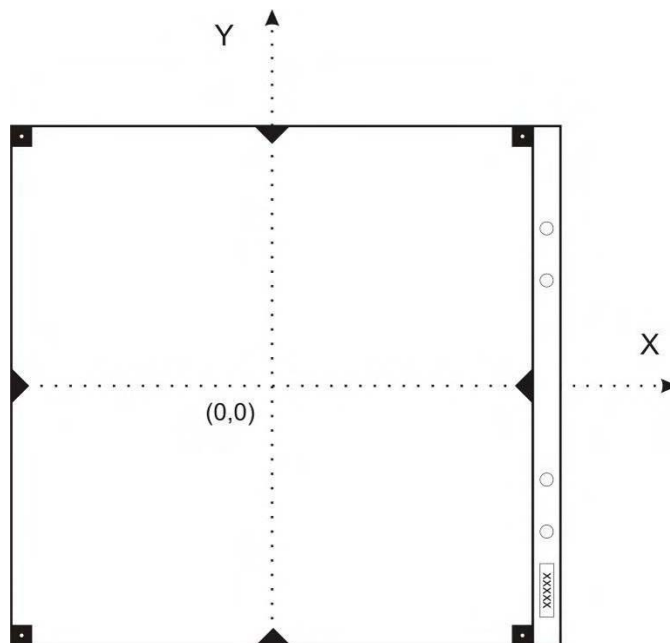


Figura 17 – Sistema de coordenadas fiducial.

Considerando o diapositivo, as características deste sistema são (ANDRADE, 1998 e LUGNANI, 1987):

- sistema de coordenadas 2D;
- origem definida pela intersecção das retas que ligam as marcas fiduciais opostas;
- eixo x coincide com a reta definida pelas marcas fiduciais e é paralelo à direção de vôo, e sendo positivo neste sentido;
- o eixo y é perpendicular ao eixo x de modo que deste último para y se tenha uma rotação anti-horária de 90°;
- o sistema situa-se no plano do diapositivo.

Vale lembrar, que a definição do eixo x do sistema fiducial apresentada acima é tradicional, sendo válida quando a câmara é colocada desta maneira no avião, o que não é obrigatório.

### **3.1.4 Sistema de Coordenadas Fotogramétricas**

É um sistema retangular cartesiano dextrogiro tridimensional com origem no centro perspectivo; os eixos Ox e Oy são paralelos aos seus homônimos no sistema fiducial e orientados da mesma forma; já o eixo Oz é perpendicular ao plano do negativo (ANDRADE, 1998). Na Figura 18 é representada a geometria do sistema de coordenadas fotogramétricas.

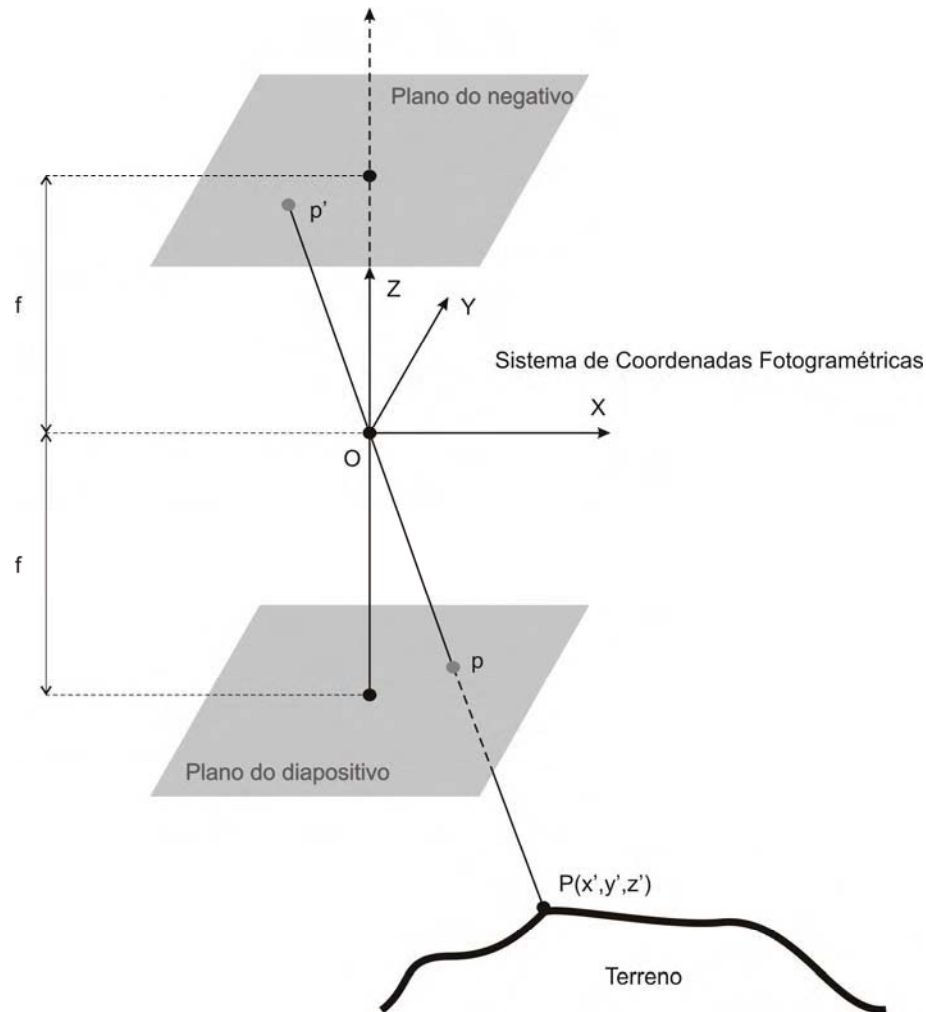


Figura 18 – Sistema de coordenadas fotogramétricas.

### 3.1.5 Correção dos Erros Sistemáticos

Segundo Wolf (1974), independente do instrumento utilizado para medir coordenadas de pontos na imagem, que contém erros sistemáticos provenientes de várias fontes. Estes erros sistemáticos são decorrentes de:

- Não coincidência da intersecção dos eixos fiduciais com a projeção do centro óptico da câmara sobre a imagem (ponto nadir ou ponto principal);
- Deformação do material fotográfico;
- Distorções das lentes;

- Distorções da curvatura terrestre.

Deste modo, correções devem ser aplicadas para eliminar os efeitos destes erros sistemáticos. Entretanto, Wolf (1974) cita que nem todas as correções precisam ser aplicadas para todos os problemas fotogramétricos, sendo que para os trabalhos que não necessitem de uma maior precisão podem ser ignorados.

Wolf (1974) cita que raramente o ponto nadir na fotografia ocorre precisamente na intersecção dos eixos fiduciais, sendo que equações fotogramétricas que utilizam coordenadas no sistema fotogramétrico se baseiam na geometria perspectiva e assumem a origem deste sistema no ponto nadir. Portanto, se faz necessária a correção para se reduzir as coordenadas referenciadas ao sistema fiducial para o sistema fotogramétrico. Por sua vez Machado et al. (2004) relatam a importância desta redução, visto que qualquer erro na correção desta implica em tratamento inadequado de todos os demais erros sistemáticos, os quais se referem ao ponto nadir.

Deste modo, a redução para o sistema fotogramétrico é realizada através da translação dos pontos no sistema fiducial para o sistema fotogramétrico, sendo necessário o conhecimento da posição do ponto principal  $(x_0, y_0)$  em relação ao sistema fiducial, através do certificado de calibração da câmara. A Equação 23 ilustra esta correção.

$$\begin{aligned}x' &= x - x_0 \\y' &= y - y_0\end{aligned}\tag{23}$$

onde:

$(x', y')$  – coordenadas do ponto no sistema fotogramétrico;

$(x, y)$  – coordenadas do ponto no sistema fiducial;

$(x_0, y_0)$  – coordenadas do ponto principal referenciado ao sistema fiducial.

Segundo Andrade (1998) a qualidade dos filmes aéreos, em relação à estabilidade métrica, aumentou consideravelmente. Entretanto, ainda se faz necessário corrigir o trabalho do filme nas coordenadas dos pontos observados.

As principais causas de trabalho dos filmes são (ANDRADE, 1998):

- Variações de temperatura;
- Variações na umidade relativa do ar;
- Tensões a que o filme é submetido (enrolar e desenrolar);
- Envelhecimento.

Existem diversos modelos matemáticos para representar a deformação do filme, sendo que em câmaras com quatro marcas fiduciais, a literatura especializada preconiza o uso da transformação afim geral. Deste modo, a através da Equação 24 é realizada correção da deformação do filme.

$$\begin{bmatrix} x_a' \\ y_a' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a & b \\ c & d \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_a \\ y_a \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \Delta x \\ \Delta y \end{bmatrix} \quad (24)$$

onde:

$(x_a, y_a)$  – coordenadas das marcas fiduciais observadas no sistema fotogramétrico;

$(x_a', y_a')$  – coordenadas corrigidas das marcas fiduciais referenciadas ao sistema fotogramétrico;

$a, b, c, d, \Delta x$  e  $\Delta y$  – parâmetros de transformação à determinar.

A transformação inversa da Equação 24 pode ser obtida através da Equação 25:

$$\begin{bmatrix} x_a \\ y_a \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a & b \\ c & d \end{bmatrix}^{-1} * \begin{bmatrix} x_a' - \Delta x \\ y_a' - \Delta y \end{bmatrix} \quad (25)$$

Segundo Ghosh (1988), todas as lentes possuem distorções mensuráveis e outros defeitos ópticos. As aberrações degradam a qualidade ou a nitidez da imagem, enquanto que as distorções das lentes causam deslocamento da

imagem, o qual é prejudicial para a realização de medições precisas na fotografia. Portanto é essencial que todas as lentes da câmara estejam calibradas, sendo que este processo determina todos os parâmetros de distorção.

Neste trabalho serão consideradas a distorção radial e a descentrada das lentes. Ghosh (1988) cita que a distorção radial é a distância radial entre um ponto e a sua localização ideal na imagem, enquanto que a distorção descentrada está relacionada com uma imperfeição na centragem das lentes e outros defeitos de fabricação na montagem do conjunto de lentes.

No caso da distorção radial, Andrade (1998) expõe que a mesma pode ser encarada como sendo a parcela não desejável da refração sofrida por um raio de luz ao atravessar uma lente, tendo origem na montagem das objetivas. Já a distorção descentrada ocorre devido à impossibilidade do fabricante em alinhar perfeitamente os eixos ópticos das lentes que compõem uma objetiva, de forma a resultar em deslocamentos da imagem.

Wolf e Dewitt (2000) comentam que os projetos de lentes em modernas câmaras fotogramétricas têm evoluído para um nível em que a distorção radial das lentes tenha a mesma ordem de magnitude da distorção descentrada, e os certificados de calibração tem sido adaptados para absorver estas mudanças.

Deste modo, conhecendo-se os parâmetros de calibração da câmara, após as transformações anteriores, a distorção radial simétrica e a distorção descentrada podem corrigidas através do seguinte modelo matemático:

$$\begin{bmatrix} x_c \\ y_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x' \\ y' \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \delta_{xr} \\ y_{yr} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \delta_{xd} \\ y_{yd} \end{bmatrix} \quad (26)$$

onde:

$(x_c, y_c)$  – coordenadas corrigidas do ponto no sistema fotogramétrico;

$\delta_{xr}$  e  $\delta_{yr}$  – componentes x e y da distorção radial;

$\delta_{xd}$  e  $\delta_{yd}$  – componentes x e y da distorção descentrada;

Os valores das componentes são definidos através das seguintes equações:

$$\begin{aligned}\delta_{xr} &= (k_1 * r^2 + k_2 * r^4 + k_3 * r^6) * x \\ \delta_{yr} &= (k_1 * r^2 + k_2 * r^4 + k_3 * r^6) * y\end{aligned}\tag{27}$$

$$\begin{aligned}\delta_{xd} &= P_1(r^2 + 2 * x^2) + 2 * P_2 * x * y \\ \delta_{yd} &= P_2(r^2 + 2 * y^2) + 2 * P_1 * x * y\end{aligned}\tag{28}$$

onde:

$r$  – é distância do ponto  $(x,y)$  em relação ao ponto principal.

$(k_1, k_2, k_3)$  – coeficientes do polinômio para o cálculo da distorção radial;

$(P_1, P_2)$  – coeficientes do polinômio para o cálculo da distorção descentrada.

Neste trabalho não serão considerados o efeito da curvatura terrestre devido à sua baixa influencia nas coordenadas. As seguintes referências bibliográficas podem ser consultadas para se obter detalhes sobre a correção do efeito da curvatura terrestre: Ghosh (1988), Wolf (1974), Wolf e Dewitt (2000), entre outros.

Para os casos onde são usadas câmaras digitais, o processo de correção dos erros sistemáticos é pouco alterado. Mais detalhes sobre a correção dos erros sistemáticos em câmaras digitais pode ser visto em Galo (1993) e Machado et al. (2004), etc.

### 3.2 Retificação de Fotografias

Retificação é o processo de geração de fotografias verticais equivalentes a partir de fotografias inclinadas, sendo estas fotografias verticais chamadas de fotografias retificadas. Teoricamente, fotografias retificadas são

fotografias verdadeiramente verticais, estando livres dos deslocamentos provocados pelas inclinações na imagem (WOLF e DEWITT, 2000). Desta forma, pode-se dizer que uma fotografia retificada consiste na eliminação dos efeitos das inclinações da câmara no momento da captura da cena.

As fotografias retificadas não estão livres dos deslocamentos devido ao relevo topográfico, causando variações de escala. A retificação pode ser realizada por qualquer um dos três métodos: analítico, óptico-mecânico e digital. Na Figura 19 é representada a geometria da retificação.

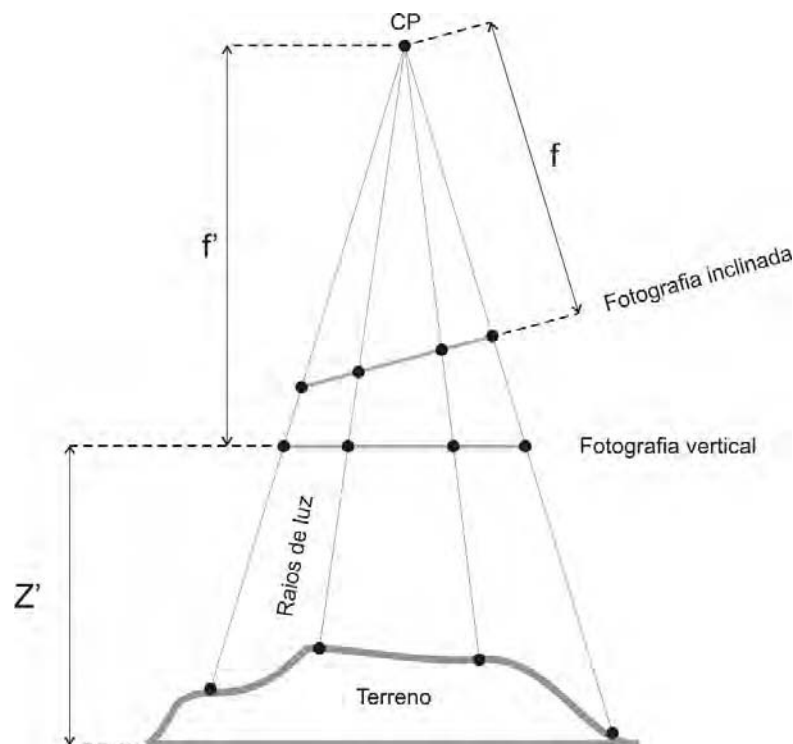


Figura 19 – Representação da geometria do processo de retificação.

Adaptado de Andrade (1998).

onde:

CP – centro perspectivo da câmara;

f – distância focal da fotografia inclinada;

f' – distância focal da fotografia vertical;

Z' – altitude do plano definido pela fotografia vertical.

O processo de retificar uma imagem faz uso das equações de colinearidade, de forma a relacionar as coordenadas fotogramétricas da imagem

original (inclinada) com as da imagem vertical. Estas equações são dadas por (LUGNANI, 1987):

$$x' = \frac{r_{11} * x + r_{12} * y - r_{13} * f}{r_{31} * x + r_{32} * y - r_{33} * f} \quad (29)$$

$$y' = \frac{r_{21} * x + r_{22} * y - r_{23} * f}{r_{31} * x + r_{32} * y - r_{33} * f} \quad (30)$$

onde:

(x, y) – coordenadas fotogramétricas da imagem original;

(x', y') – coordenadas fotogramétricas da imagem retificada;

f – distância focal;

f' – distância focal da imagem retificada;

r<sub>ij</sub> – elementos da matriz de rotação (em função dos ângulos κ, φ, ω).

A matriz de rotação equivale a cada ângulo e expressa a transformação necessária para rotacionar um sistema em relação a outro ângulo. Desta maneira, a matriz de rotação R é dada, segundo Mikhail et al. (2001), pela multiplicação das respectivas matrizes de rotação dos ângulos κ, φ, ω:

$$R_{\omega} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\omega & \text{sen}\omega \\ 0 & -\text{sen}\omega & \cos\omega \end{bmatrix} \quad (31)$$

$$R_{\phi} = \begin{bmatrix} \cos\phi & 0 & -\text{sen}\phi \\ 0 & 1 & 0 \\ \text{sen}\phi & 0 & \cos\phi \end{bmatrix} \quad (32)$$

$$R_{\kappa} = \begin{bmatrix} \cos\kappa & \text{sen}\kappa & 0 \\ -\text{sen}\kappa & \cos\kappa & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (33)$$

$$R = R_{\kappa} * R_{\phi} * R_{\omega} \quad (34)$$

Portanto, a matriz R é dada por:

$$R = \begin{bmatrix} \cos\phi \cos\kappa & \cos\omega \sin\kappa + \sin\omega \sin\phi \cos\kappa & \sin\omega \sin\kappa - \cos\omega \sin\phi \cos\kappa \\ -\cos\phi \sin\kappa & \cos\omega \cos\kappa - \sin\omega \sin\phi \sin\kappa & \sin\omega \cos\kappa + \cos\omega \sin\phi \sin\kappa \\ \sin\phi & -\sin\omega \cos\phi & \cos\omega \cos\phi \end{bmatrix} \quad (35)$$

Após aplicar as Equações 29 e 30 é necessário utilizar um processo de reamostragem, pois a posição de um *pixel* na imagem retificada dificilmente irá coincidir com o centro de um *pixel* na imagem original (Figura 20).

Diversos métodos de reamostragem podem ser utilizados, dentre os quais as técnicas mais utilizadas são (WIESEL<sup>6</sup>, 1991 apud ANDRADE, 1998):

- Vizinho mais próximo;
- Interpolação bilinear;
- *Splines* bicúbicas;
- Polinômio de Lagrange.

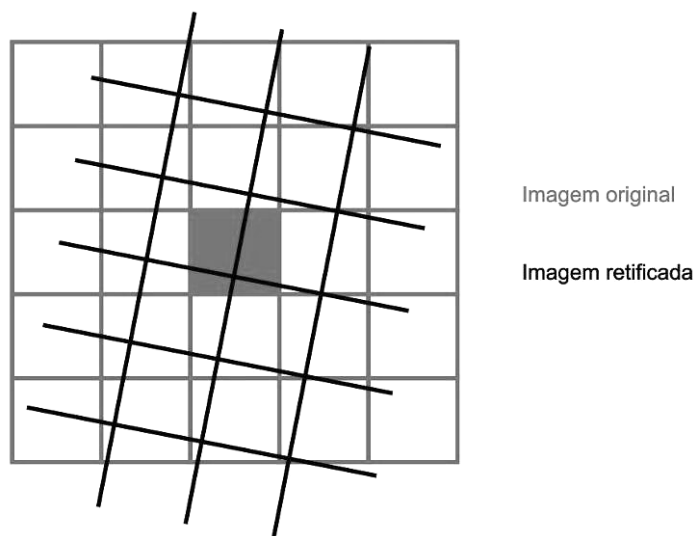


Figura 20 – Representação da não correspondência dos *pixels* da imagem retificada com a imagem original.

<sup>6</sup> WIESEL, J. **Procesamiento Digital de Imágenes – Aplicaciones em Fotogrametria y Teledetección**. Alemanha: GTZ - Deutsche Gesellschaft für Technische Zusammenarbeit GmbH. 1991. 428p.

### 3.3 Modelagem do Terreno

O conceito da criação de modelos digitais do terreno é relativamente recente, sendo a introdução do termo MDT atribuída à dois engenheiros americanos do Instituto de Tecnologia de Massachusetts (MIT), durante a década de 1950 (EL-SHEIMY, 1999). A definição proposta por estes dois engenheiros era a seguinte: “O DTM é simplesmente uma representação estatística da superfície contínua do solo dado por um grande número de pontos selecionados com coordenadas (X,Y,Z) conhecidas em um sistema de coordenadas arbitrário” (MILLER e LA FLAMME<sup>7</sup>, 1958 apud EL-SHEIMY, 1999).

Segundo Wolf e Dewitt (2000), os MDT's podem ser usados em diversas aplicações, tais como:

- Mapeamento topográfico;
- Visualização de dados espaciais;
- Produção de ortofotos;
- Integração em Sistemas de Informação Geográfica e análises com outros dados;
- Planejamento territorial;
- Gerenciamento de recursos naturais;
- Estudos geomorfológicos.

No âmbito da fotogrametria digital, muitas estações de trabalho oferecem soluções ditas inteiramente automáticas, mas normalmente se faz necessária a edição manual do MDT gerado pelo operador. Na Figura 21 pode ser visto uma ilustração representando um modelo do terreno.

---

<sup>7</sup> MILLER, C.; LAFLAMME, R. A. The digital terrain modeling - theory and applications. **Photogrammetric Engineering**, v.24, 1958. p. 433-442.

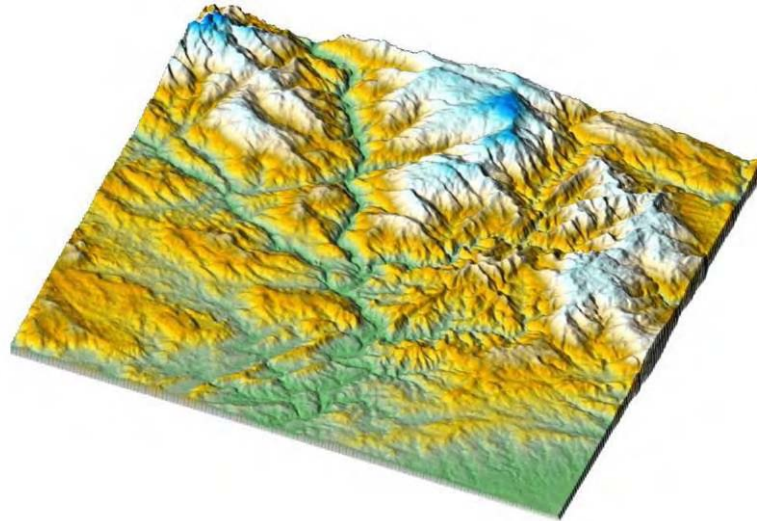


Figura 21 – Representação ilustrativa de um modelo do terreno.

Fonte: [www.fc.up.pt/lic\\_eg/](http://www.fc.up.pt/lic_eg/)

Existem várias denominações para modelos de representação de superfícies, sendo que neste trabalho, serão utilizadas as definições apresentadas em Tommaselli (2004):

- **MDT**: modelo que contém a representação topográfica do terreno, no qual é agregado *breaklines* e hidrografia;
- **MDS**: modelo digital de superfície, o qual incorpora vegetação e construções, além das feições topográficas;
- **MDE**: modelo digital de elevação, parecido com o MDT, mas sem *breaklines*. Estes tipos de modelos possuem uma utilização mais acentuada como modelos regionais ou nacionais.

A fidelidade da representação do modelo aumenta com a adoção de *breaklines*, pois as mesmas fornecem a informação sobre declives abruptos no relevo. Nos últimos anos, tem crescido o uso de dados altimétricos gerados com os chamados sistemas *laserscanner*, os quais podem gerar representações extremamente fiéis de superfícies e objetos.

Vários estudos têm sido realizados visando a geração automática dos modelos de representação do terreno, principalmente através de técnicas de correlação de imagens, visto que os sistemas comerciais disponíveis ainda não proporcionam resultados que possibilitem a dispensa da edição manual por parte do operador.

Os dados básicos para um MDT são baseados em observações das elevações do terreno, as quais são geralmente derivadas de uma destas três fontes (EL-SHEIMY, 1999):

- Digitalização de contornos (curvas de nível);
- Captura de dados fotogramétricos (incluindo fotografias aéreas e imagens de satélite);
- Levantamentos topográficos e geodésicos.

Também podem ser citadas outras fontes de dados, tais como:

- Levantamentos realizados com equipamentos do tipo *laserscanning*;
- Técnicas de radar (radares de abertura sintética interferométrico – SAR; RADARSAT).

### 3.4 Correspondência em Imagens Digitais

Uma tarefa comum em Fotogrametria está relacionada à medição de coordenadas de pontos homólogos nas áreas com sobreposição em duas ou mais imagens fotogramétricas, sendo executada em várias etapas do processo fotogramétrico digital (orientação de imagens, geração de MDT e extração automática de feições). Em Fotogrametria Digital, a identificação destes pontos pode ser executada automaticamente através de técnicas de correspondência de imagens.

As técnicas de correspondência de imagens digitais estão inseridas dentro de três categorias principais (WOLF e DEWITT, 2000; HEIPKE, 1996):

- Correspondência baseada em área: compara os tons de cinza de pequenas janelas de mesmo tamanho em cada imagem (em outras palavras, matrizes contendo tons de cinza) através do cálculo de um coeficiente de correlação, sendo que a similaridade é medida por correlação estatística. Esta técnica se caracteriza como a mais utilizada em Fotogrametria;
- Correspondência baseada em atributos: por meio da utilização de técnicas de inteligência artificial para a correspondência por meio da análise de

atributos de feições presentes na imagem, tais como posição, magnitude e orientação, comprimento de linhas, tamanho e nível de cinza médio de uma região, etc.;

- Métodos híbridos: envolvem algumas combinações dos dois primeiros.

### 3.4.1 Correlação de Imagens Digitais

Segundo Strauch (1991), a correlação de imagens com precisão ao nível de pixel examina áreas pré-estabelecidas no estereopar de imagens e aplica uma função de correlação ou critério de medida de similaridade aos valores numéricos das funções de nível de cinza.

O coeficiente de correlação é calculado através da seguinte expressão (WOLF e DEWITT, 2000):

$$\rho = \frac{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n [(A_{ij} - \bar{A}) * (B_{ij} - \bar{B})]}{\sqrt{\left[ \sum \sum (A_{ij} - \bar{A})^2 \right] * \left[ \sum \sum (B_{ij} - \bar{B})^2 \right]}} \quad (36)$$

onde:

$\rho$  – coeficiente de correlação;

A, B – matrizes contendo os tons de cinza das imagens da direita e da esquerda;

m, n – quantidade de linhas e colunas, respectivamente, das matrizes;

$A_{ij}$  – valor do nível de cinza na linha i e coluna j da matriz A;

$\bar{A}$  – média dos valores de nível de cinza da matriz A;

$B_{ij}$  – valor do nível de cinza na linha i e coluna j da matriz B;

$\bar{B}$  – média dos valores de nível de cinza da matriz B.

O valor do coeficiente de correlação pode variar no intervalo de -1 até 1, sendo que 1 indica uma correlação perfeita (correspondência exata), -1 indica

uma correlação negativa, e para valores próximos de 0 significa que não houve correlação entre as matrizes (valores iguais a 1 são extremamente difíceis). Para otimizar o processo de correlação de imagens se faz necessário a redução do espaço de busca, diminuindo, assim, o custo computacional. Dentre os meios para reduzir o espaço de busca pode-se citar o uso do princípio da geometria epipolar, no qual a busca é realizada somente sobre as linhas epipolares.

A Figura 22 mostra um ponto  $A$ , no espaço-objeto, e seus correspondentes pontos-imagens  $a_1$  e  $a_2$ , respectivamente na fotografia da esquerda e da direita. Estes pontos definem um plano, chamado de plano epipolar, sendo as duas linhas definidas pela intersecção deste plano com as fotografias denominadas de linhas epipolares conjugadas (MIKHAIL et al., 2001).

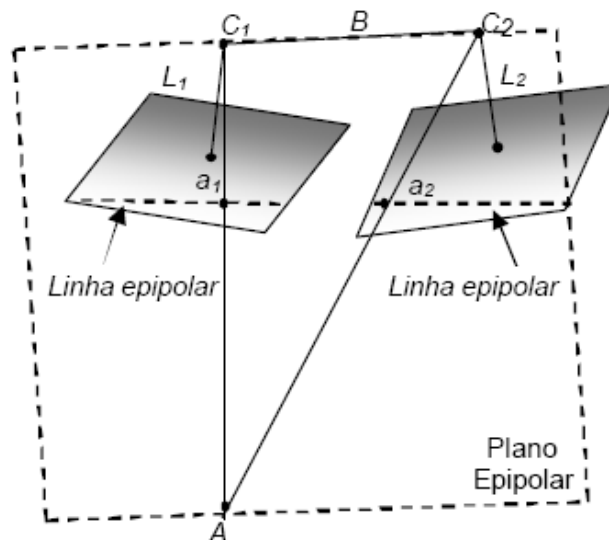


Figura 22 – Representação do plano epipolar e das linhas epipolares.

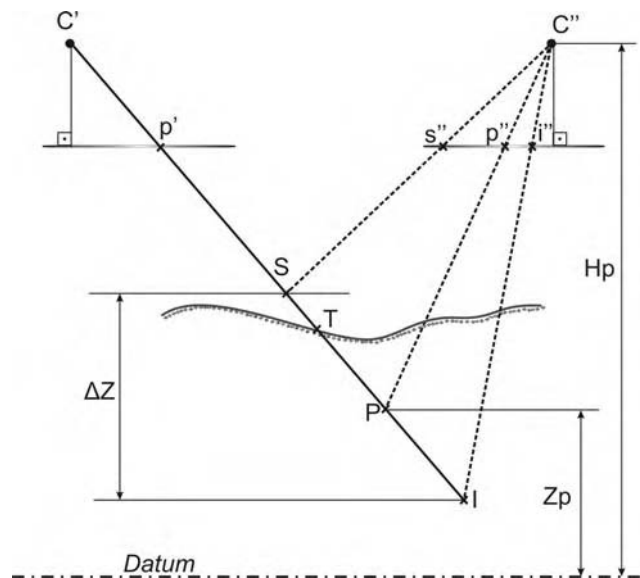
Fonte: Costa (2006), adaptado de Mikhail et al. (2001)

Conforme pode ser visto na Figura 22, para qualquer ponto localizado na área de sobreposição das fotografias, o seu homólogo na outra imagem deverá estar sobre a linha epipolar conjugada. Deste modo, uma vez conhecida a orientação relativa, as linhas epipolares conjugadas podem ser obtidas e o espaço de busca torna-se reduzido, deixando de ser bidimensional e passando a ser unidimensional (COSTA, 2006).

Normalmente as linhas epipolares não são paralelas ao eixo  $x$  do sistema de coordenadas fotogramétricas. Entretanto, sendo conhecidos os valores dos parâmetros de orientação exterior, pode-se aplicar o processo denominado de normalização de imagens ou reamostragem epipolar, o qual elimina a paralaxe

vertical e possibilita a adequada visualização estereoscópica do modelo. Mais detalhes sobre o processo de normalização podem ser vistos em Schenk (1999) e Mikhail et al. (2001).

Um modo para reduzir ainda mais o espaço de busca sobre as linhas epipolares conjugadas pode ser aplicado através da estimação do valor da altitude de um ponto  $P$  no terreno. Pela Figura 23 observa-se que o raio que passa por  $C'p'$  e  $P$ , onde  $P$  é um ponto no espaço objeto com uma altitude  $Z_P$  estimada (podendo ser o valor da altitude média da região ou os valores máximos e mínimos de pontos de apoio existentes), intercepta a superfície do terreno no ponto  $T$ .



**Figura 23 – Geometria da redução do espaço de busca com o uso das linhas epipolares e de informações altimétricas.**

**Fonte: Adaptado de Schenk (1999).**

Pelo fato de  $Z_P$  ter um valor estimado, uma incerteza  $\Delta Z$  deve ser calculada, sendo normalmente utilizados os conhecimentos prévios sobre a altimetria da área imageada, podendo, por exemplo, utilizar os valores máximos e mínimos dos pontos de apoio presentes na região para estimar  $\Delta Z$  (SCHENK, 1999). Com isto, se obtém os valores altimétricos para os pontos  $S$  e  $I$ , também localizados sobre o raio  $C'p'$ .

Deste modo, com os valores dos parâmetros de orientação da fotografia da esquerda e os valores estimados de  $Z_S$  e  $Z_I$  é possível projetar o ponto-imagem  $p'$  (sistema fotogramétrico) para o espaço-objeto, através das equações de

colinearidade inversas, obtendo os pontos S e I. As equações de colinearidade inversas são dadas por:

$$X = X_0^E + (Z - Z_0^E) * \frac{r_{11}^E * x + r_{21}^E * y - r_{31}^E * f}{r_{13}^E * x + r_{23}^E * y - r_{33}^E * f} \quad (37)$$

$$Y = Y_0^E + (Z - Z_0^E) * \frac{r_{12}^E * x + r_{22}^E * y - r_{32}^E * f}{r_{13}^E * x + r_{23}^E * y - r_{33}^E * f} \quad (38)$$

onde:

X,Y,Z – coordenadas do ponto no espaço-objeto;

x,y – coordenadas fotogramétricas do ponto na imagem da esquerda;

$X_0^E, Y_0^E, Z_0^E$  – coordenadas do centro perspectivo para imagem da esquerda no espaço-objeto;

f – distância focal da imagem original;

$r_{ij}^E$  – elementos da matriz de rotação (em função dos ângulos  $\kappa, \phi, \omega$ ) para a imagem da esquerda.

Na seqüência, são projetados na imagem da direita os pontos extremos do intervalo de incerteza altimétrica S e I, gerando, assim, uma região de busca entre os pontos s'' e i'' na linha epipolar conjugada, sendo esta projeção realizada através das equações de colinearidade diretas, utilizando os parâmetros de orientação exterior da imagem da direita. As equações de colinearidade diretas são dadas por:

$$x = -f * \frac{r_{11}^D * (X - X_0^D) + r_{12}^D * (Y - Y_0^D) + r_{13}^E * (Z - Z_0^D)}{r_{31}^E * (X - X_0^D) + r_{32}^E * (Y - Y_0^D) + r_{33}^E * (Z - Z_0^D)} \quad (39)$$

$$y = -f * \frac{r_{21}^D * (X - X_0^D) + r_{22}^D * (Y - Y_0^D) + r_{23}^E * (Z - Z_0^D)}{r_{31}^E * (X - X_0^D) + r_{32}^E * (Y - Y_0^D) + r_{33}^E * (Z - Z_0^D)} \quad (40)$$

onde  $X_0^D, Y_0^D, Z_0^D$  são coordenadas do centro perspectivo para imagem da direita no espaço-objeto.

Como se pode perceber, o tamanho do intervalo de busca na linha epipolar conjugada depende, entre outras coisas, de quão próximo o valor  $Z_P$  (que é estimado) se aproxima do valor real.

Neste contexto, a determinação automática das arestas de edifícios pode auxiliar no processo de correspondência, uma vez que proporciona uma estimativa dos pontos que definem a base e o topo destes edifícios. A localização dos pontos  $s''$  e  $i''$  é estimada diretamente na imagem, respectivamente topo e base do edifício, não sendo necessário transformar do espaço-objeto para o espaço-imagem, e deste modo diminuindo o espaço de busca sobre a linha epipolar.

## 4 METODOLOGIA PROPOSTA

Nesta seção são descritas cada uma das etapas que compõem a metodologia proposta, apresentando as técnicas utilizadas e os processamentos aplicados.

### 4.1 Definição Geral da Metodologia

A metodologia proposta baseia-se na identificação dos *pixels* que definem cada borda extraída, através do processo de crescimento de regiões, e com isto proceder com uma análise individual nas bordas extraídas para identificar aquelas que representam as arestas laterais de edifícios presentes na imagem. A partir destas arestas, são realizados os cálculos das alturas dos edifícios, tendo-se como pré-requisito o conhecimento dos parâmetros de orientação das imagens analisadas, uma vez que estas devem estar retificadas.

Para diminuir o espaço de busca utilizaram-se técnicas de extração de regiões com presença de sombras. Deste modo a extração das arestas radiais se dá somente no entorno das sombras detectadas, diminuindo consideravelmente o processamento na imagem. De uma maneira geral, a metodologia proposta é dividida em três fases de processamento, como mostra a Figura 24.



Figura 24 – Fases da metodologia proposta.

Para a implementação dos algoritmos foi utilizado o ambiente de programação do *software C++Builder 5.0* e algumas das funções disponíveis na biblioteca UPTK (*Unesp Photogrammetric Tool Kit*), mais especificamente as relativas ao processamento de imagens digitais, extração de feições e manipulação de vetores e matrizes (para maiores detalhes ver REISS e TOMMASELLI, 2005). Estas funções manipulam imagens nos formatos PPM (*Portable Pixel Map*) e PGM (*Portable Gray Map*).

O formato PPM representa uma matriz de pontos em um arquivo, usando o formato RGB, onde cada ponto colorido é apresentado por três *bytes* seguidos, representando a intensidade das cores vermelha, verde e azul. Já o formato PGM é muito parecido com o formato PPM. Neste formato podemos representar figuras monocromáticas, com intensidade nos pixels. Isto é, todos os *pixels* têm apenas uma cor, mas podem ter intensidade que pode ir de 0 a 255.

## 4.2 Delimitação do Espaço de Busca

Para a redução do espaço de busca, este trabalho baseou-se na identificação das sombras dos edifícios, definindo assim uma região de interesse (sub-imagem). A escolha pela identificação das sombras se justifica pelo fato das

áreas com presença de sombras apresentarem características, que possibilitam a sua identificação.

Os procedimentos realizados para a geração das sub-imagens se iniciam com a extração de todas as regiões de sombras presentes na fotografia aérea. Em seguida foi aplicado o crescimento de regiões sobre estas áreas de forma a identificá-las individualmente. As regiões com áreas (no espaço-objeto) fora do intervalo definido pelos limiares superior e inferior estabelecidos são descartadas. Para as regiões restantes são definidos seus respectivos retângulos envolventes, e são geradas as sub-imagens contendo os edifícios.

Na Figura 25 é apresentado o fluxograma das etapas abordadas nesta fase da metodologia proposta.

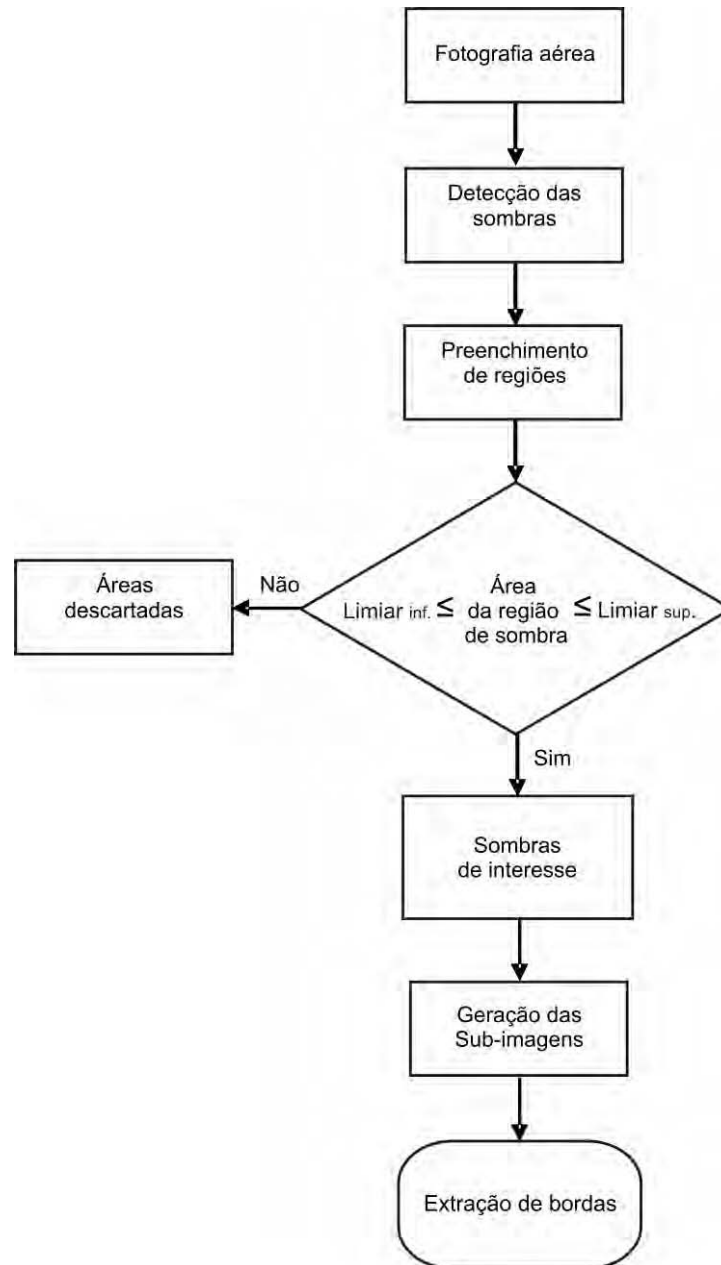


Figura 25 – Fluxograma das etapas para a geração das sub-imagens.

#### 4.2.1 Extração das Regiões de Sombra

Como primeira etapa para a localização dos edifícios presentes em uma fotografia aérea, procedeu-se com a implementação de algoritmos para a extração de regiões com presença de sombras em imagens digitais. Para tanto,

neste trabalho foram analisados os resultados das propostas apresentadas por Polidório et al. (2003) e Santos et al. (2006), já citadas na seção 2.3.

Polidório et al. (2003) utiliza as componentes saturação e intensidade (brilho) do modelo de cor HSI. Para obter estas componentes, foi utilizada uma função para esta finalidade disponível na biblioteca UPTK, onde o dado de entrada é uma imagem colorida (RGB) enquanto que os dados de saída são imagens das componentes HSI. A partir daí é calculado o índice SDW, para cada *pixel*, confrontando com um limiar pré-estabelecido, e com isto são determinadas as regiões com sombra. O índice SDW é calculado através da Equação 4.

Já Santos et al. (2006) propõe um filtro para a detecção de sombras (filtro SAD). Este filtro prioriza os *pixels* com baixo valor de tom de cinza, por meio do processo de convolução da imagem original com o filtro proposto. Nos casos em que o valor de cinza do *pixel* da imagem original, multiplicado pelo valor central do filtro proposto é maior que 255 (para imagens de 8 bits), o *pixel* é eliminado do processamento, caso contrario é denominado como sombra.

Numa comparação, o índice SDW tem como vantagem o fato de se basear nas características das respostas radiométricas das regiões com presença de sombras, ao contrário do filtro SAD, o qual realiza a detecção de regiões com baixos valores de tons de cinza em imagens digitais. Deste modo, utilizando este filtro pode ocorrer a seleção de regiões escuras (baixos valores de tons de cinza) e que não correspondem à sombras, como por exemplo superfícies com cobertura asfáltica ou edificações com tonalidades escuras.

Na seção 5.2.1 serão mostrados os resultados de experimentos utilizando o índice SDW e o filtro SAD.

#### **4.2.2 Crescimento de Regiões nas Áreas com Presença de Sombras**

A partir das sombras detectadas, foi utilizada a função *<RegionGrowing>*, da biblioteca UPTK, a qual possibilita o crescimento de regiões em imagens binárias. Esta função possui algumas características que facilitam as análises realizadas, como a identificação dos pontos que delimitam o retângulo

envolvente da região. Outras informações que são disponibilizadas pela função são: rótulo da região, quantidade de *pixels*, valor máximo, valor mínimo, posição do centro de massa, etc. Mais detalhes sobre esta função podem ser vistos em Reiss e Tommaselli (2005).

Esta etapa é importante, pois possibilita a análise individual de cada região de sombra, permitindo a seleção das bordas de interesse, conforme será visto na próxima seção.

#### 4.2.3 Seleção das Sombras de Interesse

Com todas as sombras identificadas, procedeu-se a eliminação daquelas que apresentam pouca quantidade de *pixels* por não estarem relacionadas com edifícios, mas as de outros objetos como árvores, pequenas edificações, etc. Do mesmo modo, áreas muito grandes identificadas como sombra também são descartadas, pois podem indicar a presença de sombras de áreas de vegetação arbórea.

Deste modo, depois de realizados vários testes e análises, foram determinados os limiares de seleção superior e um inferior (Figura 26), para o tamanho das sombras determinadas.



Figura 26 – Esquema da seleção das regiões representando sombras.

Para a definição destes limiares, foi proposto o uso da área (em metros quadrados) formada pelas sombras, através do cálculo da área projetada por cada *pixel* sobre o terreno (*GSD – Ground Sample Distance*), o qual pode ser calculado através dos valores da escala da fotografia e do tamanho do *pixel*.

Após vários testes empíricos, ficou definido que seriam selecionadas as sombras com área entre 100 m<sup>2</sup> e 600 m<sup>2</sup> (limiar inferior e superior,

respectivamente). Com isto, para cada fotografia verificou-se se as sombras extraídas possuíam uma quantidade de *pixels* dentro do intervalo definido pelos limiares.

Para remover as sombras com áreas fora do intervalo definido foi utilizada a função *<CleaningLabels>*, da biblioteca UPTK, a qual descarta as regiões que contém uma quantidade de *pixels* que corresponda a um valor.

#### 4.2.4 Definição das Áreas de Busca

Para facilitar a identificação dos edifícios foram geradas sub-imagens, definidas a partir das áreas de sombras selecionadas na etapa anterior. Ao retângulo envolvente das sombras foi acrescentada uma expansão de 200% em relação aos valores da altura e largura (Figura 27). Com isso cada sub-imagem gerada é 900% maior que o retângulo definido pela sombra, de forma a garantir a presença do edifício que ocasionou esta sombra na sub-imagem.

Estes valores foram definidos após testes empíricos. Porcentagens menores de aumento também foram utilizadas, mas acabavam excluindo partes dos edifícios.

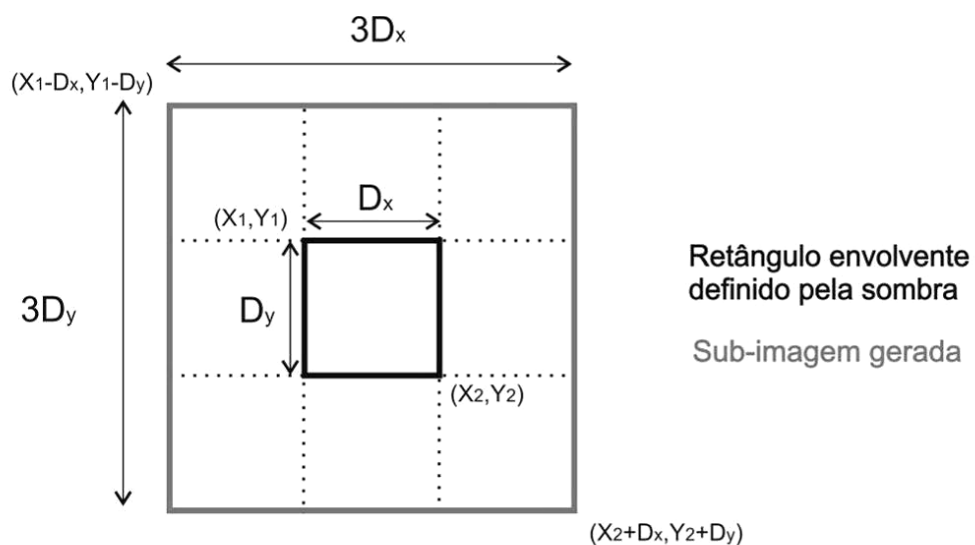


Figura 27 – Esquema de geração das sub-imagens.

onde:

$(X_1, Y_1)$  – coordenadas do canto superior esquerdo do retângulo envolvente;

$(X_2, Y_2)$  – coordenadas do canto inferior direito do retângulo envolvente;

$(X_1-D_x, Y_1-D_y)$  – coordenadas do canto superior esquerdo da sub-imagem;

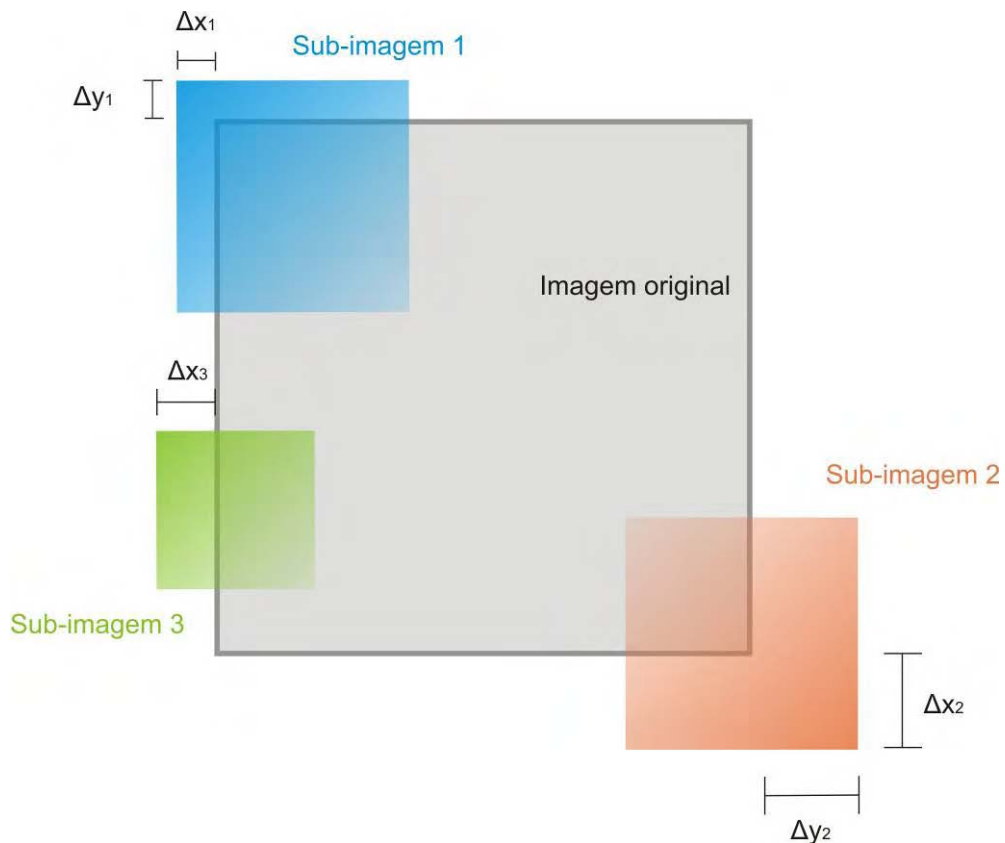
$(X_2+D_x, Y_2+D_y)$  – coordenadas do canto inferior direito da sub-imagem;

$D_x$  e  $D_y$  – dimensões do retângulo envolvente;

$3D_x$  e  $3D_y$  – dimensões da sub-imagem.

Como são geradas várias sub-imagens, as mesmas são armazenadas em arquivo e identificadas pelos números dos rótulos das regiões, acrescidos da quantidade de *pixels* das mesmas. Também foram armazenados em arquivo uma lista com a identificação de todas as sub-imagens geradas, assim como os valores das coordenadas dos pontos que definem o canto superior esquerdo e o canto inferior direito, referenciados ao sistema da imagem original para que haja correspondência com o referencial desta imagem.

Problemas podem ocorrer quando as sombras selecionadas se encontram perto das bordas da imagem, pois nestes casos a definição da sub-imagem pode exceder os limites da imagem aérea analisada, conforme ilustra a Figura 28.



**Figura 28 – Exemplo de três casos onde as sub-imagens ultrapassam os limites da imagem original.**

Como pode ser visto na Figura 28, a sub-imagem 1 ultrapassa os limites da imagem original em  $\Delta x_1$  e  $\Delta y_1$  nos eixos x e y, respectivamente; na sub-imagem 2, em  $\Delta x_2$  e  $\Delta y_2$ ; para a sub-imagem 3, apenas no eixo x excede a dimensão da imagem em  $\Delta x_3$ . Nestes casos, se faz necessário adequar as sub-imagens com as extremidades da imagem original, redefinindo os pontos extremos destas sub-imagens. Na Figura 29 é ilustrada esta adequação para os casos apresentados na Figura 28.

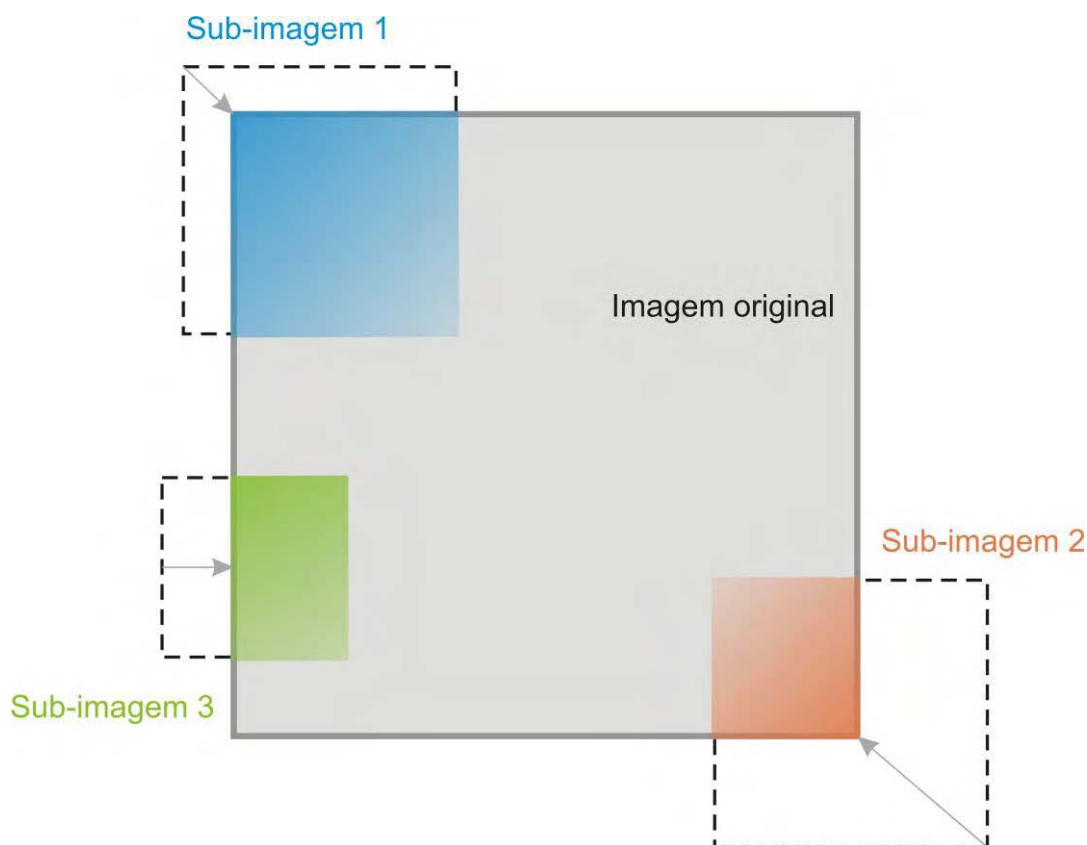


Figura 29 – Sub-imagens redefinidas para não exceder os limites da imagem original.

#### 4.2.5 Extração Geral de Bordas das Sub-Imagens

Antes de realizar a extração das retas radiais, foram aplicados alguns processamentos sobre cada sub-imagem gerada, para manter somente as bordas das feições de interesse. Para estes processamentos foram utilizadas as seguintes funções disponíveis na biblioteca UPTK (REISS e TOMMASELLI, 2005):

- Image.ReType(tiGray): transforma a imagem de entrada, que pode ser colorida, em uma imagem em tons de cinza;
- EqualizeHitogramImage: função que realiza a equalização do histograma em uma imagem;
- MedianFilter: aplica na imagem o filtro de suavização pela mediana;
- NevatiaBabu: aplica o operador de Nevatia e Babu;
- ThresholdFilter: realiza a limiarização da imagem;

- SuppressionNoMaxim: função que executa o processo de afinamento pelo método de supressão não-máxima.

A Figura 30 apresenta um fluxograma dos processamentos realizados para detectar as bordas das feições de interesse.

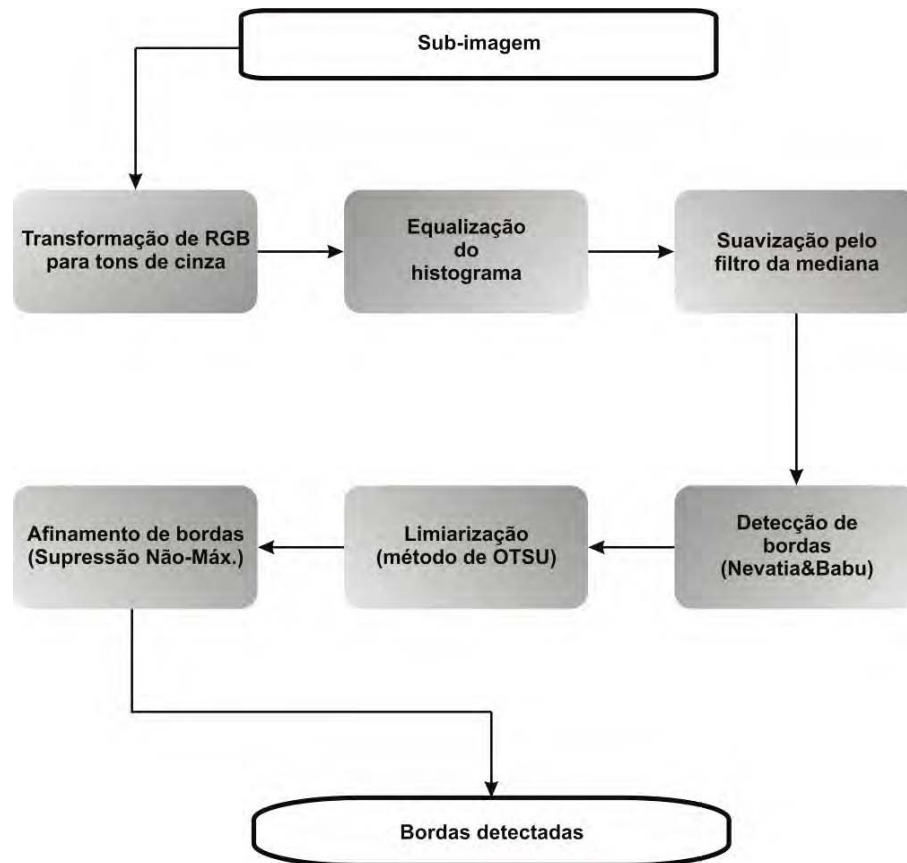


Figura 30 – Seqüência dos processamentos realizados nas sub-imagens para a extração das bordas.

Deste modo, no final desta seqüência de processamentos são geradas as imagens contendo as bordas para cada sub-imagem analisada. A partir destas imagens de bordas extraídas são realizadas análises objetivando a seleção das arestas laterais dos edifícios, conforme é visto na próxima seção.

### 4.3 Seleção das Bordas das Feições de Interesse

Nesta seção são descritos os procedimentos para a extração das bordas (ou parte destas) que representam as arestas laterais dos edifícios presentes nas sub-imagens, através da análise das sub-imagens de bordas geradas no procedimento mostrado na Figura 30.

Através da Figura 31 tem-se uma visão geral das etapas contidas nesta fase, as quais são descritas nesta seção.

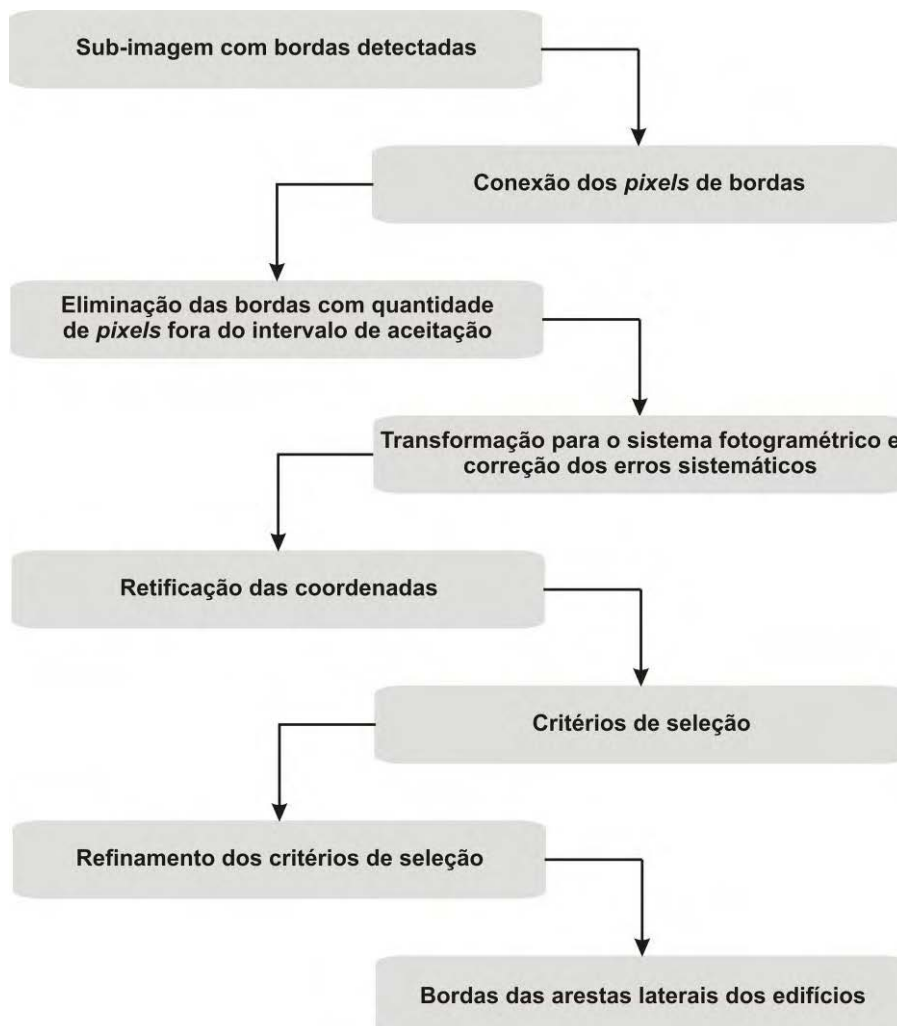
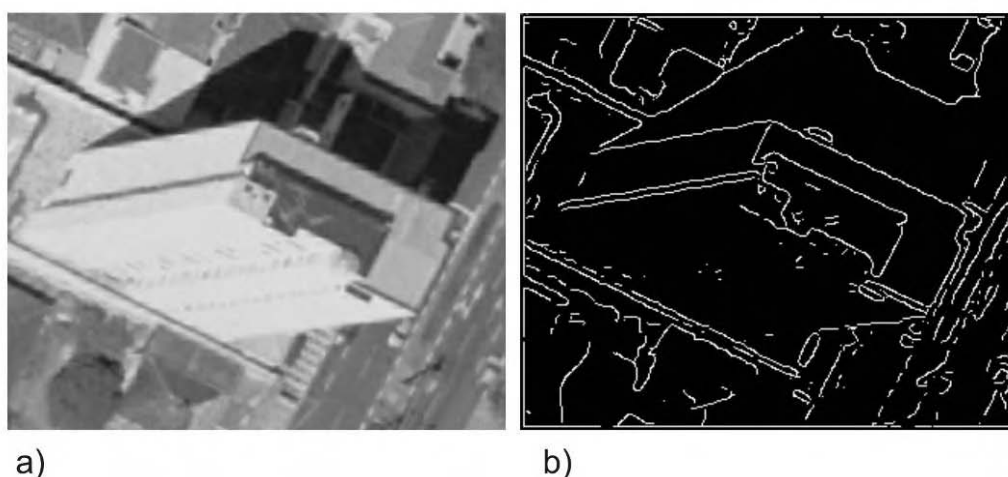


Figura 31 – Fluxograma das etapas para a seleção das bordas das arestas laterais.

### 4.3.1 Considerações Sobre a Disposição das Bordas

Para a extração das retas radiais a partir das sub-imagens com bordas detectadas, é necessário fazer algumas considerações sobre certas características destas bordas. Percebe-se pela Figura 32, que as bordas representativas das laterais dos edifícios não se apresentam isoladas, isto é, a borda que define a lateral do edifício se conecta a borda de alguma outra feição do terreno ou a borda do topo do próprio edifício.



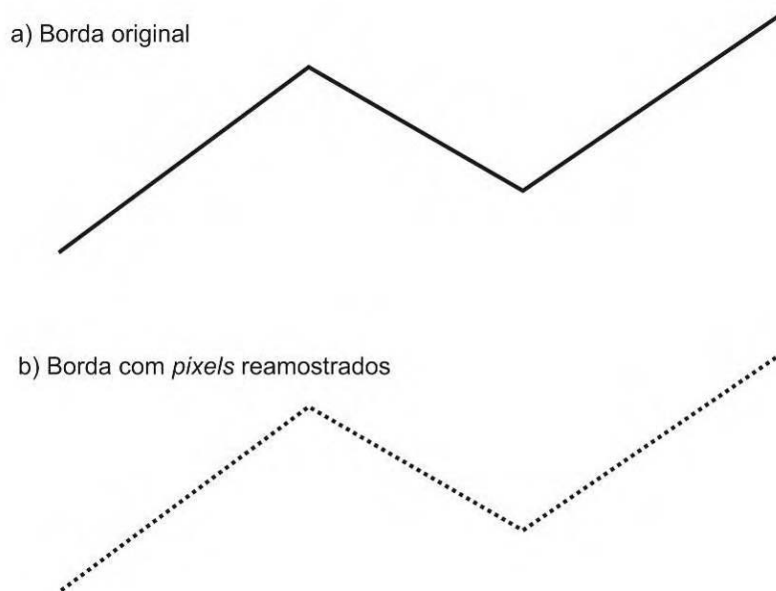
**Figura 32 – a) Imagem de um edifício em uma fotografia aérea; b) Resultado da extração de bordas.**

Sendo assim, uma mesma borda é formada por mais de um segmento de reta, dificultando o isolamento da borda que representa uma das laterais do edifício. Para tanto se torna necessário uma solução para determinação de bordas com apenas um segmento de reta, permitindo assim a verificação de sua disposição na imagem (se radial ou não).

Num primeiro momento foi utilizado um algoritmo para a detecção de intersecção de segmentos de reta (quinas), baseado no Operador de Moravec (GALO, 2004; MORAVEC, 1997). Com isto, era realizada uma análise para identificar o par de pontos da borda que representava a aresta do edifício na sub-imagem. Entretanto, após a realização de testes notou-se que muitas vezes os cantos dos edifícios não formam exatamente quinas na imagem e sim curvas, em função da discretização e resolução da imagem, entre seus segmentos de reta. Com

isto, o processo de extração de quinas é prejudicado e não são extraídos pontos de modo a representar corretamente a borda em questão.

Deste modo, optou-se por reamostrar cada borda rotulada (redução de 50% na quantidade de pontos), sendo então processada uma quantidade de pontos reduzida e suficiente para definir a borda analisada. Isto facilita as análises, pois se trabalha com um número reduzido de pontos representando uma determinada borda, sem que se percam detalhes da sua forma. Na Figura 33 pode ser vista a ilustração de uma borda antes e depois de ser reamostrada.



**Figura 33 – a) Representação de uma borda; b) Borda generalizada.**

Outra consideração a ser feita é sobre a necessidade de descartar as bordas com poucos *pixels*, as quais representam feições sem interesse na imagem e deste modo, evitar processamentos desnecessários.

Na Figura 32b pode-se observar que muitas bordas detectadas não são de interesse, as quais representam pequenas feições ou partes de objetos maiores. Na Figura 34 a imagem da Figura 32b é apresentada após a eliminação das bordas menores.

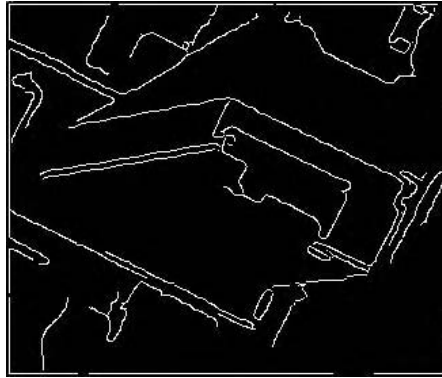


Figura 34 – Resultado da eliminação das bordas pequenas da imagem da Figura 32b.

#### 4.3.2 Crescimento de Regiões das Bordas Extraídas

O crescimento de regiões foi aplicado em todas as bordas extraídas na fase anterior, utilizando a função *<RegionGrowing>* da biblioteca UPTK. Esta função executa a varredura na imagem da esquerda para a direita e de cima para baixo, sendo aplicado às imagens binarizadas e realizado até que todos os *pixels* pertencentes à imagem tenham sido rotulados. A Figura 35 mostra um exemplo de determinação dos *pixels* referentes às bordas detectadas de uma sub-imagem gerada na fase anterior.

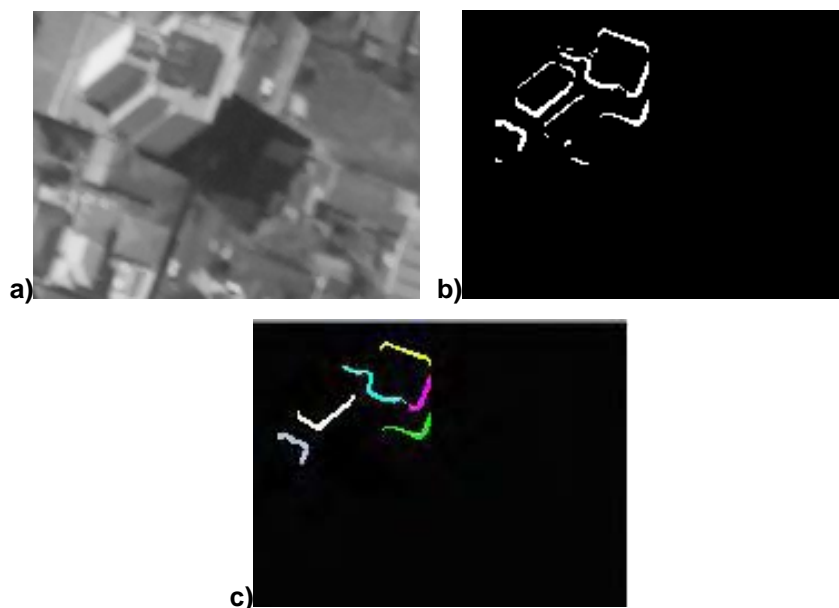


Figura 35 – a) Sub-imagem; b) Bordas detectadas; c) *Pixels* rotulados das bordas.

Os *pixels* rotulados de cada borda foram transladados para o sistema de coordenadas da imagem original, através das coordenadas dos cantos que definem as sub-imagens no sistema de coordenadas da imagem original. Esta transformação é necessária para se manter a disposição radial das bordas representativas das arestas laterais das edificações.

Em seguida foram descartadas as bordas definidas por uma quantidade de *pixels* fora do intervalo estabelecido pelos limiares inferior e superior adotados (Figura 36). Com isto, foram eliminadas pequenas bordas representativas de feições como residências, assim como as bordas muito grandes, representando quadras ou outras feições que não sejam as de interesse, de modo a evitar processamentos desnecessários.



Figura 36 – Esquema da eliminação dos conjuntos de pontos de borda.

No caso das imagens utilizadas nos experimentos, após testes empíricos, estes limites foram definidos como tendo os valores de 100 e 2000 *pixels*, respectivamente para o limite inferior e superior. Analisando-se outras imagens, a redefinição destes limites pode ser necessária, por causa de diferenças de resolução das imagens.

Ao final deste processo é conhecida a quantidade de *pixels*, assim como o rótulo (identificação numérica) para cada borda selecionada.

#### 4.3.3 Reamostragem dos Pixels das Bordas

Cada borda analisada foi reamostrada de 2 em 2 *pixels*, ou seja, a cada 2 *pixels* da borda original apenas um é selecionado para representar a borda que será analisada. Deste modo, a borda não tem sua forma alterada e a quantidade

de pontos à serem analisados é reduzida pela metade, diminuindo a quantidade de cálculos realizados.

Com isto, se faz necessário aplicar novamente o processo de crescimento de regiões (função *RegionGrowing*), para que sejam armazenados os *pixels* que definem a borda reamostrada.

#### **4.3.4 Transformação para o Sistema Fotogramétrico e Correção dos Erros Sistemáticos**

Até então, as coordenadas determinadas se encontravam referenciadas ao sistema de coordenadas da imagem (ou sistema de “tela”), entretanto, é necessário transformá-las para o sistema fotogramétrico. Para realizar a transformação entre estes dois sistemas foi aplicada a Transformação Afim, a qual é definida analiticamente pela Equação 24 (sendo  $x_a = c$  e  $y_a = l$ ).

Após a transformação entre os sistemas são aplicadas as correções dos erros sistemáticos, conforme abordado na subseção 2.5.5.

#### **4.3.5 Retificação das Coordenadas**

Conforme foi visto na Seção 2.5, para o cálculo de  $\Delta h$  (Equação 22) é necessário que a fotografia analisada esteja perfeitamente na vertical ou que as medidas dos pontos sejam realizadas na fotografia inclinada e em seguida estes pontos sejam retificados.

Com as coordenadas já transformadas para o sistema fotogramétrico, e corrigidas dos erros sistemáticos, foi realizada a retificação das coordenadas dos pontos de cada borda para a eliminação dos deslocamentos angulares no momento da tomada da fotografia.

#### 4.3.6 Determinação das Arestas dos Edifícios

Nesta etapa foi realizada a identificação de um ou mais pares de pontos, dentre os determinados na etapa anterior, os quais representam a borda de um edifício presente na sub-imagem. Para cada uma das bordas da sub-imagem foram realizadas análises que definirão o grau de representabilidade destas em relação à aresta de um edifício.

Primeiramente são definidos todos os segmentos de reta que podem ser constituídos a cada dois pontos pertencentes da borda em análise. Neste caso, havendo  $n$  pontos pertencentes a uma borda, serão analisados  $(n-1)!$  segmentos de reta. Este processo é feito de forma a não aceitar retas formadas por pares de pontos repetidos ou por dois pontos iguais. Deste modo, cada ponto  $p_i$  é analisado com relação aos pontos que seguem, isto é,  $p_{i+1}, p_{i+2}, p_{i+3}, \dots, p_n$ , conforme mostra o exemplo da Figura 37.

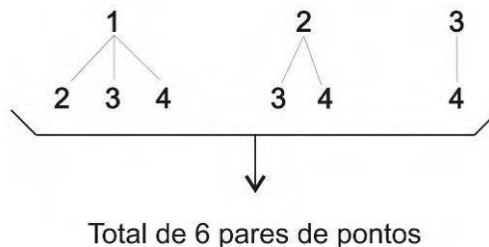


Figura 37 – Seqüência de pares de pontos analisados para o caso uma borda com 4 pixels.

Com isto, determina-se qual par de pontos é o mais provável representante da aresta do edifício. Para isto são observados três critérios gerais:

- Disposição radial: como já foi visto anteriormente na Seção 2.6, em função da geometria formada no instante da tomada da fotografia, os edifícios presentes na imagem estão dispostos radialmente, apresentando o valor do coeficiente linear ( $b$ ) da equação da reta (Equação 41) próximo de zero; deste modo são selecionados os segmentos de reta em que o valor do coeficiente linear é menor do que o limiar de tolerância;

$$y = a * x + b \quad (41)$$

Entretanto, deve ser feita uma observação para os casos de edifícios cujas arestas laterais são próximas ao eixo y do sistema fotogramétrico, pois nestas situações o termo  $a$  tende ao infinito e torna-se indeterminado, sendo necessário usar outra equação. Nestes casos adotou-se a estratégia de considerar os eixos do sistema fotogramétrico invertidos, pois se observou que nestes casos o prolongamento do segmento de reta (aresta lateral do edifício) cruza o eixo x próximo da origem do sistema. Deste modo, para as análises de seleção, atribui-se o valor do coeficiente  $b$  como sendo igual à coordenada no eixo x na posição de interceptação com o prolongamento do segmento de reta analisado;

- Distância transversal com a borda rotulada: este critério tem como finalidade evitar a seleção de retas que não existem, as quais são formadas por pares de pontos que não apresentam correspondência com a borda analisada ou parte desta (mesmo estando dispostos radialmente). Neste caso, verifica-se se a reta formada pelos pontos tem uma distância nula com a borda ou esteja numa distância máxima de 2 *pixels* (proximidade);
- Distância radial da reta: selecionar o par de pontos que tenha a maior distância entre si, ou seja, que forma o maior segmento de reta dentre aqueles analisados.

Estes três critérios serão utilizados em duas fases de seleção dos pares de pontos. A primeira fase constitui-se numa filtragem do total de pares de pontos, utilizando limiares pré-definidos para cada critério. A definição dos limiares se deu após várias análises e testes, sendo que alguns fatores foram considerados por influenciarem diretamente nesta definição:

- I. Coeficiente linear da reta: Dependente da qualidade dos parâmetros de orientação das imagens utilizadas. Após testes empíricos, ficou definido como sendo 1,20% do valor da diagonal da fotografia o valor máximo de  $|b|$  (módulo de  $b$ ). Deste modo, todos os segmentos de retas com coeficiente linear acima deste valor são descartados;
- II. Limiar de distância transversal: São considerados próximos da borda os segmentos de reta que possuem pelo menos 80% dos seus pontos a uma

distância igual ou inferior a 2 *pixels* da borda. Os demais segmentos são descartados do processamento;

- III. Limiar de distância radial: São considerados os pontos cuja distância entre si esteja dentro do intervalo entre 0,60% e 2,30% do valor da diagonal da imagem. Estes valores foram definidos após vários testes empíricos.

Com isto são obtidos pares de pontos com possibilidades de representarem a lateral de um edifício, diminuindo assim a quantidade de pontos envolvida no processamento. Considerando um par de pontos hipotéticos ideal, este representaria perfeitamente a aresta de um edifício, tendo as seguintes características:

- I. Coeficiente linear com valor nulo;
- II. 100% de proximidade com a borda (sobreposição total da reta formada pelo par de pontos em relação à borda);
- III. Maior distância entre os pontos (maior  $d_r$ , Equação 22).

Deste modo, durante a execução da primeira fase de seleção foram determinados os valores extremos a serem utilizados na segunda fase, de forma a selecionar o segmento de reta que mais se aproxima do ideal. Estes valores extremos são máximos para os critérios de distância e proximidade, e mínimo para o critério do coeficiente linear, sendo recalculados a cada borda analisada.

Os pares de pontos selecionados na primeira etapa são avaliados quanto à sua equivalência em relação aos valores extremos calculados para a borda a qual pertencem, utilizando a Equação 42:

$$\text{valor}_{\max} = \frac{P_{dr} * R_{dr} + P_{dt} * R_{dt} + P_b * R_b}{P_{dr} + P_{dt} + P_b} \quad (42)$$

onde:

$R_{dr}$  – razão entre a distância do par de pontos e a distância máxima;

$R_{dt}$  – razão entre a proximidade do par de pontos e a proximidade máxima;

$R_b$  – razão entre o parâmetro  $b$  definido pelo par de pontos e o valor mínimo do parâmetro  $b$ ;

$P_{dr}$  – peso de  $R_{dr}$  ;

$P_{dt}$  – peso de  $R_{dt}$  ;

$P_b$  – peso de  $R_b$  .

Os valores dos pesos  $P_{dr}$  ,  $P_{dt}$  e  $P_b$  foram definidos como sendo 1,2; 1,8 e 0,3 (respectivamente) após vários testes empíricos. O valor de  $P_b$  é menor em relação aos outros pesos, pois este parâmetro se mostrou mais suscetível à variações abruptas nos testes realizados e por isso foi necessário reduzir sua atuação no cálculo. Além disso, pode ocorrer de um valor pequeno de  $b$  estar relacionado à um par de pontos que não estejam representando uma borda ou parte dela.

Para o valor de  $P_{dt}$  é alto devido à necessidade de se selecionar pares de pontos que formem retas que não estejam distantes mais do que dois *pixels* da borda rotulada. Para o peso  $P_{dr}$  foi definido um valor próximo de 1, pois as variações deste fator são mais suaves, e seu efeito no valor final não necessita de redução nem de ampliação.

Deste modo, é selecionado o par de pontos que tenha o maior valor calculado pela Equação 42. O fluxograma com a seqüência dos critérios de seleção adotados é mostrado na Figura 38.

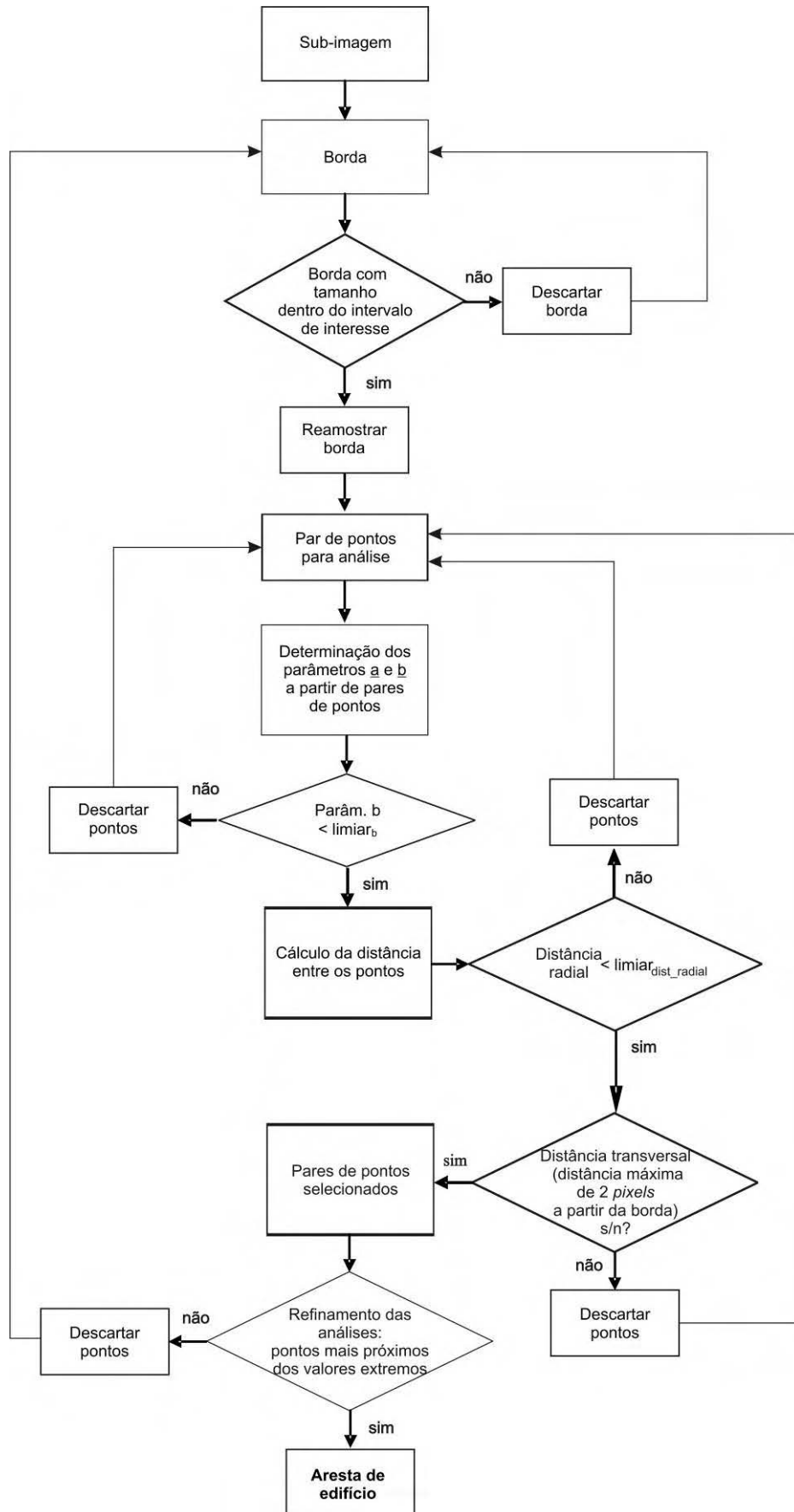


Figura 38 – Fluxograma dos critérios de seleção para os pontos de interesse.

#### 4.4 Cálculo da Altura dos Edifícios

Com a determinação das arestas laterais dos edifícios na etapa anterior são selecionados os pontos extremos destas arestas ( $P_1$  e  $P_2$ ), representando a base e topo destes edifícios. Estes pontos, juntamente com altura de vôo ( $Z$ ), são necessários para a determinação da altura do edifício através da Equação 22 (Seção 3.1.1), pois o valor de  $dr$  é obtido através da diferença entre as distâncias radiais destes pontos em relação ao ponto nadir ( $dr = r - r'$ ), também visto na Seção 3.1.1.

Como as coordenadas dos pontos selecionados já se encontram retificados, os valores das coordenadas do ponto principal são nulos (ponto principal coincidente com o ponto nadir). Deste modo, os cálculos destas distâncias radiais expressos da seguinte maneira:

$$\text{dist}_1 = \sqrt{x_1^2 + y_1^2} \quad (43)$$

$$\text{dist}_2 = \sqrt{x_2^2 + y_2^2} \quad (44)$$

onde:

$x_1, y_1$  – coordenadas retificadas de um dos extremos da aresta;

$x_2, y_2$  – coordenadas retificadas do outro extremo da aresta.

Deste modo, primeiro devem ser definidos quais pontos representam a base e o topo do edifício, para que se possa calcular  $r'$  e  $r$ . Para isto, a maior distância é atribuída como o valor de  $r$  (topo do edifício), e a menor como o valor de  $r'$  (base do edifício). Esta definição é vista da seguinte maneira:

$$\text{para } \text{dist}_1 < \text{dist}_2 \begin{cases} r = \text{dist}_1 \\ r' = \text{dist}_2 \end{cases}, \text{ caso contrário tem-se } \begin{cases} r = \text{dist}_2 \\ r' = \text{dist}_1 \end{cases}.$$

Com as distâncias calculadas e definidos os valores de  $r$  e  $r'$  realiza-se o cálculo de  $\Delta h$ , sendo os cálculos acima realizados para cada borda indicada na fase anterior, obtendo-se assim a altura de cada edifício cujas arestas foram selecionadas.

## 5 EXPERIMENTOS E ANÁLISES DOS RESULTADOS

### 5.1 Materiais e Dados Utilizados

Na execução dos experimentos foram utilizados os seguintes dados:

- Fotografias aéreas digitais (câmara não-métrica digital Kodak Professional 14N, com distância focal de 36 mm) da área central da cidade de Presidente Prudente, provenientes de um levantamento aerofotográfico realizado no ano de 2003 (vôo realizado pela empresa Multiespectral). Estas fotografias foram obtidas no sítio <<http://www2.prudente.unesp.br/dcartog/uptk/>>, sendo denominadas como levantamento 1 neste trabalho;
- Fotografias aéreas digitalizadas (câmara métrica) na escala 1:8.000 da área urbana de Presidente Prudente, provenientes de um levantamento aerofotogramétrico realizado no ano de 2003 (execução da empresa Engemap), com câmara métrica de distância focal igual à 153,16 mm (PRADO *et al.*, 2006) Estas fotografias são denominadas como levantamento 2;
- Dados de calibração das câmaras utilizadas nos levantamentos acima;
- Parâmetros de orientação das imagens.

Os equipamentos e *softwares* utilizados para a execução deste trabalho foram:

- Linguagens de programação:
  - C++, no ambiente *Builder 5.0*.
- Estação fotogramétrica digital:
  - *Leica Photogrammetry Suite (LPS)*.
- Visualizadores e editores de imagens:
  - *GIMPShop Pro 2.2.8*;
  - *IrfanView*;
  - *Paint*.

- Microcomputador:
  - Processador AMD Athlon 1.4;
  - 40 GB de disco rígido;
  - 256 Mb de memória RAM.

## 5.2 Experimentos Realizados

Nesta seção são apresentados os experimentos realizados de acordo com a metodologia proposta, assim como os resultados alcançados. Foram implementados dois programas em *C++Builder* 5.0 para a realização dos experimentos e visualização dos resultados.

O primeiro programa destina-se à identificação das sombras de interesse em imagens aéreas digitais e, com isto, a geração das sub-imagens do entorno destas sombras (etapa 1). Os dados de entrada são as imagens aéreas que serão processadas, enquanto que os dados de saída são as sub-imagens geradas e as coordenadas do retângulo envolvente de cada sub-imagem, no sistema da imagem primária.

O segundo programa realiza a análise das sub-imagens geradas, extraindo as bordas representativas do edifício presente na cena (podendo abranger mais de um) e o cálculo da altura do mesmo (etapas 2 e 3). Os dados de entrada são as sub-imagens e os respectivos valores das coordenadas do retângulo envolvente de cada uma, além dos parâmetros de orientação interior e exterior da imagem. Já os dados de saída são os valores das alturas dos edifícios detectados.

### 5.2.1 Extração de Áreas com Sombras e Delimitação do Espaço de Busca

Com o objetivo de avaliar as técnicas definidas para a extração de áreas com ocorrência de sombras, foram realizados testes com diversas imagens aéreas com características distintas. As imagens foram submetidas às duas técnicas

de extração de áreas de sombras, sendo rotuladas em seguida de modo a se determinar a quantidade de *pixels* destas áreas.

A Figura 39 mostra uma imagem aérea interessante para análises, pois a mesma mostra vários edifícios com suas respectivas sombras.



**Figura 39 – Imagem aérea com ocorrência de sombras.**

Fonte: [http://cml.upenn.edu/tierrasajama/Sajama\\_Spanish/intro/introindex.htm](http://cml.upenn.edu/tierrasajama/Sajama_Spanish/intro/introindex.htm)

A Figura 40 mostra o resultado do processamento da imagem da Figura 39 utilizando o filtro SAD abordada por Santos et al. (2006), para detecção de sombras em imagens digitais (destacadas em amarelo).



**Figura 40 – Imagem resultante da aplicação do filtro SAD na imagem da Figura 39.**

Observando a imagem da Figura 40, percebe-se que todas as regiões com presença de sombras na imagem são detectadas, desde as maiores aéreas sombreadas até as menores. Entretanto, várias regiões com vegetação de tonalidade escura também são extraídas, resultando em várias áreas selecionadas. Isto ocorre devido a semelhança dos tons de cinza das regiões de sombras com algumas regiões com vegetação, tendo pouco valor de brilho e alta saturação. Este problema já havia sido citado pelos autores como sendo uma das limitações da técnica (SANTOS, et al., 2006).

Na Figura 41 pode ser observado o resultado da utilização do índice SDW (descrito em POLIDÓRIO et al. 2003) na imagem da Figura 39, estando as sombras detectadas indicadas em azul.



Figura 41 – Resultado da aplicação do índice SDW na imagem da Figura 39.

Observando a Figura 41, pode-se perceber que o resultado obtido com índice SDW pouco difere do resultado mostrado na Figura 40, pois a maioria das sombras presentes na cena foi identificada, assim como algumas áreas de vegetação.

Analisando os resultados das Figuras 40 e 41, cada técnica selecionou mais de 2060 regiões, sendo que destas regiões um grande número era formada por uma quantidade inferior a uma dezena de *pixels*. Deste modo faz-se necessário a aplicação de um limiar para que as pequenas regiões, abrangendo uma menor quantidade de *pixels*, sejam descartadas. Com o processo de crescimento de regiões são calculadas as quantidades de *pixels* de cada região identificada como sendo de sombra e estas regiões são confrontadas com o limiar.

A dificuldade neste caso, diz respeito à definição deste limiar, pois o mesmo se encontra dependente da resolução da imagem e da área média resultante pelas áreas das sombras de interesse, sendo que nesta última o horário em que foi obtida a imagem deve ser levado em conta, uma vez que este influi na formação das sombras. Além disso, nas áreas centrais com grande concentração de edifícios, normalmente ocorrem casos nos quais edifícios são próximos, o que pode acarretar uma sombra grande o suficiente para sobrepor outros edifícios menores na vizinhança (Figura 42).



**Figura 42 – Conjunto de edifícios obstruindo a visualização**

Também podem ocorrer situações onde o próprio prédio não permita a visualização da sua sombra (Figura 43) ou que seja possível observar apenas uma parte da sombra (Figura 44).



**Figura 43 – Casos das sombras de edifícios que não estão visíveis.**



**Figura 44 – Casos de sombras parcialmente visualizadas.**

Nos dois casos observados na Figura 44, os edifícios obstruem a visualização de suas respectivas sombras, deixando visível apenas uma pequena parte. Deste modo, estas sombras, mesmo sendo de edifícios, não serão selecionadas pelos limiares utilizados para a seleção das sombras de interesse no restante da imagem.

Uma solução nestes casos seria a intervenção do usuário com propósito de determinar novos limiares para a seleção destes casos de sombras, ou definir um valor menor para o limiar inferior geral para imagem. Esta última opção tem a desvantagem de proporcionar a seleção de um grande número de sombras, enquanto que a primeira faz necessária a intervenção do usuário.

Para o caso da imagem da Figura 40 foi definido um limiar com o valor de  $130\text{m}^2$  de área de sombra, ou seja, as regiões com áreas de sombra menor do que este valor são descartadas. Deste modo, a quantidade de regiões selecionadas foi reduzida para 22 (Figura 45), sendo que destas apenas 5 regiões eram provenientes da seleção de áreas de vegetação.



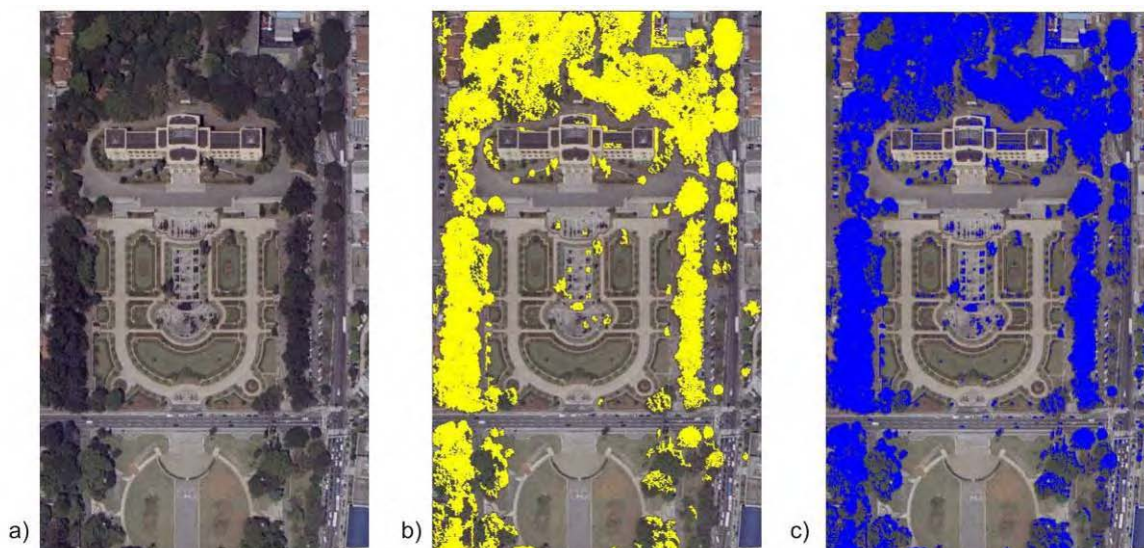
Figura 45 – Regiões seleccionadas (azul) na imagem da Figura 40 após aplicação do limiar de  $130 \text{ m}^2$ .

A partir dos resultados mostrados na Figura 45 foram geradas as respectivas sub-imagens. Na Figura 46 são apresentadas 4 das 22 sub-imagens geradas, em tons de cinza.



Figura 46 – Algumas das sub-imagens geradas a partir da imagem da Figura 45.

Em situações onde a vegetação é mais escura, como por exemplo na Figura 47, os métodos podem selecionar estas áreas de vegetação como sendo sombra.



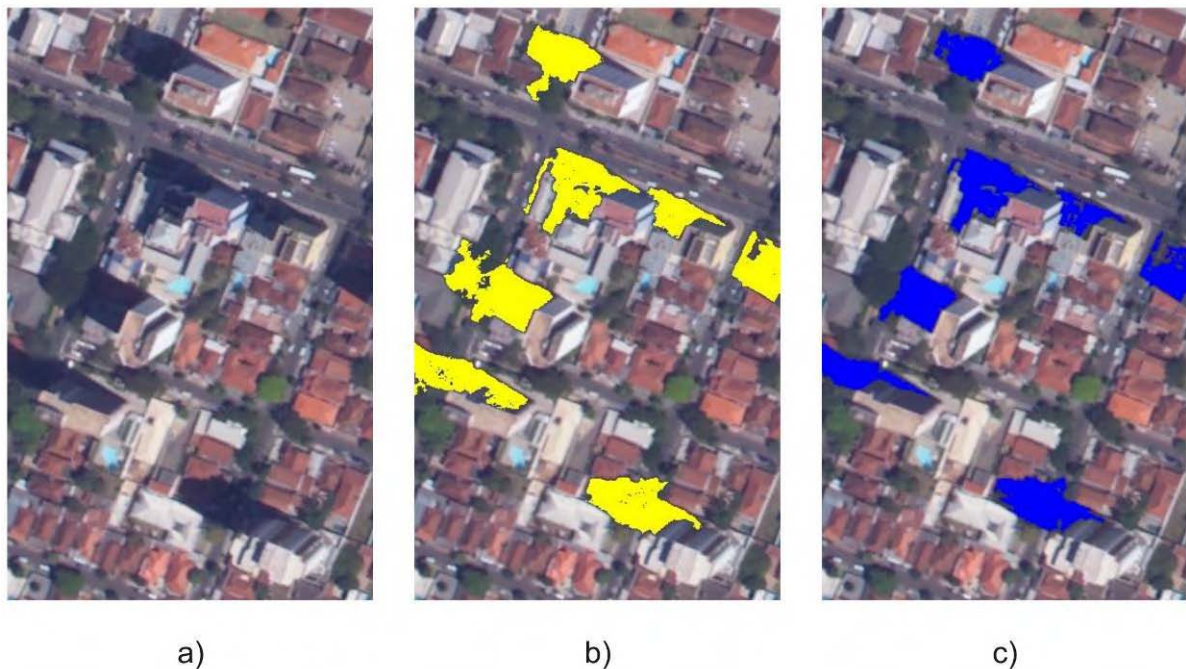
**Figura 47 – (a) Imagem aérea com ocorrência de vegetação 1; (b) Vegetação selecionada através do filtro SAD; (c) Vegetação selecionada pelo uso do índice SDW.**

Fonte: [http://www.virtual.epm.br/uati/corpo/museu\\_ipiranga.htm](http://www.virtual.epm.br/uati/corpo/museu_ipiranga.htm)

Para tentar solucionar este problema, num primeiro momento foi implementado o índice de artificialidade proposto por Polidório et al. (2003) para separar vegetação de feições artificiais. Entretanto, a definição de um limiar satisfatório para a separação das feições naturais e artificiais se mostrou uma tarefa complexa (assim como foi constatado por Costa, 2006), e deste modo não foi utilizado neste trabalho.

Com a continuidade dos testes observou-se que a grande maioria das áreas de vegetação selecionadas como sendo de sombra, com aplicação do limiar de pequenas regiões, eram descartadas, sobrando apenas áreas com grande quantidade de vegetação (parques, praças, entre outros). Deste modo, optou-se por utilizar o limiar para a eliminação de parte destes casos.

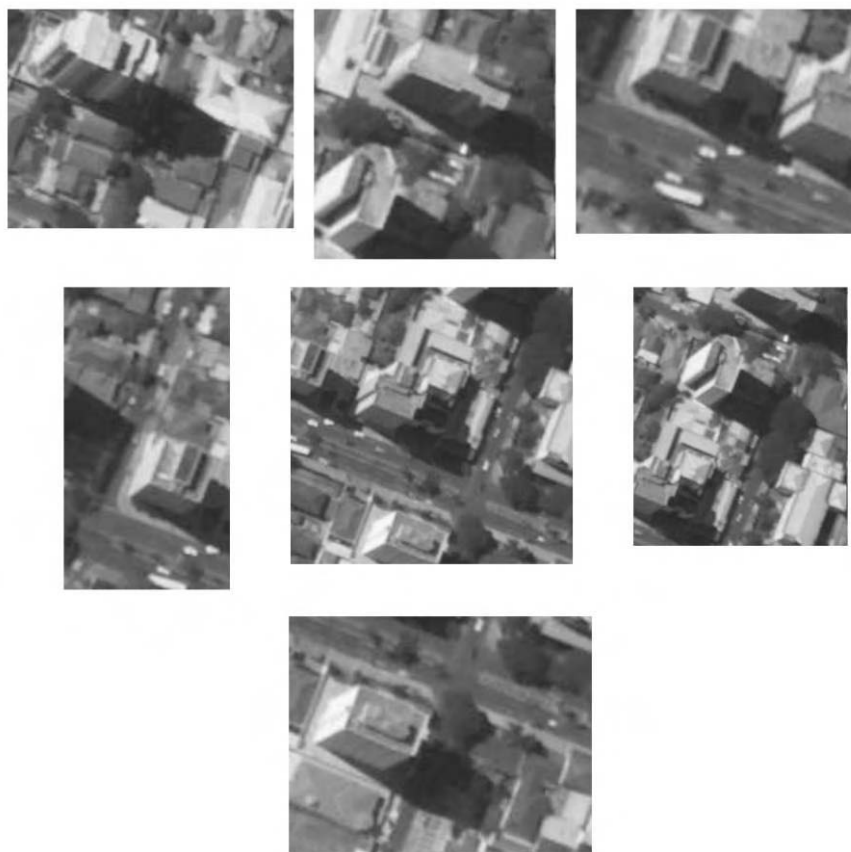
Em outro experimento, cujas imagens são mostradas na Figura 48, podem ser observadas as sombras extraídas, com as duas técnicas analisadas.



**Figura 48 – a) Recorte de uma imagem aérea do levantamento 1; b) Sombras extraídas pelo uso do filtro SAD; c) Sombras extraídas pelo uso do índice SDW.**

Conforme pode ser observado na Figura 48, as técnicas de detecção de sombras utilizadas apresentaram resultados muito parecidos, como no experimento anterior, extraíndo todas as sombras dos edifícios presentes na imagem. As regiões extraídas como sendo de sombras e com pequena área, que neste caso estão todas relacionadas com vegetação, foram excluídas. Aplicou-se a técnica de crescimento de regiões nas sombras, tendo sido utilizado um limiar inferior de  $50 \text{ m}^2$  de área e superior de  $350 \text{ m}^2$ , resultando em 7 regiões.

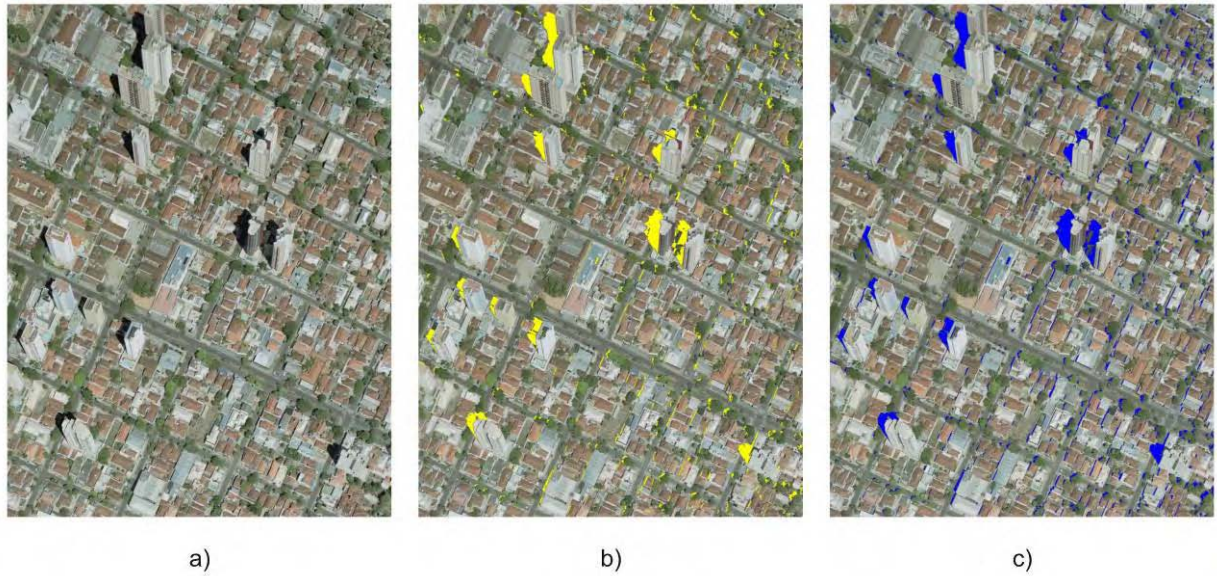
Foram geradas as sub-imagens, uma para cada região, da imagem da Figura 48, as quais podem ser vistas na Figura 49. Cada sub-imagem corresponde a um aumento de área da ordem de 900% em relação ao retângulo envolvente das regiões de sombra extraídas. Todas as sub-imagens geradas possibilitam a visualização do edifício que gerou a sombra selecionada. Tem-se também, em alguns casos, mais de um edifício podendo ser visto em uma sub-imagem, devido à concentração de edificações presentes na imagem.



**Figura 49 – Sub-imagens geradas a partir da imagem da Figura 48.**

Os resultados mostrados na Figura 49 foram obtidos a partir de uma fotografia do levantamento 2. As sombras dos principais edifícios presentes na fotografia foram selecionadas, tendo sido aplicada a mesma seqüência de passos realizados para o recorte da imagem do levantamento 1.

A Figura 50a mostra um recorte de uma fotografia aérea utilizada nos testes. Na imagem mostrada na Figura 50b foram selecionadas 73 áreas, enquanto que na Figura 50c foram selecionadas 71, demonstrando a semelhança de resultados entre as duas técnicas utilizadas para a extração de sombras, além de serem praticamente as mesmas áreas selecionadas. Neste caso foi aplicado um limiar de corte para as regiões com menos de 110 m<sup>2</sup> de área de sombra.



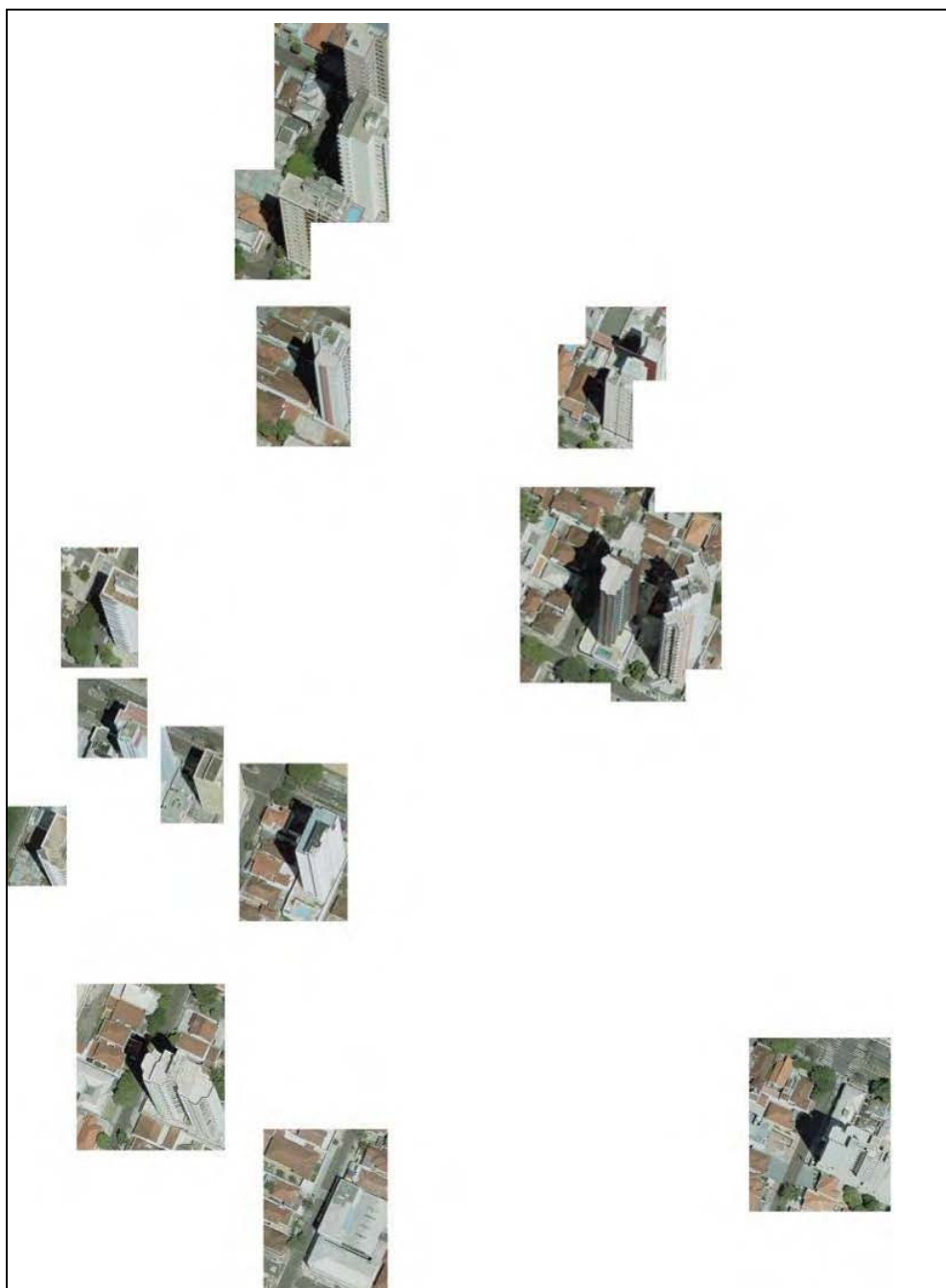
**Figura 50 – a) Recorte de uma das imagens do levantamento 2; b) Sombras extraídas pelo uso do filtro SAD; c) Sombras extraídas pelo uso do índice SDW.**

As sub-imagens geradas a partir da imagem da Figura 50 podem ser observadas na Figura 51, dispostas em suas posições na imagem de entrada. Percebe-se que foram selecionadas muitas áreas sem interesse, desde pequenas sombras até algumas áreas de vegetação de tonalidade escura.



**Figura 51 – Sub-imagens dispostas em suas posições reais no recorte da imagem, antes da aplicação do limiar de corte.**

Após alguns testes, determinou-se o valor do limiar de corte igual a  $100 \text{ m}^2$  para o limite inferior e de  $650 \text{ m}^2$  para o superior. Com este valor apenas as sombras dos edifícios foram rotuladas, obtendo-se um total de 16 sub-imagens, conforme pode ser visto na Figura 52, onde as sub-imagens também se encontram dispostas em suas posições de origem. Na Figura 52 fica evidente a redução do espaço de busca em relação à Figura 51.



**Figura 52 – Sub-imagens dispostas em suas posições reais no recorte da imagem, após a aplicação do limiar de corte.**

Para a realização dos experimentos descritos na próxima seção, foram utilizados os dados gerados a partir de uma das fotografias aéreas provenientes do levantamento 2 e obtidos em Prado et al. (2006). A fotografia utilizada abrange a área central da cidade de Presidente Prudente, onde vários edifícios estão presentes.

## 5.2.2 Determinação das Arestas dos Edifícios

Após a definição das sub-imagens realizou-se a análise das mesmas, conforme a metodologia apresentada na seção 4.3, para a extração das bordas dos possíveis edifícios representados nas fotografias aéreas.

As sub-imagens geradas a partir da seleção de áreas com vegetação não são retratadas nesta seção, pois as mesmas são processadas no programa desenvolvido e não geram resultados, devido à falta de edificações.

Deste modo, são descritos apenas os processos e resultados obtidos com as 25 sub-imagens com presença de edificações. As Figuras 53, 54, 55 e 56 mostram casos de sub-imagens em que ocorreram problemas na extração das bordas referentes às arestas laterais de edifícios. A Figura 53 mostra o caso da sub-imagem 12, onde o problema foi ocasionado pela própria característica física do edifício representado.

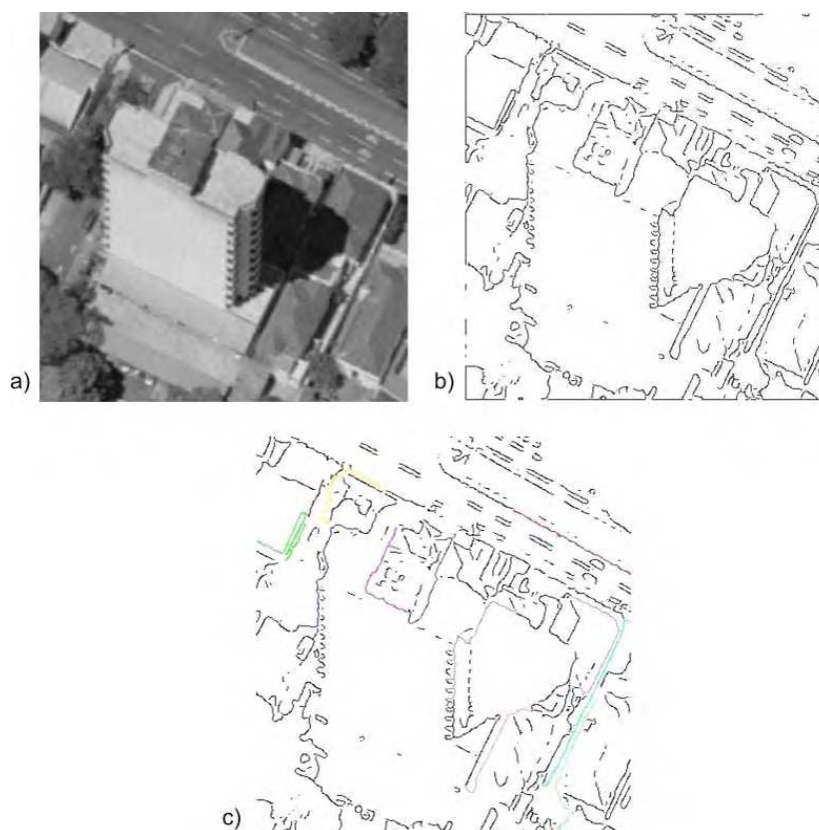


Figura 53 – a) Sub-imagem 12; b) Extração das bordas; c) Imagem rotulada.

Pela imagem na Figura 53b percebe-se que disposição na cena fez com que as arestas que definem as laterais do edifício ficassem com um traçado irregular devido às janelas do edifício. Deste modo, as bordas não resultaram em linhas retas, além de não formarem bordas contínuas para toda a lateral do edifício (Figura 53c), ou seja, não foram extraídas bordas representando arestas laterais do edifício.

O problema na sub-imagem 15 (Figura 54) se caracteriza pelo fato da parte visível do edifício na imagem estar localizado na região de sua própria sombra, prejudicando a extração de suas bordas. Também as janelas localizadas nas laterais do edifício (exatamente na linha da aresta) acarretam em uma borda irregular.

Na Figura 54c observa-se o resultado da rotulação, onde percebe-se que não houve a extração de uma borda de traçado reto representando alguma das laterais do edifício. As bordas extraídas neste caso representam outras partes do edifício, principalmente detalhes do topo e parte das janelas, sendo que para as arestas laterais houve apenas a extração de fragmentos.

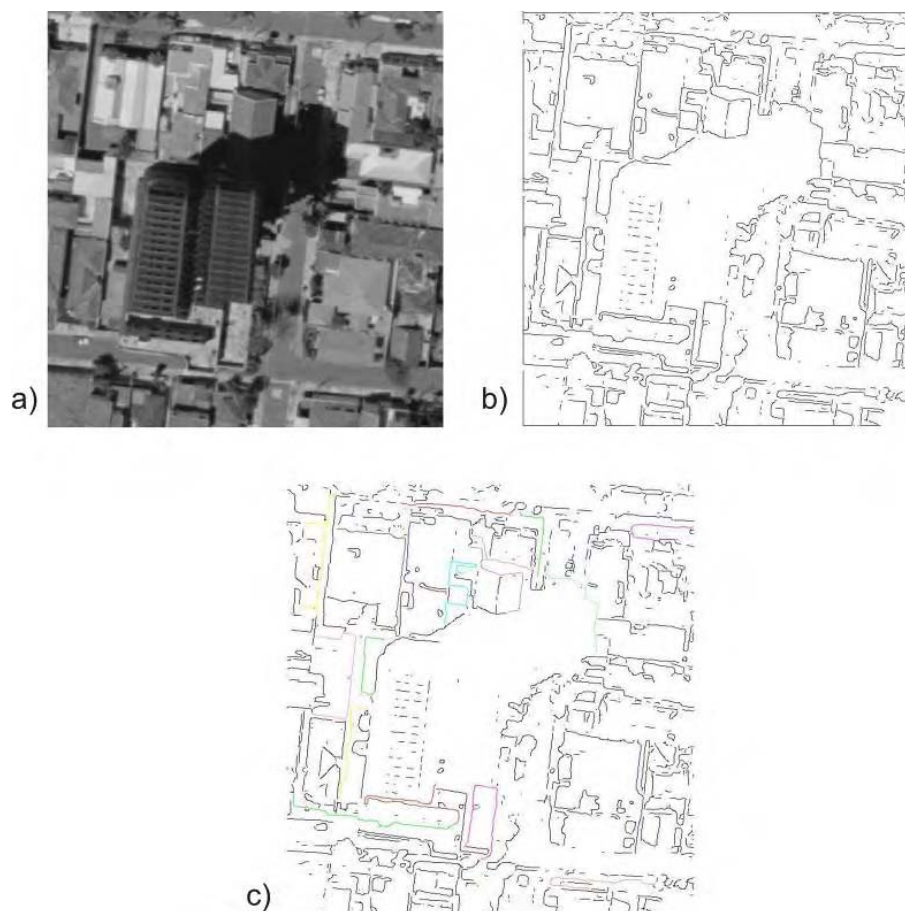


Figura 54 – a) Sub-imagem 15; b) Extração das bordas; c) Imagem rotulada.

Também para o caso da sub-imagem 16, conforme pode ser visto na Figura 55, o problema está na presença de sombra sobre a área visível do edifício, prejudicando a extração das bordas. As sacadas também prejudicaram a extração de bordas lineares que representem toda a extensão das arestas laterais, e não apenas uma parte destas.

Como consequência, pode ser visto na Figura 55c que nenhuma borda representando a lateral do edifício foi extraída, além disso, do lado esquerdo do edifício (Figura 55a) nota-se que a extração de uma borda contínua ficou comprometida pelas reentrâncias formadas pelas janelas.

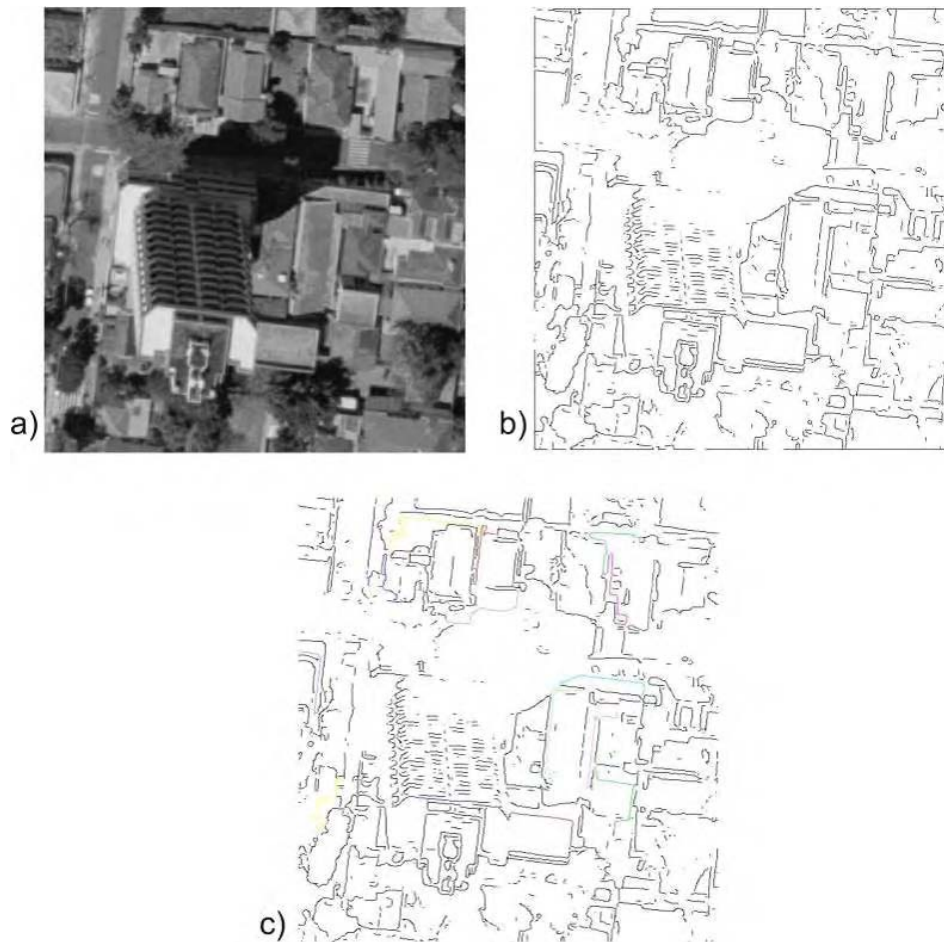


Figura 55 – a) Sub-imagem 16; b) Extração das bordas; c) Imagem rotulada.

Na sub-imagem 19 (Figura 56), a razão para não haver sido selecionada nenhuma borda, que indicasse uma das arestas laterais do edifício presente na cena, está relacionada com a proximidade da região representada nesta sub-imagem com o ponto nadir da fotografia, fazendo com que o deslocamento entre o topo e base do edifício seja pequeno.

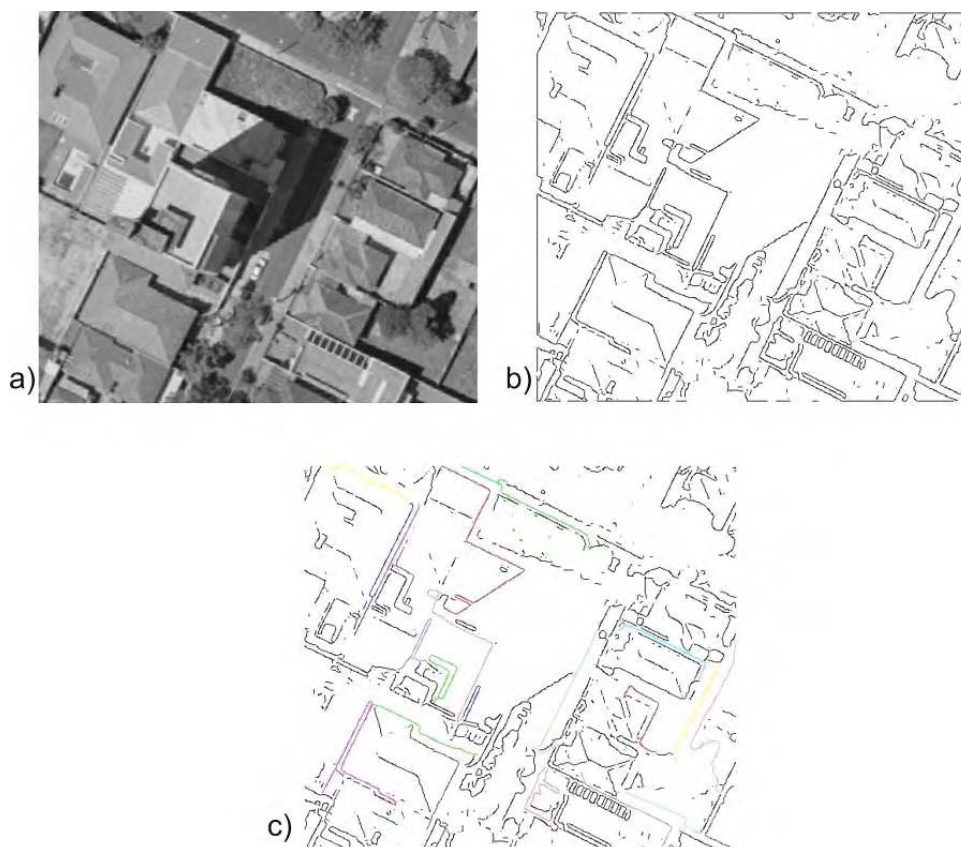


Figura 56 – a) Sub-imagem 19; b) Extração das bordas; c) Imagem rotulada.

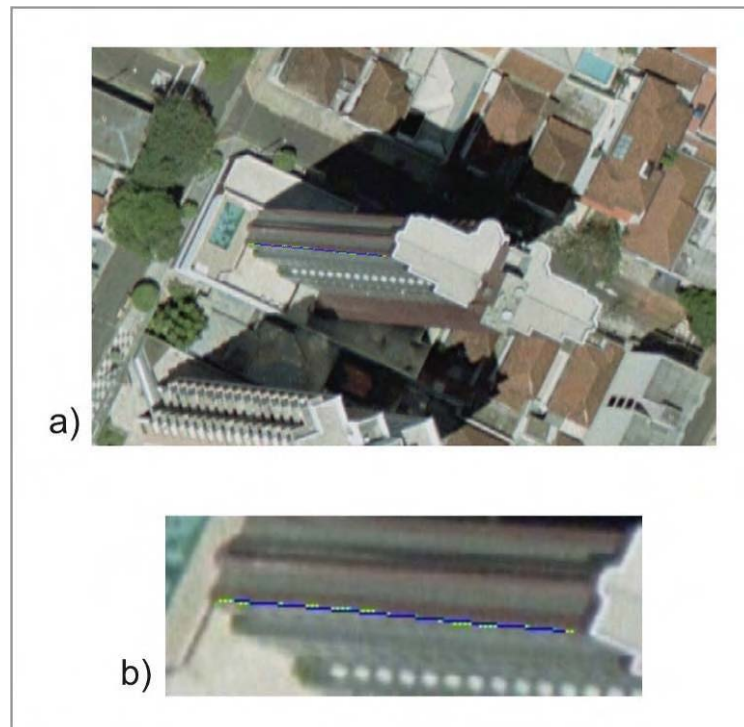
Além dos problemas apresentados nas Figuras 53 a 56, também foram observadas dificuldades em relação as outras sub-imagens, principalmente, como já foi visto, devido à existência de sacadas e janelas. Estes elementos dificultam o processo de extração de bordas, podendo resultar em bordas não contínuas das laterais dos edifícios (como no caso apresentado na Figura 55).

Nos casos onde a sombra do edifício prejudica a extração das suas bordas, foram realizados testes individuais com o intuito de melhorar o contraste destas áreas, para uma melhor visualização dos detalhes dos edifícios. Entretanto, ao se realizar estes tipos de análises específicas prejudica-se a automatização da metodologia proposta.

Na seqüência, serão mostrados os resultados, gráficos e numéricos, obtidos para a determinação de algumas das arestas dos edifícios selecionados nas sub-imagens. A partir da Figura 57 até a Figura 74 as arestas determinadas pelo algoritmo estão representadas na cor azul e as bordas extraídas automaticamente (através dos procedimentos descritos na Seção 4.2.5) com a cor verde. Para os casos das sub-imagens em que foram determinadas mais de uma aresta, estas

serão diferenciadas por letras (por exemplo, para o caso de 3 arestas extraídas na sub-imagem 99 seriam denominadas da seguinte maneira: 99A, 99B e 99C). Vale ressaltar também que algumas imagens foram rotacionadas para uma melhor visualização e acomodação no texto.

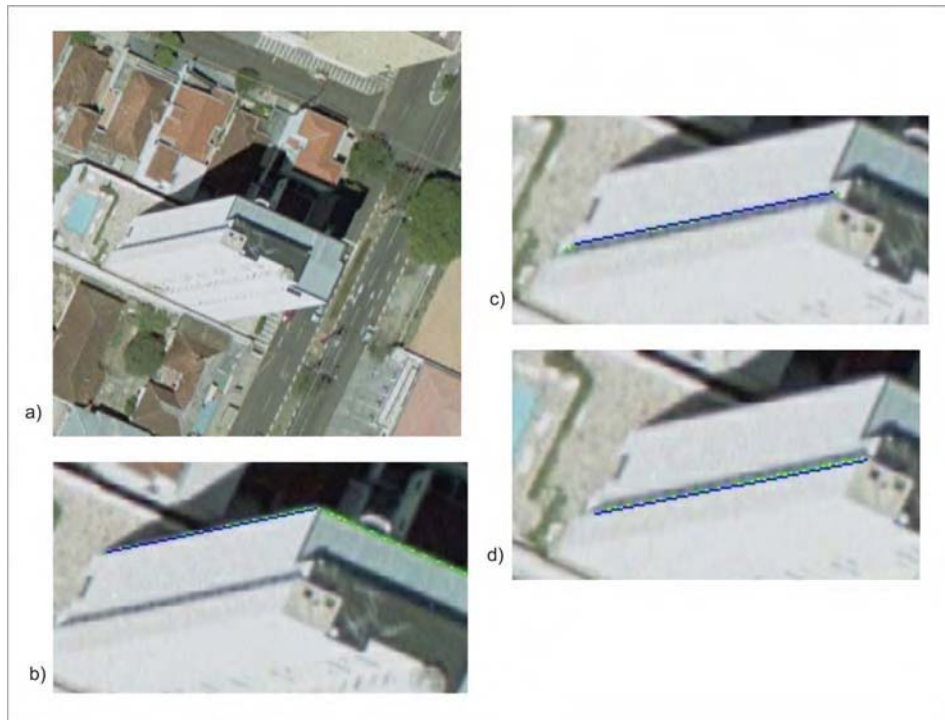
Pela Figura 57 pode ser observada a sub-imagem 1, na qual se obteve a determinação de uma aresta do edifício retratado na cena. Conforme pode ser visto na Figura 57b, a aresta identificada não corresponde a toda a extensão física do edifício, uma vez que a borda extraída também não corresponde à esta extensão do edifício.



**Figura 57 – a) Aresta determinada no edifício da sub-imagem 1; b) Detalhe da aresta 1A.**

Também pela Figura 57b percebe-se que a aresta determinada também apresentou um erro na representação da base do edifício, sendo que faltou uma pequena extensão da lateral do edifício.

Na Figura 58a é apresentado o edifício da sub-imagem 2, tendo sido determinadas 3 arestas.



**Figura 58 – a) Aresta determinada no edifício da sub-imagem 2; b) Detalhe da aresta 2A; c) Detalhe da aresta 2B; d) Detalhe da aresta 2C.**

Pela Figura 58b observa-se que a borda analisada representa tanto a lateral do edifício como também o seu topo, sendo que a aresta foi determinada corretamente somente sobre a parte da borda relacionada com a lateral. Nota-se pelas Figuras 58c e 58d que as arestas determinadas correspondem a toda extensão de suas respectivas bordas.

Nestes três casos, as bordas das quais as arestas foram determinadas, não representam corretamente o segmento da lateral do edifício próximo de sua base, sendo por este motivo que as arestas não representam a lateral do edifício em sua totalidade.

O edifício da sub-imagem 3, observado na Figura 59, teve apenas uma de suas arestas identificadas, porém esta não seguiu totalmente a borda extraída, apresentando um pequeno deslocamento à direita da borda.

Pode-se notar pela Figura 59b, que a aresta definida segue a extensão da borda, a qual possui um dos seus extremos um pouco acima da base do edifício, e se prolonga sobre parte do topo do edifício.

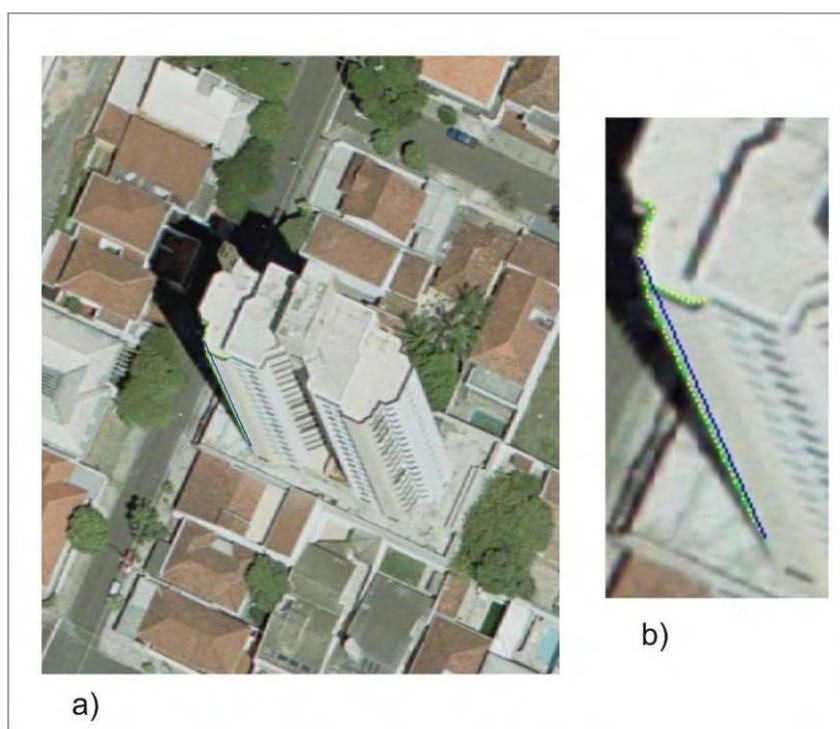


Figura 59 – a) Aresta determinada no edifício da sub-imagem 3; b) Detalhe da aresta 3A.

A divergência entre a aresta determinada e a borda, observada na Figura 59b, está relacionada ao fato do critério de disposição radial apresentar um melhor valor nesta posição do que no alinhamento formado pela borda que representa a aresta lateral do edifício.

Observa-se pela Figura 60a o edifício presente na sub-imagem 4, do qual foram determinadas três arestas. Na Figura 60b resultou na representação da lateral do edifício, no qual foi ultrapassado em aproximadamente 3 *pixels* a extensão física do edifício, tendo como extremo superior um ponto no topo.

A aresta determinada na Figura 60c corresponde corretamente à lateral do edifício. Especificamente no caso da aresta da Figura 60d, a falta de uma pequena extensão na parte superior da lateral se deve ao fato desta parte não ter sido extraída na etapa de extração geral das bordas das sub-imagens.

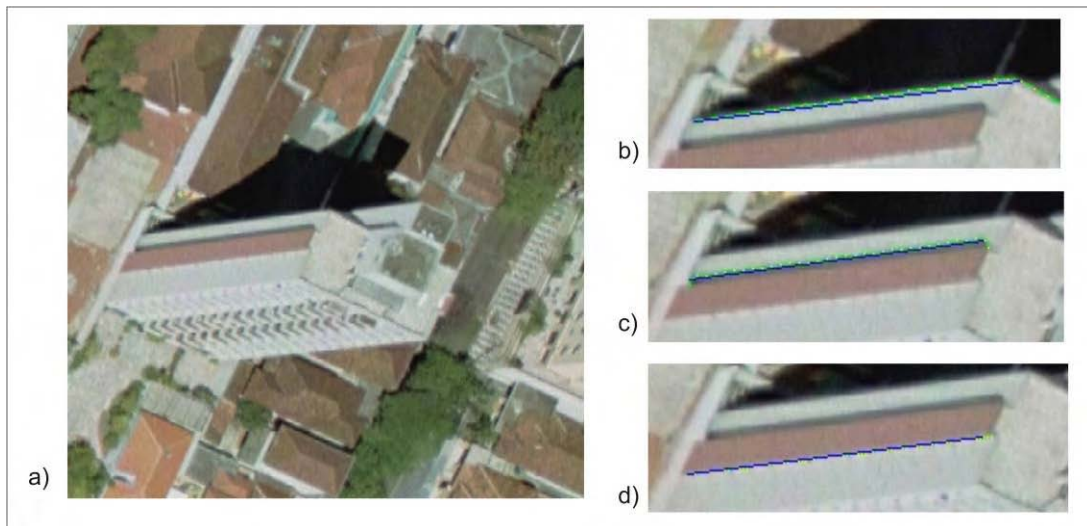


Figura 60 – a) Aresta determinada no edifício da sub-imagem 4; b) Detalhe da aresta 2A; c) Detalhe da aresta 2B; d) Detalhe da aresta 2C.

Na Figura 61 é mostrado o caso para a sub-imagem 5, onde foram extraídas duas arestas para o mesmo edifício. A aresta na Figura 61b selecionou o segmento de reta pertencente à borda que representa a lateral do edifício, faltando aproximadamente um andar para esta borda chegar ao topo.

No caso da aresta representada na Figura 61c ocorreu o contrário, pois se observa que houve uma boa representação do topo do edifício, enquanto que houve problemas na base. Isto ocorreu devido à forma irregular da borda extraída nesta parte do edifício, representando outras feições do edifício além da sua aresta lateral.

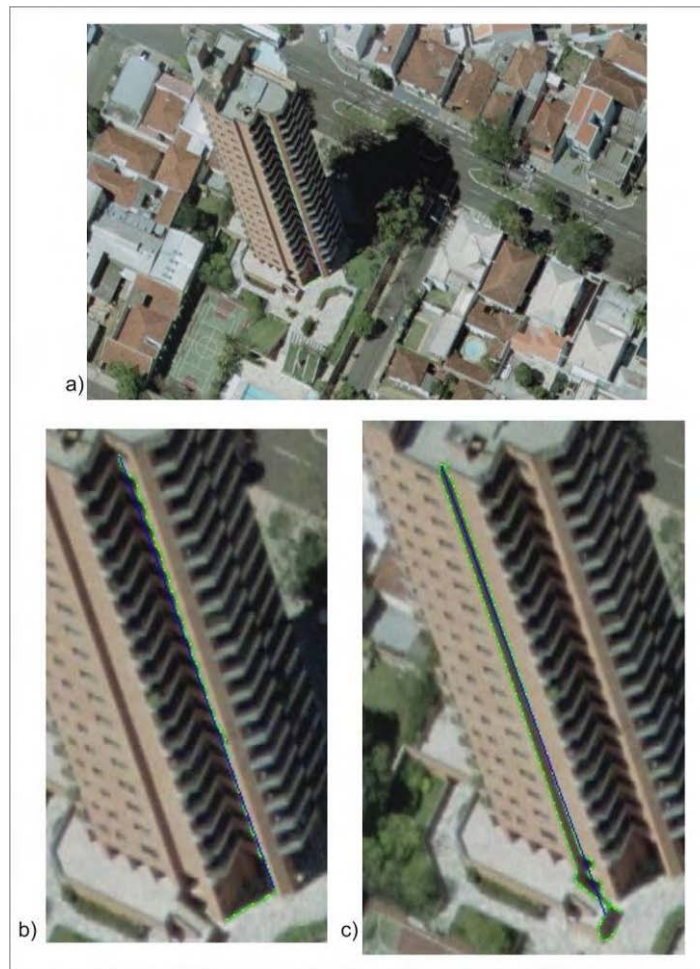


Figura 61 – a) Edifício da sub-imagem 5; b) Detalhe da aresta 5B; c) Detalhe da aresta 5A.

A aresta extraída na sub-imagem 8 (Figura 62) cobre toda a extensão lateral do edifício, sendo que, neste caso, a borda em questão apresenta apenas um segmento de reta. Observa-se pela Figura 62b que a aresta extraída não chegou ao solo (faltando uma pequena extensão). Esta falha ocorreu devido ao fato da borda extraída estar relacionada à um detalhe do edifício que não chega ao solo, e por este motivo a aresta não chega até o solo.

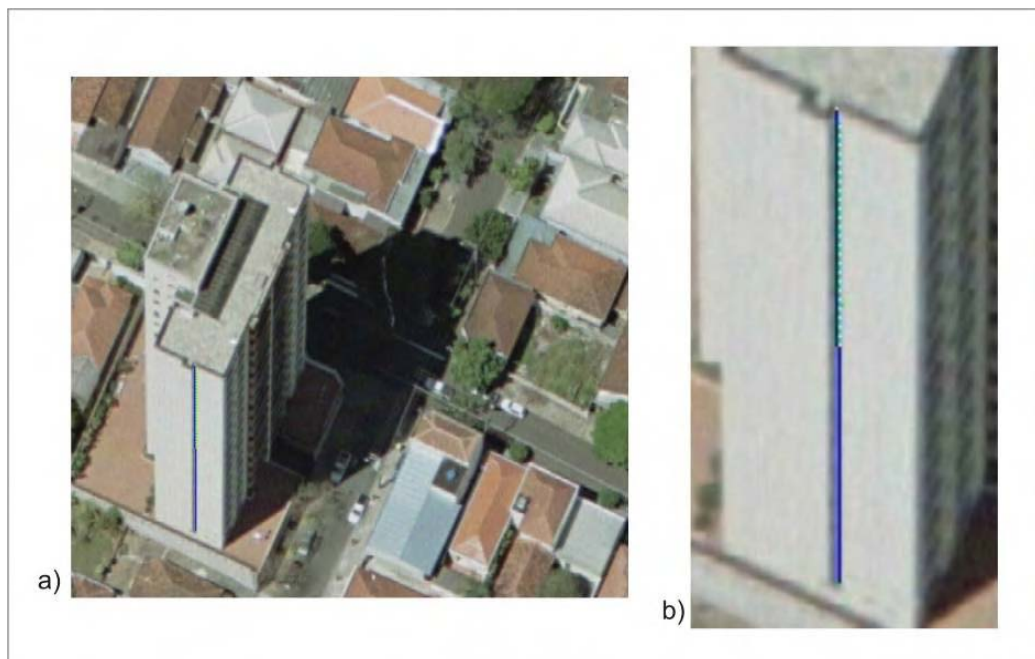


Figura 62 – a) Aresta determinada no edifício da sub-imagem 8; b) Detalhe da aresta 8A.

A Figura 63 mostra um edifício onde a aresta selecionada não corresponde corretamente à lateral física do edifício. A aresta foi extraída de uma borda que liga um ponto da base e do topo, mas que não é uma aresta lateral do edifício (Figura 63b). Este segmento de reta que forma a borda está disposto quase de forma radial, devido à posição do edifício na imagem, e por esta razão não foi excluído pelo critério que considera o coeficiente linear (b) da reta.

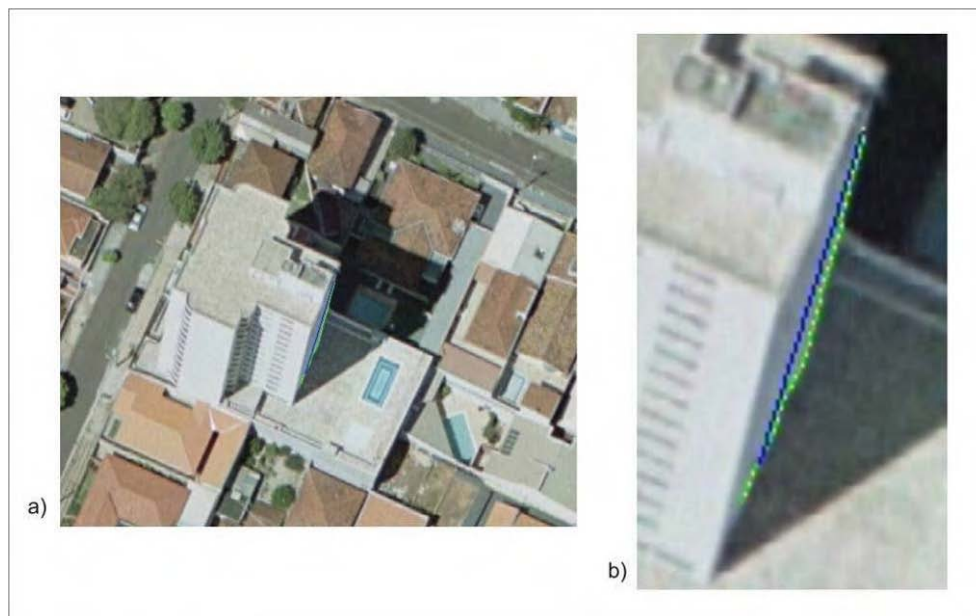
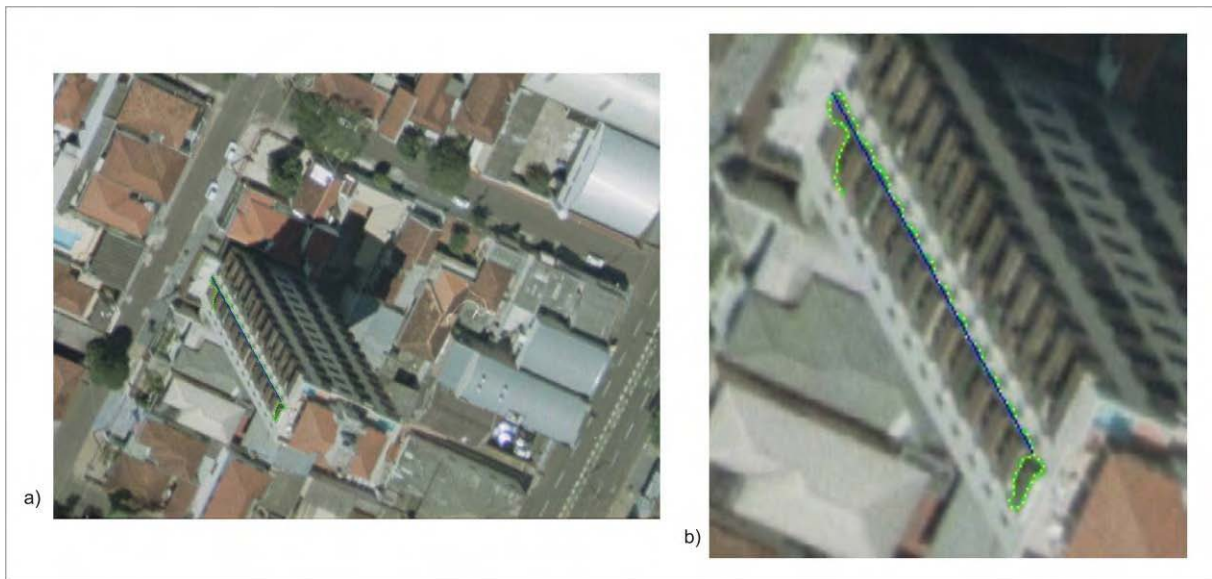


Figura 63 – a) Edifício representado na sub-imagem 13; b) Detalhe da aresta 13A.

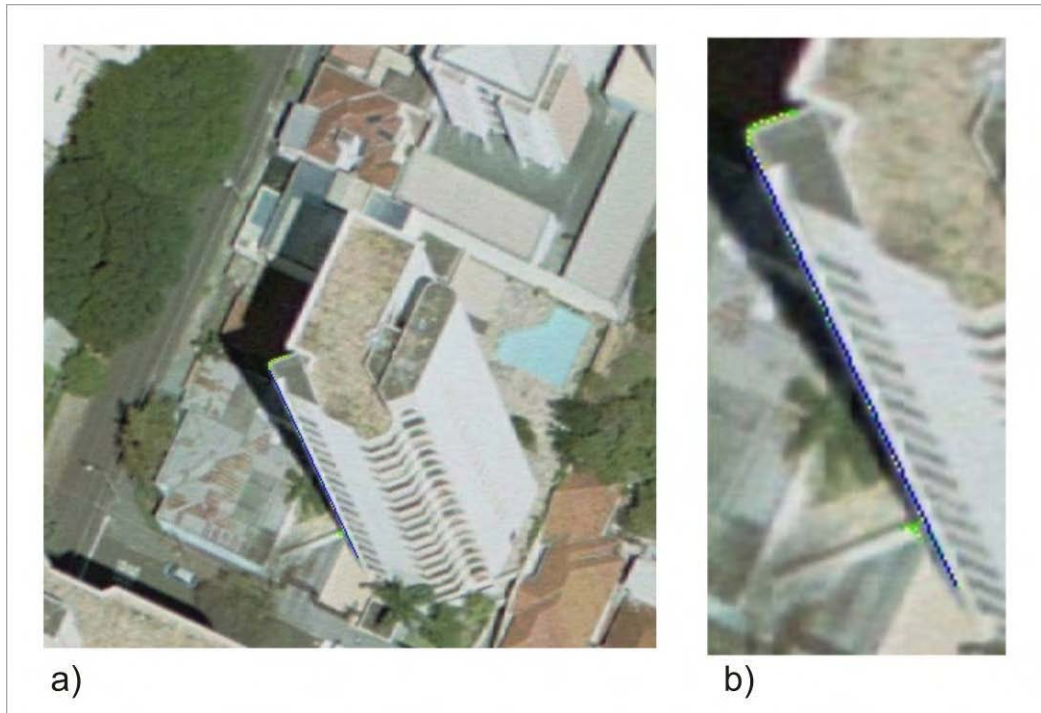
Na Figura 64 é mostrada a aresta extraída na sub-imagem 18. A Figura 64b mostra o detalhe desta sub-imagem com o resultado da extração de bordas formando uma feição fechada na extremidade inferior da aresta do edifício, o que prejudicou a determinação correta da aresta até o topo do edifício, faltando uma pequena extensão (aproximadamente o último andar do edifício).

Em relação à base do edifício não houve problemas, a qual é representada corretamente pela aresta definida pelo algoritmo.



**Figura 64 – a) Edifício na sub-imagem 18; b) Detalhe da aresta 18A.**

Na sub-imagem 21 (Figura 65b), o problema encontrado se deve ao fato da borda extraída não corresponder à toda extensão da lateral do edifício, faltando uma pequena extensão na extremidade inferior da borda (próximo da base do edifício).



**Figura 65 – a) Edifício da sub-imagem 21; b) Detalhe da aresta 21A.**

Na Figura 66 é apresentado o resultado da extração de aresta para a sub-imagem 24. De forma mais detalhada, na Figura 66b pode ser observado que a determinação da aresta do edifício apresentou uma correta representação da sua lateral.

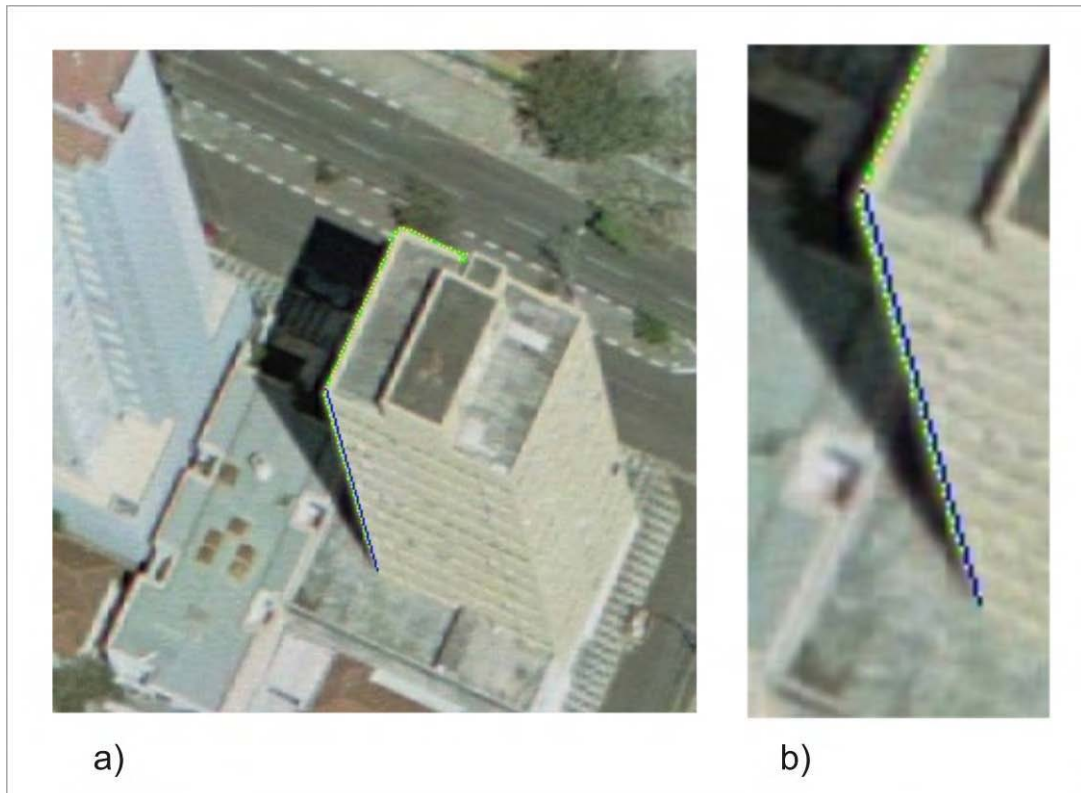
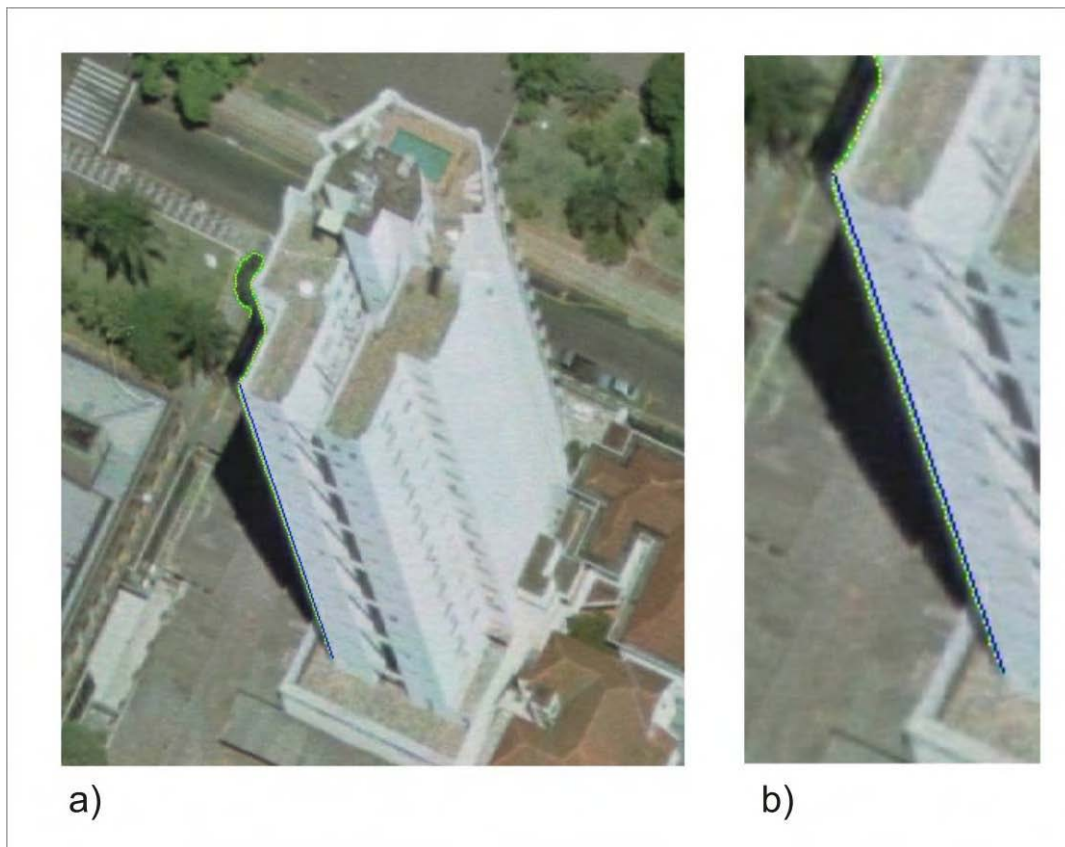


Figura 66 – a) Edifício na sub-imagem 24; b) Detalhe da aresta 24A

Entretanto, a aresta apresenta uma pequena inclinação com relação à borda. Isto pode ser explicado pelo fato do valor calculado para a Equação 42 (utilizada para o refinamento da seleção das arestas, seção 4.3.6) apresentar um valor melhor, a partir do par de pontos que definem a aresta, quando comparado com os valores obtidos com os outros pares de pontos analisados. Entretanto vale ressaltar que esta inclinação está dentro do intervalo de 2 pixels definido na etapa de seleção como critério de distância transversal com relação à borda (critério de proximidade).

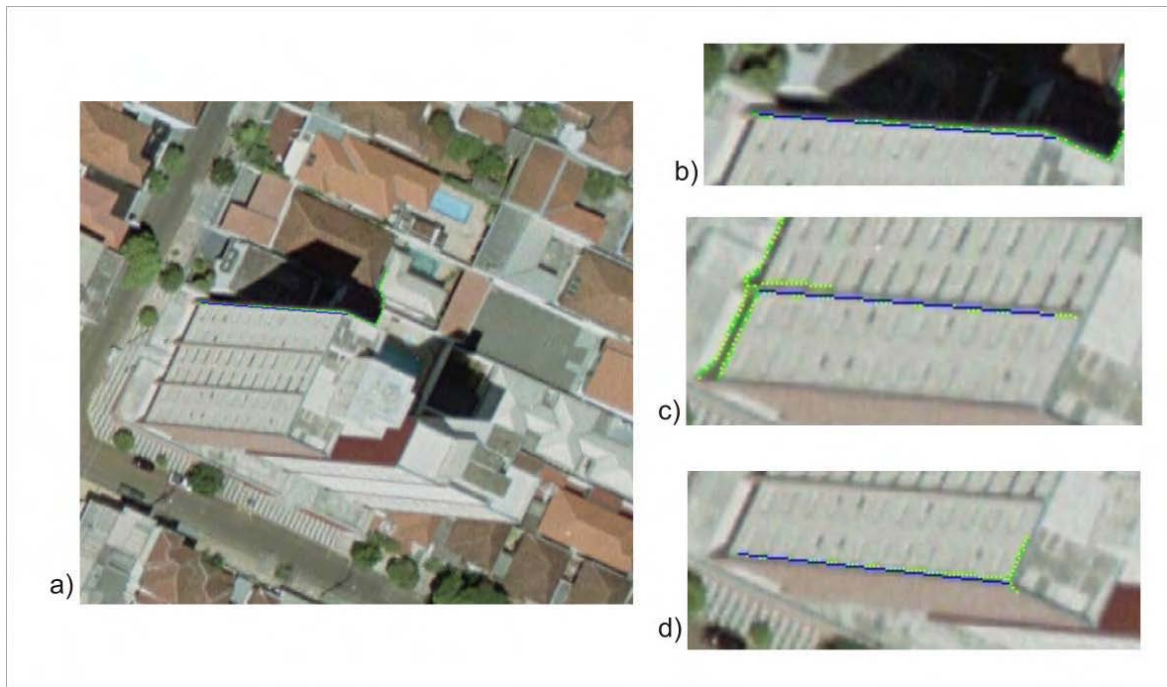
A aresta determinada na sub-imagem 26 (Figura 67) representa uma das arestas laterais do edifício presente na imagem.



**Figura 67 – a) Aresta determinada do edifício presente na sub-imagem 26; b) Detalhe da aresta 26A.**

Em sua parte superior, a aresta possui seu ponto extremo localizado corretamente no final da lateral do edifício. Na parte inferior a aresta não chega até a base, em decorrência da borda extraída não representar a lateral do edifício até o solo (Figura 67b). Entretanto, nota-se que o algoritmo possibilitou a seleção do segmento de reta pertencente à borda que melhor representava uma aresta lateral do edifício.

No caso da sub-imagem 20 (Figura 68), são mostradas 3 arestas determinadas para o edifício visualizado.

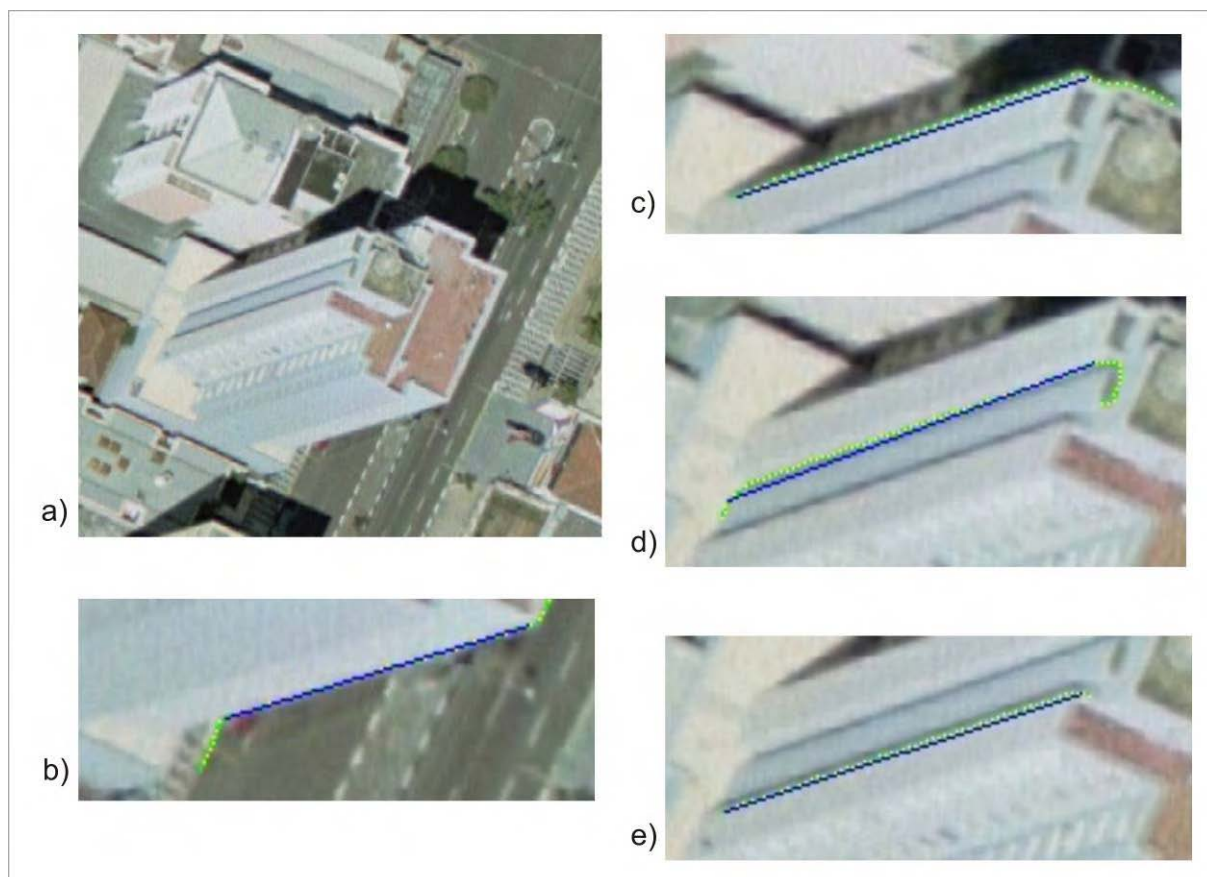


**Figura 68 – a) Edifício presente na sub-imagem 20; b) Detalhe da aresta 20A; c) Detalhe da aresta 20B; d) Detalhe da aresta 20C.**

Na Figura 68b é visualizada uma das arestas extraídas, a qual ultrapassou apenas uma pequena extensão no topo do edifício, tendo como extremidade um ponto na aresta do topo do edifício. Isto ocorreu devido à inclinação da aresta lateral e da aresta no topo do edifício formar um ângulo próximo de  $180^\circ$ , dificultando a determinação da intersecção entre as arestas pelos algoritmos implementados.

A aresta da Figura 68c também apresentou problemas na sua extremidade superior, pois o algoritmo não conseguiu extrair a aresta até o topo. Como em outros casos anteriores, isto ocorreu por causa do valor da Equação 42, o qual apresentou um melhor resultado para o par de pontos que definem a aresta. Na aresta mostrada na Figura 68d, ocorreu o contrário, ou seja, a aresta determinada apresentou problemas na base do edifício, onde faltou uma pequena extensão até a base do edifício. Entretanto, o que provocou este erro foi o processo de extração de bordas, o qual não gerou resultado nesta região.

Na Figura 69a é mostrado o edifício da sub-imagem 23. Na Figura 69b, uma das arestas foi extraída corretamente sobre o segmento de reta da borda que representa uma das laterais do edifício. Entretanto, esta borda não representa corretamente à lateral do edifício, e deste modo a aresta não corresponde à altura do edifício na sua totalidade.



**Figura 69 – a) Edifício da sub-imagem 23; b) detalhe da aresta 23A; c) detalhe da aresta 23B; d) detalhe da aresta 23C; e) detalhe da aresta 23D.**

A Figura 69c mostra uma aresta extraída corretamente a partir do segmento da borda que representa a lateral do edifício, sendo que a falha na representação da extremidade inferior (base do edifício) ocorreu pelo fato do processo de extração de borda não ter gerado resultado nesta região.

No caso da imagem da Figura 69d, a aresta selecionada apresentou uma pequena inclinação na extremidade da base do edifício, ocasionando a não coincidência dos pontos que definem a aresta com o pontos que definem a borda. Entretanto, esta diferença entre o traçado da aresta e da borda está dentro da

tolerância estabelecida de 2 *pixels*. Já a aresta determinada na imagem da Figura 69e não apresentou problemas, correspondendo corretamente a lateral do edifício.

Para a sub-imagem 27 (Figura 70), a borda extraída no pré-processamento representava duas arestas e parte da base do edifício (Figura 70a), tendo sido apenas uma destas arestas determinada (Figura 70b). Durante o processamento, as duas arestas foram analisadas, sendo escolhida aquela que apresentou o melhor resultado nos critérios de seleção (Equação 42).

Este caso mostra a necessidade de se implementar processos prevendo essas situações, de forma a melhorar a representação do edifício através de uma maior quantidade de arestas determinadas.

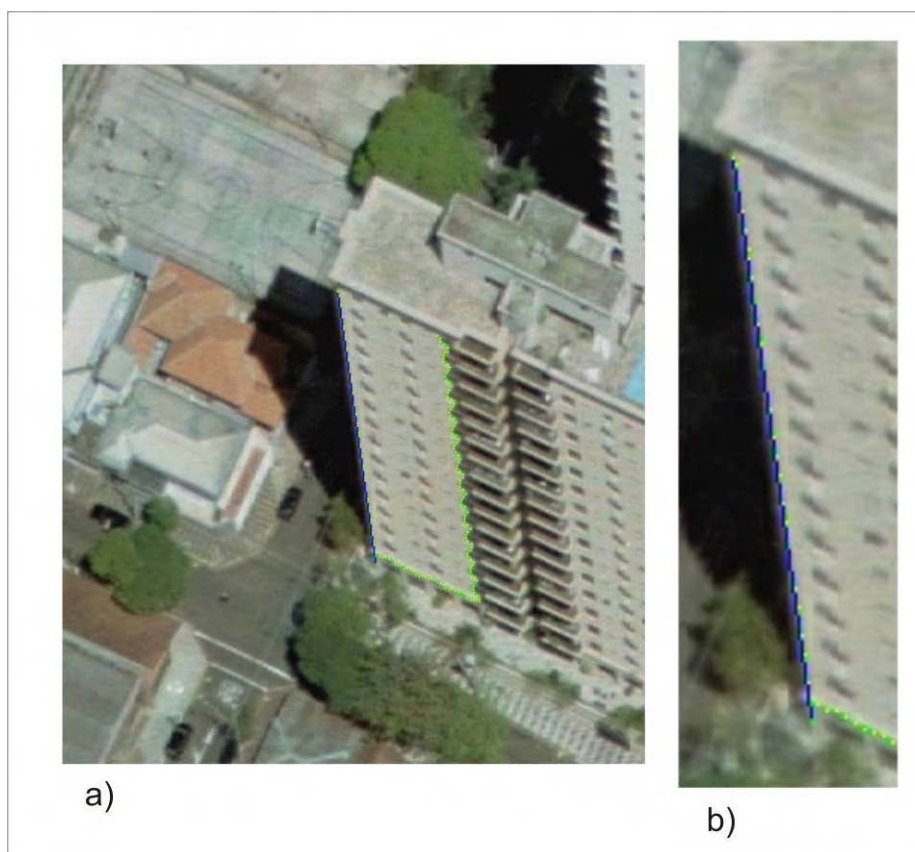


Figura 70 – a) Edifício representado na sub-imagem 27; b) Detalhe da aresta 27A.

Na Figura 71, a aresta foi definida a partir de uma borda de formato complexo, ou seja, composta de duas arestas conectadas, obtendo-se uma representação condizente da aresta lateral do edifício, faltando apenas pequenas extensões nas duas extremidades da aresta. Este caso é parecido com o da Figura

70, pois uma mesma borda corresponde à duas arestas laterais do edifício (Figura 71b). Especificamente nesta aresta, o segmento de reta da borda selecionado como aresta não era o melhor resultado, numa comparação visual com o outro segmento de reta contido na borda, e que também representa uma aresta do edifício. Entretanto, a seção selecionada da borda como aresta apresentou resultado numérico melhor nos critérios de seleção.

Isso mostra que a metodologia precisa ser melhorada, com o intuito de evitar estas situações, e conseguir melhores resultados.

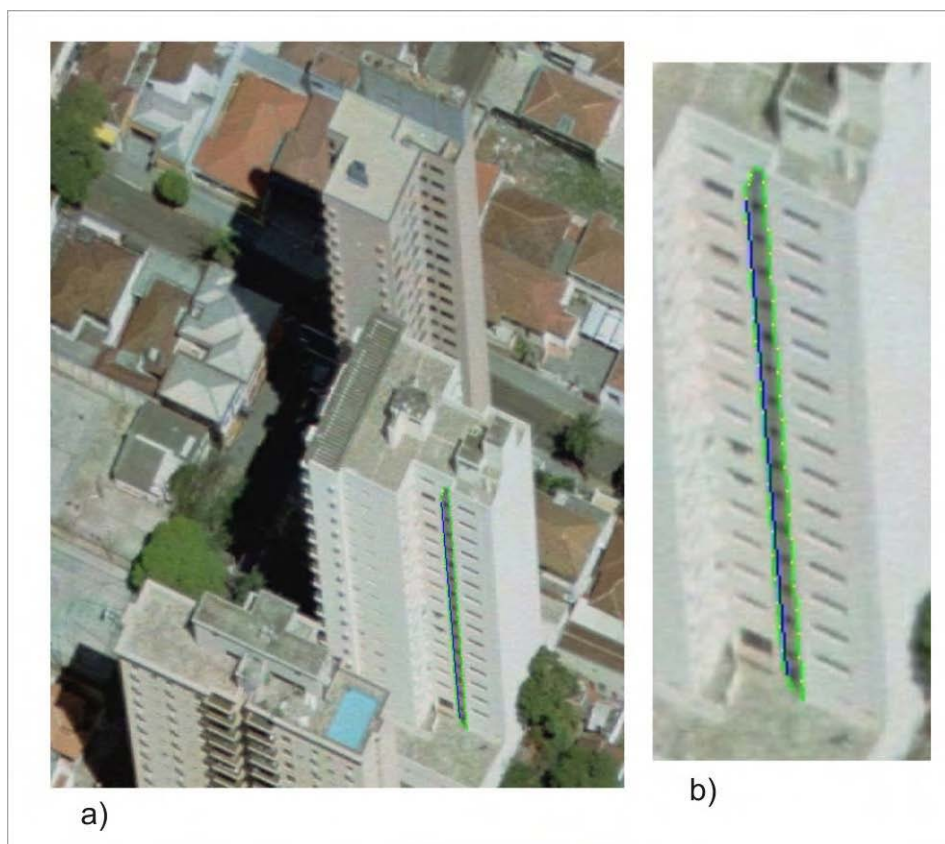
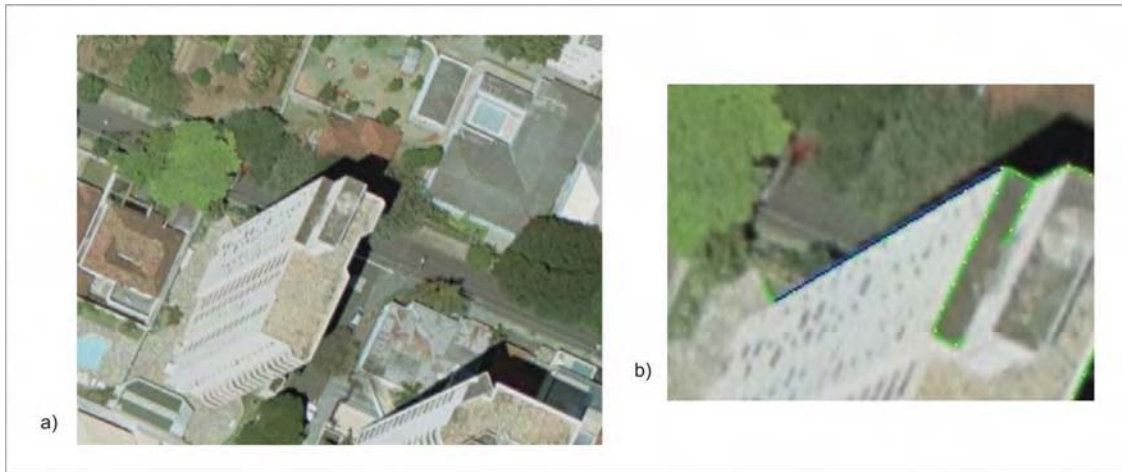


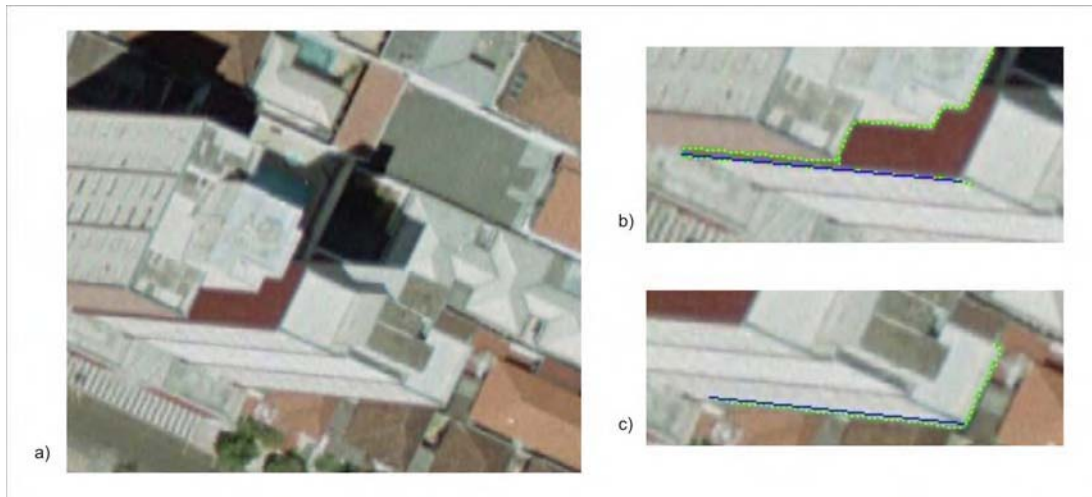
Figura 71 – a) Sub-imagem 28; b) Detalhe da aresta 28A determinada.

Na Figura 72a é observado o edifício presente na sub-imagem 22, enquanto que na imagem da Figura 72b pode-se observar que a aresta determinada compreende somente o segmento da borda que representa a lateral do edifício. Entretanto esta borda não corresponde à toda a extensão lateral do edifício, faltando uma pequena distância até o solo.



**Figura 72 – a) Sub-imagem 22; b) Detalhe da aresta determinada.**

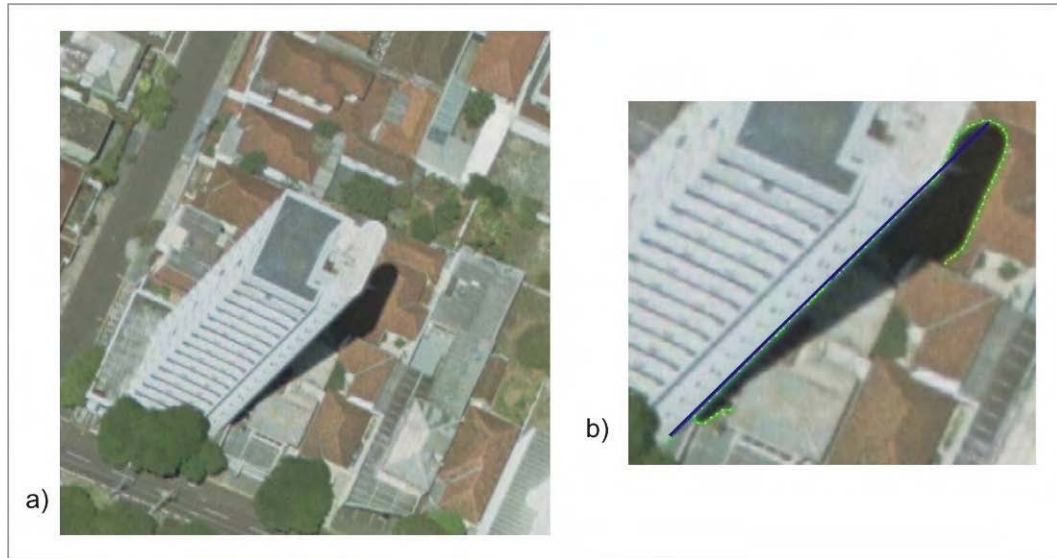
A Figura 73a mostra o edifício da sub-imagem 29. Já pela Figura 73b observa-se a primeira aresta determinada, a qual corresponde corretamente ao segmento da borda representando a lateral do edifício.



**Figura 73 – a) Sub-imagem 29; b) Detalhe da aresta 29A determinada; c) Detalhe da aresta 29B determinada.**

Pela imagem da Figura 73c nota-se que a aresta determinada também delimita de forma correta o segmento da borda que representa a aresta lateral do edifício, sendo que esta borda também representava uma feição no topo do edifício.

Na Figura 74a observa-se a o edifício da sub-imagem 14, enquanto que na Figura 74b é visualizada, com maior detalhe, a aresta determinada para umas das laterais do edifício.



**Figura 74 – a) Sub-imagem 14; b) Detalhe da aresta 14A determinada.**

Nota-se que a aresta apresentou um prolongamento em sua extremidade superior, ultrapassando a lateral do edifício representado. Neste caso, o algoritmo selecionou como ponto extremo da aresta um dos pontos do segmento curvo da borda extraída, com o qual se obteve o maior segmento de reta disposto radialmente. A aresta foi selecionada, pois apresentou 86,86% dos seus *pixels* abaixo do limiar estabelecido para o critério de distância vertical.

Para uma comparação dos resultados alcançados com a metodologia foi realizada a extração manual dos pontos extremos das mesmas arestas determinadas automaticamente. Os valores provenientes das medições automáticas e manuais das arestas determinadas (coordenadas dos pontos extremos das arestas selecionadas) podem ser observados no Anexo A. Na Tabela 1 estão dispostos os valores de  $r$  e  $dr$  (Equação 22) em relação à medidas manuais e automáticas, assim como a diferenças entre os dois modos de medidas.

**Tabela 1 – Comparação entre os pontos extremos das arestas selecionadas de modo automático e manual.**

Edifício/Aresta	Medida Manual (milímetros)		Medida Automática (milímetros)		$\Delta r = r_m - r_a$ (milímetros)	$\Delta dr = dr_m - dr_a$ (milímetros)
	$r_m$	$dr_m$	$r_a$	$dr_a$		
1A	82,4899	3,0880	82,289	2,7389	0,201	-0,3492
2A	62,9803	2,5241	62,941	2,3377	0,039	-0,1864
2B	62,6105	2,7633	62,618	2,5691	-0,008	-0,1941
2C	62,5971	2,9124	62,636	2,6888	-0,039	-0,2236
3A	52,4813	2,3627	52,733	2,3682	-0,252	0,0055
4A	92,0306	3,5461	92,117	3,6155	-0,087	0,0694
4B	91,6692	3,4817	91,669	3,3676	0,000	-0,1141
4C	91,5334	3,5859	91,424	3,3849	0,109	-0,2010
5A	111,5177	6,6724	111,230	6,4290	0,218	-0,2434
5B	111,6381	6,8892	111,686	7,4170	-0,048	0,5278
8A	71,9500	3,3200	71,920	3,2500	0,030	-0,0700
14A	92,131	4,2429	93,065	5,0559	-0,933	0,8130
18A	132,6150	4,1660	132,480	4,0106	0,135	-0,1554
20A	90,2497	2,8370	90,362	2,9495	-0,112	0,1124
20B	89,5972	2,8202	89,346	2,5694	0,251	-0,2508
20C	89,3059	2,8419	89,310	2,7172	-0,005	-0,1247
21A	67,7264	3,2804	67,960	3,1288	-0,234	-0,1516
22A	66,6380	2,7102	66,664	2,4926	-0,026	-0,2175
23A	72,8581	2,4798	72,843	2,0881	0,015	-0,3918
23B	72,3522	2,7953	72,352	2,5453	-0,078	-0,2501
23C	72,120	2,8079	72,045	2,7961	0,079	-0,0119
23D	72,1458	2,8333	72,042	2,6721	0,387	-0,1612
24A	68,8002	2,0192	68,839	2,0040	-0,038	-0,0152
26A	110,2973	4,1013	110,354	4,0286	-0,057	-0,0727
27A	102,1920	3,7350	102,152	3,7944	0,040	0,0595
28A	104,4946	4,6082	104,238	4,2136	0,256	-0,3946
29A	91,5215	2,9294	91,611	3,0558	-0,085	0,1264
29B	94,1122	3,1573	94,112	2,8458	-0,330	-0,3114
<b>Média</b>					<b>-0,009</b>	<b>-0,085</b>
<b>Desvio Padrão</b>					<b>0,231</b>	<b>0,259</b>
<b>Maior Valor</b>					<b>0,387</b>	<b>0,813</b>

Na Figura 75 observa-se gráfico relativo aos valores calculados para  $\Delta r$ , enquanto que pela Figura 76 é observado os valores relativos a  $\Delta dr$ .

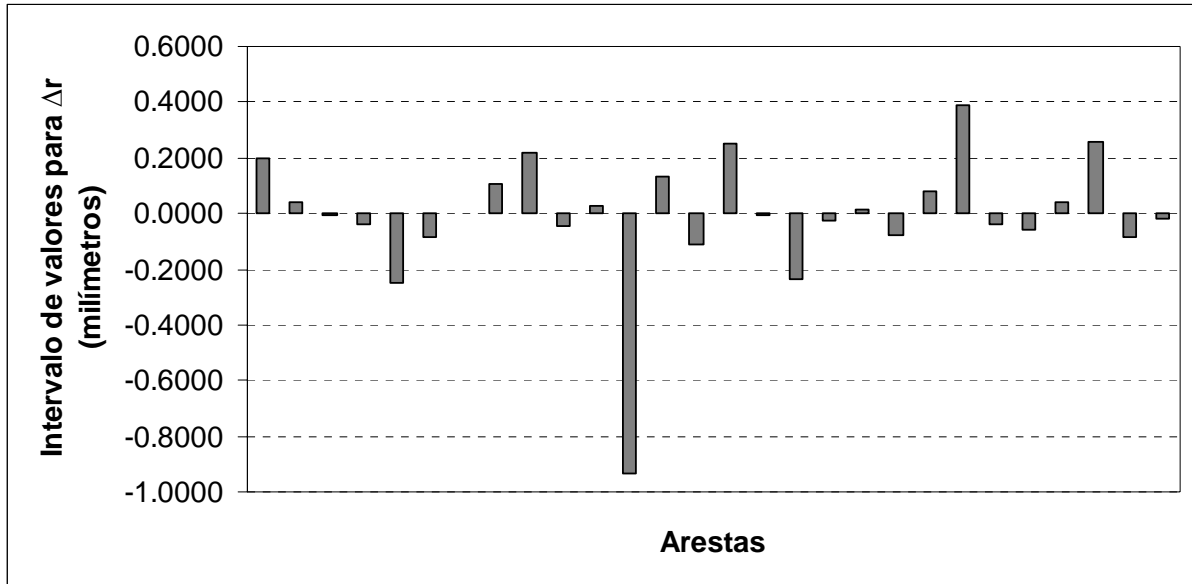


Figura 75 – Gráfico referente aos valores calculados para  $\Delta r$ .

Conforme é visto no gráfico da Figura 76 os valores de  $\Delta r$  apresentam valores mais distribuídos entre negativos e positivos, sendo que o pico negativo está relacionado com o problema ocorrido no edifício da sub-imagem 14, conforme foi visto na Figura 74.

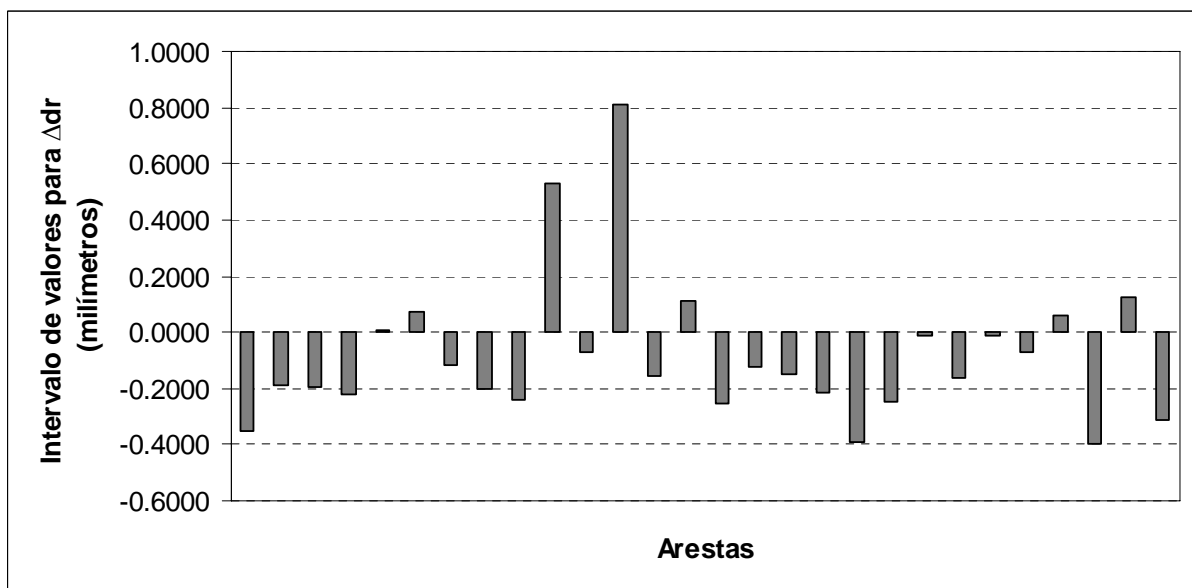


Figura 76 – Gráfico referente aos valores calculados para  $\Delta r$ .

Pelo gráfico da Figura 76 observa-se que as diferenças dos resultados obtidos para a distância  $\Delta dr$  concentram-se em valores negativos, diferentemente do que foi observado em relação aos valores de  $\Delta r$ , sendo que o pico dos valores positivos referente à aresta 5B (sub-imagem 5) vista na Figura 61b.

Para analisar os resultados obtidos através das diferenças nos cálculos de  $r'$  e  $r$ , obtidos a partir de medidas manuais e automáticas, foi realizada a propagação de erros. Para esse cálculo foi considerado um erro de pontaria na medida dos pontos extremos dessas arestas da ordem de  $\pm 2$  pixels (equivalente à  $\sigma_x = \sigma_y = \pm 0,0418\text{mm}$ ) tanto para a componente x como para y, em relação às Equações 43 e 44 que definem os valores de  $r'$  e  $r$ . Também foram utilizados os valores posicionais, dos pontos extremos, referentes à aresta determinada para o edifício localizado na maior distância radial em relação ao ponto principal.

Como são considerados os mesmo valores de  $\sigma_x$  e  $\sigma_y$  tanto para o cálculo dos erros em  $r'$  e  $r$ ,  $\sigma_{r'}$  e  $\sigma_r$  irão resultar em valores iguais. Deste modo, será exposto o cálculo da propagação de erros para o caso da distância  $r$ , a qual é dada através da Equação 45.

$$\Sigma_r = D * \Sigma_{xy} * D = \begin{bmatrix} \frac{\partial r}{\partial x} & \frac{\partial r}{\partial y} \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} \sigma_x^2 & 0 \\ 0 & \sigma_y^2 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} \frac{\partial r}{\partial x} \\ \frac{\partial r}{\partial y} \end{bmatrix} \quad (45)$$

onde:

$\Sigma_r$  – valor da variância de  $r$ ;

$\sigma_x$  e  $\sigma_y$  – são os valores para o desvio padrão da componente x e y, respectivamente;

$\frac{\partial r}{\partial x}$  – derivada da equação de  $r$  ( $r = \sqrt{x^2 + y^2}$ ) em relação à x;

$\frac{\partial r}{\partial y}$  – derivada da equação de  $r$  em relação à y.

Desenvolvendo as derivadas na Equação 45 obtém-se:

$$\Sigma_r = \begin{bmatrix} \frac{2x}{2\sqrt{x^2 + y^2}} & \frac{2y}{2\sqrt{x^2 + y^2}} \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} \sigma_x^2 & 0 \\ 0 & \sigma_y^2 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} \frac{2x}{2\sqrt{x^2 + y^2}} \\ \frac{2y}{2\sqrt{x^2 + y^2}} \end{bmatrix} \quad (46)$$

Substituindo os valores na Equação 46 obtém-se o seguinte resultado para a variância de r:  $\Sigma_r = \sigma_r^2 = 0,0017\text{mm}$ . Deste modo, tem-se para o desvio padrão de r' e r o valor de  $\sigma_{r'} = \sigma_r = 0,0418\text{mm}$ , mostrando ser proporcional com o erro admitido no posicionamento dos pontos extremos das arestas.

Numa comparação deste resultado com o desvio padrão relativo ao valor de  $\Delta r = 0,231\text{mm}$  disposto na Tabela 1, mostra que os erros referentes às arestas determinadas foram 5,5 vezes maiores.

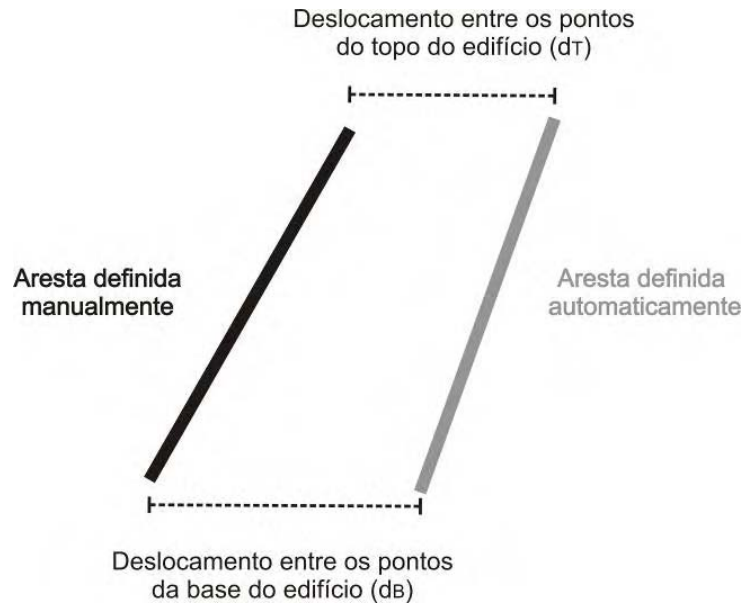
Na Tabela 2 estão dispostos outros valores estimados para  $\sigma_{r'}$  em relação a diferentes valores de  $\sigma_{xy}$ .

**Tabela 2 – Valores calculados para  $\sigma_{r'}$  a partir de diferentes valores de  $\sigma_{xy}$ .**

$\sigma_{xy}$ (pixels)	$\sigma_{r'}$ (milímetros)
1	0,021
2	0,042
3	0,063
4	0,084
5	0,105
6	0,125
7	0,146
8	0,167
9	0,188
10	0,209
11	0,230
12	0,251

Pelos dados apresentados na Tabela 2 observa-se que o valor de  $\sigma_r = 0,231\text{mm}$  obtido nos testes realizados estaria relacionado com o valor de  $\sigma_{xy} = 11$  pixels.

Na Tabela 3 apresenta os valores dos deslocamentos, em pixels, dos pontos extremos das arestas selecionadas manualmente em relação método automático proposto. Pela Figura 77 pode ser mais bem entendido como foram mensurados esses deslocamentos.



**Figura 77 – Exemplo do deslocamento medido entre os pontos extremos das arestas selecionadas de forma manual e automática.**

**Tabela 3 – Deslocamento dos pontos extremos das arestas obtidas de forma manual e automática.**

Edifício/Aresta	$d_B$ ( <i>pixels</i> )	$d_T$ ( <i>pixels</i> )
1A	7,177	9,617
2A	7,113	1,914
2B	9,864	1,914
2C	12,586	1,913
3A	11,817	12,301
4A	1,353	4,411
4B	5,601	0
4C	4,411	5,263
5A	1,353	11,005
5B	23,283	3,209
8A	1,914	1,435
14A	5,840	44,705
18A	3,383	10,228
20A	0	5,601
20B	0	11,999
20C	6,220	2,392
21A	18,481	11,373
22A	12,632	1,435
23A	18,011	1,069
23B	15,782	4,411
23C	4,712	4,411
23D	18,928	24,453
24A	2,577	1,914
26A	6,293	2,871
27A	4,785	1,914
28A	6,767	12,586
29A	2,139	4,514
29B	15,789	1,725
<b>Média</b>	<b>8,172</b>	<b>7,164</b>
<b>Desvio Padrão</b>	<b>6,486</b>	<b>9,128</b>
<b>Maior Valor</b>	<b>23,283</b>	<b>44,705</b>

Conforme mostra os valores da Tabela 3, o deslocamento médio dos pontos na base das arestas e o deslocamento médio dos pontos no topo apresentaram resultados próximos, com pouco mais de um *pixel* de diferença. Entretanto, quando se observa o desvio padrão nota-se uma maior tendência de deslocamento nos pontos que definem o topo das arestas dos edifícios.

Na Figura 78 observa-se o gráfico referente às distâncias mostradas na Tabela 3, com o qual se percebe que as maiores distâncias estão relacionadas com os pontos que definem a sua base das arestas.

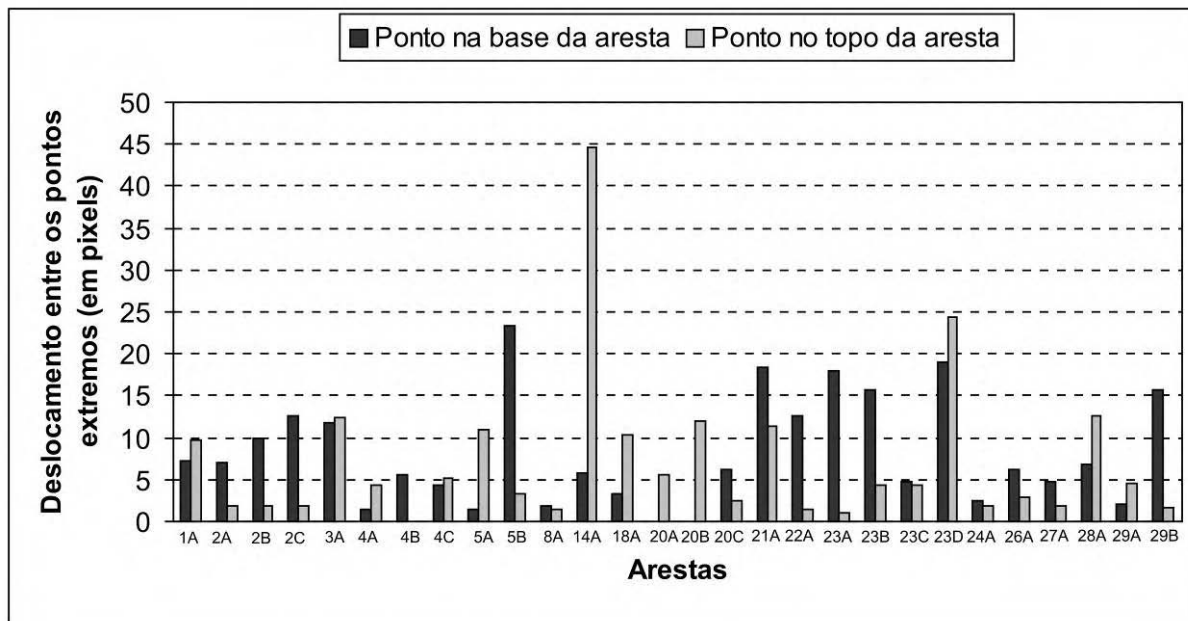


Figura 78 – Gráfico dos deslocamentos em relação aos pontos extremos das arestas obtidos de forma manual com seus respectivos pontos obtidos automaticamente.

Conforme foi visto no gráfico da Figura 78 o maior deslocamento entre os resultados relacionados com o ponto que define a base do edifício ocorreu na aresta B da sub-imagem 5 (Figura 61). Já em relação ao maior deslocamento relacionado com o ponto no topo do edifício, esta foi observada na aresta selecionada para o edifício da sub-imagem 14 (Figura 74).

### 5.2.3 Cálculo da Altura dos Edifícios a partir das Arestas Selecionadas

Com as arestas selecionadas realizou-se o cálculo da altura ( $\Delta h$ ) dos seus respectivos edifícios, sendo necessário o valor da altura de vôo, o qual foi obtida através da subtração da altitude do CP da câmara pela altitude média do terreno. O valor da altitude de vôo da fotografia analisada foi de 1663,981m, o qual apresentou uma acurácia da ordem de 0,194m na sua determinação por processo de triangulação (PRADO, 2006).

Na Tabela 4 estão dispostos os valores das alturas calculadas pela metodologia proposta para cada edifício cujas arestas foram identificadas nas sub-

imagens de uma fotografia aérea (região central de Presidente Prudente). Também estão dispostos os valores das alturas calculadas com base na extração manual destas arestas (pontos de base e topo).

**Tabela 4 – Alturas calculadas dos edifícios através da extração automática e manual das arestas.**

Edifício/Aresta	Altura obtida automaticamente ( $h_a$ ) (metros)	Altura obtida manualmente ( $h_m$ ) (metros)	Diferença ( $h_a - h_m$ ) (metros)	Diferença em percentual com relação aos valores obtidos manualmente
1A	41,025	46,555	-5,530	-11,88%
2A	46,542	49,456	-2,914	-5,89%
2B	50,628	54,461	-3,833	-7,04%
2C	53,110	57,412	-4,302	-7,49%
3A	55,396	56,031	-0,635	-1,13%
4A	48,438	47,656	-0,782	-1,64%
4B	45,331	46,867	-1,536	-3,28%
4C	45,962	48,342	-2,380	-4,92%
5A	71,278	73,833	-2,554	-3,46%
5B	71,280	74,344	-3,064	-4,12%
8A	56,161	56,193	-0,032	-0,06%
14A	67,113	56,829	10,284	18,10%
18A	35,656	38,501	-2,845	-7,39%
20A	40,241	39,662	0,579	1,46%
20B	36,865	38,246	-1,381	-3,61%
20C	37,617	38,442	-0,825	-2,15%
21A	56,509	55,383	1,126	2,03%
22A	46,140	50,186	-4,046	-8,06%
23A	36,454	42,466	-6,012	-14,16%
23B	44,555	46,863	-2,308	-4,92%
23C	47,994	48,043	-0,049	-0,10%
23D	45,949	48,460	-2,511	-5,18%
24A	35,969	35,488	0,481	1,35%
26A	45,125	45,620	-0,495	-1,08%
27A	45,824	44,766	1,058	2,36%
28A	49,936	53,612	-3,676	-6,86%
29A	41,189	39,497	1,692	4,28%
29B	37,344	41,405	-4,061	-9,81%

O valor médio das diferenças entre as alturas, mostradas na Tabela 4, foi de -1,422m e o desvio padrão apresentou um valor de 3,425m. A menor diferença, em valor absoluto, apresentou um valor de 0,032m, obtido para a diferença de alturas em relação à aresta A do edifício da sub-imagem 8. Já a maior diferença, também em valor absoluto, foi de 10,21m para o caso do edifício da sub-imagem 14.

Na Figura 79 é mostrado o gráfico dos valores destas diferenças entre as alturas.

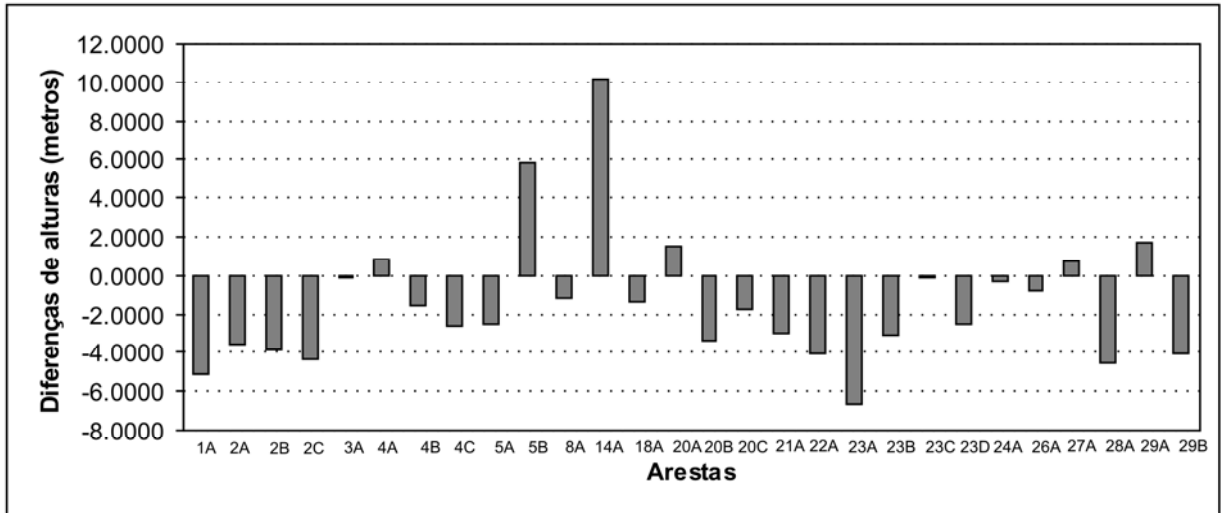


Figura 79 – Gráfico das diferenças de alturas calculadas.

Pela Tabela 4 também se observa que a maior freqüência das diferenças de alturas ocorreu com valores negativos. Para os valores referentes às porcentagens das diferenças em relação aos valores obtidos manualmente tem-se o valor médio de -3,17% e desvio padrão da ordem de 6,56%.

Com o intuito de se analisar a qualidade dos resultados na determinação automática das alturas dos edifícios foi feita a propagação de erros no cálculo de  $\Delta h$  (vista na Equação 22).

$$\Sigma_{\Delta h} = D * \Sigma_{Zr'} * D = \begin{bmatrix} \frac{\partial r}{\partial Z} & \frac{\partial r}{\partial r} & \frac{\partial r}{\partial r'} \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} \sigma_z^2 & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_r^2 & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_{r'}^2 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} \frac{\partial r}{\partial Z} \\ \frac{\partial r}{\partial r} \\ \frac{\partial r}{\partial r'} \end{bmatrix} \quad (47)$$

onde:

$\Sigma_{\Delta h}$  – valor da variância de da altura do edifício;

$\sigma_z$  – desvio padrão da altura de vôo;

$\frac{\partial \Delta h}{\partial Z}$  – derivada da equação de  $\Delta h$  (Equação 22) em relação à  $Z$ ;

$\frac{\partial \Delta h}{\partial r}$  – derivada da equação de  $\Delta h$  (Equação 22) em relação à  $r$ ;

$\frac{\partial \Delta h}{\partial r'}$  – derivada da equação de  $\Delta h$  em relação à  $r'$ .

Desenvolvendo as derivadas na Equação 47 obtém-se a seguinte expressão:

$$\Sigma_{\Delta h} = \begin{bmatrix} \frac{r-r'}{r} & \frac{Zr'}{r^2} & \frac{-Z}{r} \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} \sigma_z^2 & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_r^2 & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_{r'}^2 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} \frac{r-r'}{r} \\ \frac{Zr'}{r^2} \\ \frac{-Z}{r} \end{bmatrix} \quad (48)$$

No cálculo da Equação 48 foram utilizados os valores obtidos através da Equação 46 para  $\sigma_{r'}$  e  $\sigma_r$ , sendo que para  $\sigma_z$  foram considerados valores entre 5 e 35 m (variando de 5 em 5m). Na Tabela 5 estão dispostos os resultados obtidos para  $\sigma_{\Delta h}$  em relação aos diferentes valores de  $\sigma_z$  utilizados.

**Tabela 5 – Estimativa de  $\sigma_{\Delta h}$  para diferentes valores  $\sigma_z$ .**

$\sigma_z$ (metros)	$\sigma_{\Delta h}$ (metros)
5	0,562
10	0,615
15	0,693
20	0,790
25	0,899
30	1,078
35	1,142

Pelos dados estimados na Tabela 5 percebe-se que a variação do valor de  $\sigma_z$  tem pouca influência em na composição de  $\sigma_{\Delta h}$ , sendo que variando o valor de  $\sigma_z$  em 30m acarretou numa mudança de 0,58m no valor de  $\sigma_{\Delta h}$ .

Na realização do cálculo das alturas dos edifícios considerou-se  $\sigma_z$  como sendo igual à 30m, já incluídos os erros referentes à altitude do CP da

fotografia. A determinação do valor de  $\sigma_z$  foi obtida através da medida de pontos cotados, em carta topográfica na escala 1:2000, localizados na região representada na fotografia, sendo que estes pontos apresentaram valores altimétricos entre 406,5m e 473,0m. Conseqüentemente, o valor a altura de vôo apresenta uma variação de aproximadamente 66,3m e por este motivo determinou-se nos experimentos  $\sigma_z = 30m$ .

Em relação aos dados obtidos com o cálculo da diferença entre medidas manuais e automáticas das arestas selecionadas (Tabela 4), o resultado  $\sigma_{\Delta h} = 3,425m$  encontra-se 3,2 vezes acima do seu respectivo valor disposto na Tabela 5, ou seja, considerando  $\sigma_z = 30m$  tem-se  $\sigma_{\Delta h} = 1,078m$ .

Entretanto, esta diferença na qualidade das alturas se deve principalmente à qualidade na determinação das arestas, pois conforme foi visto na Tabela 4 os valores obtidos para  $\sigma_{r'}$  e  $\sigma_r$  equivalem à 11 *pixels*. Deste modo, realizando a propagação de erros em  $\sigma_{\Delta h}$  e considerando estes valores de 11 *pixels*, e novamente  $\sigma_z = 30m$ , resultaria em:  $\sigma_{\Delta h} = 3,116m$ . Nota-se por estes valores que a determinação das arestas tem uma maior participação nos erros em  $\sigma_{\Delta h}$  do que o erro proveniente da altura de vôo.

Pela Tabela 6 observa-se a influência nos valores de  $\sigma_{\Delta h}$  através da variação da precisão na determinação dos pontos extremos das arestas, tendo sido considerado  $\sigma_z = 30 m$ .

**Tabela 6 – Influência da variação de  $\sigma_{xy}$  em  $\sigma_{r'}$  e  $\sigma_{\Delta h}$**

$\sigma_{xy}$ ( <i>pixels</i> )	$\sigma_{r'}$ (milímetros)	$\sigma_{\Delta h}$ (metros)
1	0,021	0,903
2	0,042	1,018
3	0,063	1,186
4	0,084	1,387
5	0,105	1,609
6	0,125	1,844
7	0,146	2,088
8	0,167	2,339
9	0,188	2,594
10	0,209	2,851
11	0,230	3,116
12	0,251	3,374

Também foi realizada a comparação entre os valores das alturas obtidas pela metodologia com as alturas calculadas através da extração manual de coordenadas 3D do topo e da base de quatro edifícios, por meio de restituição em

estação fotogramétrica (LPS – *Leica Photogrammetry Suite*). Como a fotografia aérea analisada está situada no final da faixa, esta formava um modelo estereoscópico apenas com mais uma fotografia. Com isto, não foi possível o cálculo da altura de todos os edifícios que tiveram sua altura determinada automaticamente pela metodologia. Na Tabela 7 são observados os valores dos dados obtidos com essa comparação.

**Tabela 7 – Comparação entre os valores calculados automaticamente e os medidos por meio de restituição em estação fotogramétrica digital.**

Sub-Imagem/Edifício	Altura ( $h_a$ ) calculada automaticamente (m)	Altura ( $h_r$ ) medida por restituição (m)	$dh = h_a - h_r$ (m)
1	41,025	50,200	-9,175
2*	46,542	47,850	-1,308
3	55,396	54,900	0,496
4	48,438	50,100	-1,662
18	35,656	40,400	-4,744
20*	40,241	41,000	-0,759
23*	47,994	52,600	-4,606
24	35,959	40,200	-4,244
27	45,824	48,400	-2,576
28	49,936	49,000	0,936
<b>Média</b>			<b>-2,831</b>
<b>Desvio Padrão</b>			<b>2,922</b>
<b>Maior diferença</b>			<b>-9,175</b>

\*Casos em que houve a detecção de mais de uma aresta, tendo sido utilizado o valor mais próximo do valor obtido na restituição.

Como mostra a Tabela 7, a diferença média entre as alturas ficou em torno de -2,83m com um desvio padrão de 2,92m.

A Tabela 8 mostra a variação (em porcentagem) das diferenças mostradas na Tabela 7 em relação aos valores das alturas obtidos por meio de restituição.

**Tabela 8 – Porcentagem de  $dh$  em relação a  $h_m$ .**

Sub-Imagem/Edifício	$dh$ (m)	$h_r$ (m)	%
1	-9,175	50,200	-18,28
2	-1,308	47,850	-2,73
3	0,496	54,900	0,90
4	-1,662	50,100	3,32
18	-4,744	40,400	-11,74
20*	-0,759	41,000	-1,85
23*	-4,606	52,600	-8,76
24	-4,244	40,200	-10,56
27	-2,576	48,400	5,32
28	0,936	49,000	1,91
<b>Média</b>			<b>-4,247</b>
<b>Desvio Padrão</b>			<b>7,707</b>
<b>Maior %</b>			<b>-18,28</b>

Nas Figuras 80 e 81 são mostrados dois casos particulares (sub-imagens 11 e 15, respectivamente), onde houve uma seleção errônea de aresta em cada sub-imagem. As bordas de duas feições foram extraídas como sendo arestas de edifícios, mas na realidade se tratavam de outros tipos de feições presentes nas proximidades dos edifícios presentes nas sub-imagens. Na primeira, a borda representa o telhado de uma casa, enquanto que a outra borda está relacionada com o alinhamento de uma quadra. Em ambas as imagens, as arestas determinadas estão circuladas em vermelho.



**Figura 80 – Aresta radial extraída na sub-imagem 11.**

Conforme é observado na Figura 80, a aresta extraída (em azul) corresponde ao telhado de uma casa, o qual tem suas arestas dispostas de forma radial, exatamente como as arestas do edifício localizado do seu lado esquerdo.



**Figura 81 – Aresta radial identificada na sub-imagem 15.**

Na Figura 81, observa-se que a aresta extraída (azul) na sub-imagem 15 representa uma parte da aresta definida por uma quadra, a qual está orientada radialmente, da mesma maneira que as arestas do edifício presente na cena.

## 6 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

A geração automática da informação altimétrica de edifícios, através técnicas de PDI e conceitos de Fotogrametria pode ser de grande utilidade na estimativa de modelos do terreno, geração de *true-orthophotos*, além do uso para o refinamento do processo de determinação de pontos homólogos (correlação de imagens).

De uma maneira geral, a metodologia apresentada neste trabalho se mostrou viável para determinação da borda que definem os edifícios em imagens aéreas. Entretanto, são necessários mais estudos para solucionar alguns problemas observados nos experimentos.

A redução do espaço de busca através da extração das regiões de sombra se mostrou satisfatória. O fato de serem extraídas áreas de vegetação como sendo de sombra não produziu dados equivocados na etapa de determinação das arestas de edifícios, quando estas sub-imagens foram processadas. O processo de extração de bordas das sub-imagens tem grande influência na aplicação desta metodologia, pois todos os processos de determinação das arestas dos edifícios são realizados a partir destas bordas. Deste modo, o desempenho da metodologia fica sujeito à qualidade desta etapa, afetando diretamente a estimativa da altura dos edifícios.

Apesar da complexidade da tarefa de extrair feições específicas em imagens aéreas, houve poucos casos em que as bordas de duas feições foram identificadas como sendo edifícios, mas na realidade não eram. Nestes dois casos, as feições selecionadas encontravam-se dispostas de forma radial.

Conforme foi visto nos experimentos, a comparação entre os valores das alturas obtidos pelo procedimento proposto com os valores das alturas medidas manualmente indicam que a metodologia possui potencial. Foi obtida uma diferença média de -1,422m e um desvio padrão de 3,425m (considerando  $\sigma_z = 30\text{m}$ ) na comparação dos valores provenientes de medidas manuais e automáticas. Estes valores correspondem, respectivamente, à uma diferença média de -4,25% na altura dos edifícios e um desvio padrão da ordem de 7,71%. Deste modo, os resultados indicam que são necessárias mais pesquisas e testes a fim de que se possa melhorar a qualidade dos resultados.

Como recomendação para trabalhos futuros sugere-se:

- Implementação de algoritmos para a extração das áreas com vegetação para removê-las do processamento, de forma que não sejam geradas sub-imagens a partir de sombras relacionadas com vegetação;
- Refinamento do processo de extração das arestas laterais dos edifícios;
- Devido ao emprego de técnicas de crescimento de regiões (rotulação) em imagens de alta resolução espacial, seria interessante utilizar técnicas de pirâmides de imagens, principalmente na etapa de redução do espaço de busca, proporcionando um menor esforço computacional, o que diminuiria a quantidade de pequenas sombras selecionadas, ficando somente as sombras maiores referentes aos edifícios;
- Implementar rotinas para a inserção de informações relativas à posição do Sol (horário do dia e época do ano) no momento em que foi tirada a fotografia, pois é um fator que influencia no tamanho e posição das sombras presentes na imagem;
- Realizar estudos e testes para melhorar o nível de automação nas etapas da metodologia proposta, através de melhoramentos nos algoritmos implementados, também com o objetivo de evitar erros como os observados nas Figuras 80 e 81;
- Realização de uma maior quantidade experimentos e análises com diferentes imagens;
- Utilização de um modelo do terreno para a determinação da altura de vôo com maior precisão;
- Analisar o efeito do erro contido na determinação dos parâmetros de orientação (interior e exterior) de uma imagem na determinação da altura dos edifícios pela metodologia proposta;
- Desenvolvimento de soluções com o objetivo de melhorar a qualidade da extração de bordas, como por exemplo, nos casos onde a sombra de um edifício recaia sobre ele mesmo (Figuras 53 até 56);
- Adaptação da metodologia para a aplicação em imagens provenientes de sensores orbitais de alta resolução, visando à análise dos resultados e possibilidades de uso.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ACKERMANN, F.; KRZYTEK, P. Complete automation of Digital Aerial Triangulation. **Photogrammetric Record**. v.15, n. 89, p. 645-656. 1997

ACKERMANN, F. Techniques and Strategies for DEM Generation. In: THE AMERICAN SOCIETY FOR PHOTOGRAMMETRY AND REMOTE SENSING. **Digital Photogrammetry - An Addendum to the Manual of Photogrammetry**. Bethesda, Estados Unidos. 1997

\_\_\_\_\_ Airborne laser scanning-present status and future expectations. **ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing**, v. 54, p. 64–67, 1999.

ANDRADE, J. B. **Fotogrametria**. Curitiba: Ed. SBEE, 1998. 101p.

ARTERO, A. O. **Técnicas para a extração automática de feições retas em imagens digitais**. 1999 133 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Cartográficas) – Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Estadual Paulista, Presidente Prudente.

ATKINSON, K. B. **Close Range Photogrammetry and Machine Vision**. Whittles Publishing, Roseleigh House. Scotlândia-UK, 1996. 371p.

COSTA, E. R. **Geração Automática de Modelos Digitais do Terreno a partir de Imagens de Câmaras Digitais**. 2006 142 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Cartográficas) – Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Estadual Paulista, Presidente Prudente.

DALMOLIN, Q.; SANTOS, D, R. **Sistema Laserscanner: conceitos e princípios de funcionamento**. UFPR, Curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas. Curitiba, 2003. 95p.

EL-SHEIMY, N. **Digital Terrain Modelling**. The University of Calgary, Department of Geomatics Engineering. Canadá: 1999. 69p.

GABET, L.; GIRAUDON, G.; RENOUEAU, L. Automatic generation of high resolution urban zone digital elevation models. **ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing**, v.52, p.33-47, 1997.

GALLIS, R. B. A. **Extração Semi-Automática da Malha Viária em Imagens Aéreas Digitais de Áreas Rurais Utilizando Otimização por Programação Dinâmica no Espaço Objeto**. 2006. 167 f. Tese (Doutorado em Ciências Cartográficas) – Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Estadual Paulista, Presidente Prudente.

GALO, M.; TOZZI, C. L. Extração de pontos com acurácia subpixel em imagens digitais. In: **Série em Ciências Geodésicas**. Curitiba: Universidade Federal do Paraná, 2002, v.2.

GALO, M. **Extração Semi-Automática de Feições de Interesse em Imagens Digitais**. Relatório de Pesquisa Trienal. Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Departamento de Cartografia, Presidente Prudente, 2004.

GEMAEL, C., **Introdução ao Ajustamento de Observações: Aplicações Geodésicas**. Curitiba: Editora da UFPR, 1994. 319p.

GONZALEZ, R. C.; WOODS, R. E. **Processamento de imagens digitais**. São Paulo: Edgard Blücher, 2000. 509p.

GHOSH, S. K. **Analytical Photogrammetry**. 2ª ed. New York: Ed. Pergamon Books, 1988. 308p.

HABIB, F. A.; LEE, Y; MORGAN, M. Automatic Matching and Three-Dimensional Reconstruction of Free-Form Linear Features from Stereo Images. **Photogrammetric Engineering & Remote Sensing**, v. 69, n. 2, February 2003, p.189–197.

HEIPKE, C. Overview of image matching techniques. In: WORKSHOP ON THE APPLICATION OF DIGITAL PHOTOGRAMMETRIC WORKSTATIONS, 1996, Lausanne. **Proceedings....** Lausanne: OEEPE, 1996.

\_\_\_\_\_. Automation of Interior, relative and absolute orientation. **ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing**. v. 52, n. 1, p.1-19. 1997.

JAIN, A. K. **Fundamentals os Digital Image Processing**. New Jersey, USA: Prentice Hall, 1989. 567p.

JAMSA, K.; KLANDER, L. **Programando em C/C++ “A Bíblia”**, Tradução e Revisão Técnica: Jeremias René D. Pereira dos Santos, São Paulo: MAKRON Books, 1999. 1012p.

KRAUS, K. **Photogrammetry - Fundamentals and Processes**. v. 1, 4ª Bonn: Ed. Ferg Dummler Verlag, 1999. 391p.

LI, Y.; SASAGAWA, T.; GONG, P. A System of the Shadow Detection and Shadow Removal for High Resolution City Aerial Photo. In: INTERNATIONAL SOCIETY FOR PHOTOGRAMMETRY AND REMOTE SENSING CONGRESS, XX, 2004, Istambul. Anais do **XX ISPRS Congress**, 2004.

LUGNANI, J. B. **Introdução à Fototriangulação**. UFPR. Curitiba: Ed. Da UFPR, 1987. 134p.

MACHADO, A. M. L.; MITISHITA, E. A.; SANTOS, R. L. Correção de Erros Sistemáticos em Câmaras Não Métricas. In: **Série em Ciências Geodésicas**. 1 ed. Curitiba: Editora da Universidade Federal do Paraná, 2004, v. 4, p. 130 -144.

MACHADO, A. M. L. **Extração Automática de Contornos de Edificações Utilizando Imagem Gerada por Câmara Digital de Pequeno Formato e Dados Lidar**. 2006. 213 f. Tese (Doutorado em Ciências Geodésicas) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba.

MADHAVAN, B. B; TACHIBANA, K.; SASAGAWA, T.; OKADA, H.; SHIMOZUMA, Y. Automatic Extraction of Shadow Regions in High-Resolution ADS40 Images - By Robust Approach of Feature Spaces Analysis. INTERNATIONAL SOCIETY FOR

PHOTOGRAMMETRY AND REMOTE SENSING CONGRESS, XX, 2004, Istambul. **Anais do XX ISPRS Congress**, 2004.

MAUNE, D. Introduction to Digital Elevation Models (DEM). In: The American Society for Photogrammetry and Remote Sensing. **Digital Photogrammetry - An Addendum to the Manual of Photogrammetry**. Bethesda, MA, Estados Unidos: 1997.

MENA, J. B. State of the art on automatic road extraction for GIS update: A novel classification. **Pattern Recognition Letters**, v. 24, p. 3037-3058, 2003.

MIKHAIL, E. M., BETHEL, J. S., MCGLONE, J. C. **Introduction to modern Photogrammetry**. New York: Ed. John Wiley & Sons, 2001. 479 p.

OTSU, A. Threshold Selection Method From Gray-Level Histogram. **IEEE Transactions on System Man Cybernetcs**, v. smc-9, n. 1, p. 62-66, 1979.

PAINE, S.H.; LODWICK,G.D. Edge Detection and Processing of Remotely Sensed Digital Images. **Photogrammetria**, v. 43, n. 6, p. 323-336, 1989.

PARKER, J. R. **Algorithms For Image Processing and Computer Vision**. New York: Ed. John Wiley & Sons, 1996.

POLIDORIO, A. M.; IMAI, N. N.; TOMMASELLI, A. M. G.; FLORES, F. C.; FRANCO, C. Realce do grau de artificialidade de feições em imagens aéreas coloridas. In: Edson Aparecido Mitishita; Antonio Maria Garcia Tommaselli;. (Org.). **Série em Ciências Geodésicas**. 1 ed. Curitiba: Editora da Universidade Federal do Paraná, 2003, v. 3, p. 277-291.

POLIDORIO, A. M.; FLORES, F. C.; TOMMASELLI, A. M. G. ; IMAI, N. N.; FRANCO, C. Automatic Shadow Segmentation in Aerial Color Images. In: Agma Juci Machado Traina; Carlos Hitoshi Morimoto. (Org.). 16th Brazilian Sysmposium on Computer Graphics, Image Processing, and Vision. 1 ed. São Carlos: **IEEE Computer Society**, 2003, v. 1, p. 270-277.

PRATT, W. K. **Digital Image Processing**. 2ª ed. New York: Ed. John Wiley & Sons, 1991. 698p.

PRADO, F. A.; SOUZA, G. G. B.; SILVA, H. A.; BARBOSA, L.; BARBOSA, L. A. **Geração de Base Cartográfica a partir de Fotografias Aéreas**. Trabalho de Graduação. Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Curso de Graduação em Engenharia Cartográfica, Presidente Prudente, 2006.

REISS, M. L. L. **Convenções para Programação – Sugestões de Códigos para Programação C/C++**. FCT – UNESP, Programa de Pós-Graduação em Ciências Cartográficas. Presidente Prudente – SP, 2004.

REISS, M. L. L.; TOMMASELLI, M. G. UPTKImage: Uma Classe de Objetos para Manipulação de Imagens Digitais em Fotogrametria. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CARTOGRAFIA, XXII, 2005, Macaé. **Anais do XXII Congresso Brasileiro de Cartografia**. Rio de Janeiro – RJ: Sociedade Brasileira de Cartografia, 2005. v.1. p.1-9.

RUY, R. S. **Geração Semi-Automática de Estereomodelos a partir de Imagens Digitais Georreferenciadas**. 2004 143 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Cartográficas) – Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Estadual Paulista, Presidente Prudente.

SALVADOR, E., CAVALLARO, A., EBRAHIMI, T. Cast shadow segmentation using invariant colour feature. **Computer Vision and Image Understanding**. v. 95, p. 238-259, 2004.

SANTOS, D. R.; DALMOLIN, Q.; BASSO, M. A. Detecção Automática de Sombras em Imagens de Alta Resolução. **Boletim de Ciências Geodésicas**, v. 12, nº 1, p. 87-99. Curitiba, 2006.

SANTOS, D. R. **Extração Semi-Automática de Edificações com Análise do Modelo Numérico do Terreno**. 2002 166 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Cartográficas) – Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Estadual Paulista, Presidente Prudente.

\_\_\_\_\_. **Automação da Resseção Espacial de Imagens com uso de Hipóteses de Rodovias como Apoio de Campo Derivadas do Sistema de Varredura Laser**. 2005 193 f. Tese (Doutorado em Ciências Geodésicas) – Universidade Federal do Paraná, Programa de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas. Curitiba, 2005.

SCHENK, T. **Digital Photogrammetry – Volume I**. TerraScience. 1<sup>a</sup> ed. Laurelville: TerraScience, 1999. 428p.

\_\_\_\_\_. Automatic Generation of DEM's. In: **Manual of Photogrammetry Addendum**. USA: American Society for Photogrammetry and Remote Sensing, 1996.

SONKA, M.; HLAVAC, V.; BOYLE, R. **Image Processing Analysis and Machine Vision**, 2<sup>a</sup> ed. Pacific Grove: Brooks/Cole Publishing Company, 1999. 770p.

STRAUCH, J. C. M. **Correlação de Imagens Digitais**. 1991 77f. Dissertação (Mestrado em Ciências Geodésicas) – Universidade Federal do Paraná, Programa de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas. Curitiba, 1991.

TAVARES, P.; FAGUNDES, P. M. **Fotogrametria**. Rio de Janeiro: Sociedade Brasileira de Cartografia. 1991.

TOMMASELLI, A. M. G. Automação de Processos Fotogramétricos. In: 3. CONGRESSO BRASILEIRO DE CADASTRO TECNICO MULTIFINALITARIO, 1998, FLORIANOPOLIS, SC. **ANAIS DO 3. CONGRESSO BRASILEIRO DE CADASTRO TECNICO MULTIFINALITARIO**, 1998. v. 1.

TOMMASELLI, A. M. G. **Fotogrametria Digital – Notas de Aula**. FCT – UNESP, Programa de Pós-Graduação em Ciências Cartográficas. Presidente Prudente – SP, 2004.

TOMMASELLI, A. M. G.; HASEGAWA, J. K.; GALO, M. Desenvolvimento de uma biblioteca de funções e classes para fotogrametria. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CARTOGRAFIA, 21, 2003, Belo Horizonte. **Anais do XXI Congresso Brasileiro de Cartografia**.

\_\_\_\_\_. UPTK: a free toolkit to support cooperative research in photogrammetry. In: GEOMATIC WEEK, 6, 2005, Barcelona. **Proceedings...** Barcelona, v. 1, p. 1-9.

VALE, G. M. **Extração Semi-Automática do Eixo de Rodovias em Imagens de Média e Alta Resolução Utilizando Programação Dinâmica**. 2003 116 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Cartográficas) – Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Estadual Paulista, Presidente Prudente.

ZHANG, B.; MILLER, S.; DEVENECIA, K.; WALKER, S. **Automatic Terrain Extraction Using Multiple Image Pair and Back Matching**. In: ASPRS Annual Conference, 2006, Reno, Nevada.

WALKER, A. S. Practical Automation in Commercial Digital Photogrammetry **Photogrammetric Record**. v.15, n. 89, p. 657-664. 1997

WOLF, P. R. **Elements of Photogrammetry – With Air Photo Interpretation and Remote Sensing**. 2ª ed. New York: McGraw-Hill, 1983. 628p.

WOLF, P. R.; DEWITT, B. D. **Elements of Photogrammetry – With Applications in GIS**. 3ª ed. Editora The McGraw-Hill Companies. New York: 2000, 608p.

# APÊNDICE A

**Tabela A1 - Coordenadas dos pontos extremos das arestas determinadas automaticamente e valores calculados para r e r'.**

Edifício/ Aresta	Base (milímetros)			Topo (milímetros)		
	X	Y	r'	X	Y	r
1A	11,600	78,700	79,550	11,860	81,430	82,289
2A	-12,310	59,341	60,603	-12,780	61,630	62,941
2B	-11,592	58,920	60,049	-12,090	61,440	62,618
2C	-11,470	58,842	59,947	-11,980	61,480	62,636
3A	-21,320	45,630	50,365	-22,270	47,800	52,733
4A	-11,280	87,780	88,502	-11,710	91,370	92,117
4B	-11,0301	87,610	88,302	-11,460	90,950	91,669
4C	-10,590	87,400	88,039	-11,000	90,760	91,424
5A	-99,470	-33,220	104,871	-105,540	-35,340	111,230
5B	-98,570	-34,001	104,269	-105,550	-36,510	111,686
8A	-68,670	-0,060	68,670	-71,920	-0,070	71,920
14A	-61,838	62,616	88,004	-65,392	66,219	93,065
18A	112,890	61,320	128,469	116,460	63,150	132,480
20A	5,800	87,220	87,413	6,040	90,160	90,362
20B	7,410	86,460	86,777	7,630	89,020	89,346
20C	8,140	86,210	86,593	8,450	88,910	89,310
21A	-27,350	58,780	64,831	-28,620	61,640	67,960
22A	-32,110	55,560	64,171	-33,250	57,780	66,664
23A	-20,400	67,750	70,755	-21,000	69,750	72,843
23B	-22,920	66,020	69,885	-23,730	68,350	72,352
23C	-22,294	65,556	69,243	-23,271	68,184	72,045
23D	-22,294	65,556	69,245	-23,271	68,184	72,042
24A	-18,580	64,200	66,835	-19,120	66,130	68,839
26A	-34,740	100,490	106,325	-36,020	104,310	110,354
27A	-13,260	97,460	98,358	-13,770	101,220	102,152
28A	-7,270	99,760	100,025	-7,610	103,960	104,238
29A	8,821	88,113	88,553	9,127	91,155	91,611
29B	9,900	90,840	91,378	10,180	93,560	94,112

**Tabela A2 - Coordenadas dos pontos extremos das arestas determinadas manualmente e valores calculados para r e r'.**

Edifício/ Aresta	Base (milímetros)			Topo (milímetros)		
	X	Y	r'	X	Y	r
1A	11,600	78,550	79,402	11,880	81,6300	82,489
2A	-12,260	59,200	60,456	-12,780	61,67	62,980
2B	-11,510	58,730	59,847	-12,050	61,440	62,611
2C	-11,430	58,580	59,685	-11,980	61,44	62,597
3A	-21,230	45,400	50,119	-22,210	47,550	52,481
4A	-11,300	87,760	88,485	-11,730	91,280	92,031
4B	-10,990	87,500	88,188	-11,460	90,950	91,669
4C	-10,570	87,310	87,948	-11,000	90,870	91,533
5A	-99,450	-33,200	104,845	-105,770	-35,340	111,517
5B	-99,050	-34,080	104,749	-105,520	-36,450	111,638
8A	-68,630	-0,060	68,630	-71,950	-0,070	71,950
14A	-61,733	62,531	87,888	-64,702	65,587	92,131
18A	112,840	61,370	128,449	116,500	63,361	132,615
20A	5,800	87,220	87,413	6,000	90,050	90,249
20B	7,410	86,460	86,777	7,650	89,271	89,597
20C	8,140	86,080	86,464	8,400	88,910	89,306
21A	-27,210	58,420	64,446	-28,560	61,410	67,726
22A	-31,900	55,400	63,928	-33,250	57,752	66,638
23A	-20,290	67,390	70,378	-21,020	69,760	72,858
23B	-22,840	65,700	69,557	-23,730	68,350	72,352
23C	-22,378	65,598	69,313	-23,249	68,287	72,120
23D	-22,380	65,600	69,313	-23,270	68,290	72,146
24A	-18,560	64,150	66,781	-19,120	66,090	68,800
26A	-34,720	100,360	106,196	-36,020	104,250	110,297
27A	-13,260	97,560	98,457	-13,770	101,260	102,192
28A	-7,290	99,620	99,886	-7,570	104,220	104,495
29A	8,840	88,150	88,592	9,0800	91,070	91,521
29B	9,900	90,840	91,378	10,180	93,560	94,112