



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
Faculdade de Ciências e Tecnologia
Campus de Presidente Prudente

RAQUEL ALVES DE OLIVEIRA

**GERAÇÃO AUTOMÁTICA DE MODELOS DIGITAIS DE
SUPERFÍCIE UTILIZANDO MÚLTIPLAS IMAGENS**



**PRESIDENTE PRUDENTE
2013**

RAQUEL ALVES DE OLIVEIRA

**GERAÇÃO AUTOMÁTICA DE MODELOS DIGITAIS DE SUPERFÍCIE
UTILIZANDO MÚLTIPLAS IMAGENS**

Dissertação de mestrado apresentada ao Programa
de Pós-Graduação em Ciências Cartográficas da
Faculdade de Ciências e Tecnologia-UNESP
campus de Presidente Prudente.

Orientador: Prof. Dr. Antonio M. G. Tommaselli.

**PRESIDENTE PRUDENTE
2013**

FICHA CATALOGRÁFICA

Oliveira, Raquel Alves de.

O51g Geração automática de modelos digitais de superfícies utilizando múltiplas imagens / Raquel Alves de Oliveira. - Presidente Prudente : [s.n], 2013

132 f. : il.

Orientador: Antonio Maria Garcia Tommaselli

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Ciências e Tecnologia

Inclui bibliografia

1. Modelo digital de superfície. 2. Correspondência de imagens. 3. Busca em linha vertical. I. Tommaselli, Antonio Maria Garcia. II. Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Ciências e Tecnologia. III. Título.



BANCA EXAMINADORA



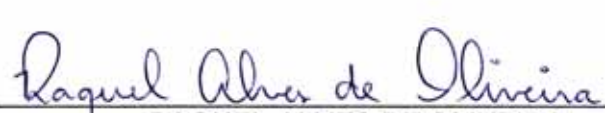
PROF. DR. ANTONIO MARIA GARCIA TOMMASELLI
ORIENTADOR



PROF. DR. MAURICIO GALO
UNESP/FCT



PROF. DR. DANIEL CARNEIRO DA SILVA
UFPE



RAQUEL ALVES DE OLIVEIRA

Presidente Prudente (SP), 22 de fevereiro de 2013.

RESULTADO: APROVADA

DEDICATÓRIA

A Deus.

*Aos meus pais José Roberto e Cleide, meus
avós Sr. José Rivaldo e Sra Maria, minha
querida tia Luzinete, meu querido amigo Pe.
Julinho, meu irmão Rafael e minha amiga e
irmã do coração Carol.*

AGRADECIMENTOS

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP), pela concessão de uma bolsa de estudo (processo: 2010/14444-0).

À UNESP, por proporcionar todos os meios para o desenvolvimento deste trabalho.

Ao professor Dr. Antonio Maria Garcia Tommaselli por todos os ensinamentos passados, pela paciência, dedicação e orientação sempre atenciosa e precisa.

Aos meus companheiros de grupo de pesquisa José Marcato Jr, Adilson Berveglieri, Marcus Moraes e Vander Freitas pelo apoio em trabalhos de campos e discussões sobre as implementações realizadas na pesquisa.

Aos amigos e colegas da sala de Pós-Graduação em Ciências Cartográficas, em especial Vinicius Rofatto, George Deroco e Henrique Cândido pela amizade desde a graduação, momentos de descontração e discussões sobre nossas pesquisas científicas.

Aos meus amados pais, Cleide e José Roberto, e meu irmão, Rafa, por todo carinho, incentivo, cuidado e amor incondicional. A minha tia Luzinete, que sempre está à disposição para me apoiar e ajudar em qualquer situação da minha vida. Enfim, a todos os meus familiares (tios, tias, primos, primas), pelo apoio, amor e descontração.

Ao meu querido e sábio amigo Pe. Julinho, que sempre tem uma palavra amiga e de carinho e me incentiva a nunca perder o entusiasmo nesta trajetória.

À minha grande amiga Carolina Malaman, que se tornou uma irmã, durante sete anos de convivência. Foram muitas conversas, estudos, gargalhadas, lágrimas e dedicação, que contribuíram para uma amizade verdadeira, que me fortaleceu e apoiou nesta conquista.

Aos docentes do programa de Pós-Graduação em Ciências Cartográficas e do Departamento de Cartografia, que fizeram parte da minha formação.

EPÍGRAFE

*“Quando recebemos um ensinamento,
devemos receber como um valioso presente e
não como uma dura tarefa. Eis aqui a
diferença que transcende.”*

Albert Einstein

RESUMO

A geração de Modelos Digitais de Superfície (MDS) é cada vez mais indispensável para todas as aplicações em que seja necessário o conhecimento das altitudes dos pontos sobre a superfície terrestre. A utilização de imagens ópticas para esta finalidade é explorada há muitos anos e a eficiência depende, além das características do projeto (resolução das imagens, tamanho da área de sobreposição entre as imagens, relação base e altura, entre outras), da capacidade computacional para o processamento das imagens. Pesquisas e desenvolvimentos recentes retomaram a atenção para a geração de MDSs utilizando imagens ópticas, visto que o avanço na tecnologia permitiu a utilização de técnicas de correspondência de imagens mais robustas. Além disso, a utilização de câmaras digitais favoreceu a aquisição de imagens com maior sobreposição lateral e longitudinal e com maior qualidade e profundidade radiométrica, o que aumenta a redundância de informações para uma mesma área. Neste contexto, o objetivo deste trabalho foi estudar, desenvolver e implementar uma técnica para a geração de MDSs utilizando a correspondência simultânea entre múltiplas imagens pelo método de busca em linhas verticais (*vertical line locus-VLL*). A correspondência entre múltiplas imagens aumenta a confiabilidade dos resultados devido à utilização da intersecção de mais de dois raios, reduzindo os problemas causados pela oclusão, múltiplas soluções, áreas homogêneas e descontinuidades da superfície. A técnica VLL foi implementada em linguagem C++ com a abordagem de múltiplas imagens e busca hierárquica. Nos experimentos foram utilizadas seis imagens da área urbana de Presidente Prudente-SP, com elemento de resolução aproximado de 7cm. Para análise da qualidade foram gerados MDSs de pequenas áreas com diferentes atributos principais (áreas homogêneas, padrão repetitivo, objetos em movimento incluindo sombras, árvores grandes e edificação com vários pavimentos). Os MDSs obtidos para essas áreas foram comparados com: pontos de verificação, dados de varredura a LASER e MDS gerado pelo software LPS (*Leica Photogrammetric Suite*). Os resultados mostraram a compatibilidade da qualidade entre os modelos gerados pela técnica implementada e os modelos de referência.

Palavras-chave: Modelo Digital de Superfície, correspondência de imagens digitais, busca em linha vertical.

ABSTRACT

The generation of Digital Surface Models (DSM) is increasingly essential for all applications requiring ground elevations. The efficient generation of DSM from optical images has been explored for many years and it is dependent on the project characteristics (image resolution, size of overlap between images, base-height ratio, among others) and the computer capabilities for the image processing. The increasing potential of new matching algorithms motivated further studies about DSM generation using digital images. Additionally, digital cameras can provide highly overlapping imagery with high radiometric quality which increases the redundancy of information for the same area. In this context, the aim of this work is to study, implement and experimentally assess a technique for DSM generation by matching of multiple images (two or more) simultaneously using the vertical line locus method (VLL). The multi-image matching approach allows higher measurement accuracy through the intersection of more than two image rays. It also leads to a reduction of problems caused by occlusions, multiple solutions, homogeneous areas and surface discontinuities. The VLL technique was implemented in C++ language considering multi-images and hierarchical search. The experiments were performed with six images of the urban area of Presidente Prudente/SP, with a GSD of approximately 7cm. To assess the quality of the developed procedure the DSM of small areas with different features (absence of sufficient texture, repetitive objects, moving objects including shadows, trees and building with several floors) were generated. These DSM obtained were compared to: independent checkpoints, LASER scanner cloud points and a DSM generated by LPS (Leica Photogrammetric Suite) software. The accomplished results showed that the DSM generated by the implemented technique has a geometric quality compatibility with the reference models but with higher density.

Keywords: Digital Surface Models, image matching, vertical line locus.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Sistema de coordenadas de imagens digitais.	24
Figura 2: Refração atmosférica em fotografia área. Fonte: Adaptada de Wolf e Dewitt (2000).	27
Figura 3: Distorção radial δr e as correções nas componentes x e y . Fonte: Adaptada de Wolf e Dewitt (2000).	29
Figura 4: Distorção descentrada.	30
Figura 5: Condição de colinearidade.	31
Figura 6: Plano epipolar e as correspondentes linhas epipolares. Fonte: Adaptado de Mikhail et al. (2001).	33
Figura 7: Correspondência entre imagens: método baseado em área.	35
Figura 8: Direções para expansão das janelas de busca. Fonte: Kanade e Okutomi (1991). ...	36
Figura 9: Posições do pixel central das janelas de busca. Fonte: Fusielo et al. (1997).	37
Figura 10: Custo da correspondência.	39
Figura 11: Imagens com diferentes escalas. Fonte: Schenk (1999).	41
Figura 12: Imagens com diferentes ângulos de orientação. Fonte: Schenk (1999).	42
Figura 13: Efeito da inclinação da superfície na correlação baseada em área. Em (a) inclinação paralela à aerobase; (b) inclinação perpendicular à aerobase. Fonte: Schenk (1999).	42
Figura 14: Efeito do relevo na medida de similaridade na correlação baseada em área. Fonte: Schenk (1999).	43
Figura 15: Pirâmide de imagens.	44
Figura 16: Redução do espaço de busca em linhas epipolares com informação altimétrica. Fonte: Adaptado de Schenk (1999).	45
Figura 17: Relação geométrica entre as imagens originais e normalizadas (Fonte: Schenk, 1999).	47
Figura 18: Redução do espaço de busca com o método VLL. Fonte: Schenk (1999).	50
Figura 19: Método <i>Vertical Line Locus</i> (VLL).	51
Figura 20: Pixel interpolado em função da interpolação dos vizinhos na imagem original.	59
Figura 21: Representação das diferenças da posição dos pixels de uma imagem após uma transformação geométrica.	60
Figura 22: Processos envolvidos na geração automática do MDS.	67
Figura 23: Forma e posição das nove subjanelas utilizadas na agregação das diferenças e cálculo dos coeficientes de correlação.	72
Figura 24: Esquema simplificado do armazenamento dos vetores com coeficientes de correlação e diferenças agregadas para cada subjanela.	73
Figura 25: Mosaico com seis imagens e seus limites.	76
Figura 26: Localização aproximada dos pontos de apoio levantados.	77

Figura 27: Rotação das imagens e mudança da posição do ponto principal.	78
Figura 28: (a), (b), (c) e (d) imagens dos pontos obtidos a cada nível da pirâmide; (e) pontos obtidos após interpolação no último nível, para o caso A.	84
Figura 29: (a, b, c e d) imagens dos pontos obtidos a cada nível da pirâmide; (e) pontos obtidos após interpolação no último nível, para o caso B.	85
Figura 30: (a, b, c e d) imagens dos pontos obtidos a cada nível da pirâmide; (e) pontos obtidos após interpolação no último nível, para o caso C.	86
Figura 31: (a, b, c e d) imagens dos pontos obtidos a cada nível da pirâmide; (e) pontos obtidos após interpolação no último nível, para o caso D.	87
Figura 32: Recortes ilustrando características da Área 1 (a) telhado com padrão repetitivo; (b) vegetação rasteira - área homogênea; (c) árvores de grande porte; (d) objetos presentes na cena; (e) pontos do telhado obtidos no Experimento A; (f) pontos da região homogênea obtidos no Experimento A; (g) pontos das árvores obtidos no Experimento A; (h) pontos dos objetos obtidos no Experimento A; (i) pontos do telhado obtidos no Experimento B; (j) pontos da região homogênea obtidos no Experimento C; (l) pontos das árvores obtidos no Experimento D.	88
Figura 33: Histograma de frequência das discrepâncias dos experimentos.	91
Figura 34: Imagem hipsométrica das diferenças entre o MDS gerado no experimento A e os dados LASER.	92
Figura 35: (a), (b), (c) e (d) imagens dos pontos obtidos a cada nível da pirâmide; (e) pontos obtidos após interpolação no último nível, para o caso A.	94
Figura 36: (a, b, c e d) imagens dos pontos obtidos a cada nível da pirâmide; (e) pontos obtidos após interpolação no último nível, para o caso B.	95
Figura 37: (a, b, c e d) imagens dos pontos obtidos a cada nível da pirâmide; (e) pontos obtidos após interpolação no último nível, para o caso C.	96
Figura 38: Gráficos da porcentagem das discrepâncias por intervalos.	98
Figura 39: Imagem hipsométrica da diferença entre o MDS gerado no experimento A e os dados LASER.	98
Figura 40: (a, b, c e d) imagens dos pontos obtidos a cada nível da pirâmide; (e) pontos obtidos após interpolação no último nível, para o caso A.	100
Figura 41: (a, b, c e d) imagens dos pontos obtidos a cada nível da pirâmide; (e) pontos obtidos após interpolação no último nível, para o caso B.	101
Figura 42: (a, b, c e d) imagens dos pontos obtidos a cada nível da pirâmide; (e) pontos obtidos após interpolação no último nível, para o caso C.	102
Figura 43: (a, b, c e d) imagens dos pontos obtidos a cada nível da pirâmide; (e) pontos obtidos após interpolação no último nível, para o caso D.	103
Figura 44: Histograma de frequência das discrepâncias dos experimentos.	105
Figura 45: Imagem hipsométrica da diferença entre o MDS gerado no experimento A e os dados LASER.	106
Figura 46: Imagens que compreendem à Área 4; (a) Imagem da Faixa 1; (b) Imagem da Faixa 2; (c) Imagem da Faixa 2.	107

Figura 47: (a, b, c e d) imagens dos pontos obtidos a cada nível da pirâmide; (e) pontos obtidos após interpolação no último nível, para o caso A.	109
Figura 48: (a, b, c e d) imagens dos pontos obtidos a cada nível da pirâmide; (e) pontos obtidos após interpolação no último nível, para o caso B.	110
Figura 49: Histograma de frequência das discrepâncias dos experimentos.	112
Figura 50: Imagem hipsométrica da diferença entre o MDS gerado no experimento A e os dados LASER.	113
Figura 51: Imagens hipsométricas do MDS gerado pelo software LPS para (a) Área 1; (a) Área 1; (b) Área 2; (c) Área 3 e (d) Área 4.	114
Figura 52: Histogramas de frequência das diferenças entre o MDS do software LPS e o MDS LASER. (a) Área 1; (a) Área 1; (b) Área 2; (c) Área 3 e (d) Área 4.	116
Figura 53: MDS para a Área 1 gerado com a correspondência entre subjanelas. (a) experimento 1; (b) experimento 2; (c) experimento 3 e (d) experimento 4.	118
Figura 54: Gráfico da média, desvio-padrão e REMQ das diferenças entre (a) VLL e LASER; (b) VLL e LPS e (c) VLL e pontos de verificação, para a área 1.	119
Figura 55: MDS da Área 2 gerado com a correspondência entre subjanelas. (a) Experimento 1; (b) Experimento 2; (c) Experimento 3 e (d) Experimento 4.	119
Figura 56: Gráfico da média, desvio-padrão e REMQ das diferenças entre (a) VLL e LASER; (b) VLL e LPS, para a área 2.	120
Figura 57: MDS da Área 3 gerado com a correspondência entre subjanelas. (a) Experimento 1; (b) Experimento 2; (c) Experimento 3 e (d) Experimento 4.	121
Figura 58: Gráfico da média, desvio-padrão e REMQ das diferenças entre (a) VLL e LASER; (b) VLL e LPS, para a área 3.	122
Figura 59: MDS da Área 4 gerado com a correspondência entre subjanelas. (a) Experimento 1; (b) Experimento 2; (c) Experimento 3 e (d) Experimento 4.	122
Figura 60: Gráfico da média, desvio-padrão e REMQ das diferenças entre (a) VLL e LASER; (b) VLL e LPS e (c) VLL e pontos de verificação, para a área 4.	123
Figura 61: (a) Recorte do MDS gerado para a Área 2 no experimento 1; (b) perfil traçado sobre a edificação; (c) recorte do MDS gerado para a Área 2 no experimento 3; (d) perfil traçado sobre a edificação.	124
Figura 62: (a) Recorte do MDS gerado para a Área 1 no experimento 1-A da Seção 4.4.1; (b) perfil traçado sobre a edificação; (c) recorte do MDS gerado para a Área 1 no experimento 1; (d) perfil traçado sobre a edificação.	125

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Dados das imagens e voo.	78
Tabela 2: Parâmetros de orientação exterior estimados.	79
Tabela 3: Desvios-padrão dos POE estimados.	79
Tabela 4: Discrepâncias, média e erro médio quadrático nos pontos de verificação.	80
Tabela 5: Configuração dos parâmetros para correlação de imagens.	82
Tabela 6: Diferença entre os pontos de verificação e os pontos dos MDSs gerados.	89
Tabela 7: Média e desvio-padrão das diferenças entre os pontos utilizados na fototriangulação e os pontos obtidos por varredura a LASER.	89
Tabela 8: Quantidade de pontos obtidos no processo de correspondência de imagens no último nível da pirâmide e por varredura a LASER.	90
Tabela 9: Média, desvio-padrão e a REMQ das discrepâncias entre os dados LASER e os MDSs gerados.	90
Tabela 10: Configuração dos parâmetros para correlação de imagens.	93
Tabela 11: Quantidade de pontos obtidos no processo de correspondência de imagens no último nível da pirâmide e por varredura a LASER.	97
Tabela 12: Média, desvio-padrão e a REMQ entre o MDS LASER e os MDSs gerados.	97
Tabela 13: Configuração dos parâmetros para correlação de imagens.	99
Tabela 14: Quantidade de pontos obtidos no processo de correspondência de imagens no último nível da pirâmide e por varredura a LASER.	104
Tabela 15: Média, desvio-padrão e a REMQ entre o MDS LASER e os MDSs gerados.	105
Tabela 16: Configuração dos parâmetros para correlação de imagens.	108
Tabela 17: Diferença entre pontos de verificação e pontos dos MDSs.	111
Tabela 18: Quantidade de pontos obtidos no processo de correspondência de imagens no último nível da pirâmide e por varredura a LASER.	112
Tabela 19: Média, desvio-padrão e a REMQ entre os dados LASER e os MDSs gerados.	112
Tabela 20: Média, desvio-padrão e REMQ das diferenças entre o MDS gerado pelo LPS e o MDS LASER e entre o MDS do LPS e os pontos de verificação.	115
Tabela 21: Configuração dos experimentos realizados com a correspondência entre subjanelas.	117
Tabela 22: Média, desvio-padrão e REMQ das diferenças entre o MDS gerado com VLL e subjanelas e o MDS do LPS e o MDS LASER e os pontos de verificação.	118
Tabela 23: Média, desvio-padrão e REMQ das diferenças entre o MDS gerado com VLL e subjanelas e o MDS do LPS e o MDS LASER.	120
Tabela 24: Média, desvio-padrão e REMQ das diferenças entre o MDS gerado com VLL e subjanelas e o MDS do LPS e o MDS LASER.	121
Tabela 25: Média, desvio-padrão e REMQ das diferenças entre o MDS gerado com VLL e subjanelas e o MDS do LPS e o MDS LASER e os pontos de verificação.	122

LISTA DE QUADROS

Quadro 1: Descrição e apresentação da área utilizada no Experimento 1.....	82
Quadro 2: Descrição dos experimentos na Área 1.	82
Quadro 3: Imagem hipsométrica do MDS gerado com seis imagens. (a) MDS sem interpolação e (b) interpolado.....	83
Quadro 4: Imagem hipsométrica do MDS gerado com 3 imagens da Faixa 1. (a) MDS sem interpolação (b) interpolado.....	84
Quadro 5: Imagem hipsométrica do MDS gerado com 3 imagens da Faixa 2 . (a) MDS sem interpolação e (b) interpolado.....	85
Quadro 6: Imagem hipsométrica do MDS gerado com duas imagens. (a) MDS sem interpolação e (b) interpolado.....	86
Quadro 7: Nuvem de pontos LASER da Área 1.....	90
Quadro 8: Descrição e apresentação da área utilizada no Experimento 2.....	92
Quadro 9: Descrição dos experimentos na Área 2.	93
Quadro 10: Imagem hipsométrica do MDS gerado com quatro imagens. (a) sem interpolação e (b) interpolado.....	93
Quadro 11: Imagem hipsométrica do MDS gerado no experimento B. (a) sem interpolação e (b) interpolado.	94
Quadro 12: Imagem hipsométrica do MDS gerado no experimento C. (a) sem interpolação e (b) interpolado.	95
Quadro 13: Nuvem de pontos LASER da Área 2.....	97
Quadro 14: Descrição e apresentação da área utilizada no Experimento 3.....	99
Quadro 15: Descrição dos experimentos na Área 3.	99
Quadro 16: Imagem hipsométrica do MDS gerado no experimento A. (a) sem interpolação e (b) interpolado.	100
Quadro 17: Imagem hipsométrica do MDS gerado no experimento B. (a) sem interpolação e (b) interpolado.	101
Quadro 18: Imagem hipsométrica do MDS gerado no experimento C. (a) sem interpolação e (b) interpolado	102
Quadro 19: Imagem hipsométrica do MDS gerado no experimento D. (a) sem interpolação e (b) interpolado.	103
Quadro 20: Nuvem de pontos LASER da Área 3.....	104
Quadro 21: Descrição e apresentação da área utilizada no Experimento 4.....	107
Quadro 22: Descrição dos experimentos na Área 4.	107
Quadro 23: Imagem hipsométrica do MDS gerado no experimento A. (a) sem interpolação e (b) interpolado.	109
Quadro 24: Imagem hipsométrica do MDS gerado no experimento B. (a) sem interpolação e (b) interpolado.	110

Quadro 25: Nuvem de pontos LASER da Área 4..... 111

LISTA DE SIGLAS

CP: Centro Perspectivo

DTM: *Digital Terrain Model*

FBM: *Feature Based Matching*

GNSS: *Global Navigation Satellite Systems*

GSD: *Ground sample distance*

IFOV: *Instantaneous field of view*

INS: *Inertial Navigation System*

LASER: *Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation*

LiDAR: *Light Detection And Ranging*

LSM: *Least Squares Matching*

MDE: Modelo Digital de Elevação

MDS: Modelo Digital de Superfície

MDT: Modelo Digital de Terreno

MMQ: Método dos Mínimos Quadrados

POE: Parâmetros de Orientação Exterior

POI: Parâmetros de Orientação Interior

pp: Ponto Principal

RADAR: *RA*dio *D*etection *A*nd *R*anging

SGM: *Semi-Global Matching*

SIG: Sistemas de Informações Geográficas

VLL: *Vertical Line Locus*

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO.....	20
1.1.	Objetivos.....	22
2.	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	23
2.1.	Orientação de Imagens.....	23
2.1.1.	Orientação interior.....	23
2.1.1.1.	Sistemas do espaço imagem.....	23
2.1.1.2.	Refinamento de coordenadas imagem.....	25
2.1.2.	Orientação exterior.....	30
2.1.3.	Geometria Epipolar.....	32
2.2.	Correspondência de imagens.....	33
2.2.1.	Métodos baseados em áreas.....	34
2.2.1.1.	Correspondências com janelas móveis.....	36
2.2.2.	Métodos baseados em características.....	37
2.2.3.	Correspondência relacional.....	38
2.2.4.	Métodos Locais e Globais.....	38
2.2.5.	Problemas na correspondência de imagens.....	41
2.2.6.	Redução do espaço de busca.....	43
2.2.6.1.	Pirâmide de imagens.....	43
2.2.6.2.	Busca em linhas epipolares.....	44
2.2.6.3.	<i>Vertical Line Locus</i>	49
2.2.7.	Correspondência com múltiplas imagens.....	52
2.3.	Modelo Digital de Terreno.....	54
2.3.1.	Fontes de dados para geração de MDTs.....	55
2.3.2.	Estrutura de dados para MDT.....	56
2.3.3.	Métodos de interpolação.....	57
2.3.3.1.	Reamostragem.....	59
2.3.4.	Geração de MDSs a partir de imagens ópticas.....	60
2.3.5.	Filtragem e redução de MDS para MDT.....	64
3.	MATERIAIS E MÉTODO.....	65
3.1.	Materiais.....	65

3.2.	Método	65
3.2.1.	Redução do espaço de busca	68
3.2.2.	Determinação dos limites das imagens.....	68
3.2.3.	Definição das janelas para correspondência.....	69
3.2.4.	Correspondência entre múltiplas imagens	71
3.2.4.1.	Correspondência entre subjanelas.....	71
3.2.5.	Interpolação e adensamento das altitudes da grade	74
3.2.6.	Formas para avaliação dos resultados	75
4.	EXPERIMENTOS E RESULTADOS	76
4.1.	Seleção da área de interesse.....	76
4.2.	Fototriangulação	77
4.3.	Geração de MDS.....	80
4.4.	Experimentos utilizando o coeficiente de correlação para janelas quadradas	81
4.4.1.	Experimento 1	81
4.4.2.	Experimento 2	92
4.4.3.	Experimento 3	99
4.4.4.	Experimento 4	106
4.5.	Comparação entre o MDS gerado no <i>software</i> LPS e os dados LASER.....	113
4.6.	Experimentos utilizando a correspondência entre subjanelas.....	116
4.7.	Discussão sobre os resultados.....	125
5.	CONSIDERAÇÕES FINAIS	128
5.1.	Conclusões	128
5.2.	Recomendações para trabalhos futuros.....	129
	REFERÊNCIAS	130

1. INTRODUÇÃO

Desde a década de 1950, muitas técnicas para geração de modelos digitais que representam a superfície do terreno foram desenvolvidas, graças aos avanços na tecnologia da informação. Uma representação digital da superfície é conhecida como Modelo Digital de Terreno (MDT) ou *Digital Terrain Model* (DTM). De acordo com El-Sheimy et al. (2005) o conceito de MDT foi introduzido pelos engenheiros americanos Miller e LaFlamme na década de 1950. Para Miller e LaFlamme¹ “O MDT é simplesmente uma representação estatística da superfície contínua do terreno por uma grande quantidade de pontos selecionados com coordenadas X, Y e Z conhecidas em um sistema de coordenadas arbitrário” (MILLER e LAFLAMME, 1958 apud LI et al., 2005, p. 7). Outras denominações ou classificações podem ser encontradas na literatura, como Modelo Digital de Superfície (MDS). Este se refere à representação que compreende pontos do terreno e acima, tais como feições antrópicas (edificações, rodovias) e árvores.

Os MDSs e MDTs são importantes para várias aplicações como nas áreas de engenharia civil, militar, sensoriamento remoto e mapeamento, avaliação de impactos ambientais, políticas públicas para projetos de infraestrutura e como fonte de dados para sistemas de informações geográficas (SIG). A representação digital possibilita a geração de ortoimagens, reconstrução e visualização bidimensional e tridimensional, classificação de objetos para mapas ou aplicações temáticas, criação de animações e simulações.

As fontes de dados para a geração de um MDS podem ser curvas de nível digitalizadas, levantamentos realizados em campo, métodos fotogramétricos aplicados sobre imagens aéreas ou em imagens de satélite, dados provenientes de RADAR (*RADio Detection and Ranging*) e varredura a LASER (*Light Amplification by Simulated Emission of Radiation*).

Com a evolução da tecnologia LiDAR (*Light Detection And Ranging*), a praticidade e qualidade dos levantamentos a LASER tornaram-se mais atrativos do que a Fotogrametria convencional para a geração de MDSs. Os sistemas a LASER apresentam algumas vantagens com relação às técnicas fotogramétricas como, por exemplo, a fácil aquisição da altitude de pontos em áreas de vegetação e em áreas homogêneas. Entretanto, as principais desvantagens com relação à Fotogrametria são o custo elevado, a ausência de informação da textura,

¹ MILLER, C.; LAFLAMME, R. The digital terrain model - theory and applications, **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, v. 24. p. 433-442, 1958.

precisão planimétrica menor que a altimétrica e a necessidade de maiores cuidados com manutenção dos dispositivos por possuírem mais partes móveis (espelhos, motores, codificadores, etc). Assim, pode-se dizer que as duas técnicas são complementares.

Atualmente, as pesquisas na área acadêmica e no setor comercial, foram intensificadas para a geração de MDSs utilizando imagens ópticas (HAALA, 2009), pois são necessárias investigações para aprimoramentos e diminuição das etapas onerosas de edição.

Na Fotogrametria tradicional o levantamento de fotos aéreas era tipicamente realizado com 60% de sobreposição longitudinal e com 20% de sobreposição lateral e o aumento desta relação implicava em muitos custos com material fotográfico (HAALA, 2011). Os custos adicionais para o aumento na superposição entre as imagens puderam ser reduzidos com a utilização das câmaras digitais. Além disso, encontram-se no mercado câmaras digitais a um custo relativamente baixo e com alta qualidade radiométrica, que é extremamente favorável para o problema da correspondência de imagens, especialmente em superfícies homogêneas (ROTHERMEL e HAALA, 2011). A ampliação da sobreposição entre as imagens aumenta o número de observações para um mesmo ponto, beneficiando a utilização de métodos que consideram a correspondência simultânea entre múltiplas imagens e a qualidade da correspondência, como o método de busca em linha vertical (*Vertical Line Locus – VLL*), que pode ser expandido para a utilização de duas ou mais imagens e é amplamente utilizado na pesquisa acadêmica (ZHANG, 2005; IDOETA, 2007), em *softwares* comerciais e acadêmicos, como o E-Foto (SILVEIRA et al., 2007). O método VLL realiza uma restrição geométrica no espaço de busca durante o processo de correspondência entre imagens partindo do espaço objeto para o espaço imagem.

Adicionalmente, o poder de processamento dos computadores permite a utilização de técnicas mais robustas de correspondência de imagens. Novos métodos surgiram, como o método *Semi-Global Matching* (SGM), desenvolvido recentemente por Hirschmüller (2005; 2008) e que tem atraído grande interesse na área de Fotogrametria, por proporcionar a geração de MDTs com densidade e qualidade próximas ao verdadeiro potencial esperado com a utilização de imagens (HIRSCHMÜLLER e BUCHER, 2010; HAALA et al., 2010; GEHRKE et al., 2010; ROTHERMEL e HAALA, 2011).

Neste contexto, é de grande relevância investigar o potencial e desenvolver estratégias mais refinadas para a geração de Modelos Digitais de Superfície a partir da abordagem de correspondência densa utilizando imagens de câmaras digitais de formato médio, bem como

desenvolver competências e conhecimento sobre as características, limites e problemas dos métodos para a correspondência de imagens.

1.1. Objetivos

O objetivo principal deste trabalho é estudar e avaliar experimentalmente uma metodologia para a geração de Modelos Digitais de Superfície a partir de múltiplas imagens.

Como objetivos específicos, têm-se:

- ✓ Implementar o método de correspondência por *Vertical Line Locus* (VLL);
- ✓ Implementar e analisar a correspondência por múltiplas imagens;
- ✓ Implementar e analisar a correspondência utilizando subjanelas;
- ✓ Realizar uma análise comparativa entre o MDS gerado a partir da metodologia desenvolvida e dados obtidos por varredura a LASER e por um *software* comercial.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. Orientação de Imagens

No processo de orientação de imagens são definidos os parâmetros dos modelos de sensor (parâmetros de orientação interior) e da plataforma (parâmetros de orientação exterior).

2.1.1. Orientação interior

A orientação interior define as características internas do sensor sendo responsável pela reconstrução dos feixes de raios no interior do sensor, correspondente ao feixe que formou a imagem no momento de sua aquisição. Os principais parâmetros de orientação interior (POI) são a distância focal, posição do ponto principal (pp), os coeficientes de distorções das lentes e em alguns casos parâmetros de afinidade (MIKHAIL et al., 2001). A determinação dos POI é realizada no processo de calibração de câmaras e os parâmetros são fornecidos por meio de um certificado de calibração.

2.1.1.1. Sistemas do espaço imagem

No início da Fotogrametria eram utilizadas fotografias analógicas e instrumentos analógicos ópticos e mecânicos para medir coordenadas 3D. Com as possibilidades trazidas pelos computadores, a Fotogrametria, ainda a partir de fotografias analógicas, passou a resolver todo o processo analiticamente por meio dos computadores e ficou conhecida como Fotogrametria analítica (KRAUS, 2007). A Fotogrametria atualmente utiliza imagens digitais, que podem ser obtidas diretamente por câmaras digitais ou a partir de imagens analógicas digitalizadas (MIKHAIL et al., 2001). O uso de imagens digitais apresenta vantagens como a possibilidade de melhoramento das imagens e a automação de grande parte dos processos fotogramétricos.

Uma imagem digital é formada por uma matriz bidimensional (linha e coluna) de elementos de imagem chamados pixels. Imagens digitais também podem ser descritas em termos de IFOV (*Instantaneous field of view*) e GSD (*Ground sample distance*). O IFOV descreve, em medida angular, a região vista por um único elemento do sensor (pixel). O GSD é a projeção do tamanho do pixel sobre o plano do terreno (MIKHAIL et al., 2001).

O sistema de coordenadas das imagens digitais tem como origem o centro do pixel superior esquerdo da matriz de pixels. O eixo horizontal (eixo C) corresponde à contagem de colunas, contado a partir da origem até a última coluna da imagem (j). O eixo vertical (eixo L) inicia na origem até i (última linha) e corresponde à contagem de linhas. Cada pixel na imagem possui uma coordenada coluna, linha (c, l) (Figura 1).

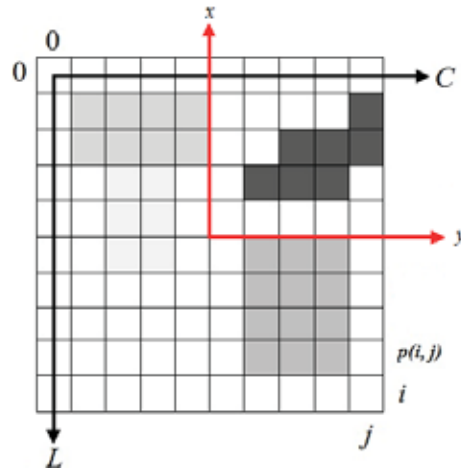


Figura 1: Sistema de coordenadas de imagens digitais.

Na Figura 1 os eixos x_c e y_c representam o sistema de coordenadas intermediário. Este sistema possui origem no centro da imagem e unidades métricas. A transformação do sistema imagem para o sistema intermediário é feita trasladando-se sua origem para o centro geométrico da imagem ($C_x = (colunas - 1)/2$, $C_y = (linhas - 1)/2$), refletindo-se o eixo vertical L (linhas) e aplicando-se fatores de escala, que são as dimensões do pixel (μ_x, μ_y). As Equações 1 permitem o cálculo das coordenadas no sistema centrado (intermediário).

$$\begin{aligned} x_c &= (l - C_x) * \mu_x \\ y_c &= -(l - C_y) * \mu_y \end{aligned} \quad (1)$$

Com o avanço das câmaras digitais e das técnicas de computação de imagens, as imagens digitais, tomadas diretamente de câmaras digitais e não digitalizadas, estão retomando o interesse para sua utilização em aplicações como a geração de modelos digitais de terreno (GEHRKE, et al., 2010; HAALA et al., 2010; HAALA, 2009) devido ao menor custo e à alta qualidade geométrica e radiométrica.

Sistema fotogramétrico

O sistema fotogramétrico é um sistema cartesiano tridimensional com origem no ponto nodal anterior, para o diapositivo; e no ponto nodal posterior, para o plano do negativo. Os eixos x_f e y_f do sistema fotogramétrico no plano do diapositivo são paralelos ao sistema intermediário da imagem (Figura 1) e o eixo $z_f = -f$ completa o sistema de forma que seja dextrogiro. No plano do negativo os eixos x_f e y_f sofrem uma reflexão e o eixo $z_f = f$.

O ponto principal (pp) é o pé da perpendicular ao plano do negativo ou diapositivo passante pelo ponto nodal anterior. Segundo Wolf e Dewitt (2000), como não ocorre a perfeita coincidência entre o pp e o centro fiducial, ou o centro do sensor em câmaras digitais, é necessário considerar o deslocamento entre estes pontos no processo de refinamento das coordenadas da imagem. A magnitude do deslocamento é obtida no processo de calibração da câmara e aplicada às coordenadas por (Equação 2):

$$\begin{aligned}x_f &= x_c - x_0 \\y_f &= y_c - y_0\end{aligned}\tag{2}$$

onde (x_c, y_c) são as coordenadas do ponto com relação ao centro da imagem, (x_0, y_0) são as coordenadas do pp com relação ao centro da imagem e (x_f, y_f) são as coordenadas fotogramétricas.

2.1.1.2. Refinamento de coordenadas imagem

Os modelos matemáticos utilizadas em Fotogrametria descrevem uma geometria ideal, não considerando fatores que causam desvio na trajetória do feixe de raios luminosos no processo de formação da imagem.

O refinamento das coordenadas é realizado para eliminar erros sistemáticos que ocorrem no processo de formação da imagem. Estes erros provocam distorções e fazem com que as coordenadas medidas na imagem sejam diferentes das coordenadas medidas caso a imagem fosse adquirida em condições ideais.

Em imagens de câmaras digitais os principais efeitos sistemáticos a serem considerados são o deslocamento do ponto principal, a refração atmosférica e as distorções das lentes. Os erros sistemáticos são corrigidos na sequência inversa em que ocorrem

(MIKHAIL et al., 2001). A correção é realizada subtraindo-se estes efeitos das coordenadas (x, y) medidas na imagem (Equação 3).

$$\begin{aligned}x_f &= x - x_0 - \delta x_{ref} - \delta x_r - \delta x_d - \delta x_a \\y_f &= y - y_0 - \delta y_{ref} - \delta y_r - \delta y_d - \delta y_a\end{aligned}\quad (3)$$

onde δx_{ref} e δy_{ref} é o deslocamento nas componentes x e y causado pela refração atmosférica; $(\delta x_r$ e $\delta y_r)$ distorção radial nas componentes x e y ; $(\delta x_d$ e $\delta y_d)$ distorção descentrada nas componentes x e y ; $(\delta x_a$ e $\delta y_a)$ são os parâmetros de afinidade.

O modelo de afinidade não está relacionado ao sistema de lentes, ele permite modelar a não ortogonalidade dos eixos do sistema de referência e diferença entre as escalas dos eixos x e y . Este modelo foi originalmente descrito por Moniwa (1972), considerando uma diferença de escala em y e não ortogonalidade entre os eixos, para o caso de câmaras não métricas. Tommaselli e Tozzi (1990) adaptaram o modelo para câmaras digitais e incorporaram a diferença de escala no eixo x , desta forma o modelo é dado por $(\delta x_a, \delta y_a) = (A(x - x_0)), (B(x - x_0))$. Estes parâmetros foram desconsiderados neste trabalho, porque não foram fornecidos no certificado de calibração.

As componentes δx_{ref} e δy_{ref} , δx_r e δy_r , δx_d e δy_d , δx_a e δy_a podem ser somadas ou subtraídas, dependendo de como os coeficientes são fornecidos no certificado de calibração (correções ou distorções).

2.1.1.2.1. Refração atmosférica

De acordo com a lei de Snell um raio de luz ao passar através de dois meios com diferentes índices de refração é refratado. Sabendo que o índice de refração da atmosfera diminui com o aumento da altitude, um raio de luz partindo do terreno (ponto A da Figura 2), que deveria ter sua imagem na posição a' , forma um ângulo α com a vertical, atingindo o sensor na posição a , com um deslocamento angular $\Delta\alpha$ e um deslocamento linear Δr . Ignorando-se a refração, o raio de luz aparenta estar partindo do ponto B no terreno (WOLF e DEWITT, 2000).

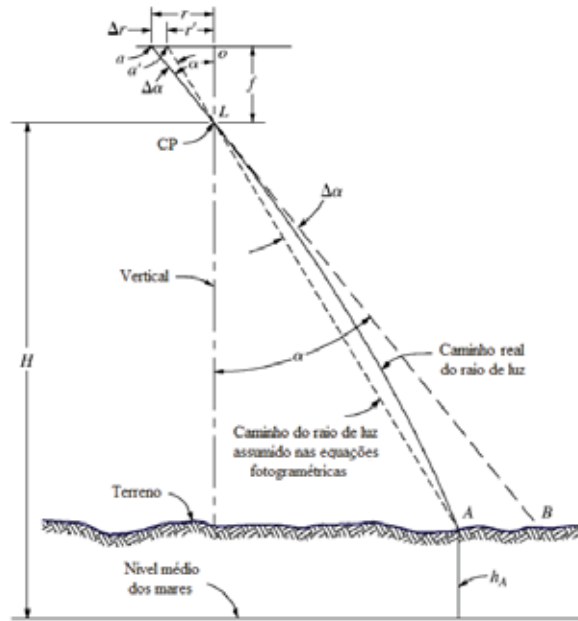


Figura 2: Refração atmosférica em fotografia aérea. Fonte: Adaptada de Wolf e Dewitt (2000).

O deslocamento provocado pelo efeito da refração atmosférica ocorre radialmente a partir do nadir e sua magnitude é maior quanto maior a altitude de voo. Este deslocamento Δr pode ser calculado baseado em um modelo de atmosfera por (Equação 4) (SHENK, 1999):

$$\Delta r = K \left(r + \frac{r^3}{f^2} \right) \quad (4)$$

$$K = \left(\frac{2410H}{H^2 - 6H + 250} - \frac{2410h^2}{(h^2 - 6h + 250)H} \right) 10^{-6} \quad (5)$$

onde H e h são dados em quilômetros. A constante K está relacionada com a altitude de voo (H) e a altitude do objeto (h).

O deslocamento nas componentes x e y (δx_{ref} e δy_{ref}) pode ser calculado por:

$$\begin{aligned} \delta x_{ref} &= \frac{x}{r} \Delta r \\ \delta y_{ref} &= \frac{y}{r} \Delta r \end{aligned} \quad (6)$$

Para o cálculo das correções da refração atmosférica nas coordenadas da imagem é necessário calcular a distância radial $r = \sqrt{x^2 + y^2}$.

2.1.1.2.2. Distorções das lentes

As distorções das lentes causam deslocamentos nas posições da imagem. As equações matemáticas que são usadas para modelar as distorções das lentes são geralmente formadas de duas componentes: distorção radial simétrica e distorção descentrada (WOLF e DEWITT, 2000).

2.1.1.2.3. Distorção Radial Simétrica

A distorção radial simétrica é um produto inevitável do processo de fabricação das lentes que pode ser reduzida a um valor muito pequeno (WOLF e DEWITT, 2000). Para Mikhail et al. (2001), a distorção radial é o deslocamento radial de um ponto na imagem de sua posição teoricamente correta ou, igualmente, uma alteração no ângulo entre um raio de luz e o eixo óptico.

A distorção radial pode ter valores positivos e negativos. Com valores positivos o deslocamento radial ocorre de dentro para fora a partir do ponto principal deixando a imagem com bordas curvadas em direção ao centro. Os valores negativos deslocam as posições em direção ao ponto principal, causando à imagem uma aparência de um barril (MIKHAIL et al., 2001).

O deslocamento δr pode ser expresso como uma função polinomial de ordem ímpar (MIKHAIL et al., 2001):

$$\delta r = k_1 r^3 + k_2 r^5 + k_3 r^7 + \dots \quad (7)$$

A Figura 3 mostra a relação entre a distorção radial δr e as correções δx_r e δy_r nas componentes x e y, respectivamente.

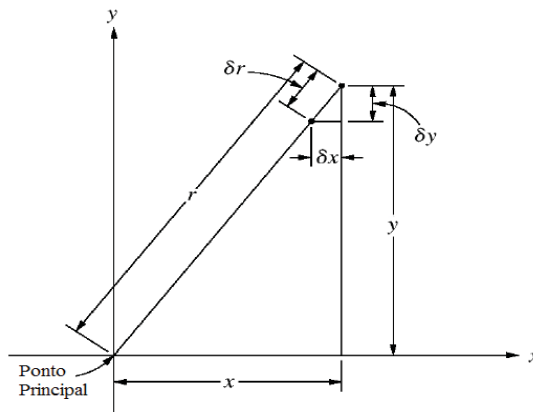


Figura 3: Distorção radial δr e as correções nas componentes x e y . Fonte: Adaptada de Wolf e Dewitt (2000).

A distorção radial nas componentes x e y (δx_r e δy_r) pode ser calculada por:

$$\begin{aligned}\delta x_r &= \frac{x}{r} \delta r \\ \delta y_r &= \frac{y}{r} \delta r\end{aligned}\tag{8}$$

2.1.1.2.4. Distorção Descentrada

Segundo Mikhail et al. (2001), a distorção descentrada é uma consequência de erros na montagem dos componentes das lentes que afetam sua simetria rotacional. Esta distorção possui uma componente radial assimétrica (δr) e uma tangencial (δt), que variam de acordo com o vetor formado do pp até o ponto de interesse e com relação ao eixo de distorção tangencial máxima (Figura 4).

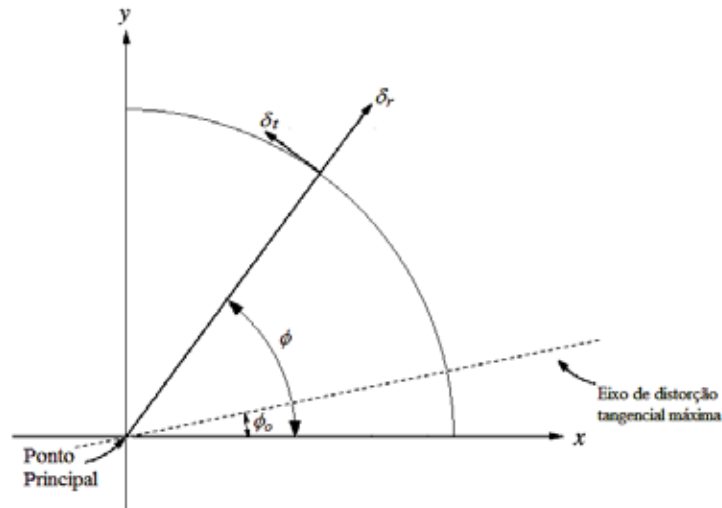


Figura 4: Distorção descentrada.

O cálculo desta distorção é realizado por:

$$\begin{aligned}\delta x_d &= [P_1(r^2 + 2x^2) + 2P_2xy][1 + P_3r^2 + \dots] \\ \delta y_d &= [P_2(r^2 + 2y^2) + 2P_2xy][1 + P_3r^2 + \dots]\end{aligned}\quad (9)$$

onde P_1 , P_2 e P_3 são coeficientes estimados no processo de calibração de câmaras, porém P_3 geralmente não são utilizados.

2.1.2. Orientação exterior

A orientação exterior define a posição e orientação do feixe de raios que constitui a imagem com relação ao sistema de coordenadas do espaço objeto. Cada imagem requer seis parâmetros independentes, três de posição (X_0 , Y_0 , Z_0) e três de orientação (ω , ϕ , κ), isto, ao se tratar de imagens de quadro. Para o caso de sensores de varredura linear (*pushbroom*), cada linha da cena define um novo feixe de raios, com seus seis parâmetros de orientação exterior (POE) (MIKHAIL et al., 2001).

Os POE para apenas uma imagem podem ser estimados pelo método de Ressecção Espacial, sendo necessários, no mínimo, três pontos de apoio não colineares. Após estimar os POE de pelo menos duas imagens separadamente é possível determinar a posição de um ponto fotogramétrico (ponto presente em no mínimo duas imagens) no sistema de referência do terreno pelo método de intersecção espacial.

A fototriangulação é um processo fotogramétrico realizado com a finalidade de determinar, para várias imagens, seus POE e as coordenadas dos pontos fotogramétricos, bem como suas precisões. Sendo assim, na fototriangulação os POE são calculados e ajustados simultaneamente, para todas as imagens do bloco.

Os métodos citados empregam modelos matemáticos para relacionar o espaço imagem e o espaço objeto e o modelo tradicionalmente utilizado é o de colinearidade.

A condição de colinearidade considera que o centro perspectivo da foto (X_0, Y_0, Z_0), o ponto no espaço imagem (x, y) e o ponto correspondente no espaço objeto (X, Y, Z) são colineares (Figura 5). A colinearidade é expressa por duas equações (Equações 10), correspondentes às coordenadas fotogramétricas x_f e y_f (MIKHAIL et al., 2001).

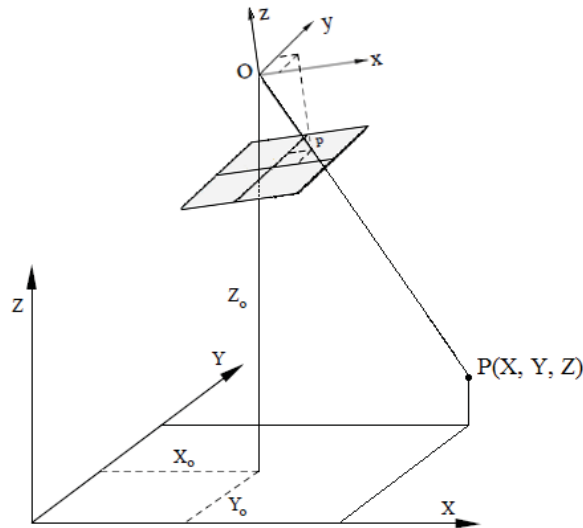


Figura 5: Condição de colinearidade.

$$\begin{aligned} x_f &= -f \cdot \frac{m_{11} \cdot (X - X_0) + m_{12} \cdot (Y - Y_0) + m_{13} \cdot (Z - Z_0)}{m_{31} \cdot (X - X_0) + m_{32} \cdot (Y - Y_0) + m_{33} \cdot (Z - Z_0)} \\ y_f &= -f \cdot \frac{m_{21} \cdot (X - X_0) + m_{22} \cdot (Y - Y_0) + m_{23} \cdot (Z - Z_0)}{m_{31} \cdot (X - X_0) + m_{32} \cdot (Y - Y_0) + m_{33} \cdot (Z - Z_0)} \end{aligned} \quad (10)$$

em que:

- x_f e y_f : coordenadas de um ponto no sistema fotogramétrico;
- (X, Y, Z) : coordenadas do ponto em um referencial do espaço objeto;
- (X_0, Y_0, Z_0) : coordenadas do centro perspectivo (CP) no referencial do espaço objeto;
- f : distância focal da câmara;
- m_{ij} : elementos da matriz de rotação 3 x 3.

sendo a matriz de rotação M (MIKHAIL et al., 2001):

$$M = \begin{bmatrix} \cos \varphi \cos \kappa & \cos \omega \sin \kappa + \sin \omega \sin \varphi \cos \kappa & \sin \omega \sin \kappa - \cos \omega \sin \varphi \cos \kappa \\ -\cos \varphi \sin \kappa & \cos \omega \cos \kappa - \sin \omega \sin \varphi \sin \kappa & \sin \omega \cos \kappa + \cos \omega \sin \varphi \sin \kappa \\ \sin \varphi & -\sin \omega \cos \varphi & \cos \omega \cos \varphi \end{bmatrix} \quad (11)$$

Outra forma de determinar os POE é o georreferenciamento direto, onde os POE são calculados para o instante de exposição fotográfica, por meio da integração entre os sistemas GNSS (*Global Navigation Satellite System*) e INS (*Inertial Navigation System*).

Neste trabalho serão utilizados os POE obtidos pela técnica de georreferenciamento direto das imagens como parâmetros aproximados para a fototriangulação.

2.1.3. Geometria Epipolar

A geometria epipolar é uma alternativa para a redução do espaço de busca na correlação, pois, a partir desta restrição, a busca de pontos correspondentes em um estereopar orientado pode ser reduzida para um problema de correspondência unidimensional.

A Figura 6 mostra um par de imagens com sobreposição e um ponto P no espaço objeto com seus correspondentes pontos p_1 e p_2 nas imagens. Em geral, as imagens não são tomadas exatamente verticais e as posições dos centros perspectivos (CP_1 e CP_2) têm alturas diferentes. O plano definido pelos pontos CP_1 , CP_2 e P é conhecido como plano epipolar. As duas linhas onde este plano intercepta as duas imagens são chamadas de linhas epipolares, sendo estas conjugadas. Nota-se que existem infinitas linhas epipolares correspondentes ao conjunto de planos que cortam as imagens e contêm a linha de base CP_1CP_2 (MIKHAIL et al., 2001). As linhas epipolares podem ser determinadas após ter sido realizada a orientação do estereopar.

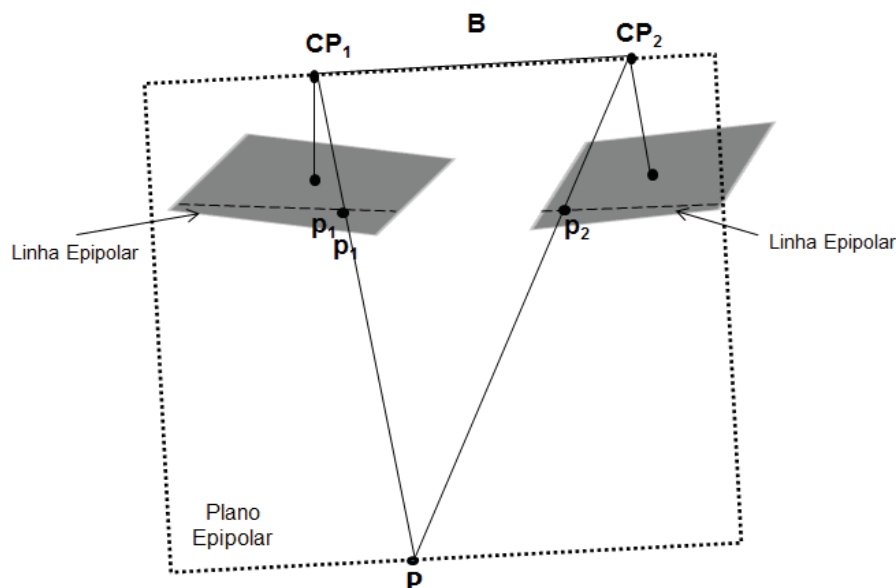


Figura 6: Plano epipolar e as correspondentes linhas epipolares. Fonte: Adaptado de Mikhail et al. (2001).

2.2. Correspondência de imagens

A correspondência de imagens (*image matching*) é uma das principais técnicas na Fotogrametria Digital (SCHENK, 1999; GRUEN, 1985). Esta técnica trata da identificação e medida de pontos homólogos (pontos comuns) em duas ou mais imagens com sobreposição.

Na Fotogrametria as principais aplicações de correspondência de imagens são para geração de modelos digitais de terreno, medição de pontos fotogramétricos e pontos de controle para orientação de imagens, e extração automática de feições (GRUEN, 2012). Além disso, é uma técnica largamente aplicada na área de visão computacional, navegação, vigilância, orientação automática, robótica e análises de imagens médicas (GRUEN, 1985).

Segundo Schenk (1999) e Gruen (2012) a correlação de imagens foi introduzida no início dos anos 1950. Inicialmente, surgiu como um procedimento analógico que utilizava circuitos elétricos para solucionar as equações de correspondência (HOBROUGH, 1959). Técnicas para correlação foram inicialmente aplicadas em restituidores analíticos. No Kern DSR-11, foi inserido o método de redução do espaço de busca em linha vertical (*vertical line locus*) (BETHEL, 1986; ALMROTH e HENDRIKS, 1987) e a correspondência por mínimos quadrados.

Com o avanço dos computadores nos anos 1970, foi possível o tratamento totalmente digital do problema de correspondência. Por volta dos anos 1980, as características e

deficiências da correlação cruzada tornaram-se mais compreendidas (GRUEN, 2012). Gruen (1985) aponta que os principais problemas para a correspondência entre os pares de imagens são causados por distorções geométricas (declividade do terreno, diferenças de altura, diferenças de posição e atitude de sensores), problemas radiométricos (iluminação, reflexão, variação das propriedades dos materiais) e a falta de bons métodos para a avaliação dos resultados.

Na busca por uma técnica de correspondência mais eficiente e precisa foi desenvolvida a correspondência por mínimos quadrados (*Least Squares Matching - LSM*) (FORSTNER, 1982; ACKERMANN, 1984; GRUEN, 1985). As medidas de precisão e confiabilidade deste método permitiram uma avaliação melhor da qualidade da correspondência do que em outras técnicas (GRUEN, 1985).

Um grande número de sistemas comerciais digitais surgiu na década de 1990, mas alguns não sobreviveram por muito tempo. Segundo Gruen (2012) uma aplicação particularmente promissora e de sucesso foi apresentada por Maas (1996). Trata-se de uma técnica de correspondência de múltiplas imagens, onde as feições são pesquisadas ao longo de linhas epipolares.

Por mais de 50 anos, a correspondência de imagens tem sido um problema pesquisado para o desenvolvimento de aplicações automáticas e, ainda, possui algumas questões a serem resolvidas.

Os métodos de correspondência de imagens podem ser classificados como métodos baseados em áreas, métodos baseados em características (*Feature-Based Matching - FBM*) e correspondência relacional. Na área de visão computacional os algoritmos podem ser classificados, segundo Scharstein e Szeliski, (2002), de métodos locais e métodos globais.

2.2.1. Métodos baseados em áreas

Os métodos baseados em áreas comparam os níveis de intensidade de uma pequena subimagem (*template*) em outras imagens. A similaridade é medida por funções de correlação (função erro, correlação cruzada, coeficiente de correlação, etc), ou pelo método dos mínimos quadrados (MMQ) (HEIPKE, 1996; SCHENK, 1999; GRUEN, 2012).

Nos métodos baseados em área a correspondência de imagens parte de duas imagens digitais ou digitalizadas (I_e e I_d). A partir da imagem da esquerda são extraídas janelas de referências (*template*), que percorrem a imagem da direita (imagem de busca) (Figura 7).

Durante este processo compara-se a distribuição dos tons de cinza entre a janela de referência e a janela de busca, delimitada na imagem da direita, utilizando uma função de similaridade.

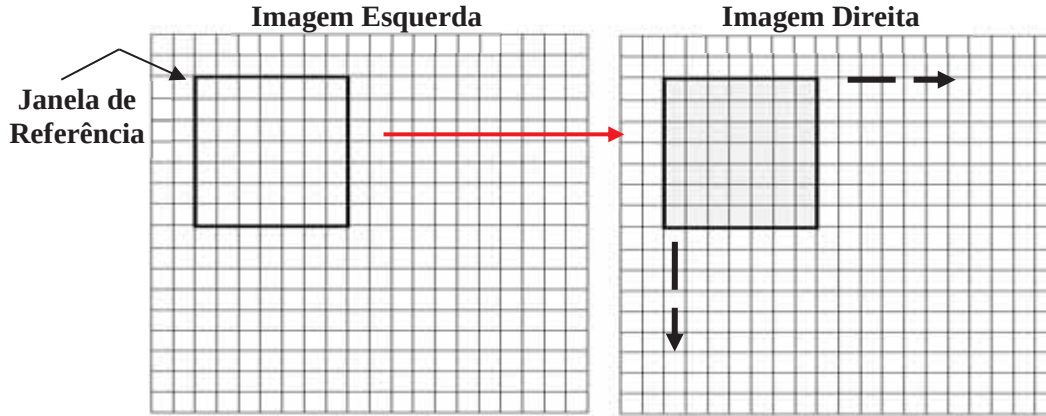


Figura 7: Correspondência entre imagens: método baseado em área.

O coeficiente de correlação (r) (Equação 12) é uma das funções mais utilizadas na medida de similaridade e é obtido da normalização da função de covariância cruzada. O valor do coeficiente r está entre -1 e +1. O valor zero significa ausência de correlação; o valor +1 significa correlação total positiva e o valor -1 significa correlação negativa (KRAUS, 2007).

$$r = \frac{\sigma_{R,B}}{\sigma_R \sigma_B} = \frac{\sum (g_R - \bar{g}_R)(g_B - \bar{g}_B)}{\sqrt{\sum (g_R - \bar{g}_R)^2 (g_B - \bar{g}_B)^2}} \quad (12)$$

em que $\sigma_{R,B}$ é a covariância entre a imagem de referência e a imagem de busca; (σ_R e σ_B) são os desvio-padrões da imagem de referência e de busca; (g_R e g_B) são os tons de cinza da imagem de referência e de busca; ($\bar{g}_R$ e $\bar{g}_B$) são as médias dos tons de cinza da imagem de referência e de referência.

O método de correspondência por mínimos quadrados é amplamente utilizado e geralmente é aplicado em uma segunda etapa com base nos resultados de uma função de similaridade, como o coeficiente de correlação e proporciona resultados com qualidade subpixel. Para mais detalhes deste método ver Forstner (1993), Schenk (1999) e Kraus (2007).

2.2.1.1. Correspondências com janelas móveis

Os métodos de correspondência baseados em área usam pequenas janelas da imagem geralmente centradas em um determinado pixel e uma medida de similaridade calculada com base nos níveis de cinza dos pixels dentro da janela.

Como ressaltado por Kanade e Okutomi (1991) se a janela é pequena demais e não apresenta variação de intensidade suficiente, a qualidade da estimativa da correspondência é comprometida, pois a relação sinal/ruído é baixa. Por outro lado, se a janela é muito grande e abrange uma região com bastante variação de intensidade, a posição da correspondência pode não ser a verdadeira. Diante disso, alguns métodos de correspondências utilizando janelas com tamanhos ou posições (ou ambos) adaptativas são encontrados na literatura (KANADE e OKUTOMI, 1991; FUSIELO et al., 1997; CHAN et al., 2003).

Para superar essas dificuldades, Kanade e Okutomi (1991) propuseram uma técnica estatística que seleciona em cada pixel o tamanho da janela que minimiza a incerteza nas estimativas de disparidade. Neste trabalho, os autores partem de uma janela 3x3 e expandem a janela um pixel para uma das quatro direções ($x+$, $x-$, $y+$ ou $y-$) (ver Figura 8) calculando a similaridade. Assim, a forma da janela varia para cada ponto (retângulo). Caso a expansão aumente a incerteza na estimativa da paralaxe, a janela para de aumentar para esta direção e inicia o processo para a próxima direção diferente. O processo é realizado para cada direção e no final verifica-se a direção com o menor erro.

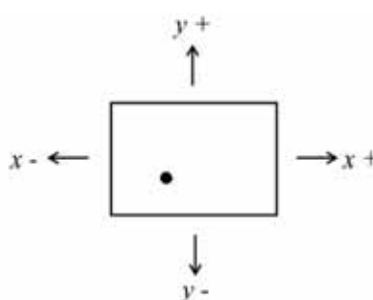


Figura 8: Direções para expansão das janelas de busca. Fonte: Kanade e Okutomi (1991).

Fusiello et al. (1997), baseados no trabalho de Kanade e Okutomi (1991) apresentam um método de múltiplas janelas com foco principalmente no problema do cálculo da paralaxe na presença de oclusões. Fusiello et al. (1997) calculam o coeficiente de correlação para nove janelas alterando a posição do pixel central como mostra a Figura 9. A ideia é que a janela

com o maior coeficiente de correlação é provavelmente a janela que abrange uma região de paralaxe constante.

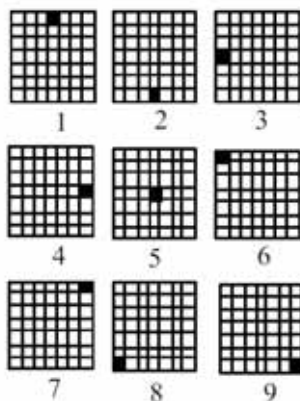


Figura 9: Posições do pixel central das janelas de busca. Fonte: Fusiolo et al. (1997).

Além de utilizar janelas com tamanhos ou posições diferentes, algumas restrições podem ser consideradas, como a restrição epipolar ou a restrição de correspondência mutua (CHAN et al., 2003).

2.2.2. Métodos baseados em características

Neste método a correspondência é realizada entre características, extraídas nas imagens. As feições podem ser classificadas em feições locais (pontos, bordas, linhas e regiões) ou feições globais (polígonos ou estruturas mais complexas), que são compostas por feições locais (HEIPKE, 1996). As feições são caracterizadas por seus atributos, como coordenadas, gradientes, tamanho e brilho médio de regiões, comprimento, curvatura, entre outros.

Segundo Gruen (2012) este método pode ser dividido em duas etapas. Na primeira etapa é feita a extração de feições (pontos, cantos, segmentos de linhas, bordas, regiões), juntamente com seus atributos ou características, em cada imagem. A etapa seguinte trata-se da busca por correspondência entre as feições extraídas a partir de imagens diferentes. Em geral, as características podem ser consideradas mais estáveis do que níveis de intensidade. No entanto, a informação que é perdida durante a fase de extração de feições não pode mais ser recuperada. Alguns métodos podem fornecer precisão subpixel, mas não ao nível dos métodos baseados em intensidade (GRUEN, 2012). A correspondência baseada em

características tem sido realizada utilizando programação dinâmica, relaxação (GALO, 2003), estimação robusta, correlação cruzada e correspondência de grafos.

Comparadas com os métodos baseados em áreas, as técnicas de correspondência por características são mais flexíveis com relação às discontinuidades na superfície e aos requisitos para valores aproximados. A precisão da correspondência baseada em característica é limitada pela precisão do processo de extração de feições (ZHANG, 2005).

2.2.3. Correspondência relacional

Para Heipke (1996) a correspondência relacional utiliza feições globais. Podem ser estabelecidas relações geométricas (ângulo, distância, etc) e radiométricas (tons de cinza entre duas regiões adjacentes, etc) entre as feições.

A correspondência é estabelecida pela técnica de busca em árvore. Estes métodos não são muito precisos, mas são geralmente robustos, e não requerem boas aproximações. Este método é pouco utilizado para a geração de modelo digital do terreno (GRUEN, 2012).

Schenk (1999) classifica os métodos de correspondência como baseados em área, baseados em atributos e em correspondência simbólica. Para Schenk (1999), a correspondência relacional é um tipo de correspondência simbólica. Segundo o autor, este método compara descrições simbólicas das imagens e mede a similaridade através de uma função de custo. A correspondência simbólica pode ser baseada nos níveis de cinza ou funções derivadas. Podem ser implementadas como grafos, árvores, redes semânticas, entre outras possibilidades. Diferentemente dos outros métodos, a correspondência simbólica não é estritamente baseada nas propriedades geométricas para medir a similaridade. Ao invés de usar a forma como um critério de similaridade, este método compara as propriedades topológicas entre as feições.

2.2.4. Métodos Locais e Globais

Nos algoritmos locais (baseados em janelas) o cálculo do mapa de disparidade, como é conhecida a paralaxe em visão computacional, em um determinado ponto depende apenas de valores de intensidade/cor dentro de uma janela finita. Alguns desses algoritmos podem ser divididos nas etapas 1, 2 e 3 (SCHARSTEIN e SZELISKI, 2002):

- 1) **Custo da correspondência:** é o cálculo da diferença entre as intensidades dos pixels da imagem da esquerda e da direita. O método mais utilizado é a diferença absoluta entre os pixels; com isso, considerando-se uma imagem com tamanho x, y pixels e assumindo d níveis de paralaxes, criam-se d planos (matrizes) com tamanhos x, y . Cada plano conterá as diferenças (quadrática ou absoluta) pixel a pixel entre as imagens. Na imagem da direita é realizado um deslocamento de 0 à d para cada pixel da imagem da esquerda. Em cada deslocamento a diferença de brilho entre os pixels é armazenada no elemento da matriz do plano d correspondente ao deslocamento (Figura 10).

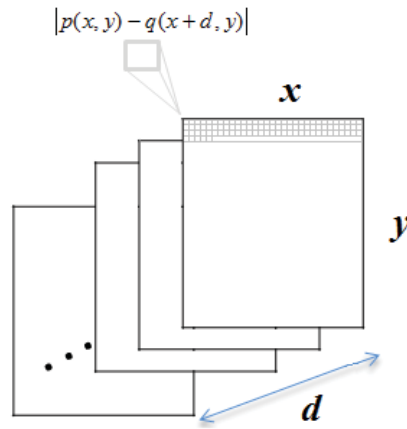


Figura 10: Custo da correspondência.

- 2) **Agregação de custo:** é a soma das diferenças, obtidas em cada plano d ; para cada elemento de janela quadrada centrada em uma posição (x, y) , tem-se:

$$C'(x, y, d) = \sum_{(x', y') \in \Omega} C(x', y', d) \quad (13)$$

onde Ω é a janela delimitada ao redor do ponto $p(x, y)$.

- 3) **Seleção da paralaxe:** seleciona-se o valor mínimo agregado a cada pixel na etapa anterior.

De acordo com Scharstein e Szeliski, (2002) os métodos globais normalmente não executam uma etapa de agregação, mas procuram uma atribuição de paralaxe (etapa 3) que minimize uma função de custo global (Equação 14), que combina dados (etapa 1) e termos de

suavidade. A principal distinção entre estes algoritmos é o procedimento de minimização utilizado.

$$E(d) = E_{data}(d) + \lambda E_{smooth}(d) \quad (14)$$

O termo $E_{data}(d)$ corresponde ao custo de correspondência definido na etapa 1, $E_{smooth}(d)$ é o termo que contribui para a suavidade do mapa de paralaxes e λ é uma constante (determinada empiricamente de acordo com o problema) e contribui para a suavidade do mapa de disparidades.

Após definir uma função global de energia, pode-se optar por vários algoritmos para encontrar um mínimo (local), como os métodos de Fluxo máximo (*Max-flow*) e Cortes de grafos (*Graph-cut*) (SCHARSTEIN e SZELISKI, 2002).

Os métodos globais, geralmente têm alta precisão no processo de correspondência entre as imagens. No entanto, a maioria deles possui alto custo computacional e algumas vezes precisam de muitos parâmetros que são difíceis de determinar. Comparadas com os métodos globais, as abordagens locais têm uma estrutura mais simples e maior eficiência.

Uma variação dos métodos globais foi desenvolvida por Hirschmüller (2005, 2008), chamado de método *Semi-Global Matching* (SGM). Este método tem sido investigado por vários pesquisadores para diferentes aplicações e conjuntos de dados, incluindo imagens aéreas e *pushbroom*. O SGM realiza uma aproximação do custo de agregação global de correspondência que é 2D, para 1D, o que diminui consideravelmente o custo computacional para sua execução (HIRSCHMÜLLER, 2005). Gehrke et al. (2010) afirmam que a precisão do SGM é semelhante à correspondência verdadeiramente global, mas é significativamente mais rápido e já está sendo reconhecido e utilizado comercialmente.

As etapas do SGM consistem em calcular o custo da correspondência hierarquicamente baseado na abordagem de Informação Mútua (*Mutual Information - MI*); em seguida é realizado o cálculo dos custos de agregação como uma aproximação de uma função global de energia por otimizações em todas as direções através da imagem. As paralaxes são calculadas utilizando refinamentos como verificação de consistência e interpolação subpixel (ver HIRSCHMÜLLER, 2005 e 2008).

2.2.5. Problemas na correspondência de imagens

Os principais problemas enfrentados pelos algoritmos de correspondência ocorrem na presença de áreas com pouca textura, onde há várias possibilidades de correspondência; áreas de oclusão, onde os pixels estão presentes em uma imagem, mas não estão presentes na outra, o que pode levar a correspondências incorretas se não forem devidamente tratadas; superfícies com padrão repetitivo; diferença de iluminação e reflectância e; áreas de descontinuidade, que representam as bordas dos objetos da cena, onde há mudanças bruscas de profundidade (VOSSELMAN et al., 2004, p.483). Considera-se que um problema é bem condicionado se três condições são atendidas: (a) a solução existe; (b) a solução é única e (c) a solução depende da continuidade dos dados iniciais. Dados os problemas citados anteriormente, a correspondência de imagens classifica-se como um problema mal condicionado.

Uma forma de evitar o problema de mal condicionamento é restringir o espaço de busca e utilizar boas aproximações, o que pode evitar falsas correspondências e assegurar a convergência da função (SCHENK, 1999). Ruídos, mudanças de iluminação e propriedades refletivas entre as imagens provocam diferenças nos níveis de cinza. Além disso, existem as distorções geométricas.

Segundo Schenk (1999) as principais causas de distorções geométricas relacionadas aos parâmetros de orientação e ao relevo são:

Diferença na altura de voo: origina imagens com escalas diferentes. Os pixels das imagens correspondem a locais diferentes no espaço objeto (Figura 11).

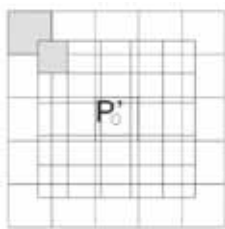


Figura 11: Imagens com diferentes escalas. Fonte: Schenk (1999).

Diferentes ângulos de rotação entre as duas imagens: os mesmos pixels das imagens referem-se a posições diferentes no espaço objeto. A Figura 12 mostra em (a) o efeito da rotação em torno do eixo X (ω); em (b) a rotação ϕ (eixo Y) e em (c) a rotação em κ (eixo Z).

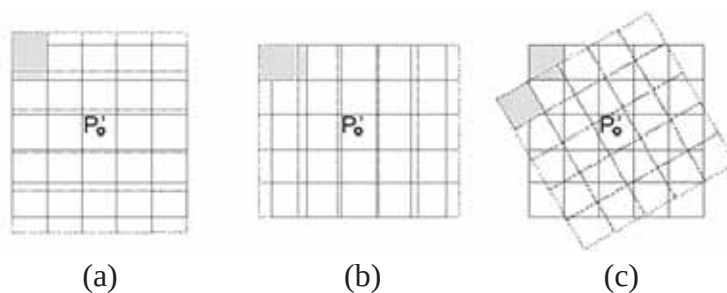


Figura 12: Imagens com diferentes ângulos de orientação. Fonte: Schenk (1999).

Efeito da inclinação da superfície: quando a superfície possui uma inclinação paralela à aerobase, a distorção geométrica é igual em todas as imagens e não afetará a correspondência entre as imagens (Figura 13 (a)). Ao contrário, se a inclinação da superfície ocorrer em torno de um eixo perpendicular à aerobase, o efeito da distorção é diferente, como pode-se observar na Figura 13 (b). A imagem da direita apresenta retângulos menores. Se a inclinação da superfície alcançar um ângulo crítico, ela não será visível na imagem consecutiva, produzindo as oclusões.

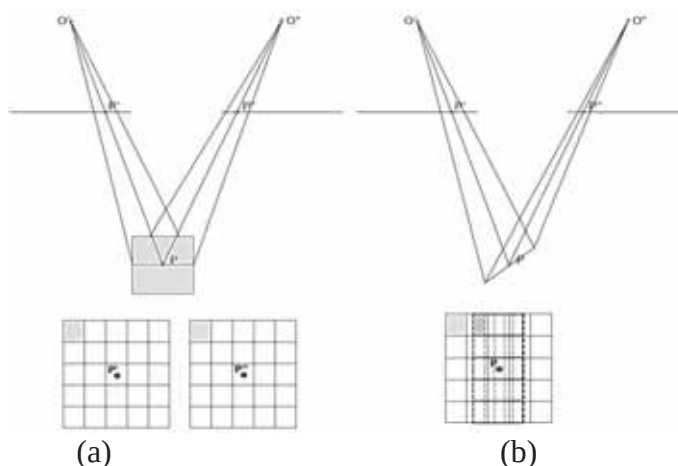


Figura 13: Efeito da inclinação da superfície na correlação baseada em área. Em (a) inclinação paralela à aerobase; (b) inclinação perpendicular à aerobase. Fonte: Schenk (1999).

Efeito do relevo: assumindo um caso real, onde cada pixel da imagem representa uma superfície com diferentes elevações, mesmo com imagens perfeitamente verticais, os pixels conjugados representam locais diferentes no espaço objeto (Figura 14).

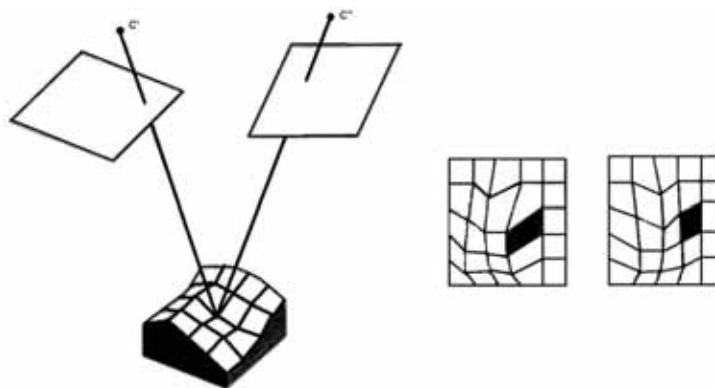


Figura 14: Efeito do relevo na medida de similaridade na correlação baseada em área. Fonte: Schenk (1999).

Os efeitos discutidos anteriormente afetam principalmente o resultado dos métodos de correlação baseados em área. Em geral, os métodos baseados em características sofrem muito menos os efeitos das distorções geométricas (SCHENK, 1999).

2.2.6. Redução do espaço de busca

A definição do espaço de busca no processo de correlação de imagens é um dos seus principais problemas. O custo computacional e a ocorrência de ambiguidades serão elevados sem a adoção de uma restrição para a região de busca para as feições homólogas, o que aumenta o risco de se ter falsas correspondências. Assim, é preciso restringir o espaço de busca para evitar estes possíveis problemas (WOLF e DEWITT, 2000) utilizando técnicas como a busca hierárquica, reamostragem epipolar, busca em linha vertical, entre outras.

2.2.6.1. Pirâmide de imagens

O tamanho das imagens e os diversos cálculos aos quais são submetidas em um sistema de processamento de imagens podem tornar o sistema carregado e lento. Para evitar esta dificuldade muitos algoritmos utilizam a técnica de pirâmide de imagens, que possibilita a redução do custo e complexidade dos cálculos.

A pirâmide de imagens é uma estrutura de dados constituída por uma sequência de imagens reamostradas a partir da imagem original com densidade de pixels e resolução reduzidos em passos regulares (ADELSON et al., 1984).

O processo para geração da pirâmide inicia-se aplicando um filtro passa baixa na base da pirâmide (nível zero G_0). Em seguida, a imagem resultante é subamostrada por um fator dois, para obter o nível seguinte da pirâmide. A nova imagem G_1 , com metade das dimensões em linhas e colunas da imagem original, é então filtrada da mesma maneira e subamostrada para obter o nível seguinte (Figura 15). O procedimento de filtragem/subamostragem é repetido até que seja alcançado o nível de menor resolução da pirâmide (ADELSON et al., 1984).

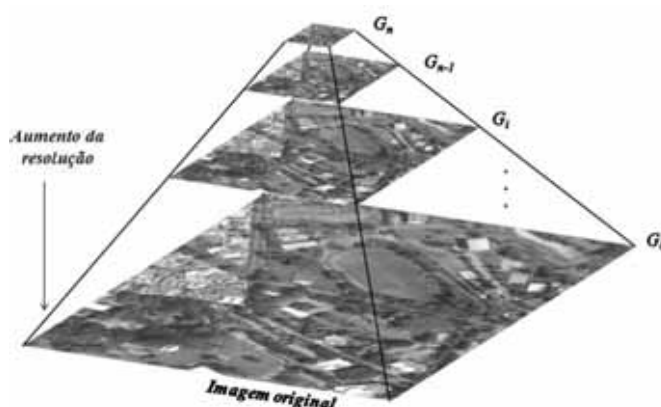


Figura 15: Pirâmide de imagens.

A partir deste método, é possível utilizar uma técnica de busca hierárquica, iniciando o processo de correlação de imagens na imagem de menor resolução (topo G_n). A solução obtida em um nível de menor resolução pode ser usada para inicializar a solução do próximo nível (com maior resolução) (MIKHAIL et al., 2001). Uma característica importante é que novos detalhes não são introduzidos nas imagens derivadas da imagem de maior resolução (MIKHAIL et al., 2001). Embora o filtro Gaussiano seja o método mais aceito teoricamente, na prática alguns sistemas de pirâmides de imagens utilizam uma média simples e subamostragem (MIKHAIL et al., 2001).

2.2.6.2. Busca em linhas epipolares

Na maior parte dos casos as imagens não são normais, então as linhas epipolares não são paralelas ao eixo de coordenadas x da imagem. Uma das características mais importantes da geometria epipolar na correspondência de imagens está no fato de que conhecidos os POE das imagens e considerando-se um determinado ponto em um delas, seu homólogo (caso exista) estará localizado sobre a linha epipolar conjugada.

A Figura 16 mostra a estratégia para redução do espaço de busca em linhas epipolares com informação altimétrica. O raio que passa pelo centro perspectivo da imagem da esquerda e pelo ponto p' ($C'p'$) intercepta o terreno no ponto S . Porém, considerando-se que é conhecida apenas uma elevação aproximada Z_p , que pode ser uma altitude média da região, o raio $C'p'$ também intercepta o ponto P .

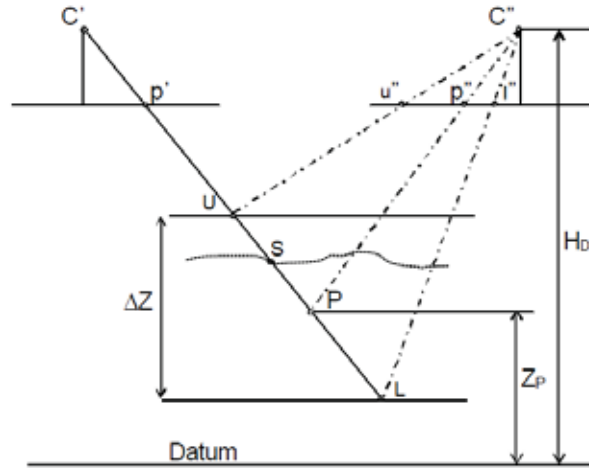


Figura 16: Redução do espaço de busca em linhas epipolares com informação altimétrica.

Fonte: Adaptado de Schenk (1999).

Com a elevação aproximada (Z_p) e os POEs da imagem da esquerda é possível projetar o ponto p' , com coordenadas no sistema fotogramétrico, para o sistema de referência do terreno (P), a partir das equações de colinearidade inversa (Equações 15):

$$\begin{aligned} X &= X_0^E + (Z - Z_0^E) \frac{m_{11}^E x_p + m_{21}^E y_p + m_{31}^E f_p}{m_{13}^E x_p + m_{23}^E y_p + m_{33}^E f_p} \\ Y &= Y_0^E + (Z - Z_0^E) \frac{m_{12}^E x_p + m_{22}^E y_p + m_{32}^E f_p}{m_{13}^E x_p + m_{23}^E y_p + m_{33}^E f_p} \end{aligned} \quad (15)$$

onde:

- (x_p, y_p) são as coordenadas do ponto no sistema fotogramétrico na imagem da esquerda;
- m_{ij}^E são os elementos da matriz de rotação para a imagem da esquerda;
- f é a distância focal da câmara;

- (X_0^E, Y_0^E, Z_0^E) são as coordenadas do centro perspectivo (CP) da câmara para a imagem da esquerda no sistema de terreno; e
- (X, Y, Z) são as coordenadas do ponto no sistema de terreno.

Como a altitude Z_p foi estimada, uma incerteza (Δz) deve ser associada a ela (SCHENK, 1999). A partir deste intervalo de incerteza podem ser calculados os limites U e L mostrados na Figura 16. Em seguida, utilizando as equações de colinearidade direta (Equações 6) e os POE da imagem da direita, o ponto no sistema de referência do terreno e os extremos do intervalo de incerteza (U e L), são projetados à imagem da direita delimitando uma região de busca (u'' , l'').

Segundo Schenk (1999), as etapas principais para implementar a correspondência ao longo das linhas epipolares são:

- Selecionar a entidade que se deseja corresponder na imagem da esquerda (p');
- Estimar a elevação (Z_p) de tal entidade e seu intervalo de incerteza (Δz);
- Calcular a posição aproximada da entidade na imagem da direita (p'');
- Calcular o intervalo de busca ($x_S'' - x_L''$);
- Realizar a correspondência dentro do intervalo de busca; e
- Analisar os valores obtidos para cada posição do intervalo de busca para determinar a posição homóloga.

2.2.6.2.1. Reamostragem Epipolar

O objetivo principal da reamostragem epipolar é gerar um novo par de imagens digitais adaptado à geometria epipolar. Geralmente, um par estereoscópico não está adequado a essa condição geométrica, que não apenas diminui o tempo computacional, mas, principalmente, aumenta a confiabilidade do processo de correspondência.

A utilização de imagens normalizadas simplifica o processo de correlação de imagens, pois as feições homólogas estarão na mesma linha nas imagens reamostradas e isto também melhora a visualização do estereopar em sistemas fotogramétricos digitais (MIKHAIL et al., 2001).

Para adequar um par à geometria epipolar, devem ser realizadas algumas transformações, de tal forma que os eixos ópticos das câmaras tornem-se perpendiculares à

linha de base. É necessário eliminar os ângulos de atitude da aeronave e os componentes de base B_Y e B_Z do par.

A transformação das imagens originais em imagens normalizadas requer dois passos (MIKHAIL et al., 2001; SCHENK, 1999):

- As imagens do par são transformadas para suas posições verticais através do uso das matrizes de rotação das imagens esquerda e direita;
- A partir das imagens verticais, são aplicadas rotações envolvendo as direções dos componentes da base.

A Figura 17 apresenta a relação entre a geometria das imagens originais e das imagens reamostradas epipolarmente, onde O' e O'' representam as imagens originais da esquerda e da direita, respectivamente e N' e N'' correspondem às imagens após a normalização.

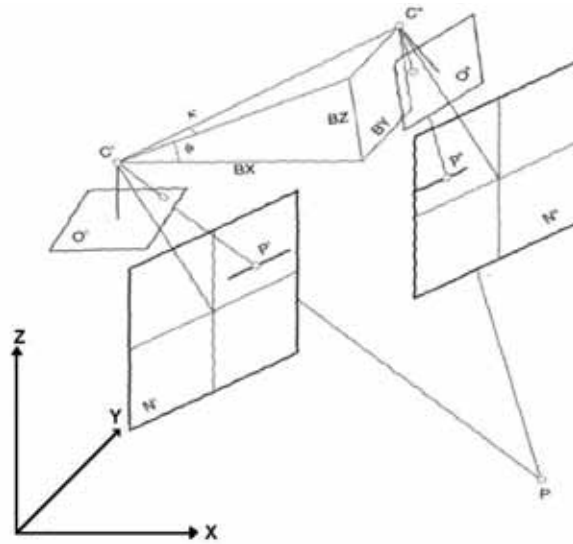


Figura 17: Relação geométrica entre as imagens originais e normalizadas (Fonte: Schenk, 1999).

Transformação das imagens originais para suas posições verticais

Esta transformação envolve a rotação com a matriz inversa da orientação exterior R^T , que é calculada a partir dos ângulos ω , φ e κ , sendo (Equação 16):

$$R = R_{\kappa} \cdot R_{\varphi} \cdot R_{\omega} \quad (16)$$

A matriz de rotação R^T é calculada para as duas imagens de acordo com seus respectivos POE.

Transformação das imagens verticais para as imagens normalizadas

Nesta etapa, são feitas rotações das imagens verticais em relação à base. Sendo assim, é necessário o cálculo da matriz de rotação da aerobase (R_B) (Equação 17):

$$R_B = R_x(\theta_x) \cdot R_y(\theta_y) \cdot R_z(\theta_z) \quad (17)$$

A primeira rotação em torno de Z (θ_z) leva o eixo X_v para o plano vertical que passa pela aerobase (Equação 18). A rotação do eixo Y (θ_y) torna o eixo X'_v paralelo à aerobase (Equação 19) e a terceira rotação fixa o eixo Z''_v (eixo Z_v rotacionado duas vezes anteriormente) (Equação 20) (MIKHAIL et al., 2001).

$$\theta_z = \tan^{-1} \left(\frac{B_y}{B_x} \right) \quad (18)$$

$$\theta_y = \tan^{-1} \left(\frac{-B_z}{\sqrt{B_x^2 + B_y^2}} \right) \quad (19)$$

$$\theta_x = \frac{\omega_E + \omega_D}{2} \quad (20)$$

Após calculadas as matrizes R_E^T , R_B^T e R_B , as matrizes de rotações entre as imagens originais e as imagens normalizadas são dadas por (Equações 24):

$$\begin{aligned} R_{N_E} &= R_B \cdot R_E^T \\ R_{N_D} &= R_B \cdot R_D^T \end{aligned} \quad (21)$$

As coordenadas das imagens originais no sistema fotogramétrico (x_p, y_p) são transformadas para suas posições normalizadas (x_N, y_N) (Equação 22) com base nas equações de colinearidade (MIKHAIL et al., 2001). Note que para facilitar assumiu-se que as coordenadas estão no sistema fotogramétrico.

$$\begin{aligned} x_N &= -f \frac{m_{N_{11}} x_p + m_{N_{12}} y_p + m_{N_{13}} (-f)}{m_{N_{31}} x_p + m_{N_{32}} y_p + m_{N_{33}} (-f)} \\ y_N &= -f \frac{m_{N_{21}} x_p + m_{N_{22}} y_p + m_{N_{23}} (-f)}{m_{N_{31}} x_p + m_{N_{32}} y_p + m_{N_{33}} (-f)} \end{aligned} \quad (22)$$

As coordenadas nas imagens normalizadas são transformadas para suas posições correlatas nas imagens originais por meio da transformação inversa, que é dada por:

$$\begin{aligned} x_p &= -f \frac{m_{N_{11}} x_N + m_{N_{21}} y_N + m_{N_{31}} (-f)}{m_{N_{13}} x_N + m_{N_{23}} y_N + m_{N_{33}} (-f)} \\ y_p &= -f \frac{m_{N_{12}} x_N + m_{N_{22}} y_N + m_{N_{32}} (-f)}{m_{N_{13}} x_N + m_{N_{23}} y_N + m_{N_{33}} (-f)} \end{aligned} \quad (23)$$

As Equações 22 são usadas para calcular os limites de cobertura das imagens normalizadas. Uma grade com espaçamento relativo ao tamanho do pixel é definida e o processo de reamostragem é então realizado com base nas Equações 23, para criar as imagens normalizadas. Ou seja, a transformação entre a imagem epipolar e a imagem original parte de uma imagem vazia (imagem epipolar) onde se executa a reamostragem dos níveis de cinza da imagem original. Caso ocorram valores fracionados de (x_p, y_p) é necessário fazer interpolações nas imagens originais utilizando algum interpolador (vizinho mais próximo, bilinear, etc), para obter os níveis de cinza correspondentes.

2.2.6.3. Vertical Line Locus

O método *Vertical Line Locus* (VLL) foi proposto por Gyer (1981) e implementado para a geração automática de MDTs no Kern DSR-11 (BETHEL, 1986). Este método proporciona uma restrição geométrica no espaço de busca durante o processo de

correspondência entre imagens. A correspondência é realizada através da correlação de janelas selecionadas e centradas em pontos no espaço objeto, ao longo da projeção de uma linha vertical.

Supondo-se que os POE de cada imagem sejam conhecidos e que se conheçam elevações aproximadas, as principais etapas do VLL são:

- 1) A posição planimétrica (X e Y) de um determinado ponto P da superfície inicial é fixada e é considerado seu valor de altitude Z_0 aproximado. Estabelece-se um valor máximo ΔZ_{max} e mínimo ΔZ_{min} para delimitar a busca na vertical, e um valor dZ (incremento a cada iteração). Na Figura 18, L representa o valor de $(Z_0 - \Delta Z_{min})$ e U o valor de $(Z_0 + \Delta Z_{max})$. L'U' e L''U'' são as linhas formadas pela intersecção do triângulo definido pela projeção do centro perspectivo e os limites L e U com o plano das imagens.

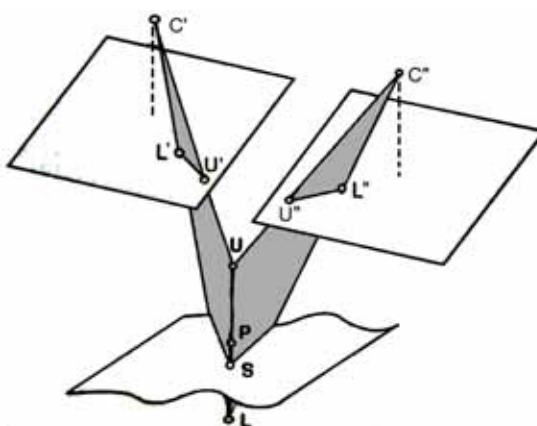


Figura 18: Redução do espaço de busca com o método VLL. Fonte: Schenk (1999).

- 2) As coordenadas fotogramétricas do ponto são calculadas a partir das equações de colinearidade em cada imagem envolvida, utilizando os POE da imagem. Inicia-se o procedimento considerando $(Z_0 - \Delta Z_{min})$ como altitude inicial;
- 3) Estabelece-se a janela de referência e a janela de busca com (x'_i, y'_i) e (x''_i, y''_i) (caso com apenas duas imagens) como ponto central. Calcula-se a similaridade entre as janelas;
- 4) Altera-se o valor de i e calcula-se um novo valor para Z_k (Equação 24);

$$Z_k = Z_0 + i \cdot dZ, i = 0, 1, \dots, n. \quad (24)$$

- 5) Repete-se as etapas de 2 à 4, até que o valor ($Z_0 + \Delta Z_{max}$) seja alcançado.
- 6) Seleciona-se a altitude Z_k , dentro do intervalo $n = (\Delta Z_{max} + \Delta Z_{min})/dZ$, correspondente ao maior valor de similaridade entre as janelas. Neste trabalho trata-se do maior valor de coeficiente de correlação $\rho_k = \max\{\rho_0, \rho_1, \dots, \rho_n\}$. Esta será a elevação estimada para o ponto P (Figura 19).

Deve ser escolhida uma função de similaridade para a comparação entre as janelas. O mais comum é o cálculo do coeficiente de correlação (Equação 12). A Figura 19 ilustra o procedimento (VLL). Nota-se que as superfícies ao longo da vertical possuem a mesma localização planimétrica (X e Y), mas elevações diferentes e que a porção destacada (cor preta) possui a elevação que se deseja determinar.

Ao utilizar o método VLL é importante levar em consideração que os valores fornecidos como alturas aproximadas para iniciar a correspondência, não devem ser muito distantes da altura real, pois a convergência pode ser comprometida e o custo computacional pode ser muito alto. O intervalo de busca na vertical ($Z_{max} - Z_{min}$) deve ser analisado de acordo com as características da região (montanhosa, plana, urbana com edifícios, etc) por influenciar no número de correspondências falsas e corretas. Além disso, é fundamental verificar o valor mais adequado para o incremento (dZ) de pesquisa, pois este valor está diretamente ligado à precisão e tempo de execução do método. Um valor de dZ pequeno pode aumentar a acurácia da correspondência, no entanto, o tempo de execução do processo também se eleva.

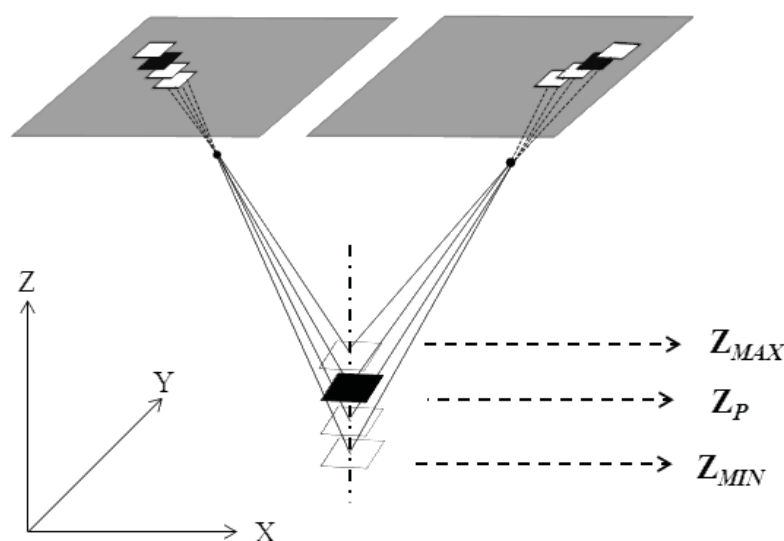


Figura 19: Método *Vertical Line Locus* (VLL).

O VLL é útil para aplicações em que se necessita obter as posições conjugadas dos pontos que ocupam posições determinadas no espaço objeto (SCHENK, 1999) e possibilita a utilização de mais de duas imagens simultaneamente. Em contraste com o método de linhas epipolares, as posições das janelas de correspondência são alteradas nas duas imagens e se movem radialmente, o que pode ser uma desvantagem quanto ao custo computacional.

Uma alternativa para que o VLL seja mais estável e eficiente, é realizar um processo hierárquico, ou seja, a partir de pirâmides de imagens. Desta forma, inicia-se no topo da pirâmide (menor resolução) considerando um espaçamento dZ mais grosseiro. Progressivamente, move-se para os demais níveis da pirâmide e refina-se o intervalo dZ .

Krupnik e Schenk (1994) e Idoeta (2007) combinaram o método VLL com a busca por linhas epipolares. Estes métodos em conjunto aumentam a confiabilidade dos pontos correspondentes.

Um dos exemplos do uso do processo de correspondência de imagens com o VLL é o método automático para recuperar alturas de edifícios através da integração de imagens de satélite e mapas vetoriais digitais e imagens IKONOS, apresentado por Lee et al. (2011). Outra aplicação nesta área é encontrada em Ji e Yuan (2008), que utilizaram o método para a detecção de mudanças nas edificações urbanas a partir de imagens aéreas. Wan et al. (2010) utilizaram o método no processo de correlação de imagens para a inspeção de linhas de energia.

2.2.7. Correspondência com múltiplas imagens

A reconstrução tridimensional de pontos no terreno a partir de imagens pode ser realizada conhecendo-se os parâmetros de orientação interior da câmara, obtidos por algum método de calibração, e os parâmetros de orientação exterior, que relacionam o referencial da imagem ao referencial do terreno.

As equações de colinearidade (Equações 10) representam funções de mapeamento entre o espaço objeto (3D) e o espaço imagem (2D) em função dos POI, dos POE (ω , ϕ , κ , X_0 , Y_0 , Z_0) e da posição do ponto $P(X, Y, Z)$. Para o caso de uma abordagem utilizando múltiplas imagens é necessário conhecer, para cada imagem, todos os parâmetros envolvidos no processo de orientação.

Com a utilização da correspondência entre múltiplas imagens é possível realizar a reconstrução de objetos 3D, combinando-se todas as imagens disponíveis simultaneamente, sem realizar a correspondência de todos os pares de imagens individualmente e combinar os resultados. Neste caso, considerando n imagens sobrepostas o número de pares de imagens np pode ser dado pela combinação de n imagens 2 a 2 (Equação 25):

$$np = \frac{n \cdot (n-1)}{2} \quad (25)$$

A correspondência de múltiplas imagens combina a redundância de informação com o aumento no sucesso e confiabilidade da correspondência. Consequentemente, proporciona a redução dos problemas causados pela oclusão, múltiplas soluções, áreas homogêneas e descontinuidades da superfície (GRUEN, 1985; AGOURIS e SCHENK, 1992; ZHANG, 2005; HAALA, 2011). Adicionalmente, é obtida maior precisão na determinação de pontos homólogos pela intersecção por mais de dois raios da imagem (HAALA, 2011), embora exija um voo com maior número de imagens e faixas. Assim, muitas pesquisas têm sido realizadas com foco na correspondência de múltiplas imagens.

Gruen (1985) apresenta uma adaptação do modelo matemático do método de correspondência por mínimos quadrados para a utilização de múltiplas imagens (*multiphoto least squares correlation*). Além disso, as equações de colinearidade foram introduzidas como restrições geométricas. Gruen (1985) ressalta sua perspectiva positiva sobre o potencial do uso de correspondência utilizando múltiplas imagens.

Seguindo a abordagem de Gruen (1985), Baltsavias (1991) desenvolveu o algoritmo *MultiPhoto Geometrically Constrained Matching (MPGC)*, que combina a correspondência por intensidade (níveis de cinza) com restrições geométricas derivadas da condição de intersecção de raios de múltiplas imagens e um conhecimento a priori dos POE.

Zhang (2005) apresenta o algoritmo *Geometrically Constrained Cross Correlation (GC³)*, que possibilita a correspondência de pontos e bordas utilizando múltiplas imagens para geração automática de modelos digitais de superfície a partir de imagens de sensores de varredura linear.

Haala et al. (2010) compararam a qualidade de três MDSs gerados por diferentes fontes de dados: utilizando imagens obtidas por uma câmara analógica RMK-Top 15(GSD de 8cm), outro com imagens de uma câmara digital DMC (GSD de 8cm) e o terceiro com dados

de varredura LASER. Os autores utilizaram a abordagem de correspondência por múltiplas imagens e os resultados evidenciaram a melhoria na qualidade dos MDSs gerados a partir de imagens devido ao aumento da qualidade das imagens obtidas por câmaras digitais. Além disso, mostraram que a qualidade da correspondência, por múltiplas imagens digitais, possibilitou a obtenção de um MDS com qualidade similar ao modelo gerado por dados de varredura a LASER (HAALA et al., 2010).

Haala (2011) ressalta que é essencial ter disponível um conjunto com várias imagens sobrepostas da mesma área para preencher regiões de oclusões, principalmente em áreas urbanas densas. A utilização de câmaras digitais possibilitou maior facilidade para obtenção de imagens com maiores áreas de sobreposição, o que aumenta a quantidade de imagens de um mesmo ponto pode aparecer.

Seguindo esta abordagem, Haala (2011) compara diferentes configurações de múltiplas imagens para a reconstrução tridimensional de pontos da superfície, analisando também a influência da relação base/altura nos resultados. Nesse trabalho foi utilizado para a correspondência o método SGM. Os resultados alcançados evidenciaram o aumento da qualidade e densidade dos pontos obtidos na correspondência de múltiplas imagens. A taxa de pontos com correspondência e a acurácia vertical, utilizando 3 imagens da mesma faixa, aumentou de 81,4% para 91,5% e de 4,27cm para 2,78cm ao acrescentar 4 imagens. Além disso, mostraram que, apesar da precisão da correspondência ser decrescente para maiores relações base/altura, por aumentarem as diferenças geométricas, a precisão da posição do ponto correspondente no espaço objeto foi melhor com o aumento desta relação, como era esperado devido à melhoria da geometria de intersecção. Assim, resultados menos precisos de correspondência foram compensados pelos benefícios da melhor configuração geométrica.

Além da possibilidade de imagens com maior sobreposição, a alta qualidade radiométrica das imagens obtidas por câmaras digitais contribuem para melhores resultados da correspondência densa (THURGOOD et al., 2004). Por outro lado, é importante ressaltar que técnicas de correlação com múltiplas janelas aumentam significativamente o custo computacional do algoritmo.

2.3. Modelo Digital de Terreno

Na década de 1950, a Fotogrametria passou a ser amplamente utilizada para coletar dados para projetos de estradas. Roberts² (1957) apud Li et al. (2005) propôs pela primeira vez o uso do computador com técnicas fotogramétricas como uma nova ferramenta para a aquisição de dados para planejamento e projeto de engenharia rodoviária (LI et al., 2005).

Os engenheiros americanos Miller e Laflamme, do Instituto de Tecnologia de Massachusetts (MIT), selecionaram e mediram as coordenadas 3D de pontos do terreno, em estereopares, ao longo das estradas, projetando e formando perfis digitais no computador para ajudar em projeto de estradas (LI et al., 2005).

Desde a definição de MDT introduzida por Miller e Laflamme, outros termos surgiram para a modelagem de terreno. Os termos mais utilizados são Modelo Digital de Terreno (MDT), Modelo Digital de Elevações (MDE) e Modelo Digital de Superfície (MDS).

Mikhail et al. (2001), definem o MDE como uma representação digital da superfície da Terra através de um conjunto de pontos. Para Paparoditis e Polidori (2002), o MDE é um termo geral usado para representar qualquer tipo de dados de elevação da superfície terrestre. Este modelo pode ser usado para representar a superfície real do terreno, que contem todos os tipos de objetos (construções, árvores, etc) ou a superfície terrestre sem objetos naturais ou artificiais.

O MDT refere-se a um tipo específico de MDE, que representa a superfície física do terreno, isto é, a informação é limitada pela elevação do terreno não incluindo objetos acima do mesmo, tais como vegetação ou construções.

Estes termos são frequentemente utilizados como sinônimos (EL-SHEIMY et al., 2005). Quando a informação contém a maior elevação de cada ponto, proveniente do solo ou acima de área de terreno (como árvores e feições antrópicas), o modelo é chamado de Modelo Digital de Superfície (MDS). Em geral, MDSs podem ser gerados a partir de dados de sensores como LiDAR (*Light Detection And Ranging*) sendo que um MDT ou um MDE podem ser derivados do processamento de um MDS.

2.3.1. Fontes de dados para geração de MDTs

Em geral, as principais fontes de dados para a geração de MDTs são:

² ROBERTS, R. 1957. Using new methods in highway location. *Photogrammetric Engineering*, 23:563–569.

- Levantamentos de campo, usando equipamentos como estação total e receptores GNSS para fazer medidas da superfície diretamente. Este método apresenta alta acurácia, mas não é viável para grandes áreas em razão do alto custo;
- Técnicas de digitalização de cartas topográficas existentes;
- Métodos fotogramétricos, usando estereopares de imagens aéreas ou orbitais;
- Dados provenientes de sensores ativos como RADAR e varredura a LASER.

Segundo Li et al. (2005) a utilização de imagens aéreas é a maneira mais eficaz de produzir e atualizar os mapas topográficos. Estima-se que cerca de 85% de todos os mapas topográficos foram produzidos através de técnicas fotogramétricas usando fotos aéreas. As fotos aéreas são também as fontes de dados mais usadas para produção de MDTs. Para MDTs com escalas grandes tem sido usada a varredura a LASER. Outra possibilidade para a construção de MDTs de pequena escala e grandes regiões são as imagens de satélite.

2.3.2. Estrutura de dados para MDT

As amostras de dados coletadas para geração de uma representação da superfície geralmente possuem um espaçamento irregular, sendo necessário estabelecer as relações entre os dados amostrais e um modelo de interpolação. Os principais métodos para representar uma superfície na forma digital são as curvas de nível, grades regulares e redes irregulares de triângulos (EL-SHEIMY et al., 2005).

- Curvas de nível: ou isolinhas, são linhas que representam a mesma elevação ao longo da superfície, respeitando um intervalo constante entre elas. Para gerar isolinhas a partir de uma amostra é necessário interpolar os dados. Neste caso, mantém-se uma elevação constante e interpola-se a posição. Uma vez que a superfície é representada por curvas de nível, é possível utilizar interpolação para determinar a elevação de pontos entre as curvas (EL-SHEIMY et al., 2005).
- Grade Regular: é uma estrutura matricial que armazena, a partir de um ponto origem, as elevações de pontos regularmente espaçados nas direções X e Y. Os algoritmos utilizando grades regulares tendem a ser relativamente mais simples (EL-SHEIMY et al., 2005). Grades muito finas (densas) possuem maior número de informações sobre a

superfície analisada, porém necessitam de maior tempo para sua geração. Porém, distâncias grandes entre os pontos podem acarretar perda de informação. Desta forma para a resolução final da grade, deve-se levar em conta a precisão dos dados e o tempo de processamento (FELGUEIRAS e CAMARA, 2002).

- **TIN:** em um TIN os pontos são conectados por linhas para formar um conjunto de faces triangulares cobrindo toda a superfície. Dentro de cada triângulo a superfície é representada por um plano. Um triângulo é formado por três segmentos de retas, onde cada borda é definida por dois pontos da amostra. Cada ponto pode ser compartilhado por dois ou mais triângulos, mas cada borda pode ser compartilhada por até dois triângulos. As combinações entre os três tipos de elementos (nós, bordas, triângulos) formam a estrutura de dados TIN (EL-SHEIMY et al., 2005). Os TINs podem ser gerados a partir de pontos irregularmente espaçados ou de uma grade regular. Existem várias técnicas e métodos para a geração de uma rede triangular. O método mais utilizado baseia-se na triangulação de Delaunay, com o qual é possível construir uma rede única de triângulos.

2.3.3. Métodos de interpolação

Os métodos de interpolação são utilizados para estimar valores de atributos (altitude, temperatura, etc.) a partir de uma amostra de referência. Segundo Li et al. (2005) a interpolação é uma técnica fundamental na construção de MDTs, por estar envolvida em várias etapas de sua geração, como controle de qualidade, reconstrução da superfície, avaliação de precisão, análise do terreno, e aplicações.

Além disso, a interpolação pode ser utilizada para converter uma amostra irregular em uma grade regular ou reamostrar uma grade para outro nível de resolução. Os principais métodos de interpolação são a interpolação linear, vizinho mais próximo, interpolação bilinear, média simples, média ponderada, convolução cúbica e krigagem.

Vizinho mais próximo: o método do vizinho mais próximo atribui ao ponto a ser interpolado a elevação associada ao ponto de referência mais próximo (EL-SHEIMY et al., 2005). Este método não gera novos valores de elevações e requer baixo tempo de processamento.

Média simples: a média simples considera o valor da elevação do ponto interpolado, como o resultado da média aritmética dos n pontos vizinhos.

Média ponderada: na interpolação por média ponderada a elevação $Z(X, Y)$ de um determinado ponto é estimada pela média ponderada das elevações dos n pontos vizinhos. Neste caso considera-se um fator de ponderação w_i .

$$Z(X, Y) = \frac{\sum_{i=1}^n Z_i w_i}{\sum_{i=1}^n w_i} \quad (26)$$

Inverso da Distância: a ponderação mais utilizada na interpolação por média ponderada é o inverso da distância euclidiana entre o ponto a ser interpolado e o ponto da amostra considerada. Segundo El-Sheimy et al. (2005), a base conceitual nesta técnica é que os pontos mais próximos possuem valores de elevação similares, enquanto elevações de pontos mais distantes são mais independentes (menor semelhança). Desta forma, w_i na Equação 26 é calculado como mostra a Equação 27, onde k é o expoente da distância. As potências mais baixas podem suavizar valores extremos. Se um ponto a ser interpolado coincide com um ponto da amostra ($d = 0$), então $Z(X, Y)$ assume a elevação do ponto coincidente na amostra ($Z(X, Y) = Z_i$).

$$w_i = \frac{1}{d_i^k} \quad (27)$$

Interpolação por ajuste de superfícies paramétricas: a interpolação pode ser realizada considerando equações polinomiais, ou mesmo a equação do plano. A altitude pode ser calculada pelo ajuste da Equação 28, onde a , b e c são os coeficientes da equação do plano a serem determinados, utilizando o método dos mínimos quadrados, por exemplo.

$$Z_{ajus} = a \cdot X + b \cdot Y + c \quad (28)$$

Interpolação Bilinear: neste método determina-se o valor desejado por interpolações dos quatro pontos mais próximos $I(c, l)$, $I(c + 1, l)$, $I(c + 1, l + 1)$, $I(c, l + 1)$. A Figura 20

representa a interpolação bilinear utilizada para a interpolação da intensidade de um pixel ($R(c', l')$) em uma imagem. A rigor é uma média ponderada, onde o peso é dado pelas distâncias $(1 - dx)$ e $(1 - dy)$. Este método pode ser aplicado da mesma forma ao considerar a interpolação de altitudes, trocando as posições coluna e linha (c, l) pelas posições no sistema de referência do terreno e a intensidade do pixel, pelas altitudes dos pontos envolvidos.

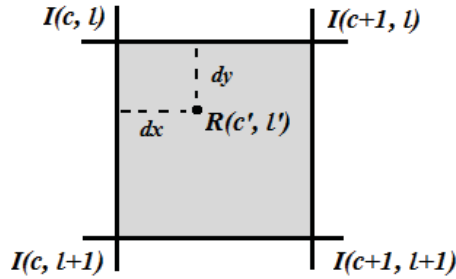


Figura 20: Pixel interpolado em função da interpolação dos vizinhos na imagem original.

A partir da Equação 29 determina-se o tom de cinza do pixel a ser interpolado.

$$R(c', l') = (1 - dx) * (1 - dy) * I(c, l) + dx * (1 - dy) * I(c + 1, l) + dy * (1 - dx) * I(c, l + 1) + dx * dy * I(c + 1, l + 1) \quad (29)$$

2.3.3.1. Reamostragem

Os métodos de interpolação podem ser aplicados não apenas para MDSs, mas também na reamostragem de imagens. Segundo Mikhail et al. (2001) a reamostragem é necessária ao se aplicar algum tipo de transformação geométrica (similaridade, afim, projetiva, polinomial, etc.) em imagens digitais. Este procedimento pode ser realizado utilizando o método direto ou o método indireto. No método direto os valores de intensidade da imagem original são transferidos para a imagem de saída (reamostrada) após realizar uma transformação direta. O método indireto baseia-se na busca dos valores de intensidade na imagem original, a partir da varredura na imagem de saída e aplicação de uma transformação ou projeção inversa. Ao calcular novas posições e transformá-las para coordenadas em pixels (c', l') na imagem original, estas coordenadas podem resultar em números reais não inteiros, sendo necessário determinar o valor de intensidade que será atribuído ao pixel da nova imagem, a partir de uma interpolação dos pixels (Figura 21).

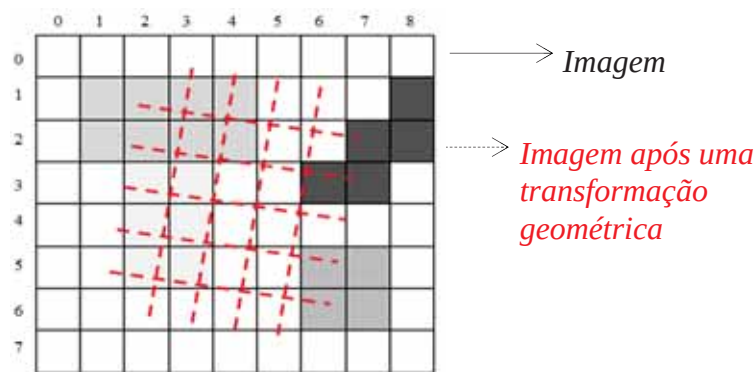


Figura 21: Representação das diferenças da posição dos pixels de uma imagem após uma transformação geométrica

Um dos métodos mais simples para realizar a interpolação dos tons na imagem é o método do vizinho mais próximo. Outros métodos usualmente aplicados são a interpolação bilinear e a interpolação polinomial.

2.3.4. Geração de MDSs a partir de imagens ópticas

A geração automática de MDSs utilizando imagens ópticas tem como base o processo de correspondência entre imagens. Embora os algoritmos e as estratégias de correspondência utilizadas, em geral, possam ser diferentes, a acurácia e os problemas encontrados são muito similares na maioria das aplicações comerciais ou acadêmicas (EL-SHEIMY et al., 2005).

Técnicas como a normalização de imagens, geração de pirâmides de imagens ou VLL são utilizadas para a redução do espaço de busca no processo de correspondência. Após encontrar os pares homólogos, executa-se a interseção fotogramétrica para obter as posições tridimensionais destes pontos no espaço objeto. Ao considerar o método VLL este procedimento não é necessário.

Segundo Gruen (2012), basicamente, os algoritmos para geração de MDT/MDS podem ser caracterizados pelos seguintes aspectos:

- ✓ Correspondência por múltiplas imagens: baseia-se no conceito de correspondência utilizando mais de duas imagens simultaneamente. Zhang (2005) desenvolveu um algoritmo de correspondência com esta abordagem, o *Geometrically Constrained Cross-Correlation (GC³)*. O algoritmo GC³ usa a correspondência conduzida a partir

do espaço objeto e permite a reconstrução 3D de objetos combinando todas as imagens disponíveis.

- ✓ Correspondência com múltiplas primitivas: algoritmos híbridos e robustos têm sido desenvolvidos, aproveitando os métodos baseados em áreas e baseados em feições, assim, incorporando múltiplas primitivas, como pontos, bordas e integrando tanto informações locais quanto globais da imagem. A utilização de bordas preserva descontinuidades na superfície, enquanto pontos da grade preenchem áreas com pouca ou nenhuma textura (ZHANG, 2005).
- ✓ Parâmetros adaptativos: a determinação adaptativa dos parâmetros de correspondência resulta em uma maior taxa de sucesso e menos incompatibilidades. Estes parâmetros incluem, por exemplo, o tamanho da janela de correspondência e os limiares de correspondência. Isto é feito através da análise dos resultados correspondentes ao nível anterior da pirâmide de imagens.
- ✓ Correspondência com alta redundância: a correspondência altamente redundante é alcançada, de modo que pontos e bordas sejam gerados. Resultados redundantes são adequados para a representação de terrenos muito íngremes e acidentados e para permitir que as microestruturas e descontinuidades do terreno sejam preservadas.
- ✓ Modelagem eficiente de superfície: a superfície é modelada por um TIN gerado pela triangulação de Delaunay a partir dos pontos e bordas determinados no processo de correspondência. O TIN é adequado para modelagem de superfícies, pois integra todos os resultados originais da correspondência (pontos e bordas) sem interpolação.
- ✓ Estratégia hierárquica: o algoritmo funciona em uma estrutura de pirâmide de imagens com diferentes resoluções, e obtém modelos de superfícies intermediários em várias resoluções. As correspondências nas imagens de baixa resolução servem como aproximações para restringir o espaço de busca e calcular, de modo adaptativo, os parâmetros para a correspondência nos níveis subsequentes.

No Brasil podem ser citados, como exemplos, os trabalhos para geração de MDTs utilizando imagens ópticas de Barbosa (1999), Costa (2006), ambos desenvolvidos neste programa de pós-graduação em Ciências Cartográficas, e o trabalho de Idoeta (2007). Em cada um foi aplicada uma metodologia diferente para a obtenção dos modelos.

Barbosa (1999) apresenta uma metodologia com base em aproximações e interpolações sucessivas para obtenção de MDTs, utilizando um par de imagens digitais (obtidas com câmaras digitais de pequeno formato), seus POE e as coordenadas dos pontos de

Grübber. A estratégia de aproximação inicia-se com uma resseção espacial dupla de um par de imagens. Em seguida, é realizada uma interpolação linear nos quadriláteros formados pelos pontos de Grübber, gerando novos pontos. As coordenadas fotogramétricas destes pontos são determinadas na imagem da esquerda e da direita, utilizando a correspondência entre imagens para refinar a determinação da posição do ponto na imagem da direita. Com o novo conjunto de pontos, é realizado um novo ajustamento da resseção dupla. O processo é repetido, interpolando-se novos pontos nos quadriláteros formados nos passos anteriores, até atingir uma densidade definida. Os resultados mostraram que os tamanhos da janela de referência e de busca influenciam tanto na parte interna (estatística) quanto na externa (raiz do erro médio quadrático (REMQ) com o modelo de referência).

Costa (2006) utiliza em seu trabalho um estereopar de imagens digitais previamente orientadas e normalizadas, nas quais são selecionadas janelas de referência na imagem da esquerda (com certo espaçamento) e automaticamente são determinados seus pontos homólogos na imagem da direita, obtendo assim uma lista de pontos com coordenadas no espaço imagem. No processo de correspondência é feita a rotulação da imagem utilizando o cálculo de um índice que detecta áreas de sombra, permitindo que a aplicação realize operações lógicas para eliminar estas áreas. Após definidos os parâmetros de controle do processo de correlação, é realizada a varredura hierárquica do modelo. A partir dos POE das duas imagens e das coordenadas dos pontos no espaço imagem, podem ser calculadas as coordenadas de pontos no espaço objeto.

Idoeta (2007) apresenta uma metodologia para elaboração automatizada de MDE e ortofoto em média e pequena escala. Neste trabalho foi utilizada como função de similaridade a correlação cruzada e imagens coloridas. A correspondência foi realizada nas três bandas, obtendo um índice único pela soma dos coeficientes calculados para cada banda, considerando pesos diferentes em cada uma delas. Foi utilizado o método de busca em linha vertical considerando duas ou mais imagens. Neste processo, após estabelecer as janelas de referência e de busca, estas foram reamostradas epipolarmente e então calculada a correspondência. Os produtos gerados atenderam o PEC classe A para a escala 1:2500 em planimetria e intervalos de curvas de nível de 5m em altimetria.

Apesar das ferramentas para correspondência de imagens encontrarem-se disponíveis há mais de quatro décadas, a aquisição de MDT/MDS utilizando sistemas LiDAR aerotransportados para os levantamentos terrestres teve grande aceitação prática e operacional devido a sua alta produtividade e qualidade. Os dados de sistemas LiDAR são capazes de

recobrir áreas com pouca textura e áreas que são de difícil acesso ao utilizar sistemas ópticos, como locais com vegetação densa. Como sensor ativo, o LiDAR captura dados independentemente das condições de iluminação e os pulsos podem penetrar abaixo da vegetação e medir a superfície diretamente. No entanto, esta tecnologia possui um custo relativamente alto para ser empregada e é dependente dos sistemas de posicionamento GNSS e de determinação de atitude com unidades de medida inercial.

O avanço das câmaras digitais e dos algoritmos de correspondência aumentaram as pesquisas e o interesse pela utilização de imagens ópticas para a aquisição de dados espaciais a partir dos métodos de correspondência de imagens. Haala (2009) chama a atenção para este fato em seu artigo intitulado: “*Comeback of digital image matching*”.

Recentemente, novas técnicas de correspondência de imagens estão possibilitando a geração de MDT/MDSs com alta qualidade. Uma destas técnicas é o SGM. A correspondência global de imagens refere-se aos algoritmos que minimizam uma função global tanto de custo quanto restrições. A desvantagem das técnicas globais está no tempo de execução, o que foi melhorado no método SGM desenvolvido por Hirschmüller (2005, 2008).

Os *softwares* comerciais como o LPS e INPHO estão investindo em algoritmos mais avançados para a geração de MDTs. O LPS possui dois módulos para geração de MDTs, o módulo Classic ATE (*Automatic Terrain Extraction*) e o módulo eATE (*enhanced Automatic Terrain Extraction*). No módulo ATE a correspondência é realizada considerando pares de imagens. Inicialmente utiliza-se um operador para extração de pontos de interesse nas imagens de menor resolução na pirâmide e estes pontos serão o centro das janelas de referência para outros níveis da pirâmide de imagens. Pode-se variar parâmetros como tamanho das janelas de referência e de busca e o coeficiente de correlação mínimo. A restrição do espaço de busca é realizada utilizando pirâmide de imagens e a geometria epipolar, como mostra a Figura 16 da Seção 2.2.6.2. O novo módulo eATE é mais robusto que o ATE. O eATE, utiliza a abordagem de correspondência por múltiplas imagens e o coeficiente de correlação. Além disso, considera restrição de bordas e refinamento por mínimos quadrados (MMQ).

O *software* INPHO utiliza o módulo MATCH-T DSM, que realiza a correspondência entre múltiplas imagens simultaneamente. Utilizam-se estratégias, como busca hierárquica, correspondência baseadas em características, refinamento pelo método dos mínimos quadrados e também o método SGM.

2.3.5. Filtragem e redução de MDS para MDT

Após a geração automática do MDS utilizando imagens ópticas, alguns pontos podem apresentar-se como picos (elevações muito acima da real) ou vórtices (muito abaixo) quando comparados com pontos vizinhos. Estes pontos são conhecidos como pontos espúrios e ocorrem, por exemplo, em razão de problemas de falsa correlação. Para a remoção destes pontos podem ser utilizados filtros especiais baseados na vizinhança. Além de diminuir a presença de erros grosseiros a filtragem pode ser utilizada para remover elementos acima do terreno e que não são pontos espúrios como arbustos, edificações ou postes, obtendo-se o MDT a partir do MDS.

Os filtros podem ser desde uma simples mediana, como filtros para classificação e exclusão de regiões de sombra utilizado por Costa et al. (2007), filtros que consideram a declividade do terreno, filtros considerando uma superfície de tendência e filtros baseados na classificação prévia das imagens (MIYOSHI et al., 2009). Para a escolha dos filtros é necessário realizar experimentos verificando seu comportamento para as diferentes classes presentes no terreno e, com isso, determinar os limiares ideais para cada caso. Isto é necessário, pois a filtragem realiza uma suavização generalizada na superfície.

Neste trabalho não será dada ênfase para este processo, visto a complexidade do tema e que o foco é a geração de MDSs.

3. MATERIAIS E MÉTODO

3.1. Materiais

Os materiais utilizados neste projeto são:

Hardware:

- ✓ Receptor GNSS para apoio de campo (pontos de apoio e de verificação);
- ✓ Computador com processador *Intel Core i7*, 8 GB de memória *RAM* e disco rígido de 1 TB.

Softwares:

- ✓ *Topcon Tools* para o processamento das coordenadas;
- ✓ Compilador *Code Blocks* v. 10.05;
- ✓ *LASTools*, para manipulação dos arquivos *.las*;
- ✓ *Cloud Peak Software LASEdit* v. 1.15.1 (*Free demo*) para visualização da nuvem de pontos.
- ✓ *Leica Photogrammetry Suite (LPS)* v. 10.1;
- ✓ Calibração Multicâmaras (CMC), para a fototriangulação das imagens.

Dados:

- ✓ Imagens aéreas digitais coletadas pela empresa Engemap com uma câmara Hasselblad H4D – 60 Mpixel;
- ✓ Dados de varredura a LASER fornecidos pela empresa Engemap.

3.2. Método

O objetivo principal deste projeto consiste em estudar e implementar uma técnica para a geração de MDS usando a abordagem de correspondência entre múltiplas imagens e o método de busca em linha vertical (VLL).

O método VLL foi implementado utilizando linguagem de programação C/C++ e módulos da biblioteca UPTK (Unesp *Photogrammetric ToolKit*), que foi desenvolvida pelo grupo de pesquisa em Fotogrametria do Departamento de Cartografia da FCT-UNESP e possui funções de processos fotogramétricos e processamento de imagens digitais. Em alguns

casos as funções foram adaptadas de acordo com a necessidade do processo. Para maiores detalhes sobre a biblioteca UPTK ver Tommaselli et al. (2003).

Inicialmente é necessário definir a área de interesse e as coordenadas dos seus limites para a geração de um MDS aproximado no formato de grade regular. Além disso, para realizar o processo implementado devem ser fornecidas as imagens e parâmetros iniciais para cada nível da pirâmide, tais como:

- tamanho da janela para a correspondência;
- limiar mínimo para aceitação do coeficiente de correlação;
- desvio padrão máximo entre os coeficientes de correlação (múltiplas imagens);
- tamanho do intervalo de busca na vertical (ΔZ_{MAX} e ΔZ_{MIN});
- valor do incremento (dZ) em cada iteração da elevação;
- resolução do MDS;
- distância máxima para busca dos pontos que serão utilizados no processo de interpolação do MDS.

A variação dos parâmetros a cada nível da pirâmide possibilita maior coerência e adaptação das técnicas com relação às características de cada nível. Para as imagens, são fornecidos os POI, obtidos no certificado de calibração da câmara, e os POE, estimados a partir da fototriangulação do bloco de imagens. Adicionalmente, é necessário que seja fornecido um modelo de superfície aproximado, que pode ser gerado a partir da interpolação dos pontos de apoio e fotogramétricos envolvidos na fototriangulação.

O programa implementado inicia-se com a geração da pirâmide de imagens para cada imagem fornecida, com quantos níveis forem desejados. Para cada ponto do MDS aproximado (grade regular), são fixadas suas coordenadas planimétricas e calculada sua altitude inicial, subtraindo o ΔZ_{MIN} (fornecido a priori) do valor de altitude do MDS aproximado ($Z_{MIN} = Z_0 - \Delta Z_{MIN}$), após a verificação das imagens que contém o ponto é realizado o processo de correspondência. A altitude Z_{MIN} é incrementada por um fator dZ (fornecido a priori) e calcula-se novamente a correspondências entre as novas janelas estabelecidas com a mudança de Z . Para cada valor de altitude (Z_K) armazena-se um vetor contendo o coeficiente de correlação entre os pares de janelas das imagens que o ponto aparece. A atribuição da altitude para o ponto é feita analisando-se qual o maior coeficiente global (obtido do vetor de coeficientes de correlação) para cada altitude Z_K dentro do intervalo

de busca. O MDS gerado a cada nível da pirâmide é interpolado e utilizado como modelo inicial para o nível subsequente.

As etapas básicas do processo de geração automática do MDS estão representadas no fluxograma da Figura 22 e são descritas com mais detalhes nas próximas seções.

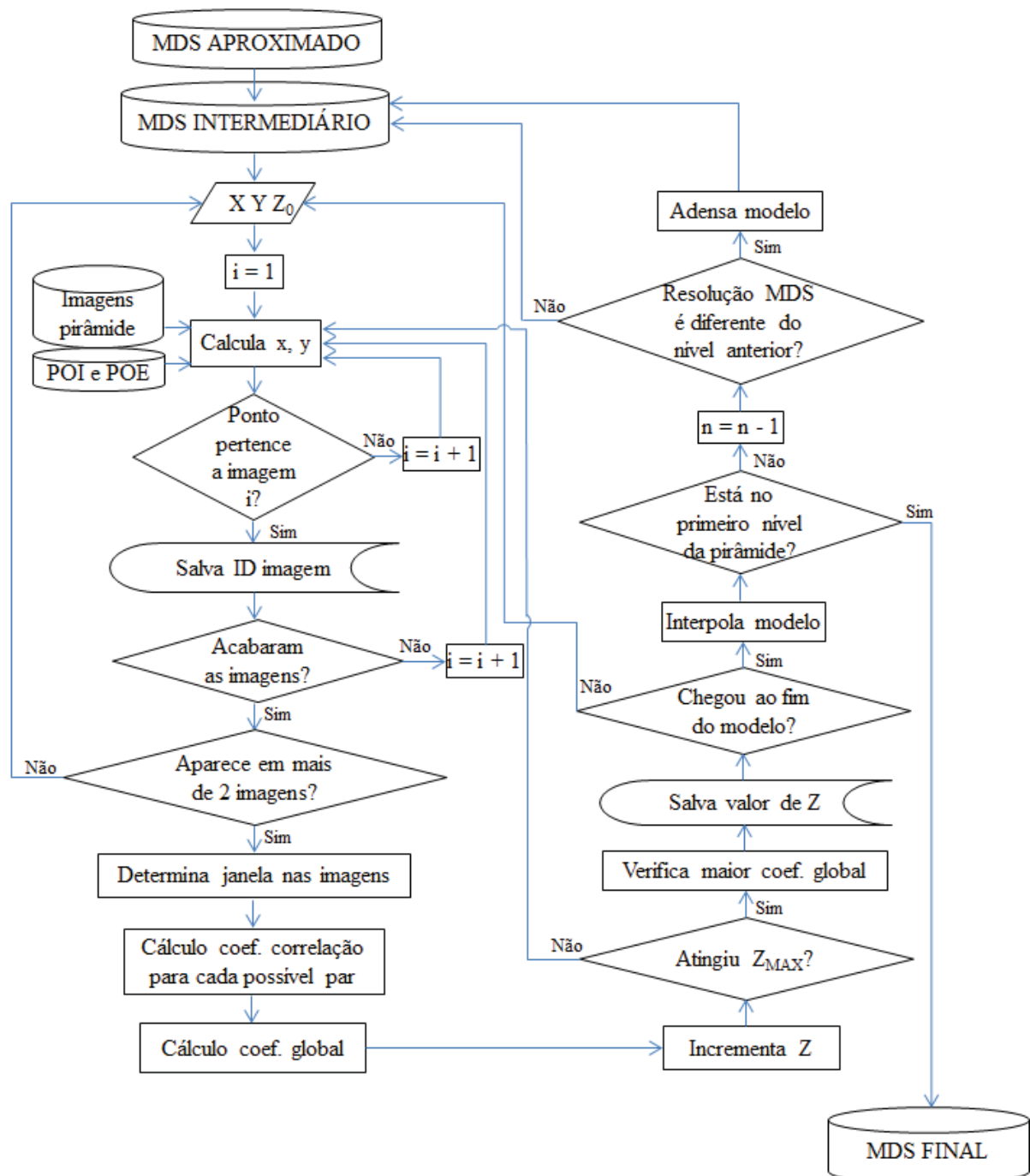


Figura 22: Processos envolvidos na geração automática do MDS.

3.2.1. Redução do espaço de busca

A redução do espaço de busca é realizada pelo processo de pirâmide de imagens e pelo método VLL. Com as imagens fornecidas e o número de níveis desejados, são geradas as pirâmides para cada imagem com n níveis (Seção 2.2.6.1). Em cada nível da pirâmide é feita a convolução da imagem por um filtro Gaussiano e em seguida a imagem é reamostrada para a metade do tamanho da imagem do nível anterior (maior resolução) utilizando a média aritmética dos quatro pixels correspondentes na imagem a ser suavizada.

A importância da utilização da pirâmide de imagens é a redução do processamento e de falsas correspondências, pois utilizando apenas o método VLL tem-se a redução do espaço de busca para uma “linha” na vertical do ponto, o que pode não representar de fato uma redução consideravelmente viável para o processo. No VLL, considerando uma imagem de alta resolução, por exemplo, 7 cm, um intervalo de busca ao longo da vertical de 20 m e o incremento para variação da altitude de $dZ = 7\text{cm}$, são necessárias 286 repetições para cada ponto do MDS e com inúmeros processos a cada repetição, representando um custo computacional extremamente elevado. Com a utilização da busca hierárquica a quantidade de processamentos podem ser reduzidas a cada nível, uma vez que para os níveis com menor resolução, é possível, uma variação dZ maior e diminuir o intervalo de busca para os níveis de maior resolução.

3.2.2. Determinação dos limites das imagens

Dados os POI, os POE, as coordenadas (x_f, y_f) dos limites das imagens e um MDS inicial, calculam-se as coordenadas aproximadas dos limites de cada imagem no sistema de referência do terreno utilizando as equações de colinearidade inversa (Equações 20).

A partir das coordenadas dos limites das imagens no espaço objeto, é possível verificar se um determinado ponto da área correspondente ao MDS faz parte das imagens. Os identificadores destas imagens são armazenados e, caso o ponto apareça em menos de duas imagens, o fluxo é interrompido e inicia-se com o próximo ponto da grade. Caso contrário, inicia-se o processo de verificação da correspondência e estimação da altitude.

3.2.3. Definição das janelas para correspondência

Após determinar as imagens em que um ponto da grade inicial aparece, é feita a determinação das janelas para a busca por pontos homólogos. Estas janelas são recortes de tamanho $M \times M$ pré-definidos e centrados no ponto do MDS. A interpolação bilinear é utilizada (Seção 2.3.3) para a determinação dos tons de cinza de cada pixel do recorte a partir da imagem completa. Isto é realizado porque, ao determinar a posição do ponto na imagem suas coordenadas (c, l) não são dadas em números inteiros, mas sim números reais.

O cálculo da posição do ponto nas imagens é feito a partir de sua posição no espaço objeto e das equações de colinearidade (Equações 10) obtendo-se as coordenadas no sistema fotogramétrico (x_f, y_f).

✓ Equações de colinearidade divididas em partes:

O cálculo das coordenadas fotogramétricas é realizado a cada incremento de altitude para todos os pontos do MDS, ou seja, é um processo que se repete n vezes, de acordo com os parâmetros de busca na vertical e do tamanho da área do MDS. Para otimizar o processo de cálculo das coordenadas x_f e y_f , as equações de colinearidade (Equação 10) foram separadas em três partes para pré-armazenar valores possíveis de se calcular com parâmetros que não variam a cada alteração da altitude e para realizar menos operações a cada vez que for solicitada.

A primeira parte das equações calcula e armazena o resultado da multiplicação dos elementos da matriz de rotação e dos POE (Equação 30). Estes valores variam para cada imagem, sendo calculados somente uma vez para cada uma delas.

$$\begin{aligned} A_{xy}(0) &= -m_{11} * X_0 - m_{12} * Y_0 - m_{13} * Z_0 \\ A_{xy}(1) &= -m_{21} * X_0 - m_{22} * Y_0 - m_{23} * Z_0 \\ A_{xy}(2) &= -m_{31} * X_0 - m_{32} * Y_0 - m_{33} * Z_0 \end{aligned} \quad (30)$$

A segunda parte utiliza para os cálculos os valores armazenados nas Equações 31, a matriz de rotação e as coordenadas do ponto, ou seja, este cálculo é realizado uma vez para cada ponto do MDS.

$$\begin{aligned}
 A &= A_{xy}(0) + m_{11} * X + m_{12} * Y \\
 B &= A_{xy}(1) + m_{21} * X + m_{22} * Y \\
 C &= A_{xy}(2) + m_{31} * X + m_{32} * Y
 \end{aligned}
 \tag{31}$$

A última função corresponde à parte do cálculo que varia a cada alteração na altitude do ponto ao percorrer o espaço de busca na vertical e então realizar o cálculo das coordenadas (x, y) .

$$\begin{aligned}
 Dem &= C + m_{33} * Z \\
 xNum &= A + m_{13} * Z \\
 yNum &= B + m_{23} * Z
 \end{aligned}
 \tag{32}$$

$$\begin{aligned}
 x &= -focal * xNum / Dem \\
 y &= -focal * yNum / Dem
 \end{aligned}
 \tag{33}$$

✓ Refinamento de coordenadas:

Após terem sido calculadas as coordenadas fotogramétricas de um ponto (x_f, y_f) é necessário transformá-las para o sistema coluna, linha (c, l) para a definição do recorte na imagem centrado neste ponto, levando em conta o procedimento apresentado na Seção 2.1.1.2, para atenuar os efeitos que causam desvio no raio de luz durante a formação da imagem. Para isso, foi criada uma função que realiza o procedimento inverso, ou seja, retorna as coordenadas no sistema fotogramétrico (x, y) para o sistema (c, l) da imagem e reconsidera os erros sistemáticos.

As imagens utilizadas foram fornecidas pela empresa Engemap após terem sido submetidas a um processo de reamostragem para correção da distorção das lentes. Por isto, o efeito da distorção descentrada se tornou muito pequeno e não foi considerado. Além disso, devido à baixa altitude de voo o erro causado pela refração atmosférica foi desprezado, calculando-se apenas o deslocamento do ponto principal e a distorção radial simétrica para cada componente (Equação 8).

O cálculo das coordenadas é realizado em um procedimento iterativo até que a diferença entre as coordenadas de entrada e as coordenadas calculadas seja menor que uma diferença mínima aceitável.

3.2.4. Correspondência entre múltiplas imagens

O método de correspondência utilizado é baseado em áreas e considera como função de similaridade o coeficiente de correlação (Equação 12). O coeficiente de correlação é calculado para cada combinação 2 a 2 possíveis entre os recortes das imagens. Deste modo, se um ponto está presente em seis imagens, são feitos seis recortes de tamanho pré-determinado, e são calculados quinze coeficientes de correlação entre as combinações de recortes. Estes coeficientes de correlação são comparados a um coeficiente de correlação mínimo aceitável, definido empiricamente. A média dos valores iguais ou superiores a este limiar é adotada como um coeficiente único, chamado aqui de coeficiente global de correlação. Calcula-se, ainda, o desvio-padrão destes valores. Este procedimento é feito para cada valor de altitude, durante seu incremento.

Ao final, tem-se para cada valor de Z_K um coeficiente global de correlação e seu desvio-padrão e se nenhum coeficiente atingir o limiar de aceitação o coeficiente global recebe o valor zero. A altitude de um ponto é atribuída verificando-se o valor Z que corresponde ao maior coeficiente global e menor desvio-padrão máximo aceitável. O ponto recebe altitude zero se nenhum valor de Z dentro do intervalo Z_K apresentar um coeficiente global diferente de zero. Nota-se que o custo computacional da etapa de cálculo dos coeficientes de correlação até a estimação do valor de altitude é elevado, por conta do grande número de repetições para cada ponto.

3.2.4.1. Correspondência entre subjanelas

Além do procedimento descrito na Seção 3.2.4, outro processo de correspondência foi implementado, utilizando o cálculo do coeficiente de correlação e a soma das diferenças de brilho, ambos considerando subjanelas (Seção 2.2.5) dos recortes das imagens.

A correspondência por subjanelas consiste basicamente em calcular e armazenar as diferenças absolutas entre os níveis de brilho de cada pixel de janelas $M \times M$ recortadas nas imagens que contém um determinado ponto do MDS. As diferenças entre os pixels são calculadas para cada combinação 2 a 2 das janelas e são armazenadas em matrizes $M \times M$. Em seguida, estas diferenças (custos) são somadas (agregadas) considerando janelas menores ($m \times m$) que as janelas recortadas.

A soma das diferenças presentes nas matrizes com dimensões $M \times M$, é realizada delimitando-se nove subjanelas em diferentes posições e com diferentes formas, como mostra a Figura 23. Os valores de discrepâncias presentes nas regiões delimitadas na matriz de diferenças são somados e armazenados em um vetor (V_{DA}), que possuirá nove elementos. Cada subjanela possui a mesma quantidade de elementos ($m^2 = ((M+1)/2)^2$). Além da agregação das diferenças, calcula-se o coeficiente de correlação para cada subjanela do recorte da imagem e não da matriz de diferenças, gerando outro vetor com nove elementos (V_{CC}). Vale ressaltar que o tamanho mínimo para da janela $M \times M$ é 5×5 .

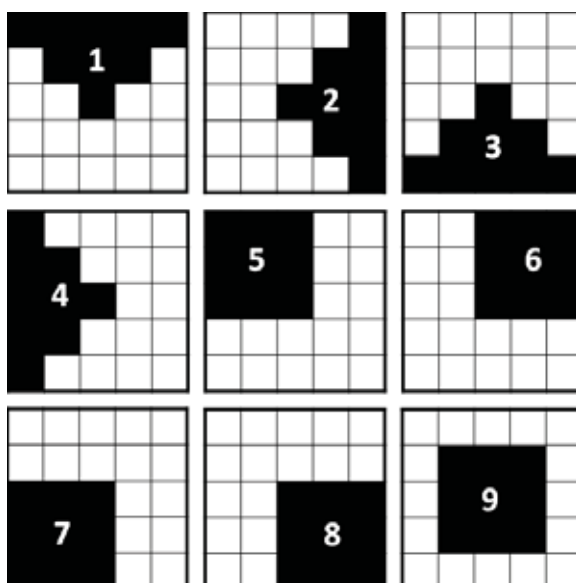


Figura 23: Forma e posição das nove subjanelas utilizadas na agregação das diferenças e cálculo dos coeficientes de correlação.

Os vetores com o somatório (agregação) das diferenças (V_{DA}) e com os coeficientes de correlação (V_{CC}) são obtidos para todos os pares possíveis de recortes das imagens, ou seja, são armazenados np (Equação 25) vetores V_{DA} e V_{CC} . Este procedimento é repetido em cada incremento (dZ) realizado ao longo da linha vertical. Para todos os valores de altitude calcula-se a média entre as subjanelas correspondentes dos np vetores de coeficientes de correlação e np vetores de agregação das diferenças, resultando em apenas um vetor V_{DA} e um vetor V_{CC} , ambos com nove elementos, para cada Z_K dentro do intervalo de altitude. A Figura 24 apresenta um esquema simplificado do procedimento descrito.

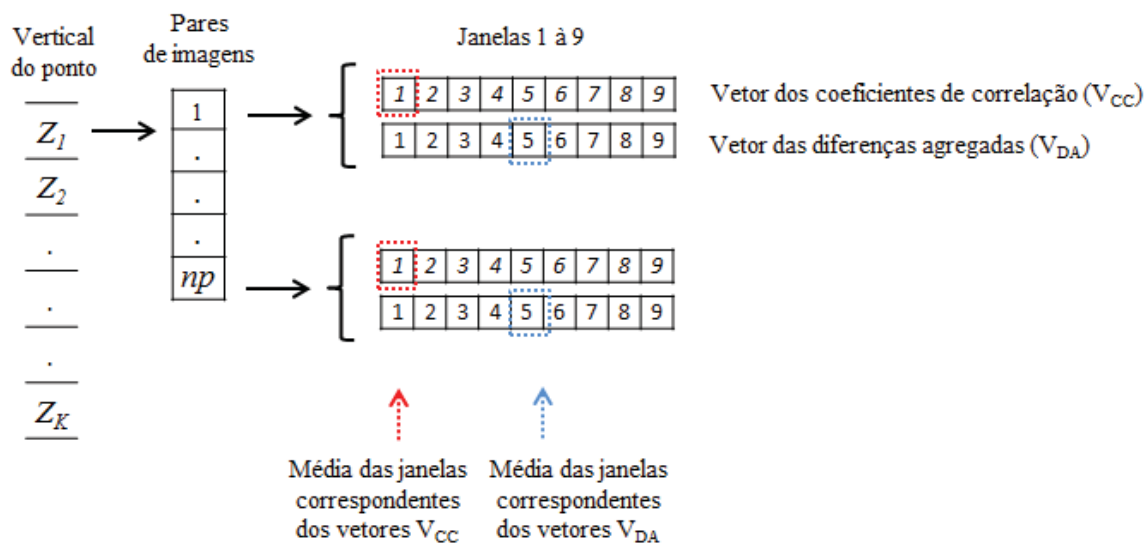


Figura 24: Esquema simplificado do armazenamento dos vetores com coeficientes de correlação e diferenças agregadas para cada subjanela.

Com apenas um vetor V_{DA} e um vetor V_{CC} para cada altitude do intervalo Z_K , a etapa seguinte consiste em comparar os elementos dos vetores com limiares de aceitação que fazem parte dos dados de entrada para o programa implementado. Os nove elementos do V_{CC} são analisados com relação a um coeficiente de correlação mínimo; e assume-se a média dos valores acima deste mínimo aceitável como um coeficiente único. Para os elementos do vetor V_{DA} armazenam-se a média e o desvio-padrão dos valores abaixo de uma discrepância máxima admissível. Este limiar é calculado empiricamente levando em conta a quantidade de pixels na subjanela e a diferença radiométrica entre as imagens, que sofre influência, por exemplo, das condições de iluminação, horário e posição da tomada das imagens. Em geral, esta diferença é maior entre imagens de faixas distintas. Para dois pixels de um mesmo ponto e de imagens diferentes, a discrepância pode chegar a 10 níveis digitais (ND). Com isso, o limite para a máxima diferença aceitável foi calculado pela quantidade de pixels dentro da subjanela (m^2) multiplicada por um fator de diferença mínima de NDs, fornecido como dado de entrada.

Enfim, tem-se para cada valor de altitude um coeficiente global de coeficientes de correlação, o erro mínimo e seu desvio-padrão. A atribuição da altitude para o ponto é realizada verificando-se qual altitude do intervalo Z_K apresenta maior coeficiente global, menor erro e com desvio-padrão abaixo do máximo aceitável. O ponto recebe altitude zero se qualquer uma das três condições não for atendida.

Este método de correspondência foi implementado para realizar um refinamento da correspondência entre as imagens no último nível da pirâmide e faz uma simplificação nas etapas utilizadas na correspondência utilizando métodos globais, especialmente no método *Semi-global matching* (SGM). A principal diferença está na função de regularização utilizada, que para este caso considera uma superfície plana e no processo de busca que é unidimensional no método SGM e bidimensional para as subjanelas. O método foi baseado na correspondência por janelas móveis (KANADE e OKUTOMI, 1991; FUSIELO et al., 1997).

3.2.5. Interpolação e adensamento das altitudes da grade

Ao terminar o processo de correspondência em todo o MDS, alguns pontos podem não apresentar correlação mínima, portanto, suas altitudes não são estimadas e receberam valor zero, com isto, por tratar-se de uma grade regular, surge à necessidade de se realizar uma interpolação das altitudes destes pontos.

O método de interpolação utilizado nesta etapa foi implementado por Miyoshi et al. (2009) e adaptado para este trabalho. A função para interpolação consiste em verificar e eliminar pontos espúrios (gerados por falsas correlações) do conjunto de altitudes estimadas na etapa de correspondência utilizando o ajuste de um plano (Equação 28). Para isso, inicialmente, são verificados quais pontos encontram-se dentro de uma distância R do ponto de interesse. Os parâmetros (a , b , c) da equação do plano (Equação 28) são determinados pelo MMQ e de um novo valor de altitude é interpolada. Para solucionar o sistema de equações são necessários três pontos e no mínimo quatro pontos para ajustar com redundância. O valor interpolado é comparado com o valor correspondente na amostra e, se a diferença entre estes valores estiver acima de um limite aceitável, o ponto é considerado espúrio e é eliminado do conjunto de pontos. Os pontos que passaram no teste anterior são utilizados para a interpolação, a partir do inverso do quadrado da distância, dos pontos do MDS (grade regular) que não foram estimados no processo de correspondência e que foram eliminados por serem considerados espúrios.

A resolução do MDS para cada nível da pirâmide é informada como dado de entrada e seu adensamento pode ser executado no término de cada nível da pirâmide, caso o nível seguinte possua uma resolução da grade do MDS diferente da resolução do nível atual. Após o adensamento todo o processo para estimação da altitude é reiniciado e repetido até alcançar o nível de maior resolução da pirâmide.

Como dados de saída são gerados arquivos texto contendo as posições e altitudes dos pontos da grade regular (interpolada) em cada nível da pirâmide e uma imagem da normalização das altitudes para tons de cinza e um arquivo no formato “.las”, utilizando a ferramenta *LasTools*, apenas com os pontos que apresentaram correspondência (sem interpolação). Este formato é comum para dados de varredura a LASER e pode ser visualizado tridimensionalmente em programas como o *LASEdit* (*CLOUD Peak Software*, 2012). Para os demais procedimentos com arquivos no formato “.las”, como conversão .txt para las, foi utilizado o software *LASTools*.

3.2.6. Formas para avaliação dos resultados

A verificação da qualidade dos MDSs obtidos pelas técnicas aplicadas foi feita pela análise visual e pelo controle externo. A visualização das nuvens de pontos foi realizada utilizando o programa *LASEdit* que oferece recursos como visualização tridimensional e extração de perfis. Com estes recursos foram verificados o aspectos e a forma dos elementos da cena, a dispersão (presença de pontos espúrios) e a densidade de pontos.

O controle externo foi realizado utilizando pontos de controle, medidos diretamente em campo, e pontos fotogramétricos, com coordenadas estimadas no processo de fototriangulação, apenas nas áreas de estudo em que esses pontos estavam disponíveis. Além disso, foi realizada a comparação com dados de varredura a LASER e com o MDS gerado no programa LPS. Os dados de varredura a LASER foram obtidos no mesmo voo das imagens, utilizando um scanner RIEGL LMS-Q680i, com densidade de aproximadamente 8 pontos/m². Foi considerada apenas a nuvem de pontos coletada em uma faixa, ou seja, não foram realizados a fusão e o registro dos dados LASER de diferentes passagens do voo.

As comparações entre os MDS obtidos e os dados de referência possibilitou o cálculo de estatísticas como a média, o desvio-padrão e a REMQ das discrepâncias.

4. EXPERIMENTOS E RESULTADOS

Nesta seção serão apresentados os experimentos e resultados obtidos com o método proposto. Para a execução dos experimentos foi realizado o levantamento de pontos de apoio e a fototriangulação das imagens para obtenção dos POE. É importante ressaltar que a qualidade dos POE das imagens é fundamental para todo o processo, uma vez que o método VLL parte do espaço objeto para o espaço imagem. Foram realizados testes alterando as configurações dos parâmetros para a busca de pontos homólogos entre as imagens e a quantidade de imagens para quatro pequenas áreas com diferentes características principais (urbana densa, áreas homogêneas, padrão repetitivo, vegetação rasteira e árvores grandes e uma edificação com vários pavimentos).

4.1. Seleção da área de interesse

A área de trabalho foi definida a partir de um bloco de imagens coletadas pela empresa Engemap em dezembro de 2011. Foram selecionadas seis imagens nas proximidades da FCT-UNESP Campus de Presidente Prudente, pertencentes a duas faixas do voo (três imagens em cada faixa). As imagens foram tomadas com uma câmara Hasselblad H4D com 60 megapixels (ver Tabela 1). A Figura 25 mostra o mosaico criado com as seis imagens utilizadas neste projeto.

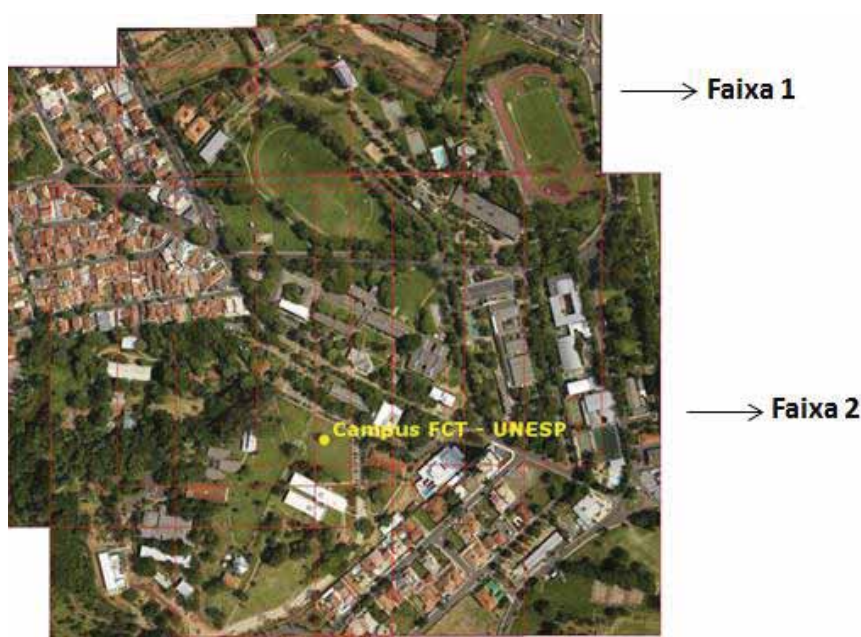


Figura 25: Mosaico com seis imagens e seus limites.

4.2. Fototriangulação

Nesta etapa, foi necessário o levantamento de pontos de apoio e de verificação. Para isto, foi utilizado um par de receptores GNSS *Hiper GGD*, onde foram realizadas coletas com duração de 20 minutos em cada ponto, utilizando uma máscara de elevação de 15 graus e taxa de coleta de 15 segundos. Os dados foram processados pelo método de posicionamento relativo utilizando o *software Topcon Tools* e a estação de referência PPTE, pertencente à RBMC (Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo). A Figura 26 mostra a localização aproximada dos 20 pontos de apoio levantados.



Figura 26: Localização aproximada dos pontos de apoio levantados.

Na Tabela 1 são apresentados os principais dados das imagens e do voo. Os valores das distorções das lentes obtidos no certificado de calibração, gerado pela empresa Engemap com o *software* INPHO, são correções estimadas aos parâmetros de distorções após corrigir as imagens destes efeitos. Assim, tratando-se de correções, os valores dos coeficientes de distorções (k_1 , k_2 e k_3) foram considerados com sinal oposto ao do certificado de calibração no processo de fototriangulação e utilizados com o mesmo sinal do certificado nos dados de entrada no método VLL.

Tabela 1: Dados das imagens e voo.

<i>Distância Focal</i>	50,88998 mm $\pm$ 1,3429 μ m
x_0	0,00216 mm $\pm$ 0,57877 μ m
y_0	0,00076 mm $\pm$ 0,54068 μ m
k_1	$-3,37355e^{-07} \text{ mm}^{-2} \pm 2,6e^{-08} \text{ mm}^{-2}$
k_2	$-1,01373e^{-09} \text{ mm}^{-4} \pm 5,3e^{-11} \text{ mm}^{-4}$
k_3	$1,06346e^{-12} \text{ mm}^{-6} \pm 3,3e^{-14} \text{ mm}^{-6}$
<i>Tamanho do pixel</i>	6,0 x 6,0 μ m
<i>Tamanho da imagem</i>	8956 x 6708 pixels
GSD	7 cm
Altitude de voo	950m

O valor do deslocamento no ponto principal obtido do certificado foi alterado de acordo com a rotação realizada nas imagens para a entrada no programa (Figura 27).

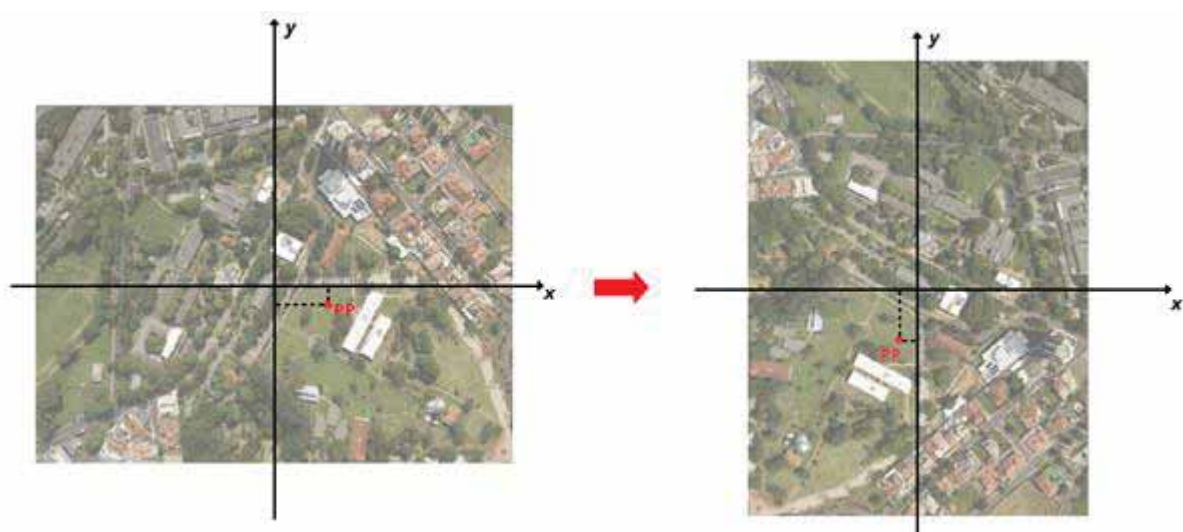


Figura 27: Rotação das imagens e mudança da posição do ponto principal.

A fototriangulação das seis imagens foi realizada inicialmente no programa LPS. No entanto, ao inserir no código implementado os valores dos POE estimados no LPS, verificou-se uma diferença média de 2 a 3 pixels nas coordenadas (c , l) calculadas na etapa de projeção do espaço objeto para o espaço imagem. Após serem realizados alguns testes, notou-se que esse problema não ocorria ao utilizar os POE estimados com o programa CMC, programa desenvolvido pelo grupo de pesquisa em Fotogrametria da FCT-UNESP (RUY e TOMMASELLI, 2004). No cálculo das coordenadas (c , l) são utilizados os POE, as equações de colinearidade e o refinamento de coordenadas, assim, uma possível causa para a

incompatibilidade entre os programas pode estar relacionada a uma diferença no processo de refinamento de coordenadas, o qual não se tem acesso ao código no programa LPS. Como este procedimento é conhecido no programa CMC, optou-se por utilizá-lo para a obtenção dos POE.

As imagens utilizadas foram rotacionadas, antes de serem realizadas as medidas dos pontos sobre as mesmas, de modo que ficassem orientadas ao norte. Isto foi feito porque a rotação entre as faixas não foi considerada durante a implementação do método VLL.

Foram utilizados 11 pontos de apoio, considerando uma precisão de $\sigma = 5$ cm para as componentes E e N, e $\sigma = 10$ cm para as altitude. Além destes pontos, foram utilizados 85 pontos fotogramétricos e 5 pontos de verificação. As coordenadas dos CPs obtidas pelo método de georreferenciamento direto, foram utilizados como dados aproximados, adotando-se um desvio-padrão de 15 cm para as componentes E e N e 20 cm para altitude. A Tabela 2 mostra os POE estimados para cada imagem após a fototriangulação e a Tabela 3 os desvios-padrão obtido para cada POE.

Tabela 2: Parâmetros de orientação exterior estimados.

	$E(m)$	$N(m)$	$h(m)$	$\omega(^{\circ})$	$\varphi(^{\circ})$	$\kappa(^{\circ})$
1	458074,410	7553793,515	971,953	2,10084333	1,18179395	-1,3714574
2	457916,949	7553789,988	973,255	0,58495371	1,61250851	2,19848781
3	457759,676	7553785,656	974,855	-4,0450090	0,71650943	0,31780143
4	457829,954	7553594,651	964,917	0,23444452	2,03673898	0,63389395
5	457984,975	7553596,686	964,245	1,89722543	1,78932853	1,66077268
6	458141,181	7553597,176	963,827	2,04140515	0,77353694	0,14890305

Tabela 3: Desvios-padrão dos POE estimados.

<i>Imagem</i>	$\sigma_E(m)$	$\sigma_N(m)$	$\sigma_h(m)$	$\sigma_{\omega(^{\circ})}$	$\sigma_{\varphi(^{\circ})}$	$\sigma_{\kappa(^{\circ})}$
1	0,2	0,191	0,106	0,019158	0,020479	0,009709
2	0,203	0,184	0,102	0,018587	0,020767	0,009078
3	0,238	0,194	0,121	0,019106	0,024567	0,010387
4	0,218	0,179	0,106	0,017911	0,022989	0,010047
5	0,17	0,153	0,092	0,015461	0,01773	0,00825
6	0,221	0,174	0,105	0,017035	0,023267	0,009502

A Tabela 4 apresenta a REMQ nos pontos de verificação obtidos na fototriangulação. Observa-se que as REMQs nas componentes E, N e h estão em torno de 1 GSDs da imagem, qualidade importante para a geração do MDS.

Tabela 4: Discrepâncias, média e erro médio quadrático nos pontos de verificação.

	<i>E(m)</i>	<i>N(m)</i>	<i>h(m)</i>
P1	0,126	-0,038	-0,036
P2	0,049	0,074	-0,005
P3	0,022	-0,098	0,007
P4	0,047	0,160	0,051
P5	0,041	-0,005	0,114
Média	0,057	0,018	0,026
REMQ	0,067	0,092	0,058

4.3. Geração de MDS

Os dados de entrada para o programa implementado são basicamente as imagens digitais, os POE e POI da câmara utilizada e um MDS aproximado. As imagens rotacionadas foram convertidas para tons de cinza. Os POI foram obtidos no certificado de calibração da câmara fornecido pela empresa Engemap (Tabela 1).

Para gerar a superfície aproximada de entrada foram interpolados todos os pontos envolvidos na fototriangulação (pontos de apoio, controle e fotogramétricos) utilizando o interpolador inverso do quadrado da distância e resolução da grade de 25x25cm para todos os testes.

Para testar o método proposto foram selecionadas quatro áreas diferentes, que apresentassem algumas das principais características que dificultam o processo de correspondência de imagens: áreas homogêneas, padrões repetitivos, sombras, oclusões e árvores, que em razão do movimento, da diferença de iluminação e sombras nas folhas tornam-se áreas bastante heterogêneas e de difícil correspondência. Para cada área foram gerados MDSs utilizando todas as imagens do bloco fototriangulado e em seguida reduzindo-se a quantidade de imagens. O objetivo dos testes realizados foi verificar a influência dos parâmetros adotados na correspondência e da utilização de múltiplas imagens, analisando-se especialmente o comportamento do método proposto nas áreas críticas para correspondência.

Os experimentos apresentados na Seção 4.4 foram realizados utilizando a correspondência apenas com o coeficiente de correlação entre janelas quadradas e variando a quantidade de imagens, analisando principalmente o impacto da utilização da abordagem de múltiplas imagens. Os resultados foram comparados com pontos de verificação e dados de varredura a LASER.

Na Seção 4.6 foi utilizado o método de correspondência considerando subjanelas, descrito na Seção 3.2.4.1, para refinar os resultados obtidos na Seção 4.4 para cada área de estudo. O objetivo destes experimentos foi analisar a contribuição da adição deste método para a correspondência. Os resultados desta seção foram comparados com dados de varredura a LASER e com um MDS gerado no programa LPS.

Na Seção 4.5 foi realizada a comparação entre dados de varredura a LASER e o MDS obtido no software comercial LPS, utilizando o método de correspondência mais tradicional, realizado entre pares de imagens. Este MDS (LPS) também foi utilizado para verificar a qualidade dos MDS obtidos pelo método implementado e para comparar as principais diferenças entre os resultados obtidos ao utilizar abordagens diferentes para a correspondência.

4.4. Experimentos utilizando o coeficiente de correlação para janelas quadradas

4.4.1. Experimento 1

Neste experimento foi utilizada a região observada na imagem do Quadro 1 (Área 1). Verifica-se que esta área apresenta vários elementos que dificultam o processo de correspondência entre imagens, por exemplo o padrão repetitivo do telhado da edificação (Figura 32 (a)), a área homogênea formada na vegetação rasteira (Figura 32 (b)), árvores com grandes copas e aproximadamente 15m de altura (Figura 32 (c)) e objetos como veículos (Figura 32 (d)). O Quadro 2 descreve a configuração de imagens utilizadas nos quatro experimentos realizados para a Área 1.

Quadro 1: Descrição e apresentação da área utilizada no Experimento 1.

	Localização	Departamento de Cartografia FCT-Unesp
	Área	50x100m
	Característica	Áreas homogêneas, árvores grandes e pequenas, vegetação rasteira, edificação com telhado com padrão repetitivo e transparência, veículos, sombras.
	Número de imagens	6 (3 imagens na Faixa 1 e 3 imagens na Faixa 2)

Quadro 2: Descrição dos experimentos na Área 1.

<i>Experimento</i>	<i>Descrição</i>
A	MDS gerado com 6 imagens.
B	MDS gerado apenas com imagens da Faixa 1 (3 imagens).
C	MDS gerado apenas com imagens da Faixa 2 (3 imagens).
D	MDS gerado apenas com um par de imagens.

Os parâmetros de entrada para geração do MDS são apresentados na Tabela 5. Estas configurações são as mesmas para todos os experimentos do Quadro 2.

Tabela 5: Configuração dos parâmetros para correlação de imagens.

Níveis	Tamanho da janela (pixel)	Coefic. de Correlação Mínimo	ΔZ_{max} (m)	ΔZ_{min} (m)	dZ (m)	Raio de busca (m)
1	35	0,85	20	6	0,60	10
2	25	0,85	7	4	0,30	10
3	15	0,85	3	2	0,15	10
4	11	0,85	1	1	0,07	10

As imagens do MDS gerados em cada experimento são apresentadas a seguir e na sequência seguem as análises e a comparação do MDS com pontos de verificação e pontos obtidos com varredura a LASER.

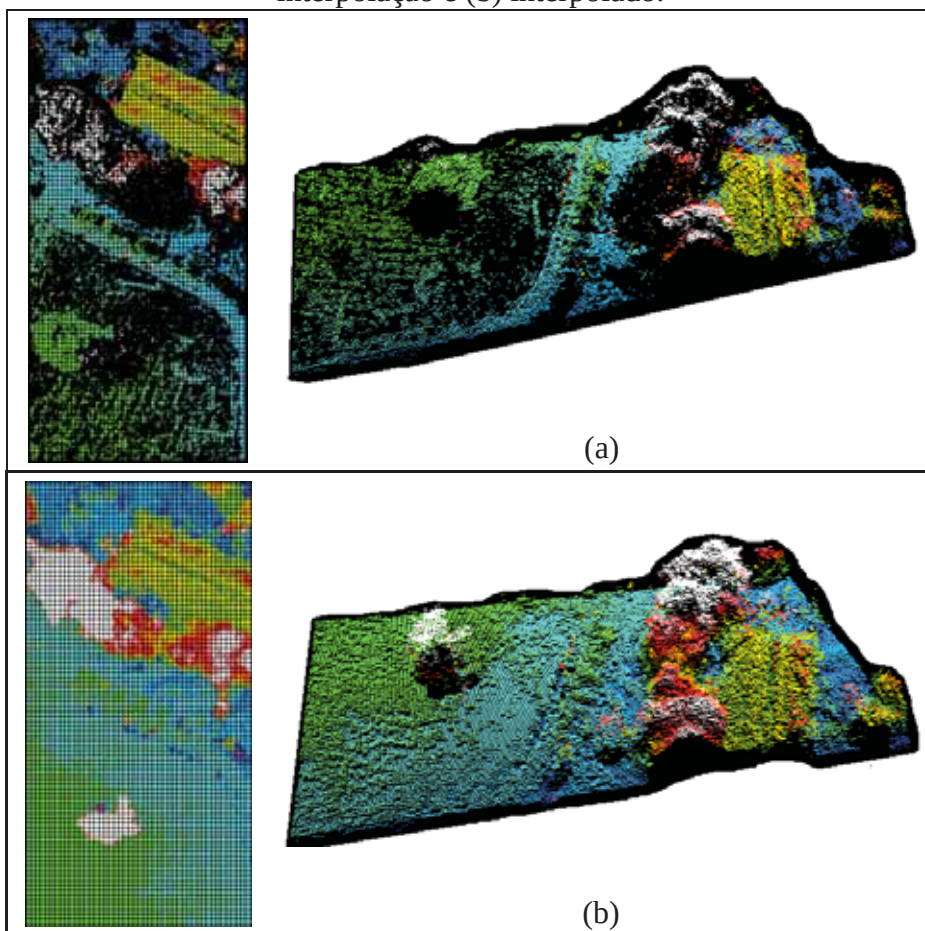
Os Quadros 3, 4, 5 e 6 mostram os resultados dos experimentos A, B, C e D, respectivamente. Cada quadro contém a imagem hipsométrica dos pontos obtidos no último

nível da pirâmide de imagens e antes da etapa de interpolação, ou seja, apenas os pontos que alcançaram as condições mínimas para aceitar a similaridade calculada e estimar a altitude, e mostra a imagem dos MDSs resultantes após a interpolação desses pontos.

As Figuras (28, 29, 30, 31) (a), (b), (c) e (d) mostram imagens em tons de cinza que representam os MDSs gerados no nível de menor GSD (Figuras (28, 29, 30, 31) (a)) até o nível de maior resolução (Figuras (28, 29, 30, 31) (d)) da pirâmide de imagens e as Figuras (28, 29, 30, 31) (e) representam os MDSs interpolados a partir dos pontos obtidos no último nível da pirâmide. Nas imagens em tons de cinza a cor preta representa ausência de pontos na região e os pontos ficam mais claros quanto maior a altitude.

✓ Experimento A:

Quadro 3: Imagem hipsométrica do MDS gerado com seis imagens. (a) MDS sem interpolação e (b) interpolado.



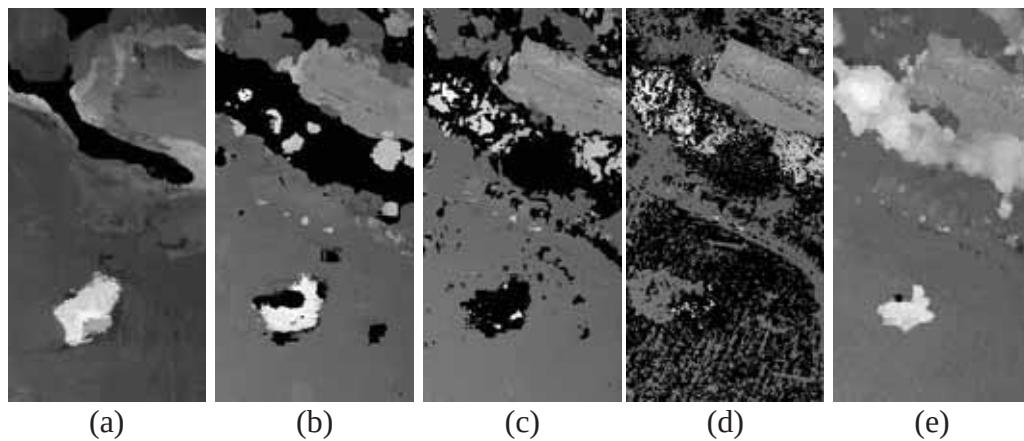
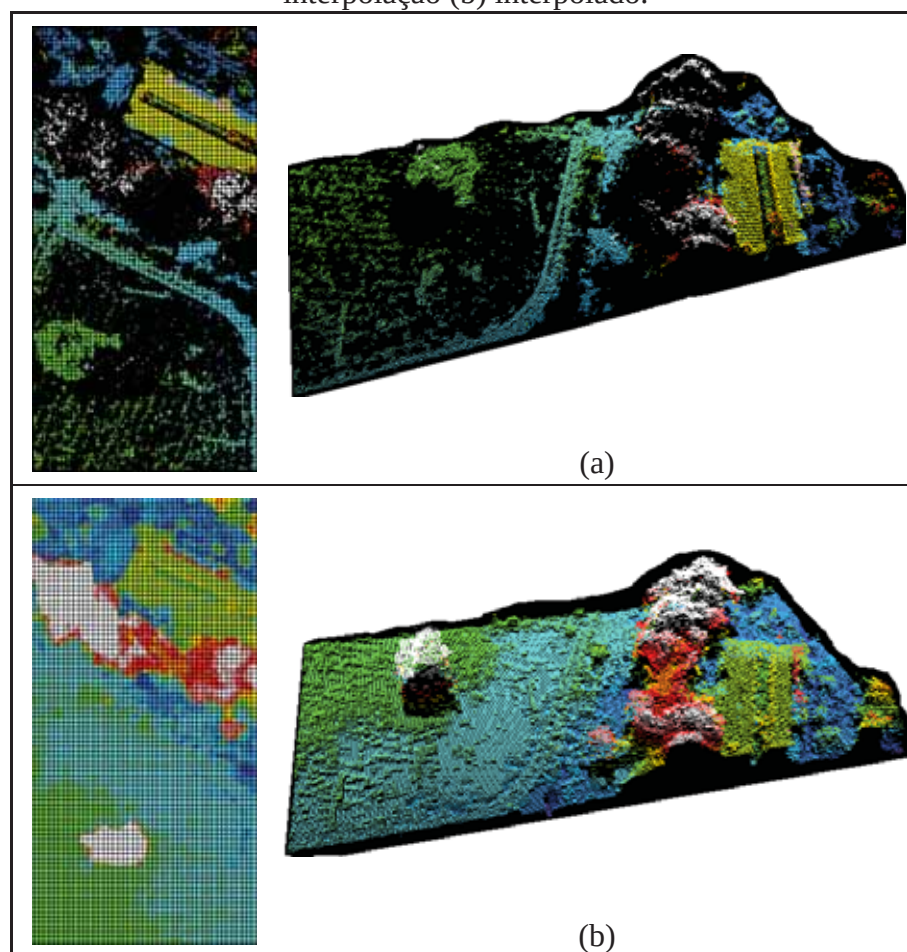


Figura 28: (a), (b), (c) e (d) imagens dos pontos obtidos a cada nível da pirâmide; (e) pontos obtidos após interpolação no último nível, para o caso A.

✓ Experimento B:

Quadro 4: Imagem hipsométrica do MDS gerado com 3 imagens da Faixa 1. (a) MDS sem interpolação (b) interpolado.



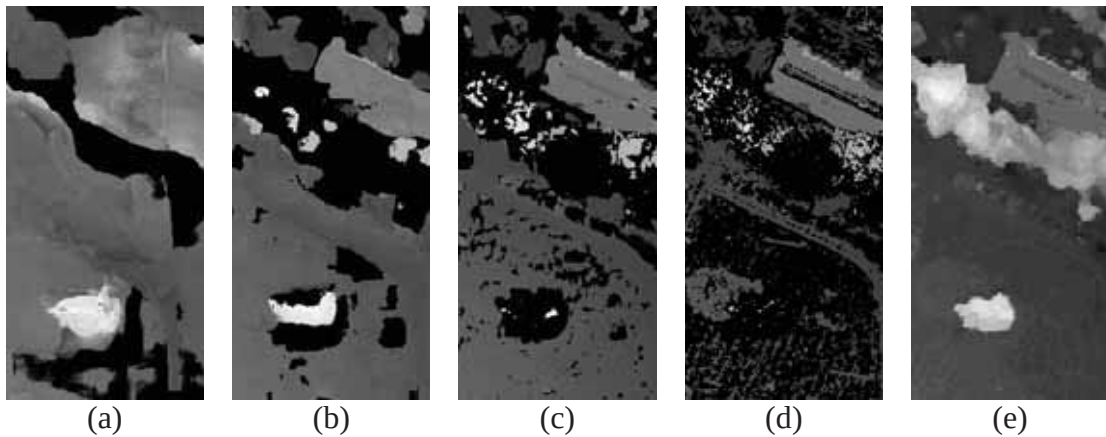
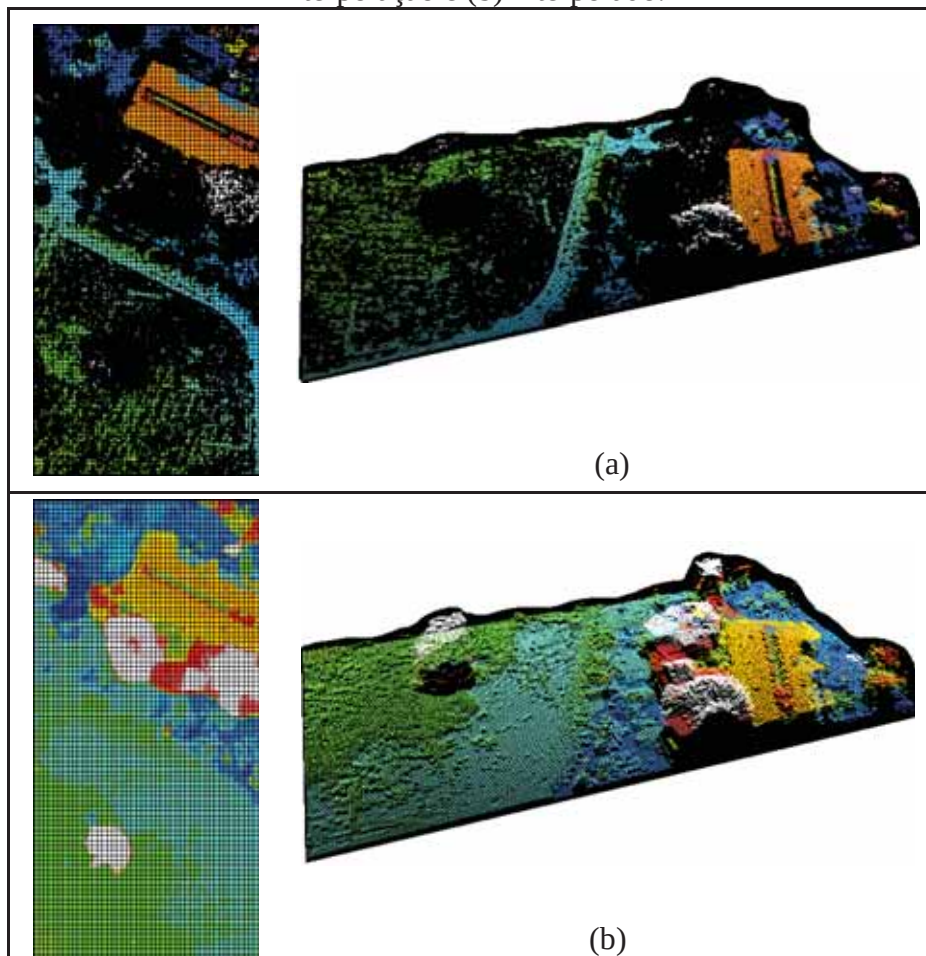


Figura 29: (a, b, c e d) imagens dos pontos obtidos a cada nível da pirâmide; (e) pontos obtidos após interpolação no último nível, para o caso B.

✓ Experimento C:

Quadro 5: Imagem hipsométrica do MDS gerado com 3 imagens da Faixa 2 . (a) MDS sem interpolação e (b) interpolado.



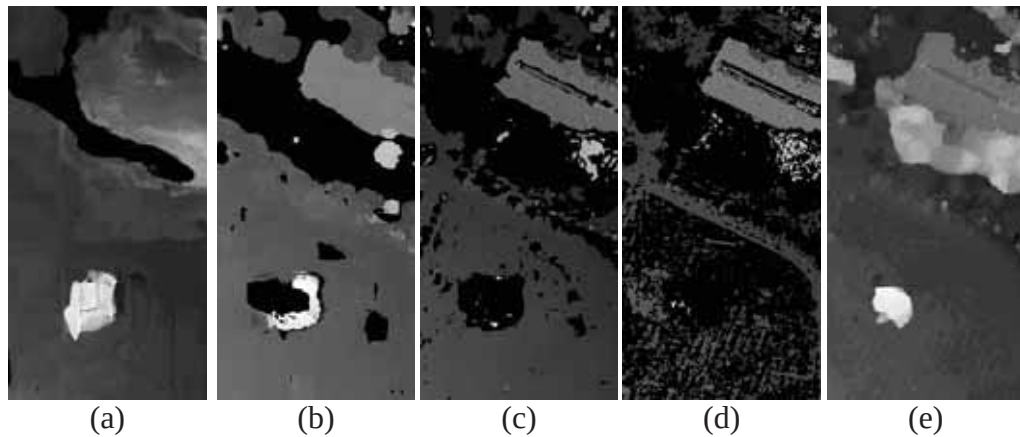
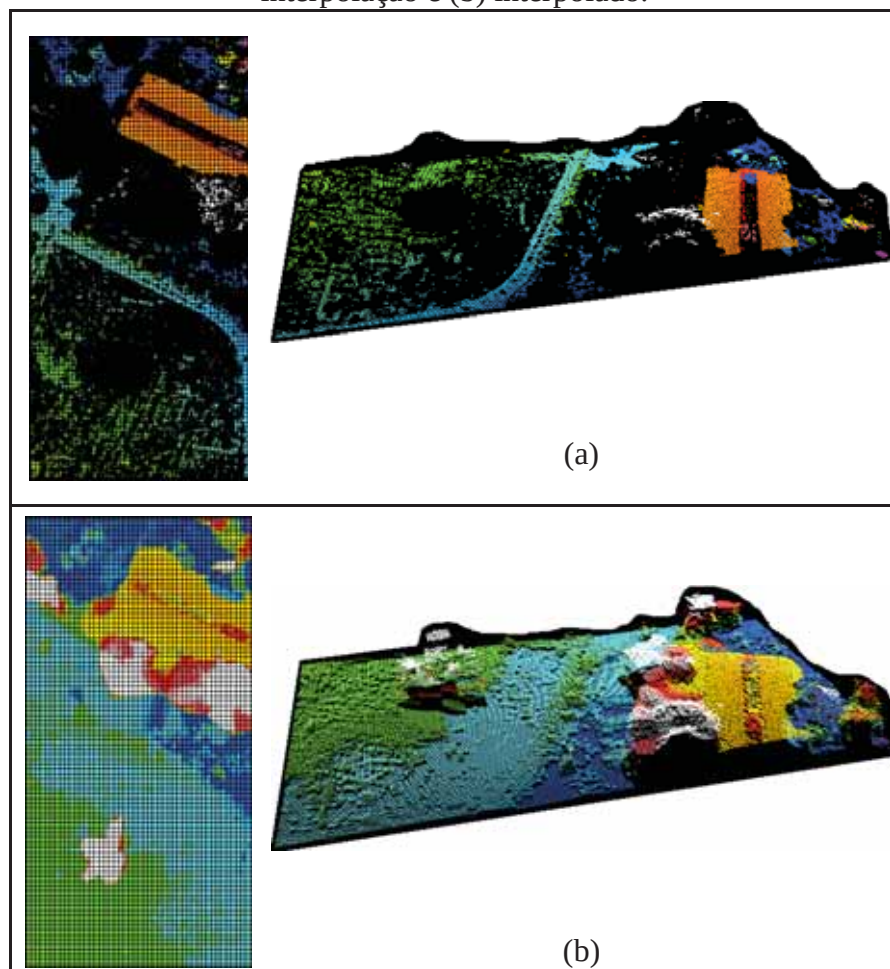


Figura 30: (a, b, c e d) imagens dos pontos obtidos a cada nível da pirâmide; (e) pontos obtidos após interpolação no último nível, para o caso C.

✓ Experimento D:

Quadro 6: Imagem hipsométrica do MDS gerado com duas imagens. (a) MDS sem interpolação e (b) interpolado.



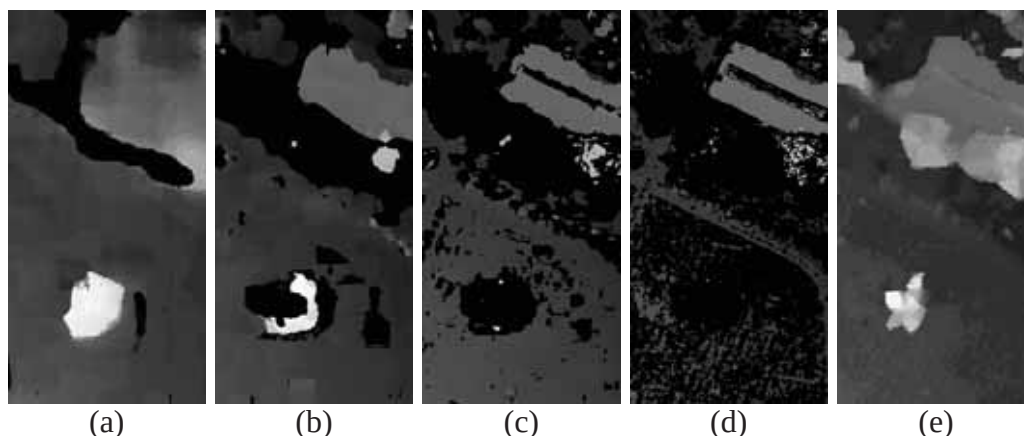


Figura 31: (a, b, c e d) imagens dos pontos obtidos a cada nível da pirâmide; (e) pontos obtidos após interpolação no último nível, para o caso D.

Nota-se visualmente que em todos os experimentos a maioria dos pontos que não obtiveram sua altitude estimada encontra-se em locais com a presença de árvores e de vegetação rasteira, que representa uma área homogênea. Além disso, verifica-se que esta redução é maior com a diminuição da quantidade de imagens, como pode ser visto, para o caso das áreas homogêneas, na diferença entre a Figura 32 (f), que mostra um recorte da imagem hipsométrica do MDS gerado com seis imagens (Experimento A) e a Figura 32 (g), que mostra um recorte do MDS gerado no Experimento C (3 imagens); e para o caso das árvores nas Figuras 32 (g) e (l) que mostram a diferença na quantidade de pontos no MDS do Experimento A e no MDS do Experimento D, respectivamente.

A edificação com padrão repetitivo (Figura 32 (a)) teve sua forma delimitada quase completamente, porém, neste caso, os pontos apresentaram um comportamento mais desordenado e com a presença maior de pontos espúrios no MDS gerado com seis imagens (Experimento A) como mostra a Figura 32 (e). Nos experimentos B, C e D os pontos do telhado apresentaram altitudes mais uniformes, exceto para alguns pontos próximos às bordas da edificação. O MDS do Experimento B foi o único a conservar o padrão “ondulado” do telhado, como mostra a Figura 32 (i). Em todos os experimentos a delimitação das bordas foi comprometida após o processo de interpolação. Alguns objetos presentes na cena, como os veículos no estacionamento (Figura 32 (d)), foram detectados (Figura 32 (h)).

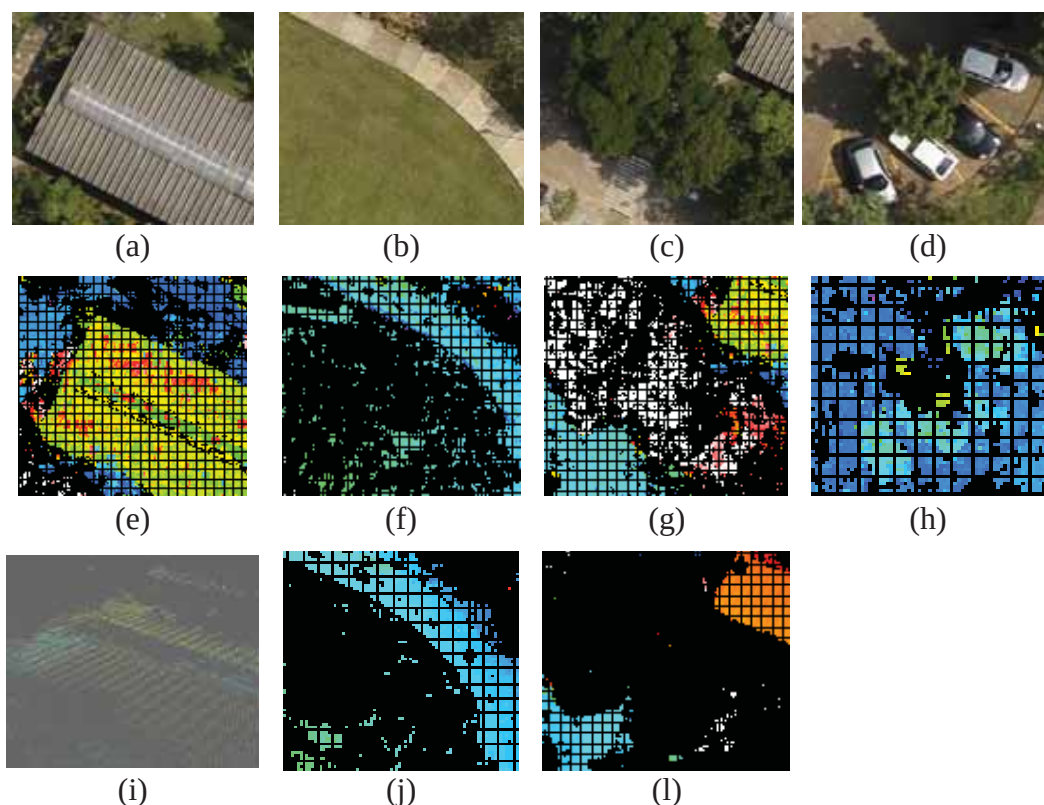


Figura 32: Recortes ilustrando características da Área 1 (a) telhado com padrão repetitivo; (b) vegetação rasteira - área homogênea; (c) árvores de grande porte; (d) objetos presentes na cena; (e) pontos do telhado obtidos no Experimento A; (f) pontos da região homogênea obtidos no Experimento A; (g) pontos das árvores obtidos no Experimento A; (h) pontos dos objetos obtidos no Experimento A; (i) pontos do telhado obtidos no Experimento B; (j) pontos da região homogênea obtidos no Experimento C; (l) pontos das árvores obtidos no Experimento D.

Para a análise quantitativa externa da qualidade dos MDSs gerados com o método implementado foi realizada a comparação entre a altitude de pontos de verificação, que são os pontos utilizados na fototriangulação (pontos de apoio e fotogramétricos) presentes nesta área e os pontos correspondentes nos MDSs obtidos. Para isso, foi utilizado o módulo *lascontrol* do pacote *LasTools*, que compara dados entre pontos de um arquivo *.las* e os pontos de referência de um arquivo *.csv*. O módulo *lascontrol* gera um TIN utilizando os pontos a serem comparados (*.las*) e interpola nele as altitudes correspondentes as posições dos pontos de referência. A Tabela 6 mostra as diferenças entre as altitudes de sete pontos de referência (pontos de apoio e fotogramétricos) e os MDSs sem interpolação e após a interpolação, para cada um dos experimentos realizados.

Tabela 6: Diferença entre os pontos de verificação e os pontos dos MDSs gerados.

Ref.	A		B		C		D	
<i>h(m)</i>	<i>Sem interp.</i>	<i>Interp.</i>	<i>Sem interp.</i>	<i>Interp.</i>	<i>Sem interp.</i>	<i>Interp.</i>	<i>Sem interp.</i>	<i>Interp.</i>
433,46	-2,898	-2,168	0,0999	0,049	0,0199	0,0199	-0,020	-0,020
437,251	0,148	0,0761	0,167	0,201	0,566	0,2511	0,566	0,2511
434,507	0,076	0,0404	0,048	0,012	-0,053	-0,053	-0,053	-0,0526
433,304	-0,0204	-0,021	-0,4997	0,304	-0,332	-0,239	-0,294	0,304
434,383	-0,085	-0,098	-0,105	0,013	0,0014	-0,185	-0,136	-0,206
434,582	-0,014	-0,014	-0,014	-0,014	-0,023	0,3663	-0,048	0,341
434,251	-0,1115	-0,108	-0,069	-0,072	-0,162	-0,162	-0,162	-0,162
<i>Média(m)</i>	-0,415	-0,327	-0,053	0,071	0,0027	0,00005	-0,021	0,065
<i>σ(m)</i>	1,099	0,814	0,218	0,133	0,277	0,230	0,275	0,229
<i>REMQ(m)</i>	1,098	0,822	0,209	0,142	0,2564	0,213	0,255	0,222

Na Tabela 6, nota-se que as REMQs para os experimentos B, C e D ficaram entre 14cm e 26 cm e foi menor para o experimento B após a interpolação. Para o experimento A este valor foi maior que 80 cm para o MDS interpolado e maior que um metro para o MDS sem a interpolação, isto em virtude de um ponto espúrio que encontra-se entre o solo e a edificação, sendo esta a razão da diminuição da discrepância após a interpolação. Sem o ponto espúrio a média ficaria igual a -0,112 cm e a REMQ se reduziria para 9,79 cm.

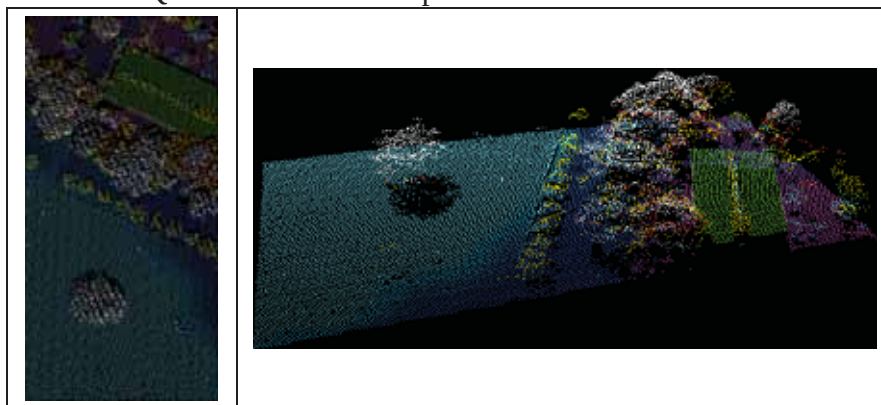
Ao utilizar os dados de varredura a LASER, verificou-se que os pontos apresentavam um deslocamento consideravelmente grande na componente E, causada possivelmente por um erro de sincronização do relógio no momento da coleta. Assim, para utilizar estes dados, foram comparadas as diferenças entre pontos de apoio e pontos estimados na fototriangulação. As médias das diferenças entre E, N e h são apresentadas na Tabela 7.

Tabela 7: Média e desvio-padrão das diferenças entre os pontos utilizados na fototriangulação e os pontos obtidos por varredura a LASER.

	<i>dE</i>	<i>dN</i>	<i>dh</i>
<i>Média</i>	4,295	-0,432	0,243
<i>σ</i>	0,2657	0,155	0,214

A nuvem LASER foi transladada utilizando a ferramenta *LasTools* usando os valores das médias das componentes E e N. O Quadro 7 mostra o MDS obtido por varredura a LASER após as translações.

Quadro 7: Nuvem de pontos LASER da Área 1.



A Tabela 8 mostra a quantidade de pontos estimados após a etapa de correspondência do último nível da pirâmide em cada experimento e a densidade de pontos da nuvem LASER. A Tabela 9 mostra a média, o desvio-padrão e a REMQ obtidas das discrepâncias entre os dados LASER e os MDSs gerados pelo método VLL.

Tabela 8: Quantidade de pontos obtidos no processo de correspondência de imagens no último nível da pirâmide e por varredura a LASER.

Técnica	Quantidade de pontos
Experimento A	37648
Experimento B	27413
Experimento C	24947
Experimento D	21073
LASER	24616

Tabela 9: Média, desvio-padrão e a REMQ das discrepâncias entre os dados LASER e os MDSs gerados.

	A		B		C		D	
	<i>Sem interp.</i>	<i>Interp.</i>	<i>Sem interp.</i>	<i>Interp.</i>	<i>Sem interp.</i>	<i>Interp.</i>	<i>Sem interp.</i>	<i>Interp.</i>
Média(m)	0,114	-0,130	0,053	-0,254	-0,349	-0,725	-0,223	-0,679
σ (m)	2,997	3,093	3,019	3,145	3,054	3,250	2,835	3,075
REMQ(m)	3,000	3,096	3,019	3,155	3,074	3,330	2,844	3,149

A Tabela 8 mostra um aumento expressivo na quantidade de pontos quando se utiliza a maior quantidade de imagens disponíveis. Com relação ao LASER, no experimento A a diferença passa de dez mil pontos. Os resultados da Tabela 9 mostram que em todos os experimentos as REMQs foram de, aproximadamente, 3m, significativamente diferentes das

REMQs apresentadas na Tabela 6. Para analisar o comportamento das diferenças ($MDS_{LASER} - MDS_{VLL}$) foram gerados gráficos (Figura 33) que apresentam a porcentagem dos valores absolutos das discrepâncias de cada experimento separados em sete intervalos.

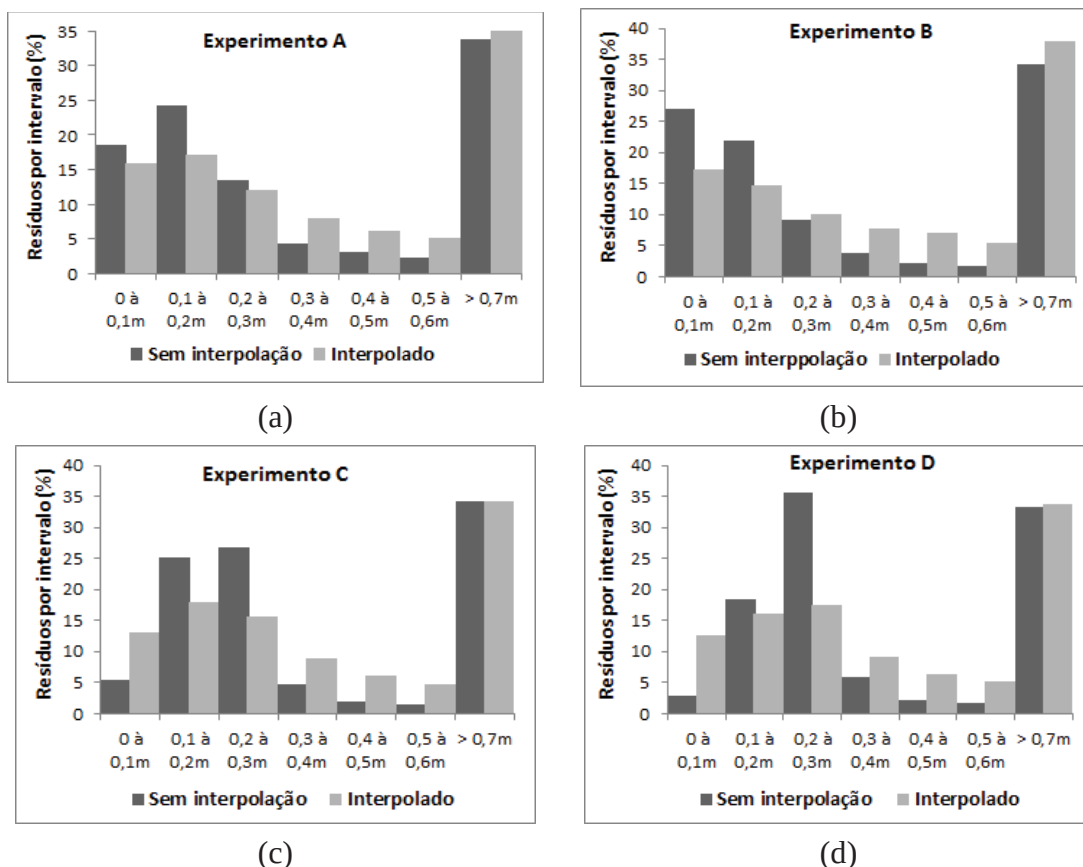


Figura 33: Histograma de frequência das discrepâncias dos experimentos.

Os gráficos da Figura 33 mostram que em todos os experimentos aproximadamente 35% das discrepâncias entre os MDSs obtidos e os dados LASER foram maior que 0,5 m e cerca de 55% foram menores que 0,30 m. Apenas os experimentos A e B apresentaram mais de 45% dos pontos com diferenças de até 0,20 m. Os valores altos para as REMQs estão relacionados principalmente aos pontos nas áreas com árvores. Os dados LASER possuem pontos que estão abaixo de elementos como, por exemplo, das árvores, o que não ocorre no processo de correspondência com imagens ópticas. Com isso, a diferença entre estes pontos pode chegar ao valor da altura das árvores com sinal oposto, como pode ser observado na Figura 34 que mostra a imagem hipsométrica das diferenças obtidas entre o MDS_{VLL} e o MDS_{LPS} .

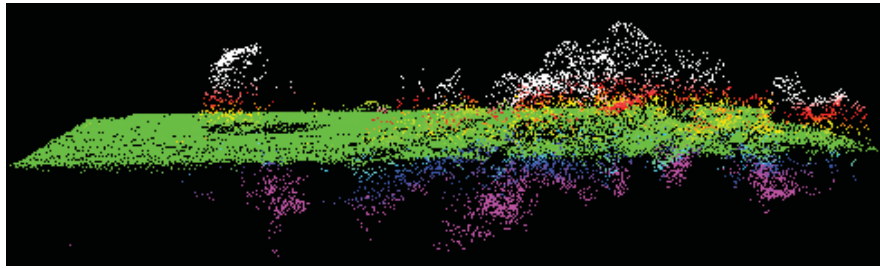


Figura 34: Imagem hipsométrica das diferenças entre o MDS gerado no experimento A e os dados LASER.

4.4.2. Experimento 2

No experimento 2 foi utilizada a Área 2 descrita e ilustrada no Quadro 8. Esta região representa uma área urbana densa, que, em geral, são locais bastante heterogêneos. As edificações nesta área possuem poucos pavimentos e encontram-se pequenas áreas homogêneas, padrões repetitivos e áreas com sombras.

Quadro 8: Descrição e apresentação da área utilizada no Experimento 2.

	
Localização	Rua João Gonçalves Foz, Jd. das Rosas.
Área	100x50m
Característica	Área urbana densa; edificações baixas (poucos pavimentos); telhados com padrão repetitivo; pequenas áreas homogêneas, pouca vegetação, áreas com sombras.
Número de imagens	4

Os parâmetros de entrada para geração do MDS são apresentados na Tabela 10 e os experimentos realizados estão descritos no Quadro 9.

Quadro 9: Descrição dos experimentos na Área 2.

<i>Experimento</i>	<i>Descrição</i>
A	MDS gerado com 4 imagens.
B	MDS gerado apenas com imagens da Faixa 1 (2 imagens).
C	MDS gerado apenas com imagens da Faixa 2 (2 imagens).

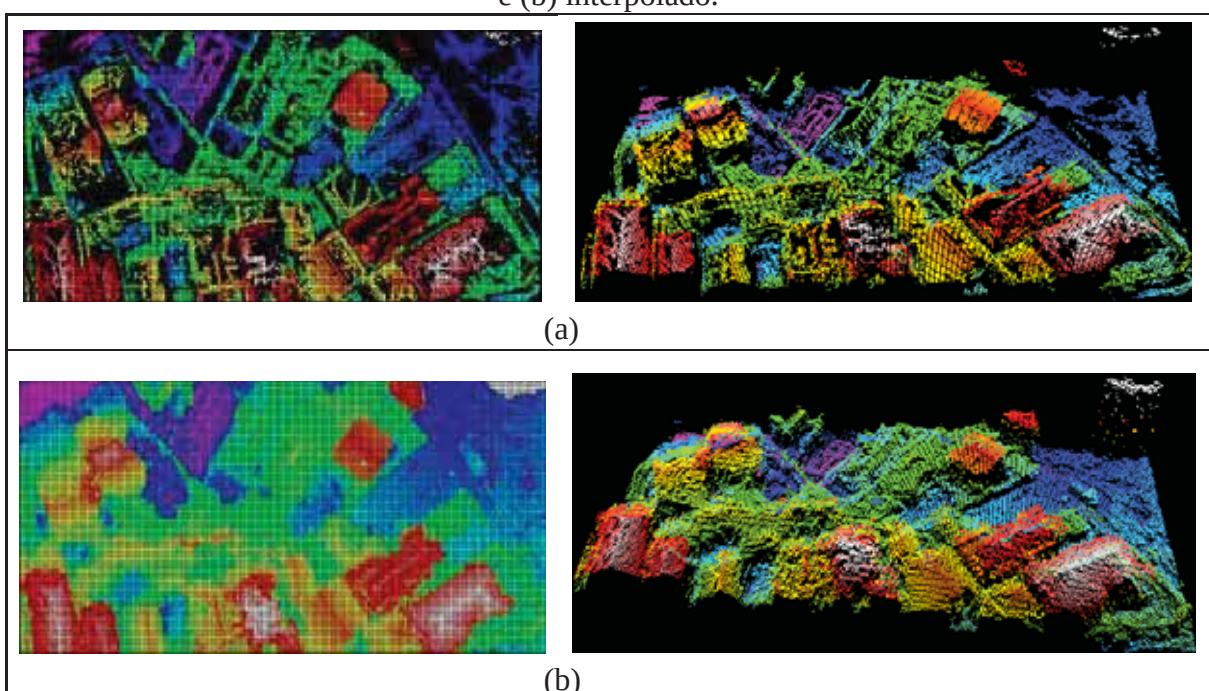
Tabela 10: Configuração dos parâmetros para correlação de imagens.

Níveis	Tamanho da janela (pixel)	Coefic. de Correlação Mínimo	ΔZ_{max} (m)	ΔZ_{min} (m)	dZ (m)	Raio de busca (m)
1	35	0,85	20	6	0,60	10
2	25	0,85	7	4	0,30	10
3	15	0,85	3	2	0,15	10
4	11	0,85	1	1	0,07	10

As imagens hipsométricas dos MDSs, sem interpolação e após interpolação, obtidos nos experimentos A, B e C estão representadas nos Quadros 10, 11 e 12, respectivamente. As Figuras 35, 36 e 37 (a), (b), (c) e (d) são imagens em tons de cinza que representam os MDSs gerados em cada nível da pirâmide de imagens e as Figuras 35, 36 e 37 (e) representam os MDSs interpolados a partir dos pontos obtidos no nível de maior resolução da pirâmide.

✓ *Experimento A:*

Quadro 10: Imagem hipsométrica do MDS gerado com quatro imagens. (a) sem interpolação e (b) interpolado.



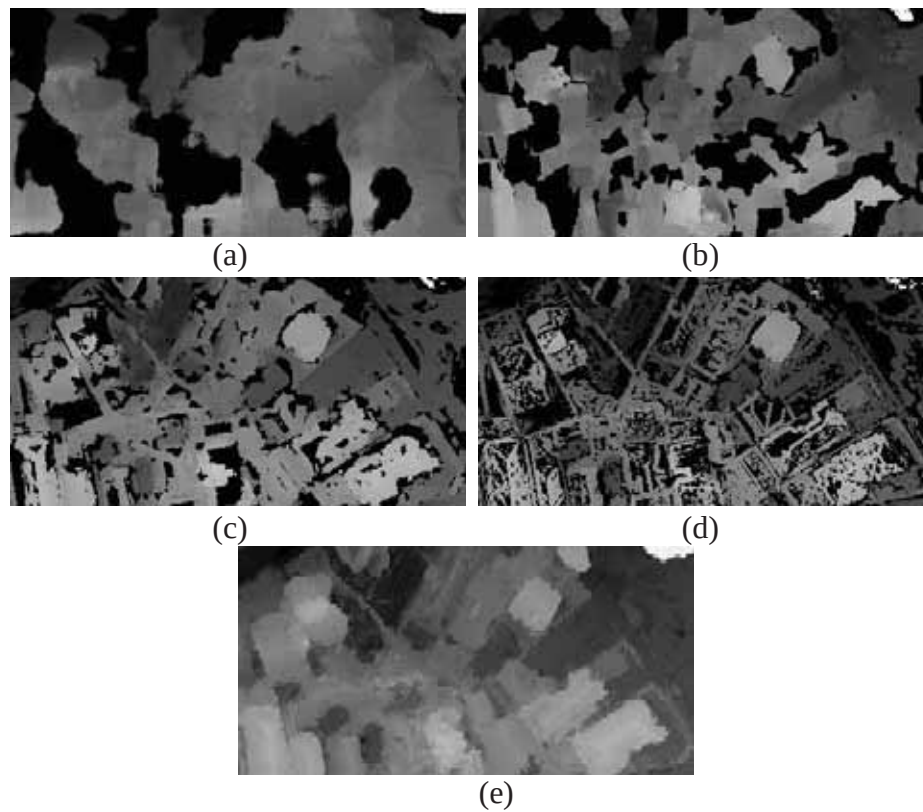
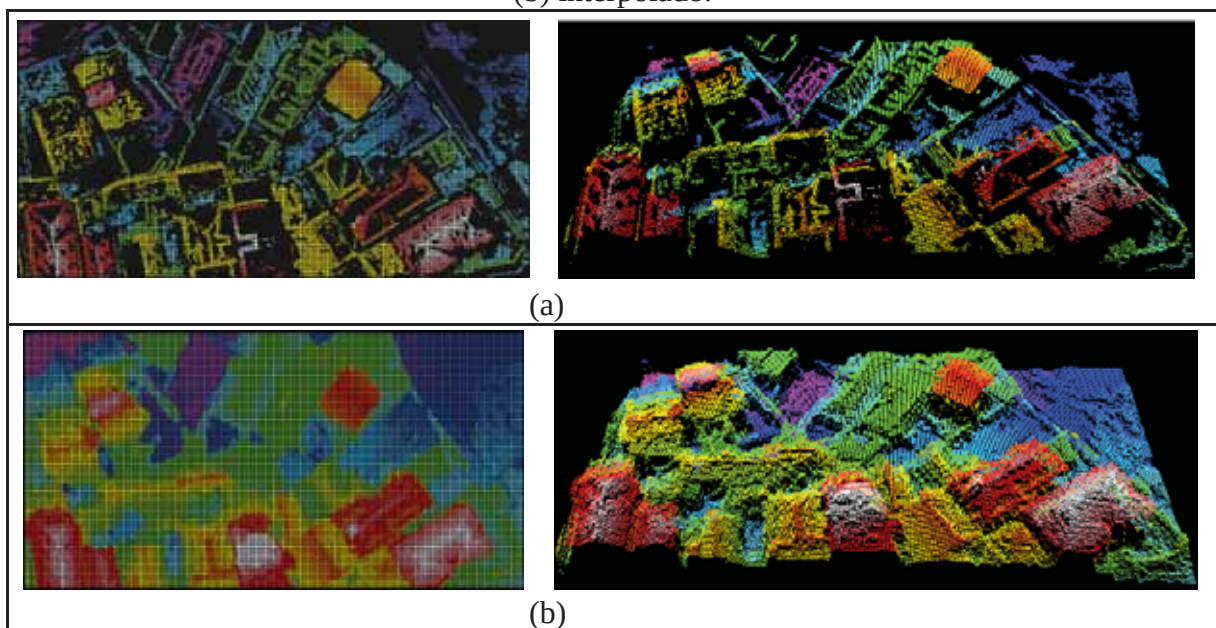


Figura 35: (a), (b), (c) e (d) imagens dos pontos obtidos a cada nível da pirâmide; (e) pontos obtidos após interpolação no último nível, para o caso A.

✓ *Experimento B:*

Quadro 11: Imagem hipsométrica do MDS gerado no experimento B. (a) sem interpolação e (b) interpolado.



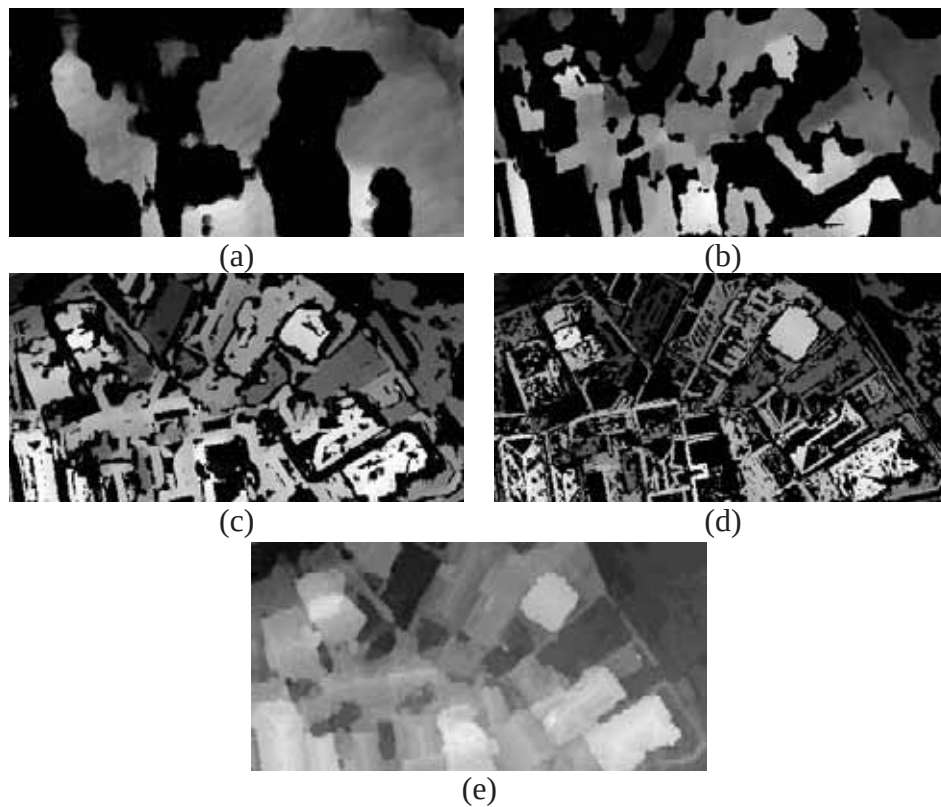
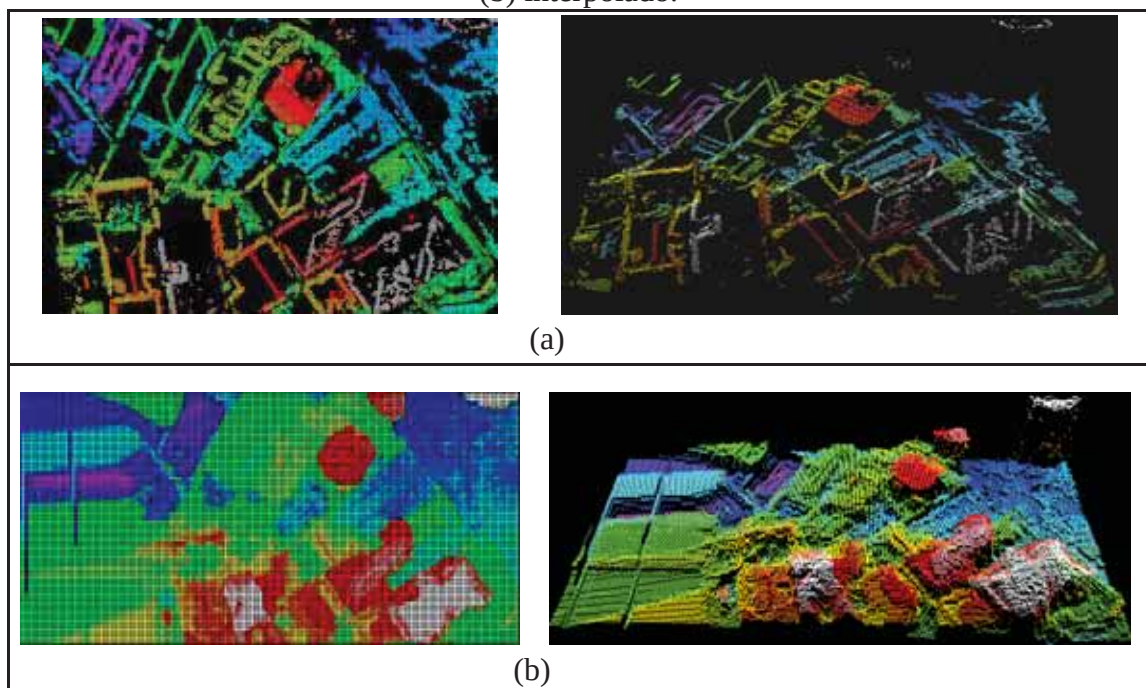


Figura 36: (a, b, c e d) imagens dos pontos obtidos a cada nível da pirâmide; (e) pontos obtidos após interpolação no último nível, para o caso B.

✓ *Experimento C:*

Quadro 12: Imagem hipsométrica do MDS gerado no experimento C. (a) sem interpolação e (b) interpolado.



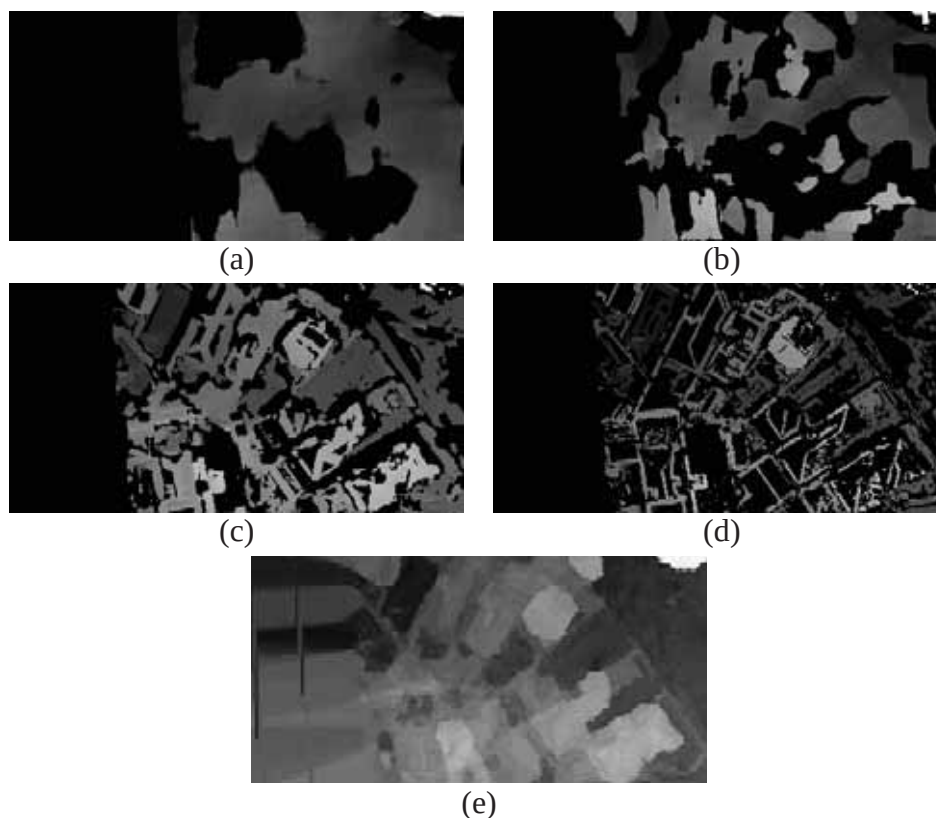


Figura 37: (a, b, c e d) imagens dos pontos obtidos a cada nível da pirâmide; (e) pontos obtidos após interpolação no último nível, para o caso C.

A análise visual dos resultados mostra que foi possível determinar as formas da maior parte dos telhados das edificações e outros elementos da cena, principalmente nos experimentos A e B. O MDS gerado no experimento A, utilizando quatro imagens, obteve a maior quantidade de pontos, como visto nas figuras do Quadro 10 (a). No experimento C uma parte da área teve a altitude obtida apenas por interpolação, pois não estava totalmente presente nas duas imagens da Faixa 2.

Para todos os experimentos a análise de qualidade foi realizada apenas com os dados LASER, pois não haviam pontos de apoio ou fotogramétricos na região. O Quadro 13 mostra a imagem hipsométrica do MDS da Área 2 obtido por varredura a LASER. Nota-se que a imagem dos MDSs obtidos nos experimentos A e B (Quadros 10 e 11) estão semelhantes às imagens do Quadro 13.

Quadro 13: Nuvem de pontos LASER da Área 2.



A Tabela 11 apresenta a quantidade de pontos estimados após a etapa de correspondência do nível de maior resolução da pirâmide em cada experimento e a quantidade de pontos da nuvem LASER utilizada para comparação. A Tabela 12 mostra a média, o desvio-padrão e a REMQ obtidos da subtração entre os dados LASER e os MDSs gerados pelo método proposto.

Tabela 11: Quantidade de pontos obtidos no processo de correspondência de imagens no último nível da pirâmide e por varredura a LASER.

Técnica	Quantidade de pontos
Experimento A	48949
Experimento B	33512
Experimento C	20994
LASER	20037

Tabela 12: Média, desvio-padrão e a REMQ entre o MDS LASER e os MDSs gerados.

	A		B		C	
	<i>Sem interp.</i>	<i>Interp.</i>	<i>Sem interp.</i>	<i>Interp.</i>	<i>Sem interp.</i>	<i>Interp.</i>
Média(m)	0,249	0,109	0,575	0,154	-0,070	-0,791
σ (m)	2,343	2,392	1,855	2,546	2,321	2,835
REMQ(m)	2,356	2,395	1,942	2,551	2,322	2,943

A Tabela 11 mostra que em todos os experimentos com as imagens ópticas foram obtidos mais pontos com relação a nuvem de pontos LASER, até mesmo no experimento C, onde a área não é completamente coberta pelas imagens da faixa utilizada. Verifica-se pela Tabela 12 que o experimento A apresenta médias das discrepâncias de 0,25 m e 0,11 m, respectivamente antes e depois da interpolação, mas um desvio-padrão de 2,4m para os dois casos e em todos os experimentos as REMQs estão acima de 2m. A Figura 38 mostra os gráficos com a porcentagem das diferenças para sete intervalos de discrepância.

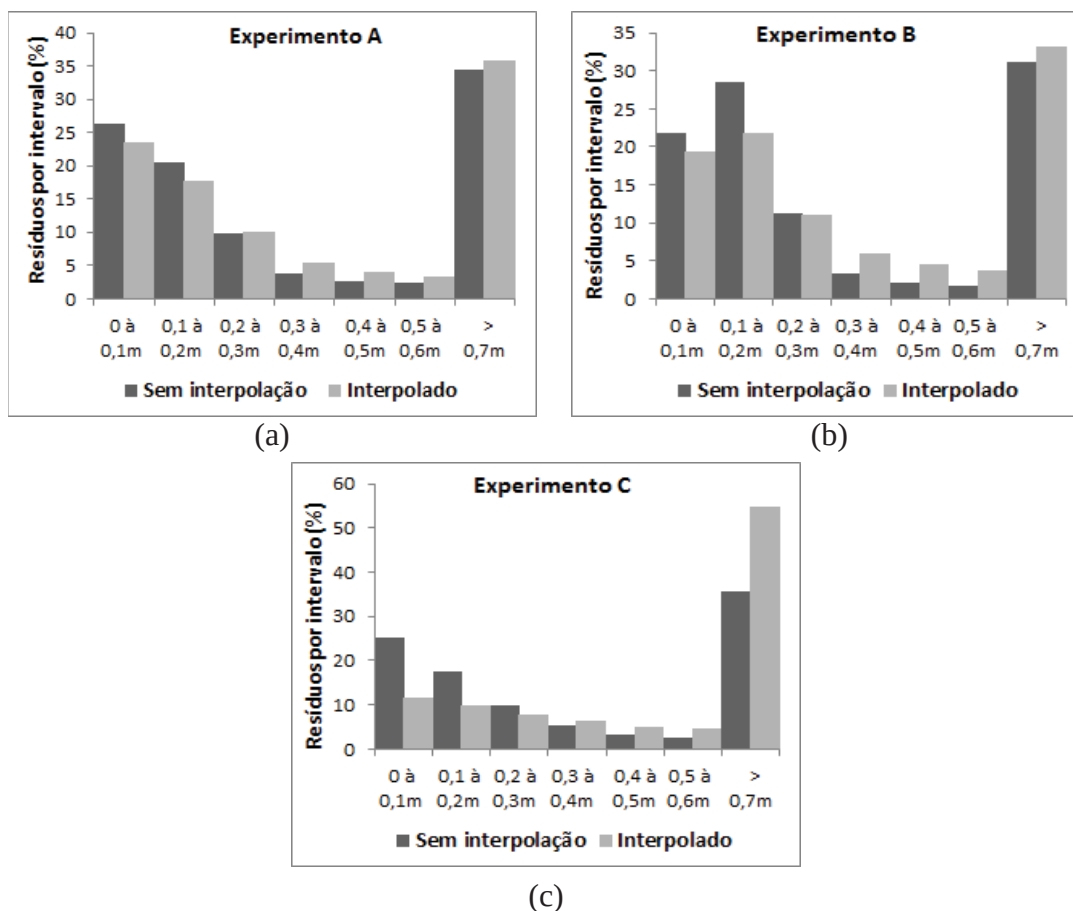


Figura 38: Gráficos da porcentagem das discrepâncias por intervalos.

Os gráficos (a) e (b) da Figura 38 mostram que mais de 40% das diferenças calculadas nos experimentos A e B foram menores que 0,20 m e mais de 50% foram menores que 0,30 m nos três experimentos. Assim como no Experimento 1, a porcentagem de pontos com diferenças que superam 0,70 m é maior que 30%. Os valores mais altos para as REMQs estão relacionados principalmente aos pontos em árvores e em muros das casas como mostra a imagem hipsométrica das diferenças na Figura 39.

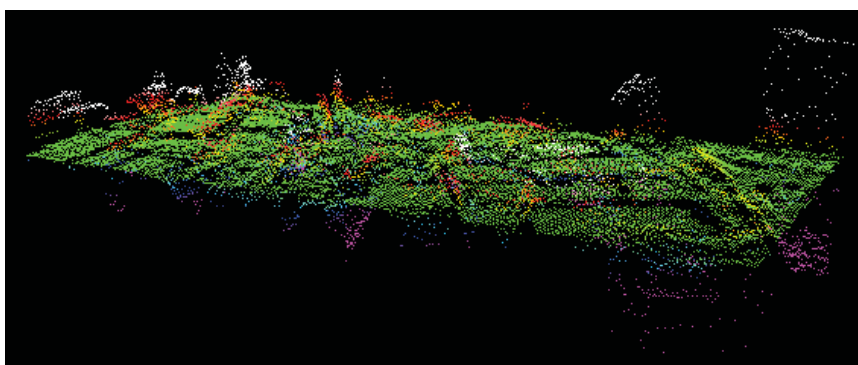


Figura 39: Imagem hipsométrica da diferença entre o MDS gerado no experimento A e os dados LASER.

4.4.3. Experimento 3

A área utilizada no experimento 3 (Quadro 14) possui vegetação rasteira, que representa uma área homogênea, algumas árvores com copas pequenas e áreas pavimentadas. Os experimentos realizados estão descritos no Quadro 15 e os parâmetros de entrada para geração do MDS apresentados na Tabela 13.

Quadro 14: Descrição e apresentação da área utilizada no Experimento 3.

	Localização	Gramado em frente ao Departamento de Cartografia FCT-Unesp
	Área	35x45m
	Característica	Vegetação rasteira (áreas homogêneas), árvores pequenas, áreas pavimentadas, sombras.
	Número de imagens	6

Quadro 15: Descrição dos experimentos na Área 3.

<i>Experimento</i>	<i>Descrição</i>
A	MDS gerado com 6 imagens.
B	MDS gerado apenas com imagens da Faixa 1 (3 imagens).
C	MDS gerado apenas com imagens da Faixa 2 (3 imagens).
D	MDS gerado apenas com um par de imagens.

Tabela 13: Configuração dos parâmetros para correlação de imagens.

Níveis	Tamanho da janela (pixel)	Coefic. de Correlação Mínimo	ΔZ_{max} (m)	ΔZ_{min} (m)	dZ (m)	Raio de busca (m)
1	35	0,85	15	5	0,60	10
2	25	0,85	7	4	0,30	10
3	15	0,85	3	2	0,15	10
4	11	0,85	1	1	0,07	10

Os Quadros 16, 17, 18 e 19 apresentam as imagens hipsométricas dos MDSs, sem interpolação e interpolados, obtidos nos experimentos A, B e C, respectivamente. As Figuras 40, 41, 42 e 43 (a), (b), (c) e (d) mostram imagens em tons de cinza que representam os MDSs

gerados em cada nível da pirâmide de imagens e as Figuras 40, 41, 42 e 43 (e) representam os MDSs interpolados a partir dos pontos obtidos no nível de maior resolução da pirâmide.

✓ *Experimento A:*

Quadro 16: Imagem hipsométrica do MDS gerado no experimento A. (a) sem interpolação e (b) interpolado.

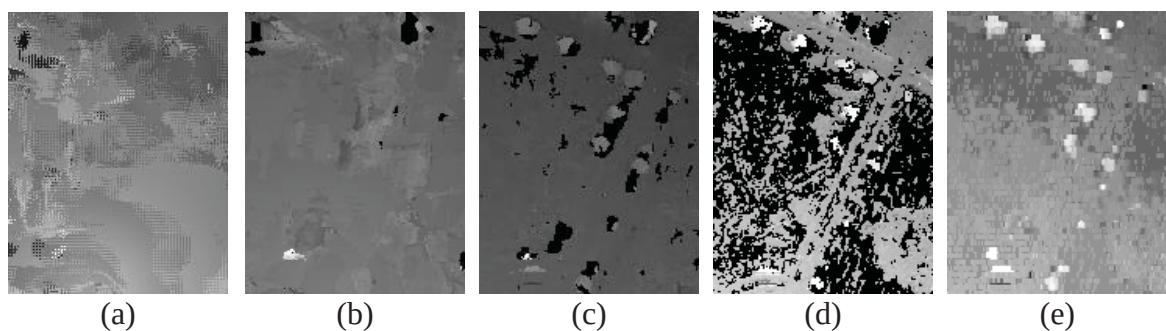
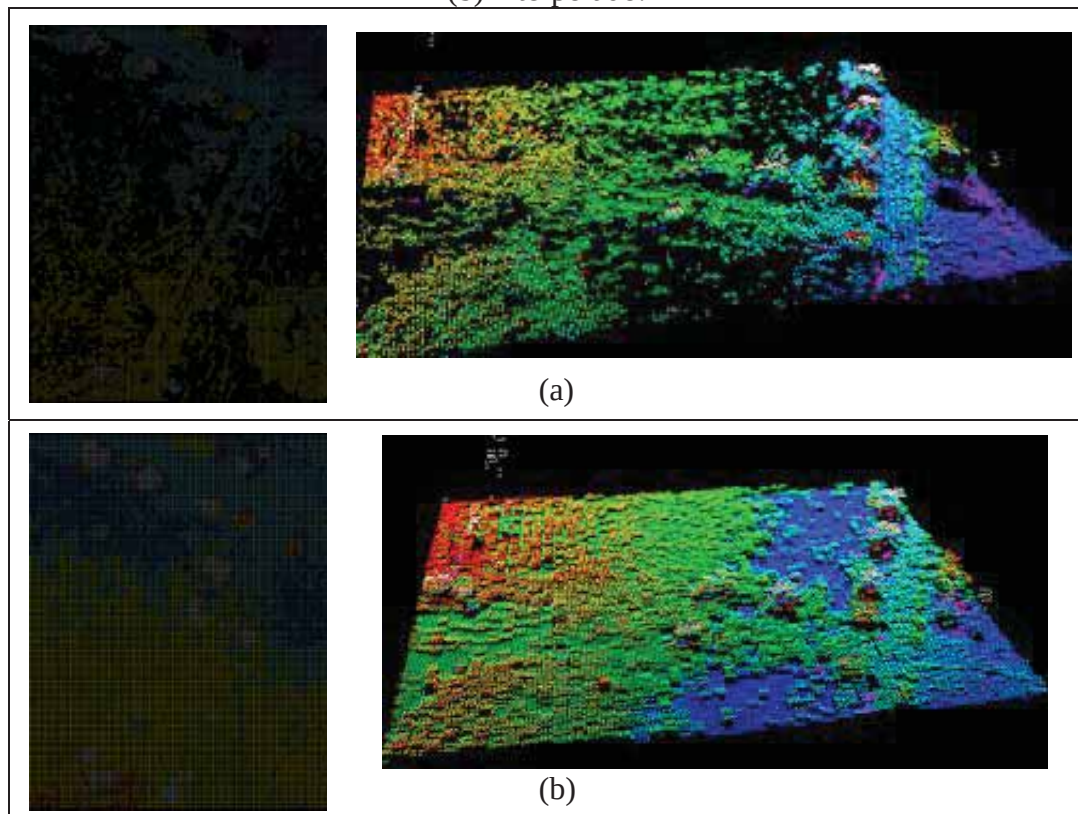


Figura 40: (a, b, c e d) imagens dos pontos obtidos a cada nível da pirâmide; (e) pontos obtidos após interpolação no último nível, para o caso A.

✓ *Experimento B:*

Quadro 17: Imagem hipsométrica do MDS gerado no experimento B. (a) sem interpolação e (b) interpolado.

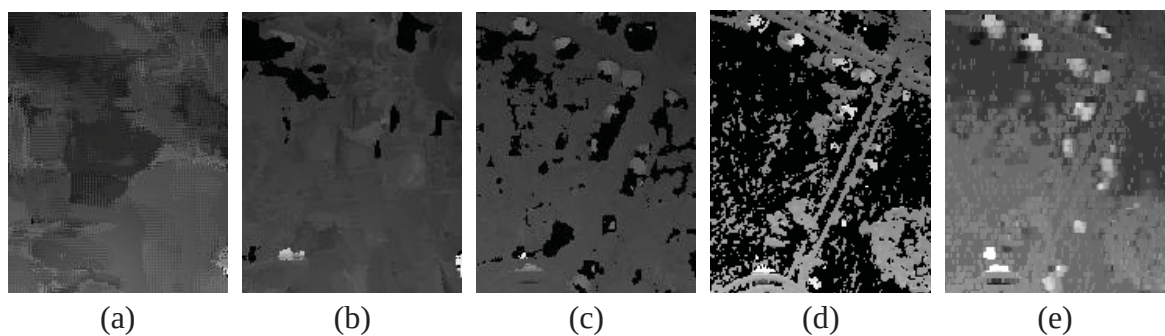
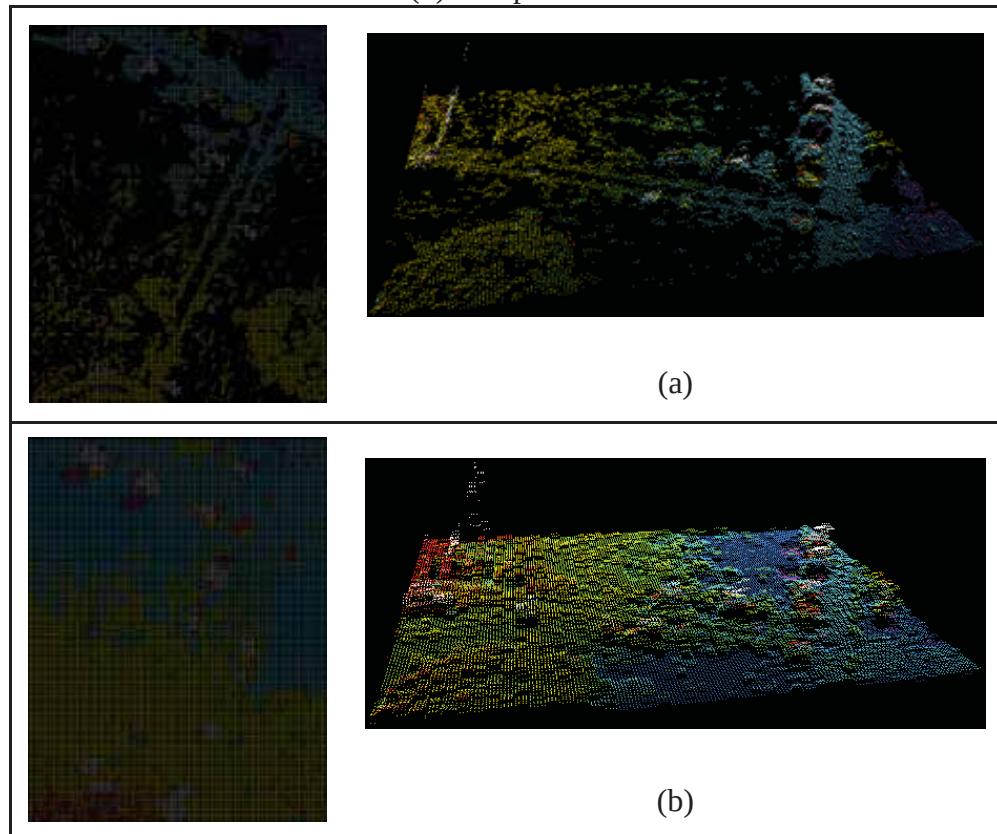


Figura 41: (a, b, c e d) imagens dos pontos obtidos a cada nível da pirâmide; (e) pontos obtidos após interpolação no último nível, para o caso B.

✓ *Experimento C:*

Quadro 18: Imagem hipsométrica do MDS gerado no experimento C. (a) sem interpolação e (b) interpolado

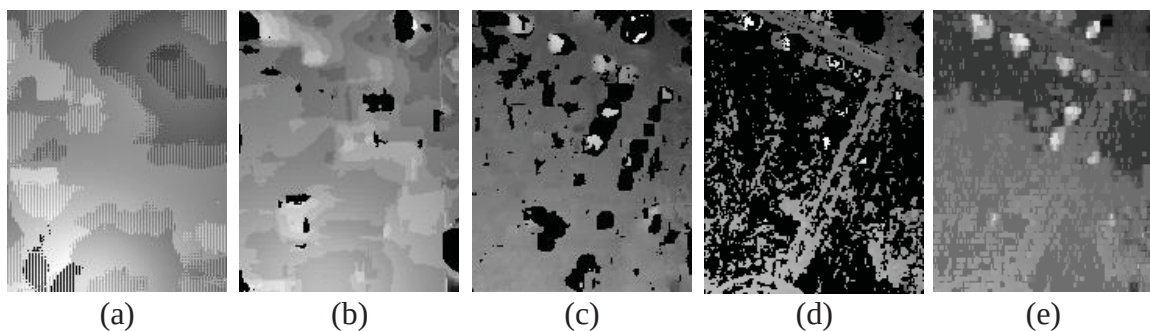
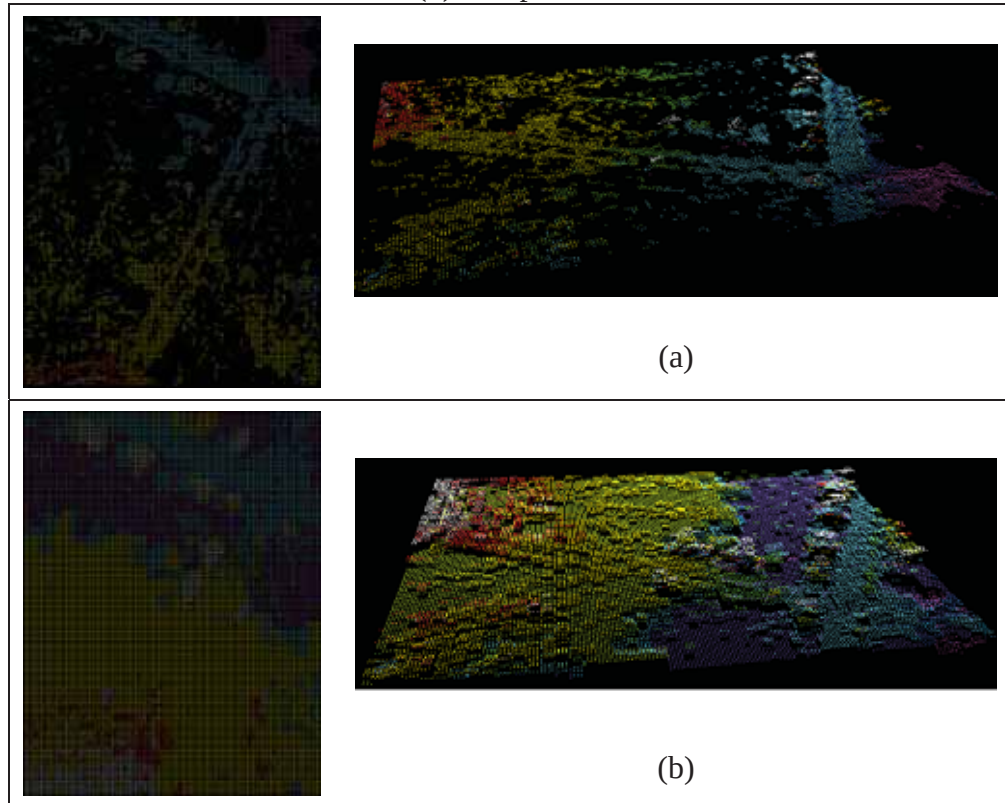


Figura 42: (a, b, c e d) imagens dos pontos obtidos a cada nível da pirâmide; (e) pontos obtidos após interpolação no último nível, para o caso C.

✓ *Experimento D:*

Quadro 19: Imagem hipsométrica do MDS gerado no experimento D. (a) sem interpolação e (b) interpolado.

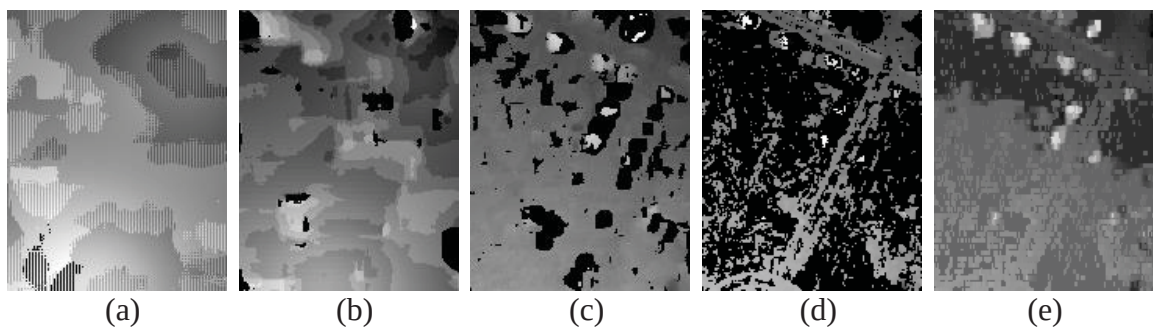
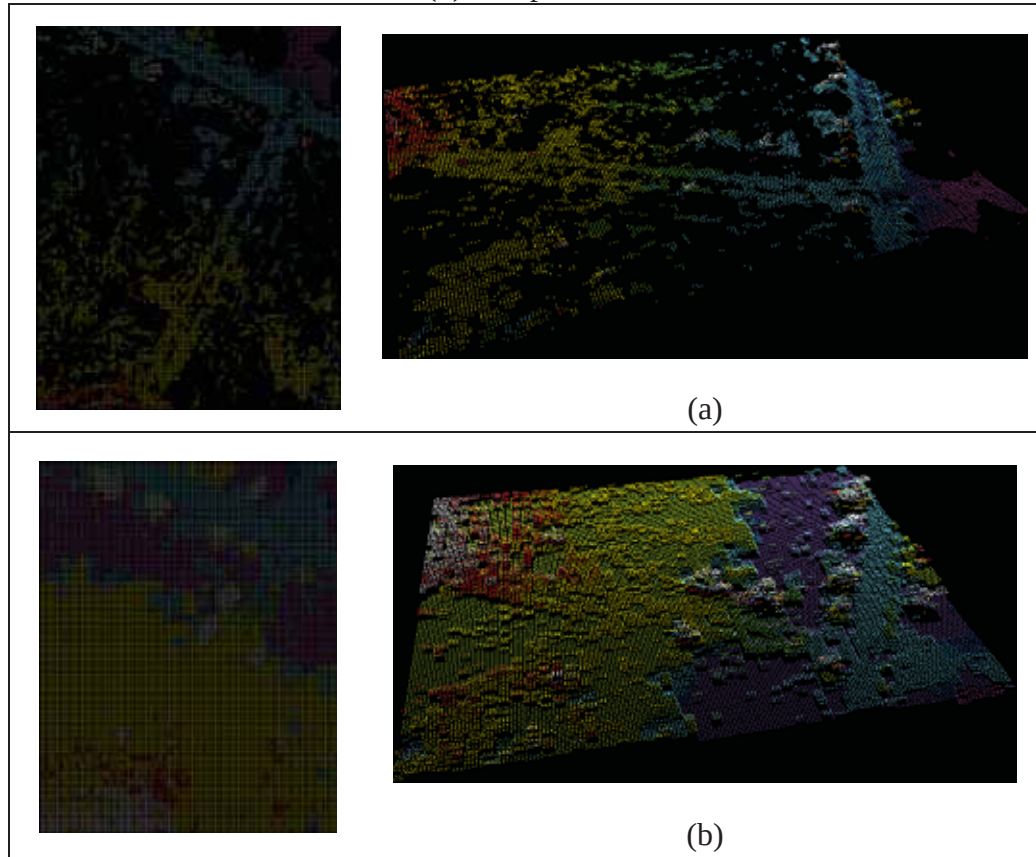


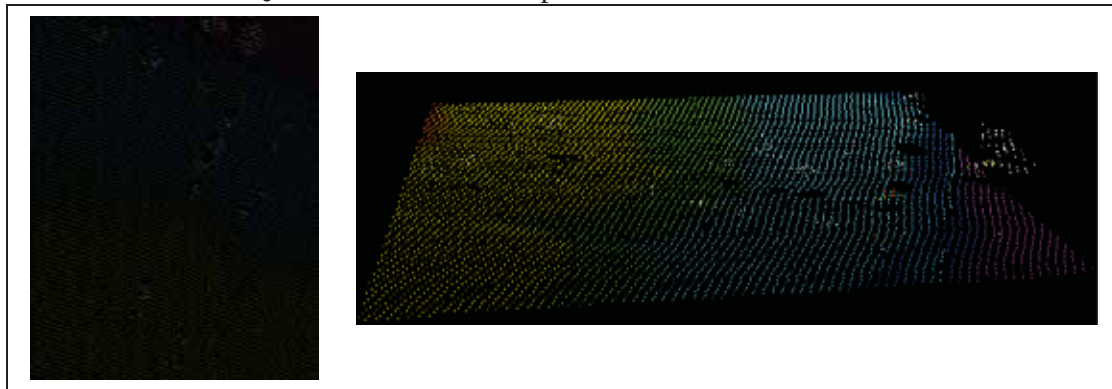
Figura 43: (a, b, c e d) imagens dos pontos obtidos a cada nível da pirâmide; (e) pontos obtidos após interpolação no último nível, para o caso D.

Visualmente as imagens dos MDSs resultantes dos experimentos mostraram que muitos pontos nos locais de vegetação rasteira não foram determinados, o que ocorre em virtude da dificuldade da correspondência de imagens em áreas homogêneas. Na área pavimentada do estacionamento foram determinados vários pontos, o que não ocorreu na área

pavimentada sobre o gramado. A principal causa para este fato está na presença de detalhes no estacionamento, como faixas pintadas, tonando a área mais heterogênea.

Neste experimento, assim como nos experimentos 2, a análise de qualidade foi realizada apenas com os dados LASER, por não haver pontos de apoio ou fotogramétricos na região. O Quadro 20 mostra a imagem hipsométrica do MDS correspondente à Área 3, obtido por varredura a LASER.

Quadro 20: Nuvem de pontos LASER da Área 3.



A quantidade de pontos obtidas no processo de correspondência em cada experimento e a quantidade de pontos da nuvem LASER correspondente são apresentadas na Tabela 14. Nota-se que, assim como nos experimentos 1 e 2, a quantidade de pontos LASER é menor.

Tabela 14: Quantidade de pontos obtidos no processo de correspondência de imagens no último nível da pirâmide e por varredura a LASER.

Técnica	Quantidade de pontos
Experimento A	13117
Experimento B	9982
Experimento C	8891
Experimento D	8619
LASER	7373

A média, o desvio-padrão e a REMQ das discrepâncias entre os dados LASER e os MDSs gerados pelo método proposto são apresentados na Tabela 15.

Tabela 15: Média, desvio-padrão e a REMQ entre o MDS LASER e os MDSs gerados.

	A		B		C		D	
	<i>Sem interp.</i>	<i>Interp.</i>	<i>Sem interp.</i>	<i>Interp.</i>	<i>Sem interp.</i>	<i>Interp.</i>	<i>Sem interp.</i>	<i>Interp.</i>
Média(m)	0,167	-0,031	0,132	-0,123	0,232	-0,063	0,246	-0,056
σ (m)	0,622	0,691	0,640	0,713	0,481	0,598	0,479	0,590
REMQ(m)	0,644	0,692	0,653	0,724	0,534	0,601	0,538	0,592

Na Tabela 15 verifica-se que os experimentos obtiveram um REMQ acima de 53 cm, que é melhor do que os resultados obtidos nos primeiros experimentos. Isto ocorre porque a Área 3 é uma área com poucos elementos afastados do solo, diferente das situações presentes nas Áreas 1 e 2. Este fato influenciou na redução das médias das diferenças após a interpolação dos pontos.

A Figura 44 mostra os gráficos com o histograma de discrepâncias para sete intervalos.

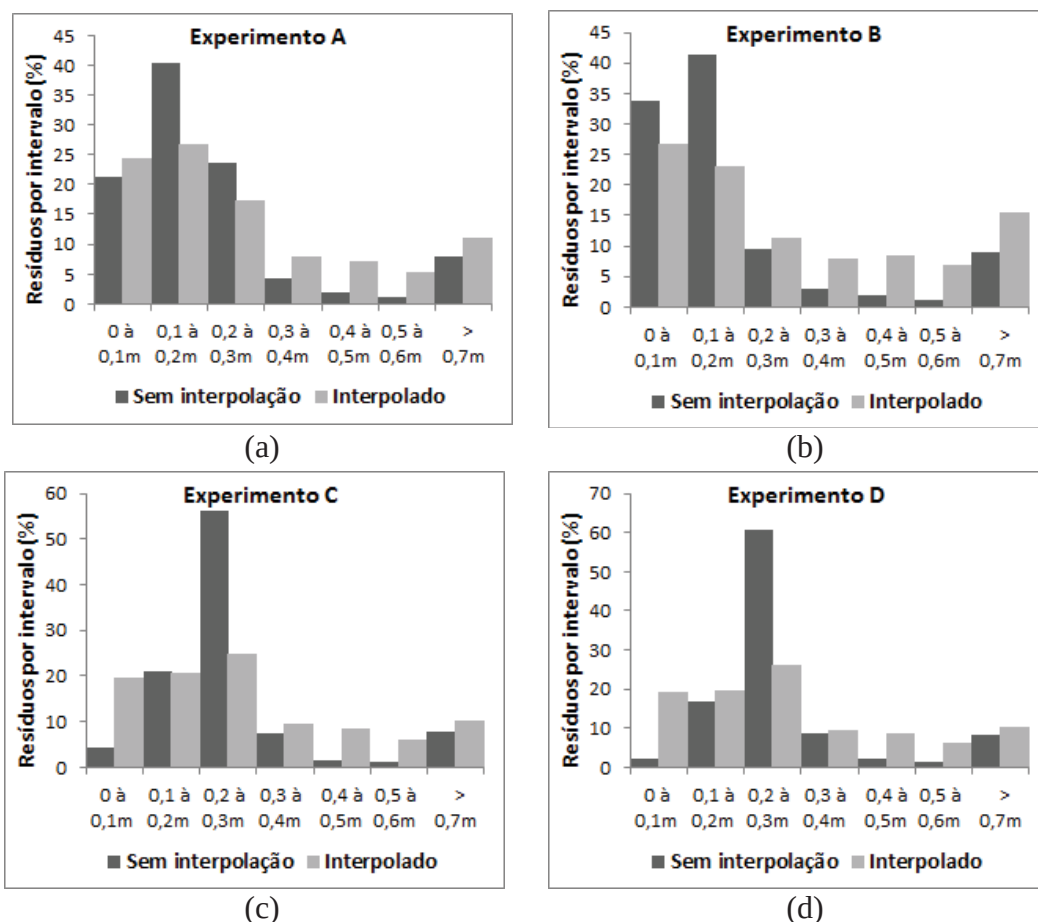


Figura 44: Histograma de frequência das discrepâncias dos experimentos.

No experimento A (Figura 44 (a)) 61% das discrepâncias absolutas foram de até 0,20 m, antes da interpolação e após a interpolação esta taxa foi reduzida para 51% dos pontos nesse intervalo. Para o experimento B (Figura 44 (b)), 75% das discrepâncias foram de até 0,20m, antes da interpolação e 49,8% após a interpolação. Nos experimentos C e D, as diferenças ficaram concentradas principalmente no intervalo entre 0,20m à 0,30 m. Ao contrário dos experimentos 1 e 2, as diferenças maiores que 0,50m estão entre 9% e 10%. Isto porque a área utilizada neste experimento é plana e possui poucos elementos acima do solo. Além disso, como verificado anteriormente, as maiores discrepâncias entre os dados LASER ocorreram entre pontos que representam elementos acima do solo, neste caso pequenas árvores. A Figura 45 mostra que as maiores diferenças estão nas áreas com pequenas árvores e arbustos próximos ao estacionamento.

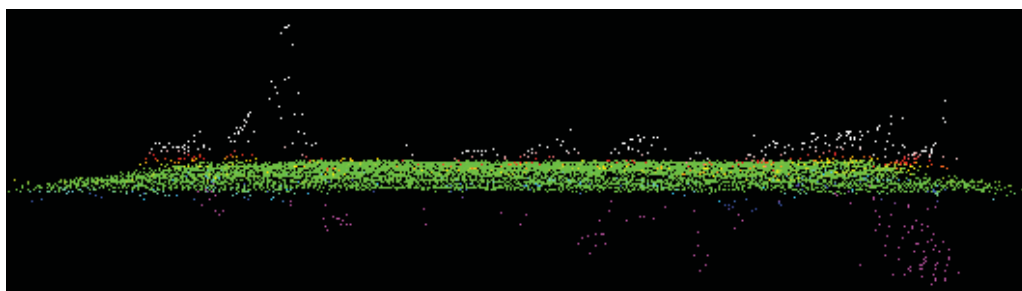


Figura 45: Imagem hipsométrica da diferença entre o MDS gerado no experimento A e os dados LASER.

Vale ressaltar, que apesar de não apresentar muitos elementos que favoreçam o aumento das diferenças, esta região representa uma área homogênea que, por si só, dificulta a etapa de correspondência entre imagens. Contudo, foi possível estimar uma alta densidade de pontos, que possibilitaram, até mesmo, inferir a delimitação de elementos como as calçadas no gramado.

4.4.4. Experimento 4

A área utilizada no Experimento 4 apresenta um edifício residencial localizado próximo à FCT-UNESP, que possui aproximadamente 60m de altura. Neste caso estão presentes áreas de oclusões e sombras. A imagem e descrição da Área 4 podem ser observadas no Quadro 21.

Quadro 21: Descrição e apresentação da área utilizada no Experimento 4.

	Localização	Edifício Residencial San Marcos próximo a FCT-Unesp
	Área	55x50m
	Característica	Edifício com altura aproximada de 60m, com oclusões e sombras.
	Número de imagens	3 (1 imagem na Faixa 1 e 2 imagens na Faixa 2)

O Quadro 22 descreve a configuração de imagens utilizadas nos quatro experimentos realizados para a Área 4. A Figura 46 mostra as imagens que representam a Área 4, sendo possível observar em (a), (b) e (c) as áreas de oclusões causadas pela diferença entre os pontos de vista no momento da tomada das imagens e pelos objetos presentes na cena.

Quadro 22: Descrição dos experimentos na Área 4.

<i>Experimento</i>	<i>Descrição</i>
A	MDS gerado com 3 imagens.
B	MDS gerado apenas com imagens da Faixa 2 (2 imagens).



(a)



(b)



(c)

Figura 46: Imagens que compreendem à Área 4; (a) Imagem da Faixa 1; (b) Imagem da Faixa 2; (c) Imagem da Faixa 2

Os parâmetros de entrada para geração do MDS apresentados na Tabela 16.

Tabela 16: Configuração dos parâmetros para correlação de imagens.

Níveis	Tamanho da janela (pixel)	Coefic. de Correlação Mínimo	ΔZ_{max} (m)	ΔZ_{min} (m)	dZ (m)	Raio de busca (m)
1	35	0,85	65	6	0,60	10
2	25	0,85	15	6	0,30	10
3	15	0,85	4	3	0,15	10
4	11	0,85	1	1	0,07	10

Os resultados dos experimentos A e B são apresentados nos Quadros 23 e 24 respectivamente. Os quadros mostram as figuras hipsométricas dos pontos obtidos no nível de maior resolução da pirâmide de imagens e dos MDSs resultantes após a interpolação dos pontos que não apresentaram correlação aceitável.

As Figuras 47(a) e (b) e 48 (a) e (b) apresentam as imagens em tons de cinza que representam o desenvolvimento dos MDSs gerados no nível de menor resolução até o nível de maior resolução da pirâmide de imagens. A Figura 47 (e) e a Figura 48 (e) representam os MDSs interpolados a partir dos pontos obtidos no último nível da pirâmide.

✓ Experimento A:

Quadro 23: Imagem hipsométrica do MDS gerado no experimento A. (a) sem interpolação e (b) interpolado.

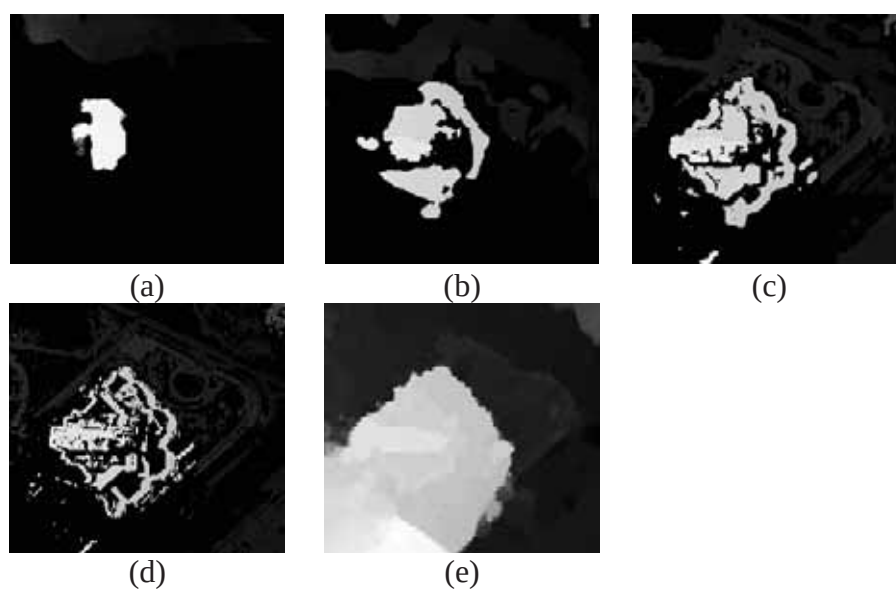
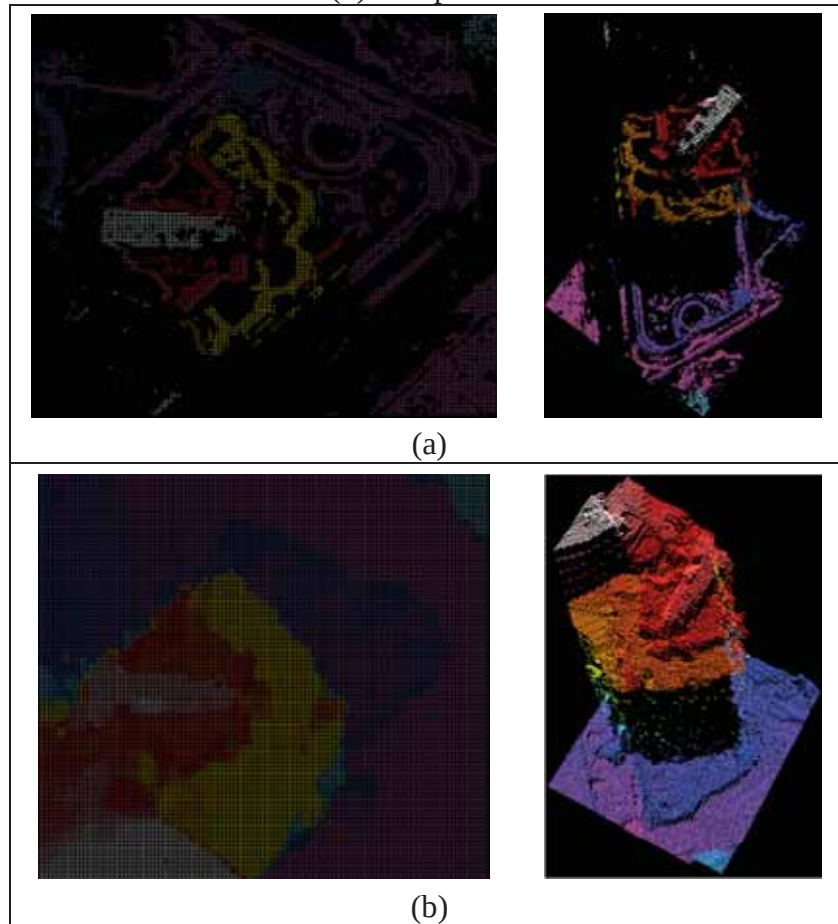


Figura 47: (a, b, c e d) imagens dos pontos obtidos a cada nível da pirâmide; (e) pontos obtidos após interpolação no último nível, para o caso A.

✓ Experimento B:

Quadro 24: Imagem hipsométrica do MDS gerado no experimento B. (a) sem interpolação e (b) interpolado.

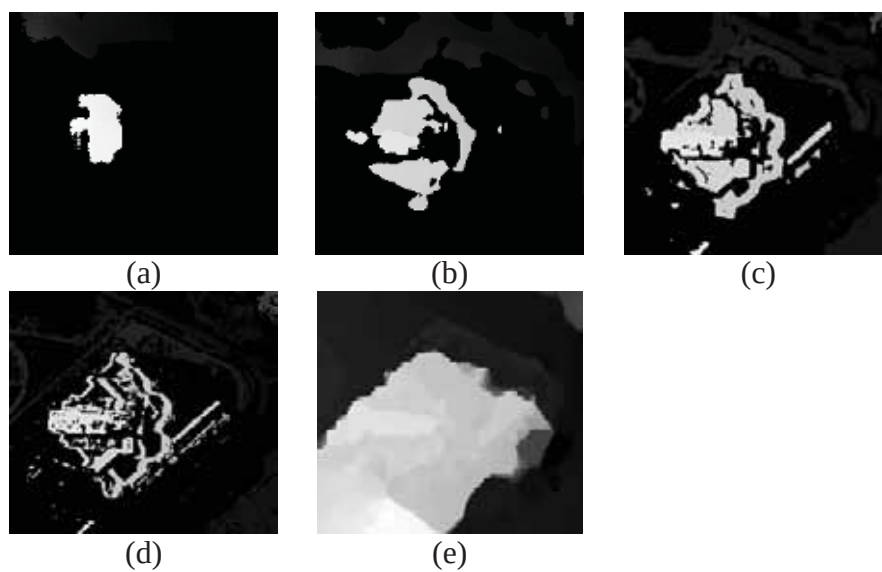
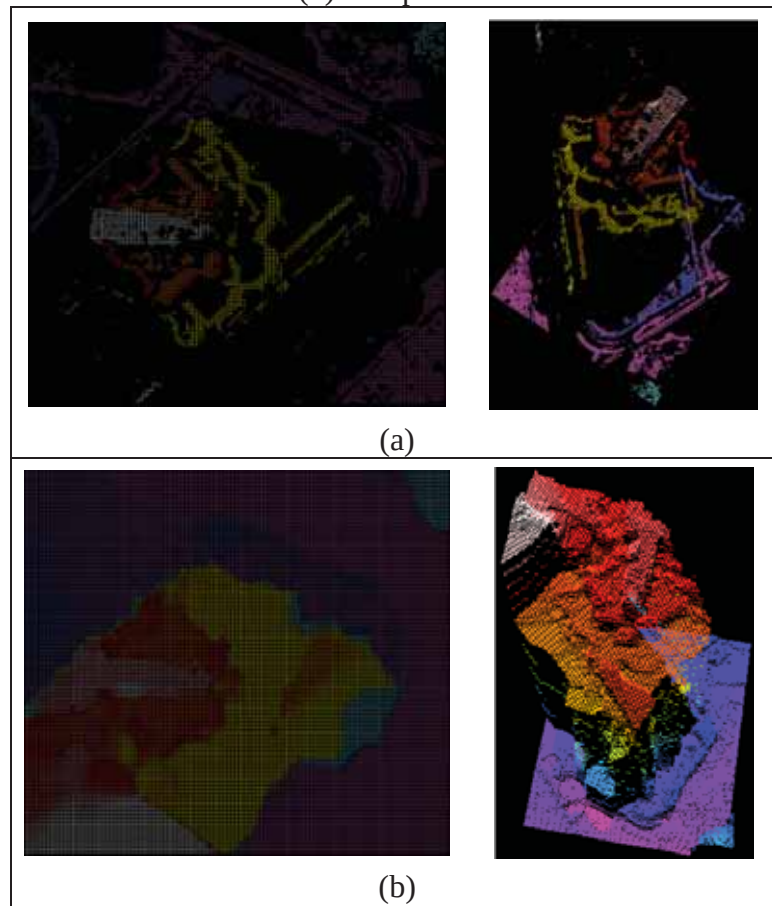


Figura 48: (a, b, c e d) imagens dos pontos obtidos a cada nível da pirâmide; (e) pontos obtidos após interpolação no último nível, para o caso B.

Para a análise da qualidade, foram utilizados três pontos de verificação (1 ponto de apoio e 2 pontos fotogramétricos) presentes nesta área. A Tabela 17 mostra as diferenças entre esses pontos e os pontos correspondentes interpolados no MDSs sem interpolação e após a interpolação.

Tabela 17: Diferença entre pontos de verificação e pontos dos MDSs.

Ref.	A		B	
<i>h(m)</i>	<i>Sem interp.</i>	<i>Interp.</i>	<i>Sem interp.</i>	<i>Interp.</i>
428,673	1,854	0,775	0,354	0,0835
484,988	-0,0414	-0,0195	-0,041	-0,0196
423,592	-0,194	-0,132	-0,153	-0,153
<i>Média(m)</i>	0,54	0,208	0,0531	-0,0298
<i>REMQ(m)</i>	1,08	0,454	0,224	0,102

Na Tabela 17, observa-se que a REMQ para o experimento A foi maior que 1m e foi de 0,22m para o experimento B, antes da interpolação. Após a interpolação os dois valores foram reduzidos para a metade. Além disso, foi realizada a comparação com dados de varredura a LASER (Quadro 25) e os resultados (média, desvio-padrão e REMQ) podem ser vistos na Tabela 19. A Tabela 18 mostra a quantidade de pontos obtidos no processo de correspondência de imagens nos experimentos A e B e a quantidade de pontos obtida por varredura a LASER. A área de oclusão dos dados LASER, que pode ser vista no Quadro 25 não foi considerada no cálculo das diferenças com os MDS_{VLL}.

Quadro 25: Nuvem de pontos LASER da Área 4.

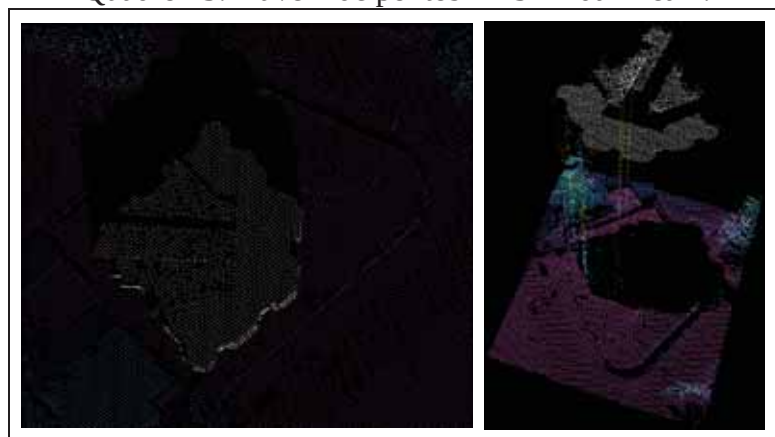


Tabela 18: Quantidade de pontos obtidos no processo de correspondência de imagens no último nível da pirâmide e por varredura a LASER.

Técnica	Quantidade de pontos
Experimento A	13465
Experimento B	11051
LASER	12007

Tabela 19: Média, desvio-padrão e a REMQ entre os dados LASER e os MDSs gerados.

	A		B	
	<i>Sem interp.</i>	<i>Interp.</i>	<i>Sem interp.</i>	<i>Interp.</i>
Média(m)	11,000	12,243	14,063	15,129
σ (m)	20,648	22,345	21,513	23,453
REMQ(m)	23,394	25,478	25,701	27,908

Na Tabela 19 verifica-se que os experimentos A e B obtiveram médias altas, de 11m à 15m, e REMQ maior do que 23m. Para verificar o comportamento das diferenças entre o LASER e os MDSs obtidos foram gerados os histogramas de frequência das discrepâncias contendo a porcentagem dos valores absolutos das diferenças de cada experimento divididos em sete intervalos (Figura 49).

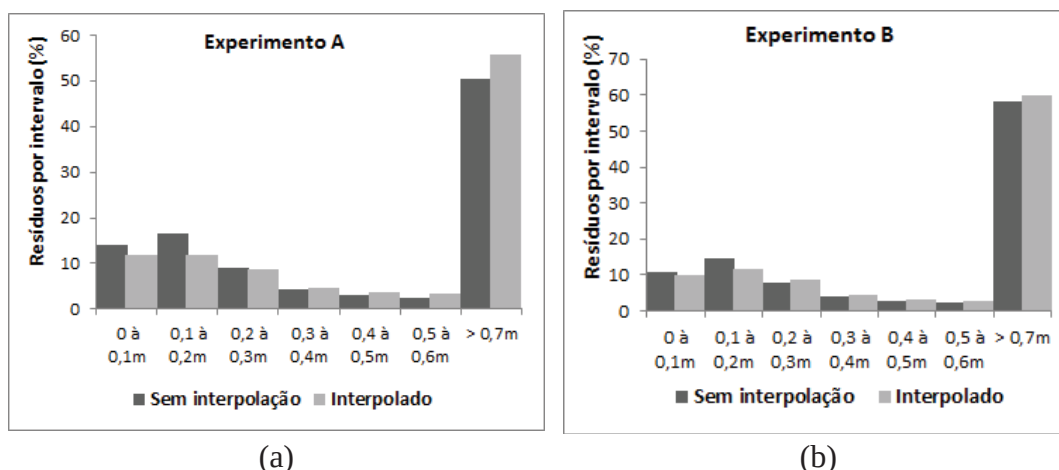


Figura 49: Histograma de frequência das discrepâncias dos experimentos.

Os gráficos da Figura 49 mostram que no experimento A, antes do processo de interpolação dos pontos, 53% dos pontos estão com diferenças, em relação ao LASER, acima

de 0,50 m e 30% estão abaixo de 0,20 m. No experimento B, esses resultados foram de 62,7% para as discrepâncias maiores que 0,50m e 21,4% para as discrepâncias abaixo de 0,20 m. Estes resultados são causados principalmente pelas falsas correlações no topo do edifício e, também, pelo fato de que a superfície de referência (LASER) possui pontos ao longo dos andares que ao serem interpolados no MDS de comparação, podem ter sido utilizados pontos no chão e pontos no topo do edifício, gerando grandes diferenças. Além disso, a presença de áreas de oclusões afeta a qualidade do processo de correspondência de imagens e possivelmente melhores resultados poderiam ser obtidos com a utilização de mais imagens desta área. A imagem hipsométrica das diferenças entre o MDS do experimento A e os dados LASER (Figura 50) mostra que as maiores discrepâncias ocorreram principalmente na casa ao lado do prédio, que não foi estimada corretamente em nenhum experimento. Ao observar as Figuras 47 e 48, que apresentam o desenvolvimento dos MDSs a cada nível da pirâmide, verifica-se que nesta área não foram determinados pontos por correspondência, por isso, foram estimados por interpolação para gerar a nuvem de entrada para o nível seguinte da pirâmide. Assim, o erro foi propagado até alcançar o MDS final (ver Quadro 23 e 24), uma vez que a linha de busca na vertical diminui a cada nível da pirâmide.

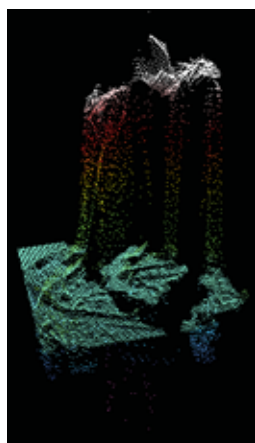


Figura 50: Imagem hipsométrica da diferença entre o MDS gerado no experimento A e os dados LASER.

4.5. Comparação entre o MDS gerado no *software* LPS e os dados LASER

Para a comparação com dados gerados utilizando um software comercial que se baseia na metodologia de correspondência de imagens ópticas, foi gerado um MDS no *software* LPS correspondente à área de estudo. Na geração do MDS foi utilizado o módulo do LPS *Classic ATE* considerando o coeficiente de correlação mínimo igual a 0,85. Este módulo utiliza a

busca por linha epipolares como redução para o espaço de busca e a correspondência é realizada aos pares, gerando um MDS para cada par disponível. Para realizar as comparações envolvendo os dados utilizados neste trabalho, foram selecionados os MDSs obtidos das imagens que abrangem completamente as regiões de interesse. A Figura 51 mostra as imagens hipsométricas dos MDSs selecionados para cada área.

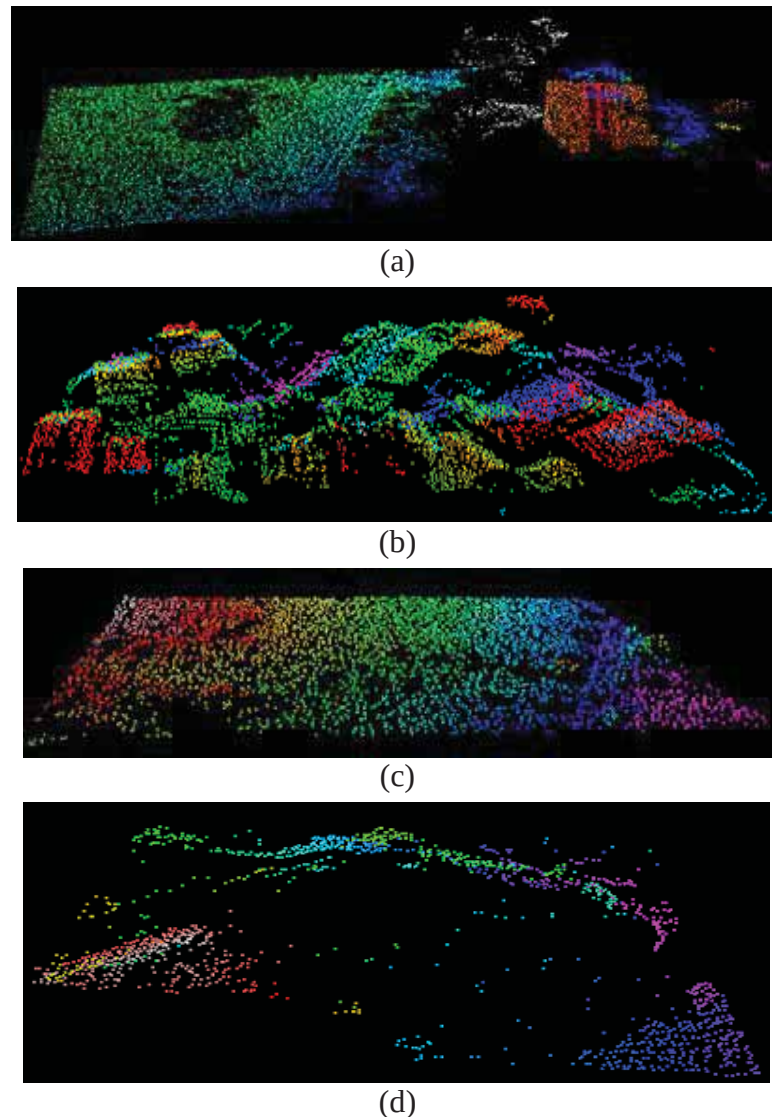


Figura 51: Imagens hipsométricas do MDS gerado pelo software LPS para (a) Área 1; (a) Área 1; (b) Área 2; (c) Área 3 e (d) Área 4.

Nota-se pela análise visual dos MDSs obtidos do LPS, que assim como nos resultados apresentados na Seção 4.4.1 as áreas com árvores apresentam poucos pontos com correspondência (Figura 51 (a)) e a densidade de pontos é inferior à densidade obtida nos

experimentos utilizando múltiplas imagens simultaneamente. A Figura 51 (d) mostra que, com a estratégia utilizada no LPS, não foi possível estimar a altitude dos pontos no topo do prédio. Foi realizada a comparação entre os dados do LPS e os pontos de apoio e fotogramétricos presentes na Área 1 e Área 4 e com os dados de varredura a LASER. A média, desvio-padrão e REMQ das diferenças entre os MDSs do LPS e os MDSs dos dados LASER e a diferença entre os pontos de verificação são apresentados na Tabela 20.

Tabela 20: Média, desvio-padrão e REMQ das diferenças entre o MDS gerado pelo LPS e o MDS LASER e entre o MDS do LPS e os pontos de verificação.

	MDS LPS e MDS LASER				MDS LPS e Pontos de verificação	
	<i>ÁREA 1</i>	<i>ÁREA 2</i>	<i>ÁREA 3</i>	<i>ÁREA 4</i>	<i>ÁREA 1</i>	<i>ÁREA 4</i>
Média(m)	-0,0205	0,817	0,268	-7,265	0,101	-19,747
σ (m)	2,849	2,26	0,51	17,477	0,238	32,248
REMQ(m)	2,849	2,403	0,576	18,926	0,238	32,912

Os histogramas de frequência apresentados na Figura 52 para cada área mostram a porcentagem dos valores absolutos das diferenças divididas em sete intervalos. Observa-se que para as áreas 1 e 3 as discrepâncias entre o LPS e LASER estão concentradas principalmente no intervalo de 0,30m à 0,40 m (40% para área 1 e 70% para a área 3); para a área 2, 40% das diferenças estão entre 0,20 m e 0,40 m; e como esperado as maiores diferenças foram obtidas para a área 4. Comparando estes histogramas (Figura 52), aos histogramas correspondentes de cada área nas Seções 4.4.1, 4.4.2, 4.4.3 e 4.4.4, verifica-se que as diferenças calculadas nos experimentos utilizando apenas pares de imagens na aplicação implementada neste trabalho, apresentaram frequências semelhantes às obtidas entre a os MDSs do LPS e os dados LASER, porém as diferenças obtidas ao utilizar mais do que duas imagens foram menores do que as diferenças apresentadas pelo LPS para todas as áreas.

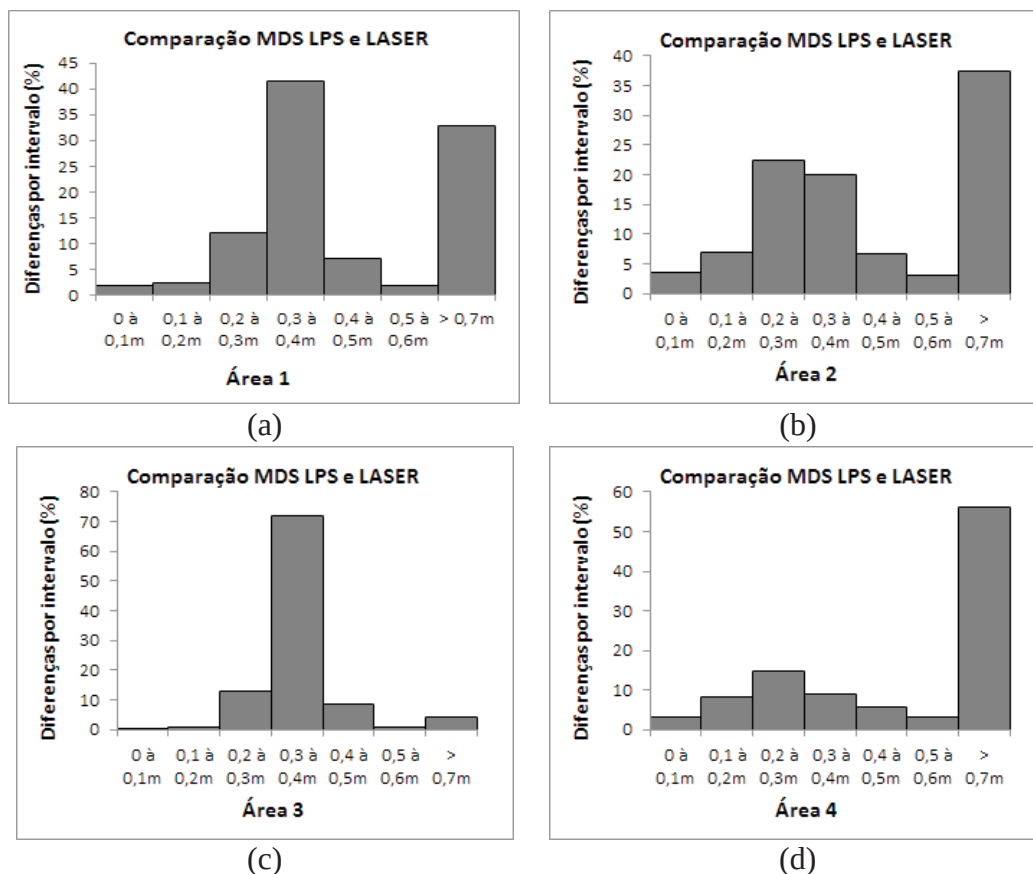


Figura 52: Histogramas de frequência das diferenças entre o MDS do software LPS e o MDS LASER. (a) Área 1; (a) Área 1; (b) Área 2; (c) Área 3 e (d) Área 4.

4.6. Experimentos utilizando a correspondência entre subjanelas

Nesta seção são apresentados os resultados obtidos utilizando o método de correspondência descrito na Seção 3.2.4.1.

Para os experimentos foram consideradas as quatro áreas de estudo e foram utilizados os MDSs dos Experimentos 1-A, 2-A, 3-A e 4-A da Seção 4.3 obtidos no penúltimo nível da pirâmide, como dados de entrada para a aplicação da correspondência entre subjanelas apenas no último nível da pirâmide de imagens.

Na Tabela 21 verifica-se a configuração dos quatros experimentos realizados para cada área de estudo. Para analisar o método de correspondência proposto, utilizando apenas o cálculo e a soma das diferenças, foi considerada no experimento 1 uma diferença de níveis digitais máxima aceitável entre cada pixel, pequena (igual a 0,25), desta forma, considerando o tamanho da janela igual a 11 pixels por 11 pixels, a diferença máxima de ND total aceitável para a subjanela é igual a $(6 \text{ pixels} \times 6 \text{ pixels} \times 0,25 \text{ ND}) = 9 \text{ ND}$. O desvio-padrão máximo

permitido para as diferenças foi igual a 3; e o coeficiente de correlação mínimo igual a 0,1, ou seja, 10%. No caso 2, o coeficiente de correlação mínimo foi de 0,85, o mesmo utilizado nos experimentos da Seção 4.4, e a diferença média de ND foi de 0,5 com desvio-padrão igual a 3. Para o experimento 3, os limiares utilizados no experimento 2 foram reduzidos para 0,8 (coeficiente de correlação) e 1 (máxima diferença de ND). No experimento 4, foi considerado o coeficiente de correlação mínimo aceitável igual a 0,9, e valores de diferença de ND e desvio-padrão máximos iguais a 500 e 200, respectivamente, para possibilitar a análise do comportamento da correspondência levando em consideração apenas o limiar estabelecido pelo coeficiente de correlação mínimo.

Tabela 21: Configuração dos experimentos realizados com a correspondência entre subjanelas.

<i>Experimento</i>	<i>Tamanho da janela</i>	<i>dZ (m)</i>	<i>ΔZ_{max} (m)</i>	<i>ΔZ_{min} (m)</i>	<i>C. de Correlação Mínimo</i>	<i>Diferença máxima de ND entre pixels</i>	<i>σ</i>
1	11	0,07	1	1	0,1	0,25	3
2	11	0,07	1	1	0,85	0,25	3
3	11	0,07	1	1	0,8	1	5
4	11	0,07	1	1	0,9	500	200

As Figuras 53, 55, 57 e 59 mostram a imagem hipsométrica dos MDSs obtidos para a Área 1, 2, 3 e 4, respectivamente, após a correspondência entre subjanelas para cada experimento da Tabela 21. Os MDSs gerados para cada área e em cada experimento foram comparados aos modelos obtidos com dados LASER, com o software LPS e com pontos de verificação (apenas na área 1 e 4), os resultados são apresentados nas Tabelas 22, 23, 24 e 25 e nos gráficos ilustrados nas Figuras 54, 56, 58 e 60.

✓ Área 1:

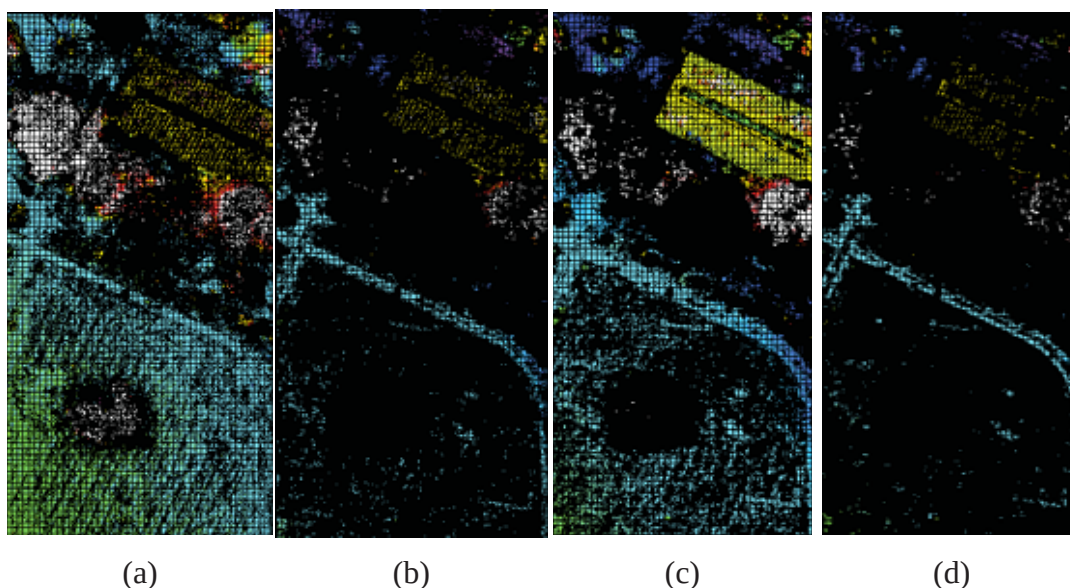


Figura 53: MDS para a Área 1 gerado com a correspondência entre subjanelas. (a) experimento 1; (b) experimento 2; (c) experimento 3 e (d) experimento 4.

Tabela 22: Média, desvio-padrão e REMQ das diferenças entre o MDS gerado com VLL e subjanelas e o MDS do LPS e o MDS LASER e os pontos de verificação.

Experimento	LASER			LPS			Pontos de verificação		
	Média(m)	$\sigma(m)$	REMQ(m)	Média(m)	$\sigma(m)$	REMQ(m)	Média(m)	$\sigma(m)$	REMQ(m)
1	-0,074	3,022	3,023	-0,359	1,187	1,241	-0,281	0,448	0,504
2	0,262	2,516	2,529	-0,177	0,636	0,660	-0,068	0,304	0,293
3	0,257	2,637	2,649	-0,145	0,903	0,915	0,292	0,945	0,931
4	0,290	2,465	2,482	-0,158	0,874	0,888	NP ^(*)	NP ^(*)	NP ^(*)

^(*) Não foi possível calcular.

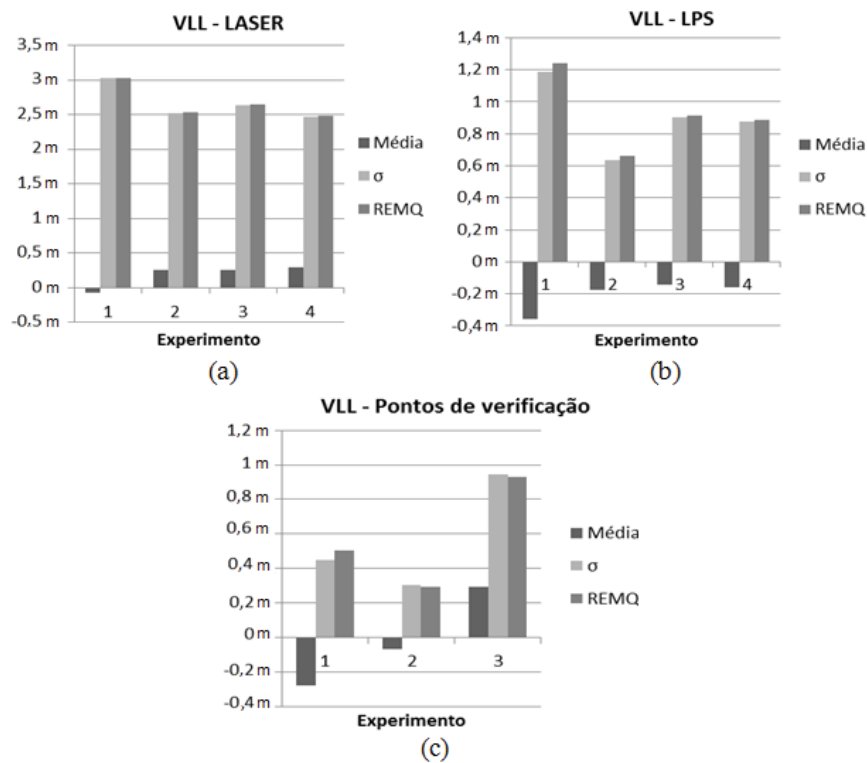


Figura 54: Gráfico da média, desvio-padrão e REMQ das diferenças entre (a) VLL e LASER; (b) VLL e LPS e (c) VLL e pontos de verificação, para a área 1.

✓ Área 2:

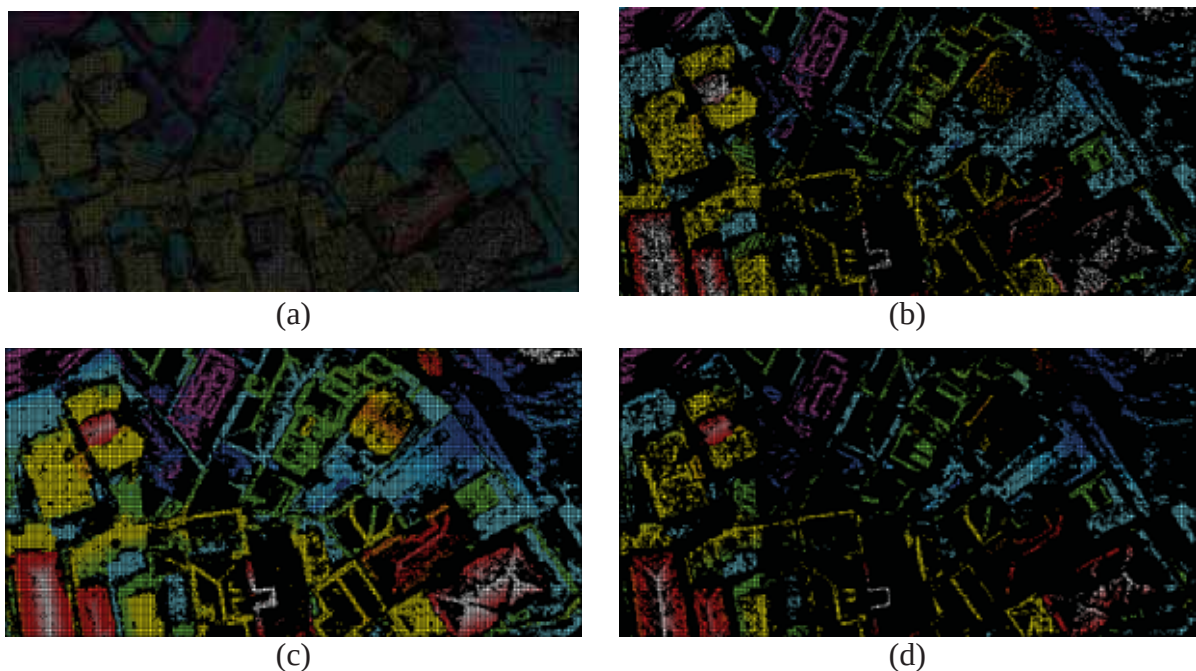


Figura 55: MDS da Área 2 gerado com a correspondência entre subjanelas. (a) Experimento 1; (b) Experimento 2; (c) Experimento 3 e (d) Experimento 4.

Tabela 23: Média, desvio-padrão e REMQ das diferenças entre o MDS gerado com VLL e subjanelas e o MDS do LPS e o MDS LASER.

Experimento	LASER			LPS		
	Média(m)	$\sigma(m)$	REMQ(m)	Média(m)	$\sigma(m)$	REMQ(m)
1	0,027	2,341	2,341	-0,598	0,981	1,149
2	0,435	2,140	2,184	-0,358	0,716	0,801
3	0,363	2,171	2,201	-0,384	0,748	0,841
3	0,434	2,113	2,157	-0,376	0,794	0,879

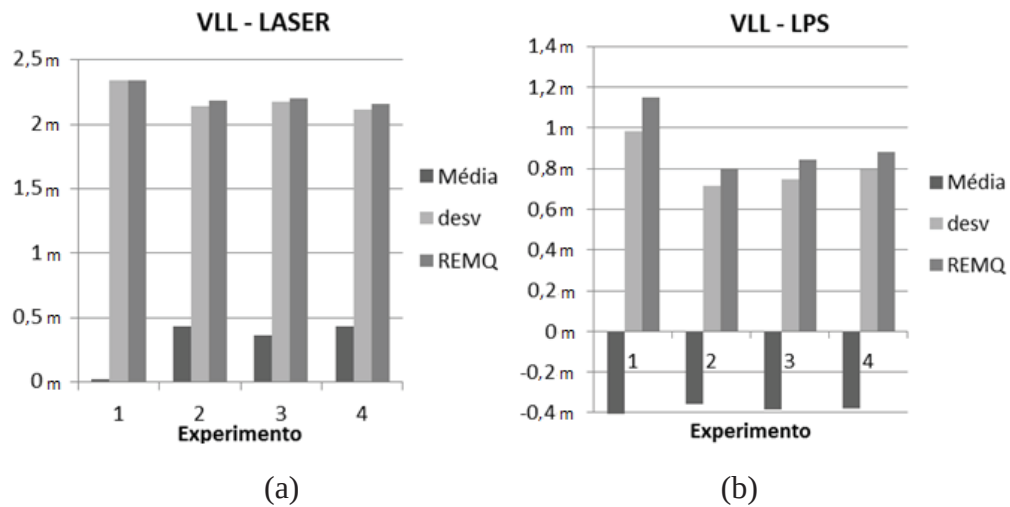


Figura 56: Gráfico da média, desvio-padrão e REMQ das diferenças entre (a) VLL e LASER; (b) VLL e LPS, para a área 2.

✓ Área 3:

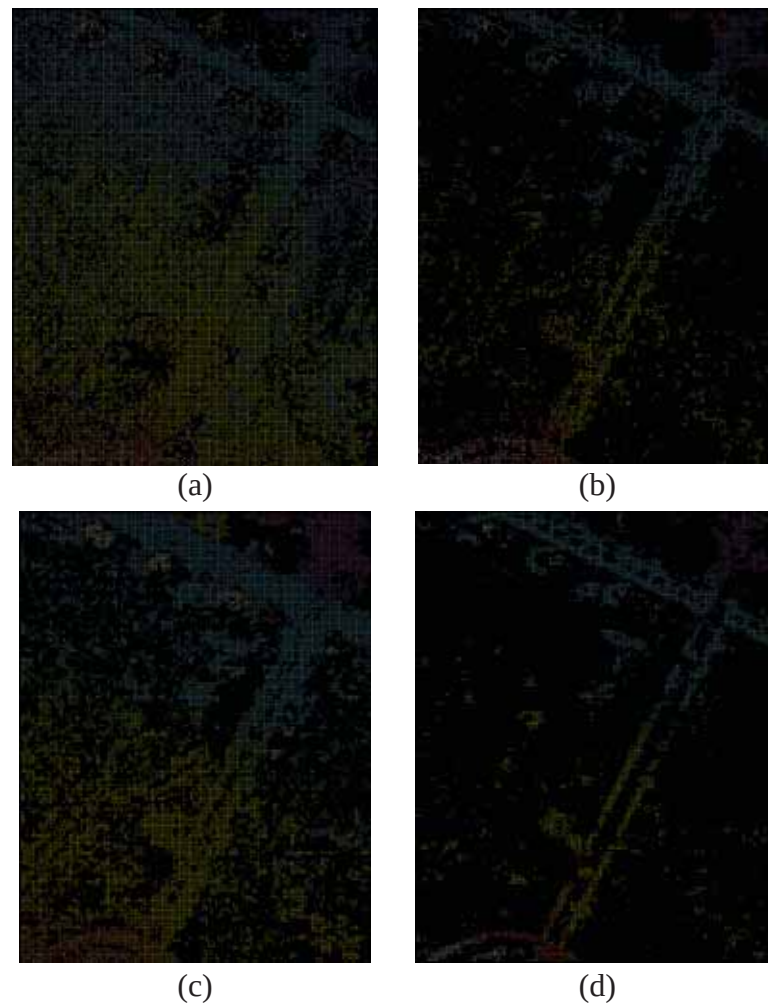


Figura 57: MDS da Área 3 gerado com a correspondência entre subjanelas. (a) Experimento 1; (b) Experimento 2; (c) Experimento 3 e (d) Experimento 4.

Tabela 24: Média, desvio-padrão e REMQ das diferenças entre o MDS gerado com VLL e subjanelas e o MDS do LPS e o MDS LASER.

Experimento	LASER			LPS		
	<i>Média(m)</i>	$\sigma(m)$	<i>REMQ(m)</i>	<i>Média(m)</i>	$\sigma(m)$	<i>REMQ(m)</i>
1	-0,056	0,627	0,630	-0,398	0,426	0,583
2	0,055	0,491	0,494	-0,247	0,158	0,293
3	0,119	0,498	0,513	-0,225	0,236	0,326
4	0,091	0,526	0,534	-0,207	0,213	0,297

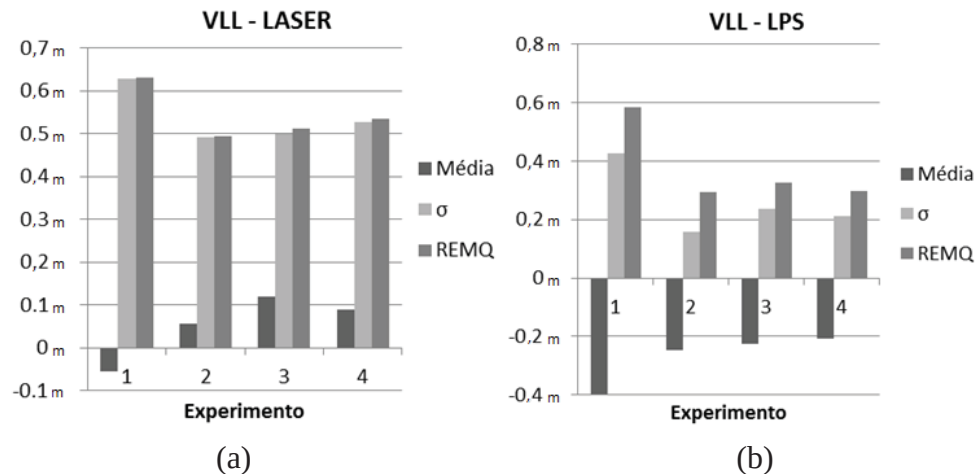


Figura 58: Gráfico da média, desvio-padrão e REMQ das diferenças entre (a) VLL e LASER; (b) VLL e LPS, para a área 3.

✓ Área 4:

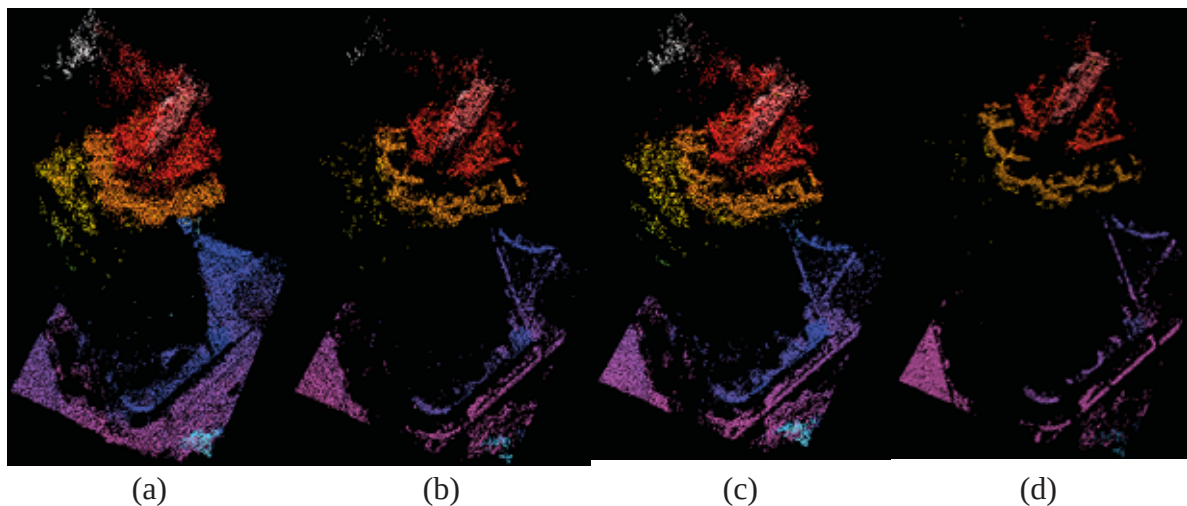


Figura 59: MDS da Área 4 gerado com a correspondência entre subjanelas. (a) Experimento 1; (b) Experimento 2; (c) Experimento 3 e (d) Experimento 4.

Tabela 25: Média, desvio-padrão e REMQ das diferenças entre o MDS gerado com VLL e subjanelas e o MDS do LPS e o MDS LASER e os pontos de verificação.

Experimento	LASER			LPS			Pontos de verificação		
	Média(m)	σ (m)	REMQ(m)	Média(m)	σ (m)	REMQ(m)	Média(m)	σ (m)	REMQ(m)
1	12,402	22,500	25,691	15,810	24,437	29,098	NP ^(*)	NP ^(*)	NP ^(*)
2	13,282	22,350	25,998	16,188	24,411	29,284	-0,415	0,485	0,574
3	13,002	22,564	26,042	16,216	24,555	29,419	-0,638	0,618	0,814
4	12,725	21,203	24,727	7,847	18,325	19,927	-1,084	1,931	1,913

(*) Não foi possível calcular.

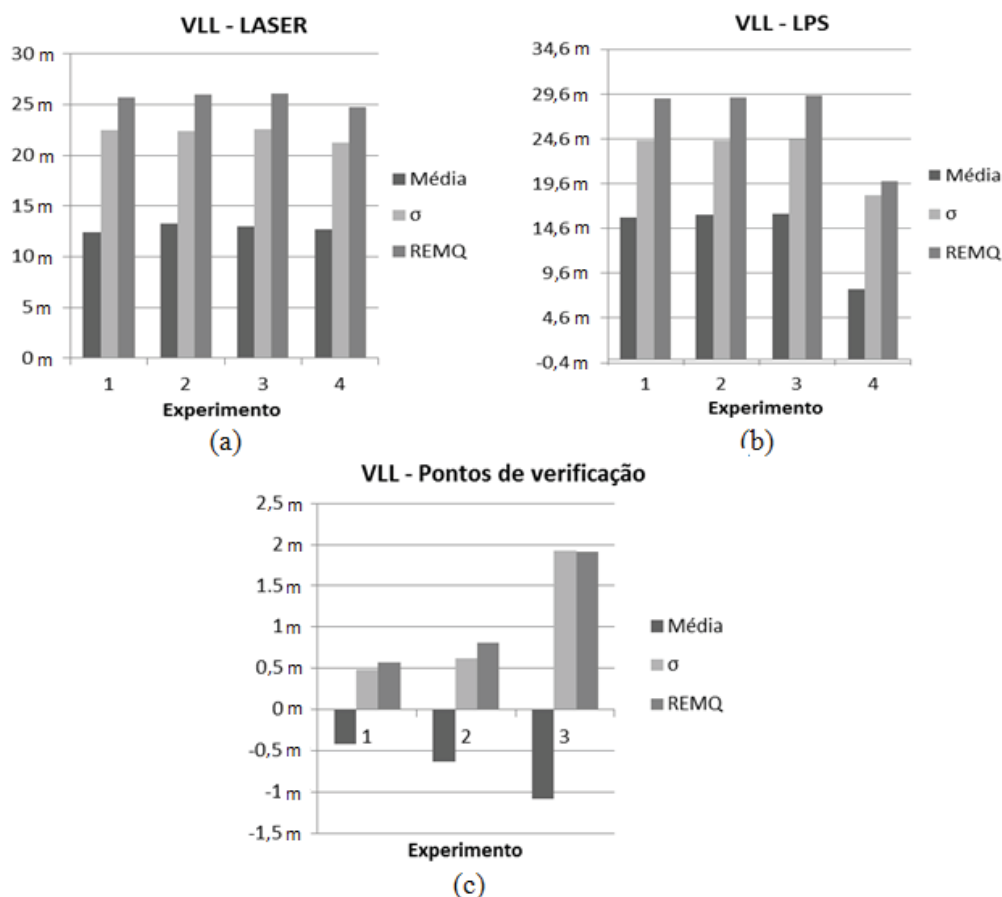


Figura 60: Gráfico da média, desvio-padrão e REMQ das diferenças entre (a) VLL e LASER; (b) VLL e LPS e (c) VLL e pontos de verificação, para a área 4.

As Figuras 53, 55, 57, 59, (a), (b), (c) e (d) mostram os MDSs obtidos para a Área 1 após a correspondência entre subjanelas para os experimentos 1, 2, 3 e 4, respectivamente. Nota-se que, para todos os experimentos realizados, a densidade de pontos utilizando apenas o limiar de erro máximo (Figuras 53(a), 55(a), 57(a), 59(a)) foi significativamente maior do que ao utilizar apenas o coeficiente de correlação (Figura 53(d), 55(d), 57(d), 59(d)), mostrando que o coeficiente de correlação tem maior influência na determinação da correspondência e, consequentemente, na densidade de pontos. Os experimentos 2 e 3, que combinam os dois limiares, apresentaram densidade de pontos maior do que o experimento 4 e menor que o experimento 1, porém com menos pontos espúrios do que no caso 1.

Para a Área 2, o experimento 1 mostrou que utilizando apenas a função de agregação das diferenças foi possível delimitar melhor as formas dos elementos, sendo possível identificar facilmente, até mesmo, as cumeeiras dos telhados (Figura 61 (a)). No entanto, como pode ser verificado no perfil extraído de um telhado, apresentado na Figura 61 (b), as superfícies apresentaram-se ruidosas. Foi traçado no MDS do experimento 3 o perfil no

mesmo telhado (Figura 61 (d)). Neste caso, nota-se que, apesar de menor número de pontos, as superfícies apresentaram menos pontos espúrios. Verifica-se, ainda nesta área, que nos experimentos 2 e 3 a redução de pontos comparada com o experimento 1, ocorreu nas áreas homogêneas, mas, em geral, as bordas foram preservadas.

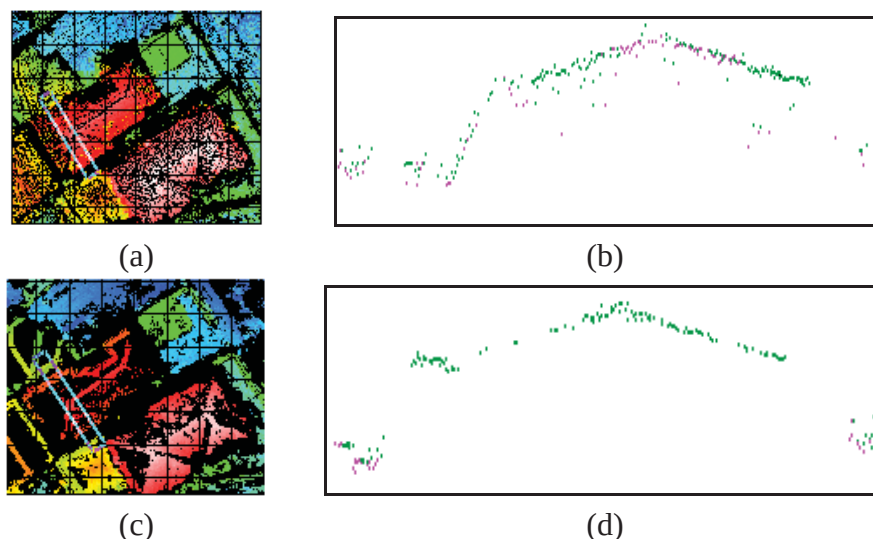


Figura 61: (a) Recorte do MDS gerado para a Área 2 no experimento 1; (b) perfil traçado sobre a edificação; (c) recorte do MDS gerado para a Área 2 no experimento 3; (d) perfil traçado sobre a edificação.

A análise das estatísticas presentes nas Tabelas 22, 23, 24 e 25 mostra que os experimentos 1 de cada área, apesar de terem gerado muitos pontos correspondentes, apresentaram maior dispersão, ou seja, maior desvio-padrão e REMQ, o que confirma a constatação feita visualmente nos modelos. Pode-se observar que a média, o desvio-padrão e a REMQ das diferenças entre VLL e LASER foram reduzidos pela metade na comparação VLL e LPS. Este fato ocorre principalmente porque os modelos gerados pelo programa LPS não apresentam a mesma quantidade de pontos em regiões de árvores e não possuem pontos no solo abaixo das mesmas, como os gerados pelo LASER.

O desvio-padrão e a REMQ dos resultados obtidos nesta seção comparados com dados LASER foram menores do que nos experimentos 1-A (Seção 4.4.1); 2-A (Seção 4.4.2); 3-A (Seção 4.4.3) e 4-A (Seção 4.4.4). Como exemplo para a diminuição desta dispersão nos MDSs, tem-se os perfis traçados sobre a edificação com padrão repetitivo localizada na Área 1 e apresentados na Figura 62. A Figura 62 (a) mostra o recorte da edificação no MDS gerado no experimento 1-A da Seção 4.4.1 e ao lado o perfil extraído (Figura 62 (b)). A Figura 62 (c)

mostra o recorte da edificação no MDS obtido no experimento 3 desta seção e na Figura 62 (d) o perfil traçado sobre ela.

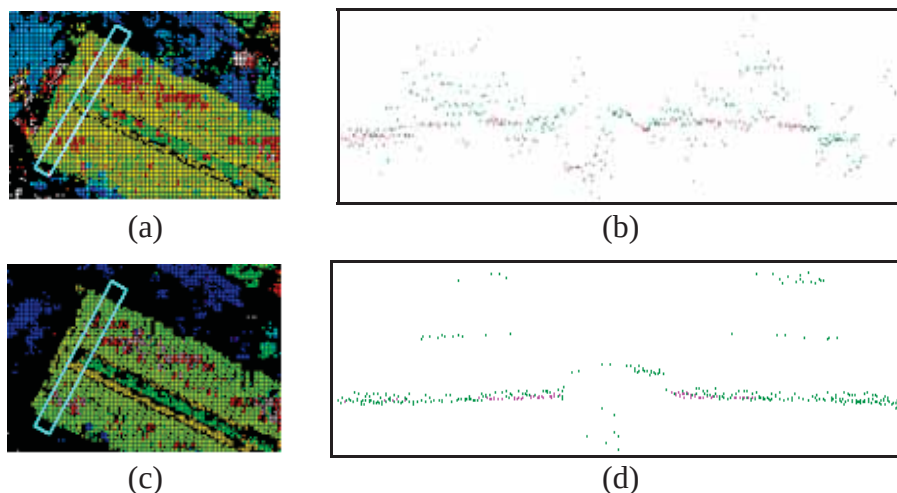


Figura 62: (a) Recorte do MDS gerado para a Área 1 no experimento 1-A da Seção 4.4.1; (b) perfil traçado sobre a edificação; (c) recorte do MDS gerado para a Área 1 no experimento 1; (d) perfil traçado sobre a edificação.

Observa-se pelos perfis a redução dos pontos espúrios e a maior uniformidade da superfície do telhado ao utilizar a abordagem de correspondência entre subjanelas. Além disso, pela Figura 62 (c) verifica-se que o padrão ondulado do telhado foi parcialmente acompanhado pela nuvem de pontos, o que não ocorreu no experimento inicial, utilizando todas as imagens do bloco e sem as subjanelas.

4.7. Discussão sobre os resultados

Foram realizados experimentos utilizando quatro áreas diferentes e com algumas características especiais para geração de MDSs. A primeira área apresentava árvores altas e com copas grandes, padrão repetitivo e área homogênea; a segunda área enquadrava-se em uma área urbana densa, porém baixa; a terceira área caracterizava-se por ser plana e homogênea e a última área tratava-se de um edifício com aproximadamente 60m de altura. O objetivo da seleção destas áreas foi verificar como o método implementado comportava-se em relação a essas questões fundamentais para o problema da correspondência de imagens.

Com a primeira área foi observado que, para o padrão repetitivo, os resultados utilizando apenas a correspondência com coeficiente de correlação foram melhores e

visualmente mais fiéis à forma dos elementos, ao considerar separadamente a correspondência entre as faixas. Para as áreas homogêneas (áreas 1 e 3), notou-se que os melhores resultados foram alcançados nos testes utilizando a maior quantidade de imagens disponíveis. A quantidade de pontos que representam áreas com árvores grandes foi extremamente pequena ao utilizar apenas duas imagens, porém utilizando um número maior de imagens foi possível defini-las com maior densidade e qualidade.

Para os experimentos 1, 2 e 3 realizados na Seção 4.4, verificou-se que ao considerar apenas as imagens da Faixa 1, a qualidade dos MDSs foi igual ou ligeiramente melhor aos MDSs obtidos ao utilizar todas as imagens disponíveis e a qualidade foi sempre superior aos resultados alcançados utilizando apenas as imagens da Faixa 2. Este fato pode estar relacionado a fatores como a qualidade dos POE estimados e à variação radiométrica devido à diferença de iluminação no momento da tomada das imagens, uma vez que as faixas são coletadas em momentos e posições diferentes. As altitudes de áreas que não foram estimadas no processo de correspondência foram interpoladas e em alguns casos isto diminuiu a qualidade do produto gerado.

O grupo de experimentos considerando o coeficiente de correlação e janelas fixas mostraram que a correspondência utilizando múltiplas imagens proporcionou maior qualidade e densidade de pontos. No entanto, a quantidade de pontos acarretou em maior número de pontos espúrios. Assim, foi utilizada a técnica de correspondência considerando subjanelas com o intuito de refinar o processo de correspondência e aumentar a qualidade da geração dos MDSs. A aplicação deste método foi realizada no nível de maior resolução da pirâmide. Os produtos gerados foram comparados com dados de varredura a LASER e com o MDS gerado no *software* LPS no módulo *Classic ATE*.

As análises visuais e quantitativas dos resultados dos experimentos realizados para cada área de estudo na Seção 4.6 mostraram que a aplicação da correspondência entre subjanelas, reduz a quantidade de pontos estimados, por ter dois critérios de aceitação, mas melhora a definição das formas dos objetos da cena, principalmente na área urbana, e reduz a quantidade de pontos espúrios.

A comparação entre o MDS obtido no *software* LPS e os dados de varredura a LASER, apresentou desvio-padrão e REMQ similares aos obtidos com a metodologia proposta neste trabalho, principalmente aos MDSs gerados considerando o VLL em pares de imagens.

Um aspecto que afetou significativamente a análise da qualidade dos resultados está relacionado à imprecisão dos dados LASER utilizados para verificação da qualidade dos MDSs gerados. Apesar das correções aplicadas como citado na Seção 4.3, sabe-se que isto não é o suficiente para corrigir o erro de sincronismo para todo o bloco, pois este não é corrigido apenas com translações aplicada a todos os pontos de modo uniforme. Além disso, os dados de varredura a LASER já possuem qualidade planimétrica inferior à qualidade obtida nos MDSs utilizando imagens ópticas. Como consequência do imperfeito alinhamento entre as nuvens de pontos comparadas, a diferença altimétrica pode não ser calculada entre pontos na mesma posição planimétrica.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

5.1. Conclusões

O objetivo principal deste trabalho consistiu em estudar, implementar e avaliar experimentalmente uma metodologia para a geração de MDS utilizando o método de busca em linhas verticais (VLL) adaptado para a abordagem de múltiplas imagens. O VLL é um método para restrição do espaço de busca no processo de correspondência de imagens, que parte do espaço objeto para o espaço imagem. Como função de similaridade, foi utilizado o coeficiente de correlação, calculando-o para todas as combinações dois a dois, possíveis entre as imagens disponíveis. Adicionalmente, foi implementada uma técnica de correspondência que utiliza nove subjanelas em diferentes posições nas janelas de referência e de busca para a determinação da correspondência, levando em conta o coeficiente de correlação e a diferença de ND entre os pixels.

A aplicação possibilitou a utilização de configurações flexíveis ao longo de cada nível da pirâmide de imagens, permitindo a análise mais detalhada da influência e adaptação dos mesmos para cada área. Com isso, na execução dos experimentos foram feitas alterações na configuração das estratégias variando o tamanho da janela para cada nível da pirâmide, os limiares de aceitação para a correspondência, o tamanho do espaço de busca na linha vertical, que com a utilização de busca hierárquica é reduzido a cada nível, e o incremento na altitude.

De uma forma geral, os experimentos utilizando múltiplas imagens proporcionaram maior qualidade e densidade de pontos. Além disso, com a aplicação da técnica de correspondência que considera subjanelas foi possível aumentar a precisão da estimativa das altitudes e reduzir a quantidade de pontos espúrios em comparação com os resultados da correspondência utilizando janelas fixas.

Os resultados obtidos neste trabalho mostraram que o VLL considerando a correspondência de múltiplas imagens simultaneamente apresenta potencial para geração de MDSs com exatidões similares às obtidas por varredura a LASER e com densidade de informação superior a este. A qualidade dos resultados com relação ao LASER foi maior em áreas com pavimento, áreas homogêneas e locais com vegetação rasteira. As árvores com copas grandes foram as áreas com maior dificuldade para a estimação da altitude por correspondência, como esperado. Para as áreas urbanas a aplicação mostrou-se com alto potencial, delimitando com qualidade as formas de vários tipos de telhados.

5.2. Recomendações para trabalhos futuros

Diante do exposto, sugere-se para trabalhos futuros a inserção do refinamento da correspondência utilizando o método dos mínimos quadrados (MMQ) com o objetivo de considerar não apenas as variações radiométricas, mas também as diferenças geométricas entre as janelas, permitindo a estimação da correspondência com precisão subpixel. Outra recomendação é o uso de imagens coloridas e, para isso, o algoritmo de correspondência deve ser adaptado para utilizar a informação radiométrica das diferentes bandas.

A utilização de áreas que representam um desafio para o problema de correspondência de imagens, como áreas homogêneas, padrões repetitivos e árvores, mostrou a principal necessidade é o estudo, desenvolvimento de técnicas específicas para cada um destes problemas. Com isso, é possível a utilização de técnicas e parâmetros de acordo com as características dos elementos da cena, o que pode ser feito, por exemplo, realizando uma classificação prévia das imagens e então aplicação das técnicas de correspondência.

Como visto nos resultados apresentados, as nuvens de pontos apresentam ruídos e na Seção 4.3, verifica-se que os MDSs gerados após o processo de interpolação utilizado neste trabalho, tiveram sua qualidade reduzida. Assim, recomenda-se a investigação e utilização de algoritmos para filtragem da nuvem de pontos gerada a cada nível da pirâmide de imagens, bem como a utilização de diferentes procedimentos para a interpolação os pontos que não apresentaram correspondência.

Tendo em vista todos os procedimentos implementados e os métodos descritos para a geração de MDS proposta neste trabalho, ressalta-se que o tempo de processamento é grande, devido ao alto custo computacional. Com isso, sugere-se a utilização de métodos de otimização para redução do tempo de processamento, como o uso de processamento paralelo.

REFERÊNCIAS

- ACKERMANN, F. Digital image correlation: Performance and potential application in photogrammetry. **The Photogrammetric Record**. v. 11, n. 64, p. 429-439, 1984.
- ADELSON, E. H.; ANDERSON, C. H.; BERGEN, J. R.; BURT, P. J.; OGDEN, J. Pyramid methods in image processing. **RCA Engineer**, v. 29, n. 6, p. 33-41, 1984.
- AGOURIS, P.; SCHENK, T. Multiple image matching. In: ISPRS, 1992, Washington. **International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing**. Washington: ISPRS, 1992 v. XXIX, Parte B3, p. 802-807.
- ALMROTH, U.; HENDRIKS, L., High accuracy digital matching of close-range objects on the analytical plotter Kern DSR-11. In ISPRS Intercommission Conference on Fast Processing of Photogrammetric Data, 1987, Interlaken. **Proceedings of ISPRS**. Interlaken: ISPRS: 1987. p. 193-203.
- BALTSAVIAS, E. **Multiphoto geometrically constrained matching**. 1991. 221f. Ph.D. thesis, Institute of Geodesy and Photogrammetry, ETH Zurich, Switzerland, Mitteilungen.
- BARBOSA, R. L. **Geração de modelo digital do terreno por aproximações Sucessivas utilizando Câmaras digitais de pequeno formato**. 1999. 97 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Cartográficas)-Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, Presidente Prudente, 1999.
- BETHEL, J. The DSR11 Image Correlator. **Proceedings...** ACSM/ASPRS Annual Convention, 1986. p. 44-49.
- CHAN, S.; WONG, Y.; DANIEL, J. Dense stereo correspondence based on recursive adaptive size multi-windowing. In: Image and Vision Computing, 2003, New Zealand. **Proceedings...**, New Zealand: IVC, 2003. v. 1. p. 256-260.
- CLOUD Peak Software, LASEdit Utility versão 1.15.1 (Free Demo). Disponível em: <<http://www.cloudpeaksoftware.com>>. Acesso: 10 maio 2012.
- COSTA, E. R. **Geração automática de modelos digitais de terreno a partir de imagens de câmaras digitais**. 2006. 118 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Cartográficas)-Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, Presidente Prudente, 2006.
- COSTA, E. R.; TOMMASELLI, A. M. G.; GALO, M. Geração automática de modelos digitais de terreno a partir de imagens obtidas por câmaras digitais. **Revista Brasileira de Cartografia**, Rio de Janeiro, R.J, 2007, v. 59, n. 3, p. 151-170.
- EL-SHEIMY, N.; VALEO, C.; HABIB, A. **Digital terrain modeling**: acquisition, manipulation, and applications. Artech House, 2005. 257p.
- FELGUEIRAS, C. A.; CÂMARA, G. Modelagem Numérica de Terreno. In: CÂMARA,

G.; DAVIS, C. e MONTEIRO, A. M. V. **Introdução à Ciência da Geoinformação**. 2002. Disponível em: <<http://www.dpi.inpe.br/gilberto/livro/introd/cap7-mnt.pdf>>. Acesso em: 20 jul. 2012.

FORSTNER, W. On the geometric precision of digital correlation. In ISPRS, 1982, Helsinki. **International Archives of Photogrammetry**. Helsinki: ISPRS, 1982. v. 24, n. 3, p. 176–189.

FORSTNER, W. Image Matching. In: HARALICK, R.; SHAPIRO, L. G. **Computer and Robot Vision**. Addison- Wesley Publishing Company, 1993. v. 2, cap. 16, p. 289-378.

FUSIELLO, A.; ROBERTO, V.; TRUCCO, E. Efficient stereo with multiple windowing. In: IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, 1997, San Juan, **Proceedings...** San Juan: CVPR, 1997. p. 858-863.

GALO, M. **Automação dos processos de correspondência e orientação relativa em visão estéreo**. 2003. 262p. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) - Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação - FEEC, Universidade Estadual de Campinas - UNICAMP, Campinas, 2003.

GEHRKE, S, MORIN, K., DOWNEY, M., BOEHRER, N., FUCHS, T. Semi-global matching: an alternative to LiDAR for DSM generation? In: IAPRSSIS, 2010, Calgary. **Proceedings...** Calgary: IAPRSSIS, 2010, v. 38. ed. 1.

GRUEN, A.W. Adaptive least squares correlation: A powerful image matching technique. **Journal of Photogrammetry, Remote Sensing and Cartography**, p.175–187, 1985.

GRUEN, A. Development and status of image matching in photogrammetry. **The Photogrammetric Record**, v.27, n. 137, p. 36-57, 2012.

GYER, M., Automated Stereo Photogrammetric Terrain Elevation Extraction, Tech. Report, Gyer and Saliba Inc., 1981.

HAALA, N. Comeback of Digital Image Matching. In Photogrammetric Week, 2009, Heidelberg, 2009. **Proceedings...** Heidelberg: Ed. D. Fritsch, 2009. p. 289-301.

HAALA, N. Multiray Photogrammetry and Dense Image Matching. In Photogrammetric Week, Heidelberg, 2011. **Proceedings....** Heidelberg: Ed. D. Fritsch, 2011. p. 185-195.

HAALA, N; CRAMER, M.; JACOBSEN, K. The german camera evaluation project-results from the Geometry group. In: ISPRS, Calgary. **International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences**. Calgary: ISPRS, 2010, v. XXXVIII.

HEIPKE, C. Overview of image matching techniques. In: Workshop on the Application of digital photogrammetric workstations, 1996, Lausanne. **Proceedings...** Lausanne: OEEPE, 1996.

HIRSCHMÜLLER, H. Accurate and efficient stereo processing by semi-global matching and mutual information. In: IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, 2005, San Diego, USA. **Proceedings...** San Diego: ICCVPR, 2005, v. 2, p. 807-814.

HIRSCHMÜLLER, H. Stereo Processing by Semiglobal Matching and Mutual Information. In: IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2008, **Proceedings...** v. 30, n. 2, p. 328-341, 2008.

HIRSCHMÜLLER, H.; BUCHER, T. Evaluation of Digital Surface Models by Semi-Global Matching. DGPF, July 2010 in Vienna, Austria.

HOBROUGH, G. L. Automatic stereo plotting. **Photogrammetric Engineering**. v. 25, n. 5, p. 763–769, 1959.

IDOETA, I. V. **Metodologia de elaboração automatizada de modelo digital de elevação e ortofoto em média e pequena escala**. 2007. 215 f. Tese (Doutorado em Engenharia) Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2007.

KANADE, T.; OKUTOMI, M. A stereo matching algorithm with an adaptive window: Theory and experiments. In: IEEE International Conference on Robotics and Automation, 1991, California. **Proceedings...** ICRA: California, 1991. p. 1088-1095.

KRAUS, K. **Photogrammetry: Geometry from Images and LASER Scans**. 2. ed. Berlin: Walter de Gruyter, 2007, v. 1, p. 459, (ISBN 978-3-11-019007-6).

KRUPNIK, A., SCHENK, T. Predicting the Reliability of Matched Points. In ACSM/ASPRS Annual Convention, 1994, **Proceedings...** ACSM/ASPRS, 1994, v. 3, p. 337-343.

Jl, S; Yuan, X. Detecting building changes from aerial images using height information. In: ISPRS Congress, XXI, Pequim. **International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences**. Pequim: ISPRS, 2008. v. XXXVII. p. 887-892.

LANGHI, P. J. P. **Ajuste radiométrico de imagens aéreas digitais**. 2009. 127 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Cartográficas)-Faculdade de Ciência e Tecnologia, Universidade Estadual Paulista, Presidente Prudente.

LEE, D.; YOM, J.; SHIN, S. W.; OH, J.; PARK, K. Automatic Building Reconstruction with Satellite Images and Digital Maps. **ETRI Journal**, v. 33. n. 4. p. 537-546, dez. 2011.

LI, Z.; ZHU, Q.; GOLD, C. **Digital terrain modeling: principles and methodology**. CRC Press, 2005. 323p.

MAAS, H. G. Automatic DEM generation by multi-image feature based matching. In ISPRS, 1996, Vienna. **International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing**. Vienna: ISPRS, 1996. v. 31, p. 484–489.

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

MIYOSHI, J. T., TOMMASELLI, A. M. G., GALO, M. Geração automática de modelo digital de terreno com estratégias baseadas em segmentação e classificação. In: VI Colóquio Brasileiro de Ciências Geodésicas, 2009, Curitiba. **Anais...** Curitiba: Universidade Federal do Paraná, 2009. v.1. p.1-2.

MONIWA, H. **Analytical camera calibration for close-range photogrammetry**, 1972, 104 p. Thesis (Master of Science) -University of New Brunswick, 1972.

PAPARODITIS, N.; POLIDORI, L. DSM quality: internal and external validation. In: EGELS, Y.; KASSER, M. **Digital Photogrammetry**. 1. ed. New York: Taylor & Francis, 2002. 351p.

ROTHERMEL, M.; HAALA, N. Potential of Dense Matching for the Generation of High Quality Digital Elevation models. In: ISPRS Workshop High-Resolution Earth Imaging for Geospatial Information, 2011, **Proceedings...** Hannover: ISPRS, 2011. Disponível em: < <http://www.ipi.uni-hannover.de/418.html> >. Acesso em: 20 jul. 2012.

RUY, R.S.; TOMMASELLI, A. M. G. Reconstrução automática de estereomodelos a partir de parâmetros de orientação direta do sensor. Boletim de Ciências Geodésicas, Curitiba, PR, v. 10, n. 1, p. 65-82, 2004.

SCHARSTEIN, D. AND SZELISKI, R. A taxonomy and evaluation of dense two-frame stereo correspondence algorithms. **International Journal of Computer Vision**, Hingham, USA, v. 47, p. 7–42, 2002.

SCHENK, T. **Digital Photogrammetry**. v.I. Ohio: Terra Science, 1999. 428 p.

SILVEIRA, M. T; NUNES, J. L. S. B.; MOTA, G. L. A.; BERNARDO FILHO, O.; RIBEIRO, J. A.; CAOLHO FILHO, L. C. T.; SILVEIRA, F. J. C.; SANTOS, F. C. Geração de Modelo Digital de Elevações e orto-retificação: a experiência do projeto E-FOTO. In: XXIII Congresso Brasileiro de Cartografia, 2007, Rio de Janeiro. **Anais: XXIII CBCG**, 2007, p. 832-839.

THURGOOD, J.D., GRUBER, M., KARNER, K.. Multi-ray matching for automated 3D object modeling. In ISPRS, 2004, Istanbul. **International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences**. Istanbul: ISPRS, 2004, v. 35, Parte 3, p. 140–144.

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**, 2003.

TOMMASELLI, A. M.G.; TOZZI, C. L. Técnicas de calibração de câmaras em visão computacional. In: JORNADA EPUSP/IEEE EM COMPUTAÇÃO VISUAL, 1990, São Paulo. **Jornada EPUSP/IEEE em Computação Visual**. 1990.

VOSSelman, G.; SESTER, M.; MAYER, H. Basic computer vision techniques. In: **Manual of Photogrammetry**. 5 ed. Falls Church, USA: ASP, 2004. p. 455-504.

WAN, X.; QU, X; WANG, L.; WU, B.; ZHANG, J.; ZHENG, S. Photogrammetric techniques for power line raging. In: ISPRS Congress, XXI, Saint-Mandé. **Proceedings...** Saint-Mandé: ISPRS, 2010. v. XXXVIII, parte 3B. p. 29-34.

WOLF, P.R., DEWITT, B.A. **Elements of Photogrammetry:** with Applications in GIS. ed. 3. McGRAW-HILL, 2000.

ZHANG, L. **Automatic Digital Surface Model (DSM) Generation from Linear Array Images.** 2005. Ph. D. Dissertation, n. 88, Institute of Geodesy and Photogrammetry, ETH Zurich, Switzerland. Disponível em < <http://e-collection.ethbib.ethz.ch/ecol-pool/diss/fulltext/eth16078.pdf>> .Acesso em 6 de janeiro de 2012.