



UNESP – UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
CAMPUS DE PRESIDENTE PRUDENTE
FACULDADE DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA

HENRIQUE CÂNDIDO DE OLIVEIRA

DETECÇÃO DE OCLUSÃO
VIA ANÁLISE DE GRADIENTES DE SUPERFÍCIE
SOBRE UM POLIEDRO
PARA GERAÇÃO DE ORTOIMAGEM VERDADEIRA



Presidente Prudente
2016

HENRIQUE CÂNDIDO DE OLIVEIRA

DETECÇÃO DE OCLUSÃO
VIA ANÁLISE DE GRADIENTES DE SUPERFÍCIE
SOBRE UM POLIEDRO
PARA GERAÇÃO DE ORTOIMAGEM VERDADEIRA

Tese de doutorado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Cartográficas da Universidade Estadual Paulista – Faculdade de Ciências e Tecnologia – Campus de Presidente Prudente, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Doutor em Ciências Cartográficas. Área de concentração em aquisição, análise e representação de informações espaciais.

Orientador: Prof. Dr. Aluir Porfírio Dal Poz

Co-orientador: Prof. Dr. Mauricio Galo

Presidente Prudente
2016

FICHA CATALOGRÁFICA

O47d Oliveira, Henrique Cândido de.
Detecção de oclusão via análise de gradientes de superfície sobre um poliedro para geração de ortoimagem verdadeira / Henrique Cândido de Oliveira. - Presidente Prudente : [s.n.], 2016
113 f. : il.

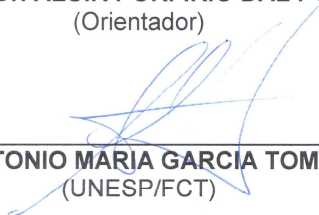
Orientador: Aluir Porfírio Dal Poz
Coorientador: Mauricio Galo
Tese (doutorado) - Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Ciências e Tecnologia
Inclui bibliografia

1. Fotogrametria. 2. Detecção de oclusão. 3. Ortoimagem verdadeira. 4. SGBM. I. Dal Poz, Aluir Porfírio. II. Galo, Mauricio. III. Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Ciências e Tecnologia. IV. Título.

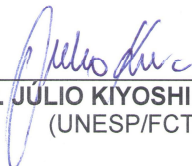
BANCA EXAMINADORA



Prof. Dr. ALUIR PORFIRIO DAL POZ
(Orientador)



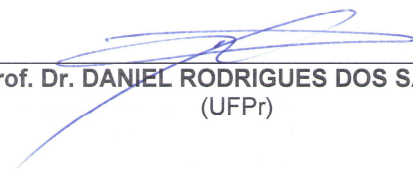
Prof. Dr. ANTONIO MARIA GARCIA TOMMASELLI
(UNESP/FCT)



Prof. Dr. JÚLIO KIYOSHI HASEGAWA
(UNESP/FCT)



Prof. Dr. EDSON APARECIDO MITISHITA
(UFPr)



Prof. Dr. DANIEL RODRIGUES DOS SANTOS
(UFPr)



HENRIQUE CÂNDIDO DE OLIVEIRA

Presidente Prudente (SP), 29 de abril de 2016.

Resultado: APROVADO.

DEDICATÓRIA

*Aos meus amados pais, Ana Maria e Wanderley,
e namorada, Deise.*

AGRADECIMENTOS

A concretização desta tese de doutorado só foi possível graças ao apoio de diversas pessoas e instituições. Em especial a todas estas citadas abaixo.

Aos meus pais, Ana Maria e Wanderley, pelos ensinamentos, educação e oportunidades a mim proporcionados, sendo os dois a minha base familiar. Assim como a minha namorada Deise, por toda paciência e companheirismo durante o período do doutorado.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela disponibilização de bolsa de estudo durante o primeiro ano do curso de doutorado.

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP) por financiar este projeto de doutorado, a partir do segundo ano do curso, por meio da concessão de bolsa de estudo e reserva técnica, no Brasil (processo nº 2013/21647-2) e no exterior (processo nº 2014/15332-1).

Ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Cartográficas (PPGCC) e à Universidade Estadual Paulista (UNESP) pela infraestrutura fornecida, e aos seus professores pelas valiosas discussões e compartilhamento do conhecimento.

Ao meu orientador Prof. Dr. Aluir Porfírio Dal Poz, por me apoiar a todo instante durante o doutorado, além de toda partilha de conhecimento durante o período de orientação. Ao meu co-orientador Prof. Dr. Mauricio Galo, pela orientação desde a graduação (iniciação científica), até os cursos de mestrado e doutorado. Ao meu supervisor durante o estágio de pesquisa no exterior, Prof. Dr. Ayman Fawzy Habib, que permitiu a minha participação em seu grupo de pesquisa na Universidade de Purdue nos Estados Unidos da América, fornecendo diversos conjuntos de dados, software para comparação de resultados e importantes discussões durante este período. Estes professores foram fundamentais para a obtenção dos resultados apresentados nesta tese.

Aos membros da banca examinadora: Prof. Dr. Aluir Porfírio Dal Poz (UNESP), Prof. Dr. Mauricio Galo (UNESP), Prof. Dr. Antonio Maria Garcia Tommaselli (UNESP), Prof. Dr. Júlio Kiyoshi Hasegawa (UNESP), Prof. Dr. Edson Aparecido Mitishita (UFPR) e Prof. Dr. Daniel Rodrigues dos Santos (UFPR), tanto pela participação quanto pelas valiosas contribuições.

Aos amigos do PPGCC pelas frequentes discussões, ajudas mútuas, e confraternizações, os quais auxiliam na execução dos projetos de pesquisa e contribuem para um ambiente de convívio agradável entre estudantes e professores.

RESUMO

A utilização de ortoimagem verdadeira, em projetos executados em áreas urbanas, é essencial para certas aplicações. Para a geração de tal produto é necessária a detecção de áreas de oclusão, assim como a compensação destas áreas, usando-se imagens adjacentes. Este trabalho apresenta um novo método de detecção de oclusão denominado SGBM (*Surface-Gradient-Based Method*), por meio da identificação de gradientes de superfície sobre representação poliédrica. A diferença desse método para os demais encontrados na literatura, como estado da arte, é a utilização de um conjunto de pontos, organizados de acordo com a estrutura de dados TIN (*Triangulated Irregular Network*). Essa representação, por ser formada por pontos tridimensionais irregularmente espaçados, permite o uso de uma nuvem de pontos com diferentes densidades e, em determinadas situações, a obtenção de bons resultados por meio do uso de um modelo digital de superfície composto por uma quantidade menor de pontos, o que implica menor tempo de processamento. Nesta tese, apresentam-se diferentes experimentos para validar a metodologia proposta, por meio de análise quantitativa (índice de completude, alinhamento de feições lineares e tempo de processamento) e qualitativa (coerência visual dos resultados obtidos). Foram utilizados três conjuntos de dados aéreos obtidos por plataformas à baixa altura de voo. Esses dados são oriundos de sistemas acoplados a veículos aéreos não tripulados e helicóptero. Os conjuntos de pontos tridimensionais foram obtidos por sistemas de varredura a LASER (*Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation*) aerotransportado e por técnicas fotogramétricas. Selecionou-se esse conjunto de dados, devido à grande presença de áreas de oclusão, ao aumento da utilização destas plataformas em levantamentos fotogramétricos e à atual qualidade da extração de nuvem de pontos via correspondência densa de imagens. Os resultados, assim como comparações com métodos existentes, indicam que o método proposto apresenta contribuição ao estado da arte na detecção de oclusão visando à geração de ortoimagem verdadeira, visto que a utilização de uma malha triangular, para análise da superfície, evita certas limitações encontradas nos métodos atuais, assim como, permite uma representação mais eficiente dos elementos presentes na área de interesse.

Palavras-chave: Fotogrametria. Detecção de oclusão. Ortoimagem verdadeira. SGBM.

ABSTRACT

The usage of true-orthophoto in projects performed over urban areas is essential for certain applications. To generate this type of product it is necessary a procedure for occlusion detection, as well as, a proper radiometric compensation for the occluded areas, using adjacent images from the aerial image block. The main objective of this thesis is to present a new method for occlusion detection named SGBM (Surface-Gradient-Based Method), using a surface gradient identification over a polyhedral surface. The main difference among this method and the others, presented as state of the art, is the usage of a point cloud arranged as a triangular data structure (TIN: Triangulated Irregular Network). This surface representation is formed by an irregularly-spaced 3D point cloud, which allows the use of different point density along the surface. This characteristic supports obtaining good results by using a less dense point cloud - situation that requires a reduced computational effort. Several experiments were carried out, seeking for the validation of the proposed method, by using quantitative analyzes (completeness index, mosaic alignment and time of processing) and qualitative analyzes (visual coherence of the obtained results). Three datasets were used, being all acquired by a low-altitude flight configuration (helicopter and unmanned aerial vehicles), which make possible the identification of large occlusion areas. The point cloud was obtained by airborne LASER (Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation) scanning system and by dense image matching. These dataset were used due to the incidence of occlusions and the growth of unmanned platform usage. The results indicate that the proposed method has some contribution to the state of the art in occlusion detection, aiming the generation of true-orthophoto. The use of an irregularly-spaced point cloud avoids some limitations found on the other methodologies, along with, a better representation of objects in the surface of interest.

Key-words: Photogrammetry. Occlusion detection. True-orthophoto. SGBM.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Representação de diferentes tipos de MDE.....	26
Figura 2. Componentes de um SVLA e suas relações geométricas.....	31
Figura 3. Representação de superfície por uma malha regular (grade).	36
Figura 4. Representação de superfície por uma malha triangular (TIN).	37
Figura 5. Dualidade entre diagrama de Voronoi (linhas tracejadas) e a triangulação de Delaunay (linhas contínuas).	39
Figura 6. Elementos necessários para desenvolvimento das equações de colinearidade.....	42
Figura 7. (a) Visada em perspectiva central. (b) Visada ortogonal.	45
Figura 8. Concorrência entre <i>groundels</i> e o efeito de duplo mapeamento.....	48
Figura 9. (a) Imagem original com deslocamento da feição devido à projeção perspectiva. (b) Efeito de duplo mapeamento.	48
Figura 10. Área de oclusão, representada em vermelho.	49
Figura 11. Sequência geral para geração de ortoimagem verdadeira. (a) Imagem original. (b) Efeito de duplo mapeamento. (c) Detecção de oclusão. (d) Preenchimento das áreas de oclusão com informações radiométricas de imagens adjacentes.	50
Figura 12. Exemplo de linhas de corte presentes em uma ortoimagem.....	52
Figura 13. Efeitos encontrados em mosaico de ortoimagens convencionais de áreas urbanas.....	52
Figura 14. Função de custo baseada na proximidade com o ponto nadir no terreno.....	54
Figura 15. Função de custo baseada na orientação da superfície em relação ao plano da imagem.....	55
Figura 16. Suavização via método <i>feathering</i>	56
Figura 17. Representação para entendimento do cálculo do índice de completude. (a) Imagem original. (b) Duplo mapeamento. (c) Área de referência. (d) Detecção de oclusão.	58
Figura 18. Alinhamento de feições lineares para a avaliação da qualidade geométrica de mosaicos.	59
Figura 19. Estrutura de dados TIN via critério de Delaunay.....	63
Figura 20. Ponto nadir sobre a superfície poliédrica e sobre o mapa de visibilidade.....	64
Figura 21. Determinação das direções radiais para detecção de oclusão.....	65
Figura 22. Representação do plano que intercepta o poliedro e determina os elementos da linha poligonal (perfil) para uma dada direção radial.	66
Figura 23. Interseção de plano vertical com a superfície triangulada e obtenção da linha poligonal para uma direção radial – vértices em amarelo e segmentos de reta em preto.	67

Figura 24. Linha poligonal (em preto) definida pela interseção do plano vertical (em vermelho) e as faces do poliedro.	67
Figura 25. Representação do início de áreas de oclusão (gradientes negativos).	69
Figura 26. Geometria utilizada para determinação das áreas de oclusão.	70
Figura 27. (a) Imagem ortorretificada com uso de MDS, sem o tratamento da oclusão. (b) Identificação dos gradientes de superfície. (c) Projeção do fim das áreas de oclusão. (d) Ortoimagem em conjunto ao mapa de visibilidade. Fonte: Oliveira (2013).	73
Figura 28. (a) Efeito de duplo mapeamento. (b) Ortoimagem com oclusões detectadas.	74
Figura 29. Diagrama de Voronoi (DV) utilizado para mosaicagem das ortoimagens e suavização radiométrica das linhas de corte.	75
Figura 30. Conjunto de dados 1. (a) Câmera Canon EOS-1D. (b) Exemplo de imagem coletada. (c) Nuvem de pontos obtida por SVLA.	78
Figura 31. Conjunto de dados 2. (a) Plataforma eBee RTK. (b) Exemplo de imagem coletada. (c) Nuvem de pontos obtida por técnica fotogramétrica.	78
Figura 32. Conjunto de dados 3. (a) Plataforma DJI Phantom e câmera GoPro. (b) Exemplo de imagem coletada. (c) Nuvem de pontos obtida por técnica fotogramétrica.	79
Figura 33. Detecção de oclusão para o conjunto de dados 1. (a) Imagem original. (b) Duplo mapeamento. (c) Mapa de visibilidade. (c) Ortoimagem com oclusões detectadas.	83
Figura 34. Detecção de oclusão para o conjunto de dados 2. (a) Imagem original. (b) Duplo mapeamento. (c) Mapa de visibilidade. (c) Ortoimagem com oclusões detectadas.	83
Figura 35. Detecção de oclusão para o conjunto de dados 3. (a) Imagem original. (b) Duplo mapeamento. (c) Mapa de visibilidade. (c) Ortoimagem com oclusões detectadas.	84
Figura 36. Detecção de múltiplas oclusões. (a) Imagem original. (b) Efeito de duplo mapeamento. (c) Áreas de oclusão.	85
Figura 37. Detecção de oclusão para diferentes métodos. (a) Imagem original. (b) Z-buffer. (c) Angular via varredura em espiral. (d) Angular via varredura radial. (e) Método SGBM. .	86
Figura 38. Análise de completude. (a) Área 1. (b) Área 2.	87
Figura 39. Aplicação do parâmetro Δr com os seguintes valores: (a) 1 m. (b) 0,75 m. (c) 0,5 m. (d) 0,25 m.	89
Figura 40. Aplicação do parâmetro Th com os seguintes valores: (a) 1 m. (b) 3 m. (c) 5 m. (d) 10 m.	90
Figura 41. Mosaico de ortorectificação verdadeira com os seguintes parâmetros: $\Delta r = 1$ m e $Th = 1$ m.	91

Figura 42. Mosaico de ortoimagem verdadeira com os seguintes parâmetros: $\Delta r = 0,25$ m e $Th = 10$ m.	91
Figura 43. Ortoimagem verdadeira para o conjunto de dados 3, utilizando-se a função de custo que considera a orientação da superfície em relação ao plano da imagem.	93
Figura 44. Ortoimagem verdadeira para o conjunto de dados 3, utilizando-se a função de custo que considera a proximidade entre <i>groundels</i> e pontos nadir no terreno.....	94
Figura 45. Ortoimagem verdadeira para o conjunto de dados 2, utilizando-se a função de custo que considera a orientação da superfície em relação ao plano da imagem.	95
Figura 46. Ortoimagem verdadeira para o conjunto de dados 2, a utilizando-se função de custo que considera a proximidade entre <i>groundels</i> e pontos nadir no terreno.....	96
Figura 47. Alinhamento de feições presentes no mosaico de ortoimagem verdadeira. (a) Área 1. (b) Área 2. (c) Área 3. (d) Área 4.	98
Figura 48. Mosaicagem para o conjunto de dados 1. Uso do <i>Feathering</i> : (a) Sem. (b) Com. .	99
Figura 49. Mosaicagem para o conjunto de dados 2. Uso do <i>Feathering</i> : (a) Sem. (b) Com.	100
Figura 50. Mosaico de ortoimagem verdadeira via SGBM com densidade variando em: (a) 50 pontos/m ² . (b) 10 pontos/m ² . (c) 5 pontos/m ² e (d) 2,5 pontos/m ²	101
Figura 51. Detalhes 1 do mosaico em diferentes densidades. (a) 50. (b) 10. (c) 5. (d) 2,5 pontos/m ²	102
Figura 52. Detalhes 2 do mosaico em diferentes densidades. (a) 50. (b) 10. (c) 5. (d) 2,5 pontos/m ²	102

LISTA DE SIGLAS

ASPRS	<i>American Society for Photogrammetry and Remote Sensing</i>
CP	Centro Perspectivo
DGPS	<i>Differential Global Positioning System</i>
DPRG	<i>Digital Photogrammetry Research Group</i>
DV	Diagrama de Voronoi
GIS	<i>Geographic Information System</i>
GNSS	<i>Global Navigation Satellite System</i>
<i>Groundel</i>	<i>Ground Element</i>
GSD	<i>Ground Sample Distance</i>
IDE	<i>Integrated Development Environment</i>
IMU	<i>Inertial Measurement Unit</i>
LASER	<i>Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation</i>
LiDAR	<i>Light Detection And Ranging</i>
MDC	Modelo Digital de Construção
MDE	Modelo Digital de Elevação
MDS	Modelo Digital de Superfície
MDT	Modelo Digital de Terreno
PE	Ponto Extremo
POE	Parâmetros de Orientação Exterior
POI	Parâmetros de Orientação Interior
RADAR	<i>RA</i> dio <i>D</i> etection <i>A</i> nd <i>R</i> anging
SGBM	<i>Surface-Gradient-Based Method</i>
SVLA	Sistema de Varredura a Laser Aerotransportado
TIN	<i>Triangulated Irregular Network</i>

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	15
1.1 Considerações iniciais	15
1.2 Estado da arte em detecção de oclusão	17
1.3 Hipótese e objetivos	20
1.4 Potencial de contribuição da solução proposta	21
1.5 Estrutura da tese	23
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	25
2.1 Modelo digital de elevação	25
2.1.1 Geração de modelo digital de superfície (MDS).....	26
2.1.1.1 Sistema de varredura a LASER aerotransportado	27
2.1.1.2 Técnicas fotogramétricas	32
2.1.1.3 SVLA <i>versus</i> técnicas fotogramétricas.....	33
2.1.2 Estrutura de dados para representação de modelo digital de superfície	35
2.1.2.1 Malha regular	35
2.1.2.2 Malha triangular	36
2.1.2.3 Subamostragem de conjunto de pontos de modo adaptativo	40
2.2 Modelo de colinearidade	41
2.3 Ortorretificação de imagens	45
2.3.1 Método direto e indireto.....	46
2.3.2 Duplo mapeamento e áreas de oclusão	47
2.3.3 Ortoimagem convencional e verdadeira	49
2.4 Mosaicagem de ortorectificação verdadeira	51
2.4.1 Funções de custo para a compensação de áreas de oclusão	53
2.4.2 Método de suavização de linhas de corte.....	55
2.5 Análise de qualidade	57
2.5.1 Índice de completude.....	58
2.5.2 Alinhamento de feições lineares em mosaicos.....	59
3. DETECÇÃO DE OCLUSÃO VIA MÉTODO BASEADO EM GRADIENTES DE SUPERFÍCIE	61
3.1 Considerações iniciais	61
3.2 Definição do espaço de busca	63
3.3 Determinação dos gradientes de superfície	68

3.4	Identificação de áreas de oclusão e geração de mapa de visibilidade	70
3.5	Preenchimento de áreas de oclusão e mosaicagem	74
4.	MATERIAIS, EXPERIMENTOS E DISCUSSÕES	77
4.1	Materiais	77
4.1.1	Conjuntos de dados.....	77
4.1.2	Equipamentos utilizados para implementação e execução do SGBM.....	80
4.1.3	Bibliotecas e <i>software</i>	80
4.2	Experimentos	82
4.2.1	Detecção de áreas de oclusão	82
4.2.2	Comparação entre métodos e análise de completude	86
4.2.3	Análise de sensibilidade dos parâmetros Δr e Th	88
4.2.4	Funções de custo para compensação de áreas de oclusão.....	92
4.2.5	Alinhamento de feições lineares em mosaicos de ortoimagem verdadeira	97
4.2.6	Balanceamento radiométrico de linhas de corte.....	99
4.2.7	Efeito da subamostragem da nuvem de pontos na geração de ortoimagem verdadeira	100
5.	CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	105
	REFERÊNCIAS	109

1. INTRODUÇÃO

1.1 Considerações iniciais

Atualmente, projetos ligados a diversas áreas do conhecimento necessitam de produtos cartográficos, dentre os quais estão os mapas criados a partir de imagens aéreas e orbitais. As imagens provindas de sensores aerotransportados e orbitais, usados em Sensoriamento Remoto e Fotogrametria, são adquiridas por meio de uma projeção em perspectiva central. Este tipo de projeção gera uma imagem com escala não uniforme devido à variação de atitude do sensor, no instante de obtenção da imagem, e à variação do relevo. A ausência de uma escala única, a priori, dificulta a geração de produtos cartográficos com rigor geométrico. Para solucionar o problema de não uniformidade da escala, pode-se utilizar, portanto, o processo de ortorretificação convencional, o qual deriva em um produto denominado ortoimagem convencional.

A geração de ortoimagens convencionais visa, portanto, eliminar os deslocamentos na imagem provocados pela inclinação do sensor durante a aquisição da imagem e pela variação do terreno. Como resultado, as ortoimagens convencionais possuem escala uniforme e apresentam o relevo em sua real posição ortográfica, como ocorre em mapas e cartas convencionais. Esse produto pode ser considerado geometricamente equivalente a um mapa, o que permite ao usuário identificar posições de objetos, mensurar distâncias, calcular áreas, analisar mudanças espaciais e extrair informações úteis para diferentes aplicações (WOLF e DEWITT, 2000). Tal característica mostra a grande utilidade e a importância da utilização de uma ortoimagem.

Com o desenvolvimento do processamento digital de imagens e da tecnologia relacionada ao GIS (*Geographic Information System*), como também da evolução dos sensores de imageamento aerotransportados e orbitais, e dos sistemas fotogramétricos digitais, tornou-se frequente o uso de ortoimagens convencionais como informação base para execução de projetos diversos. A busca por imagens de alta resolução espacial e radiométrica cresce dia a dia e, conseqüentemente, ocorre o mesmo em relação à qualidade geométrica e radiométrica das ortoimagens e de informações derivadas das mesmas.

A produção de ortoimagem convencional requer imagens, modelo digital de terreno (MDT), assim como Parâmetros de Orientação Interior (POI) e Exterior (POE) do sistema sensor (KRAUS, 1993), seja aerotransportado ou orbital. Esses dados podem ser obtidos por

sistemas de imageamento aéreo ou orbital, sistemas de varredura LASER (*Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation*) aerotransportados, técnicas fotogramétricas (tais como o *semi-global matching* e *vertical line locus*), métodos de calibração e, atualmente, com o auxílio de sistemas que permitem o georreferenciamento direto da plataforma, por meio da integração de receptores GNSS (*Global Navigation Satellite System*) e unidade de medição inercial - IMU (*Inertial Measurement Unit*). O georreferenciamento direto é essencial quando Sistemas de Varredura a LASER Aerotransportado (SVLA) são usados para coleta de conjunto de pontos tridimensionais. Entretanto, o uso de georreferenciamento indireto e calibração de câmaras também permitem a determinação dos POI e POE da plataforma e de representação da superfície.

Para a geração de ortoimagens convencionais, é necessário o uso de um MDT, imagens com seus respectivos POE e informações do sensor (POI) para corrigir o deslocamento resultante da variação do relevo e inclinação da câmara. A variação, em altura, dos objetos acima da superfície, como edificações, não é considerada na geração da ortoimagem convencional. Como ressaltado por Chen et al. (2007), o produto gerado nessas circunstâncias apresenta deslocamento nas reais posições dos objetos presentes na cena. Com a grande variação de altura de alguns objetos acima da superfície, surgem áreas do terreno que não são visíveis tanto nas imagens, quando vistas em projeção de perspectiva central, quanto nas ortoimagens convencionais, prejudicando, dessa forma, o uso deste produto em aplicações como o planejamento urbano, conforme destacado por Xie e Zhou (2008). Essas áreas em que não se tem visibilidade na imagem são denominadas áreas de oclusão.

Em áreas de alta densidade urbana, as edificações existentes devem ser representadas, na ortoimagem, em projeção ortogonal sobre um plano de referência, sem conter áreas de oclusão. Atualmente, a esse tipo de produto denomina-se ortoimagem verdadeira, *true-orthophoto*, ou, ainda, *true ortho*, conforme se verifica na literatura específica, como por exemplo: Nielsen (2004), Habib et al. (2007), Sheng (2007), Chen et al. (2007), Xie e Zhou (2008), Jensen (2009), Mendonça Júnior (2010), Wang e Xie (2012) e Oliveira et al. (2015), uma vez que representam as feições antrópicas presentes na área de interesse em correta projeção ortogonal.

A identificação e preenchimento dessas áreas de oclusão é fator fundamental para a geração da ortoimagem verdadeira. Nesse sentido, é necessário identificar e compensar as áreas oclusas por objetos, como edificações, que obstruem feições presentes nas imagens digitais, tais como vias, parques, residências, dentre outras. A geração de ortoimagens

verdadeiras, portanto, considera os objetos acima do solo para detecção de oclusão, utilizando modelos digitais de superfície (MDS), sendo muitas vezes mais acuradas e completas que as ortoimagens convencionais, conforme mencionado por Chen et al. (2007).

Para aplicações em que se necessita ortoimagens de áreas urbanas, cujos dados foram obtidos por imageamento aéreo, nota-se a importância da utilização da ortoimagem verdadeira, a fim de evitar os problemas de oclusão. De maneira geral, a contribuição desta pesquisa enfatizará o desenvolvimento de uma nova abordagem para detecção de áreas de oclusão.

1.2 Estado da arte em detecção de oclusão

A detecção de oclusão tem sido considerada o ponto crítico para a geração das ortoimagens verdadeiras. Em literatura específica, encontram-se alguns métodos capazes de realizar tal tarefa, que se diferenciam principalmente pela métrica utilizada para essa detecção, já os dados de entrada, geralmente, são utilizados de maneira análoga. Para a execução da detecção de oclusão são necessários, basicamente, quatro conjuntos de dados: as imagens, o modelo digital de superfície da área de interesse, os dados de posição e orientação da plataforma (POE) e as informações do sistema sensor (POI). A seguir, como estado da arte, apresentam-se as ideias básicas dos principais métodos de detecção de oclusão existentes, quais sejam: o Projetivo, o *Z-buffer*, o Traçado de Raios, o Baseado em Gradientes de Altura e o Angular.

Projetivo: essa metodologia baseia-se na projeção de estruturas pré-definidas para detectar as áreas de oclusão. Em trabalhos como os de Schickler e Thorpe (1998), Volotão (2001), Chen et al. (2007), Günay et al. (2007), Barazzetti et al. (2008), Wu et al. (2011), Wang e Xie (2012) e Yoo e Lee (2016), a ideia principal refere-se à utilização de modelo digital de construção (MDC) ou feições lineares (3D), para projetar as arestas das edificações (bordas dos telhados) sobre um plano de referência e, posteriormente, delimitar as áreas de oclusão. A vantagem do uso do MDC e feições lineares em 3D é a identificação precisa do término das áreas de oclusão, uma vez que as arestas são bem definidas. Em função do trabalho necessário para a geração do MDC e algoritmos para extração automática de feições, entretanto, esta fonte de informação pode ser considerada como um aspecto negativo deste método, apesar de auxiliar na obtenção de bons resultados, principalmente no que se refere à qualidade da representação das bordas das edificações.

Z-buffer: para utilização deste método é necessário, como dado de entrada, um MDS formado por pontos tridimensionais regularmente espaçados. A identificação das áreas de oclusão é feita por meio da comparação de distâncias entre células do MDS (*groundels* – *ground elements*) e a posição do centro perspectivo da imagem utilizada. Regiões com presença de oclusão apresentam concorrência entre *groundels* para um mesmo pixel na imagem. Esse problema pode ser solucionado via método *Z-buffer* ao determinar o *groundel* (em concorrência) que esteja mais próximo ao centro perspectivo da câmara (CP), como elemento visível, e os demais (em concorrência) rotulados como oclusos. Este método não apresenta bons resultados em regiões com edificações altas e estreitas, devido à falha na representação das fachadas das edificações (paredes), causando, como consequência, problemas na detecção das áreas de oclusão, como descrito em Habib et al. (2007) e Chen et al. (2007). Outros aspectos negativos são: a necessidade de um MDS regular, que potencialmente, possui erros planialtimétricos introduzidos no processo de interpolação; a alta revisita em *groundels* próximos ao ponto nadir; e a sensibilidade à diferença entre resolução do MDS e do elemento de resolução espacial da imagem (GSD – *Ground Sample Distance*). O uso, as características e as variações deste método podem ser encontrados em Catmull (1974), Amhar (1998), Rau e Chen (2002), Qin et al. (2003), Zhou et al. (2005), Habib et al. (2007), Chen et al. (2007) e Mendonça Júnior (2010).

Traçado de Raios (Ray Tracing): como apresentado por Nielsen (2004) e Bang et al. (2007), o método de traçado de raios, visa identificar quais *groundels* não possuem visibilidade com o CP. O método pode ser resumido da seguinte maneira: para um dado *groundel*, cuja visibilidade será analisada, cria-se uma reta entre esse e o CP. Ao projetar essa reta sobre o MDS, é possível determinar um conjunto de *groundels* que a representa (pontos tridimensionais). Com esse conjunto de *groundels*, representando a direção radial (projeção da reta entre CP e *groundel*), torna-se possível identificar se algum desses *groundels* (que formam a direção radial) possui altitude que ultrapasse a reta formada entre o *groundel* em análise e o CP. Caso esta condição seja confirmada, o *groundel* em análise é considerado ocluso ao CP, pois se encontra em uma posição em que há o bloqueio visual com CP. Para tal análise, é necessário avaliar todos os *groundels* para uma dada direção, até que se encontre algum bloqueio. Outros trabalhos utilizam métricas semelhantes, tais como os apresentados por Machado et al. (2005), Shariat et al. (2008), Wimmer (2010) e Fangming e Wei (2013). Este método também necessita de um MDS regular, além de revelar problemas com a alta revisita em *groundels* próximo ao ponto nadir.

Baseado em Gradientes de Altura: esse método foi apresentado por Oliveira (2013) e tem como base a análise de gradientes de altura negativos sobre uma grade de pontos (MDS regular). Para uma dada direção radial, obtida via método de Bresenham (ROGERS, 1985) – com início no ponto nadir no terreno (WOLF e DEWITT, 2000) e término na extremidade da imagem projetada no MDS – realiza-se a identificação de variações de altura que indicam o início de uma área de oclusão. Com o início da área de oclusão identificado, é possível projetá-lo na superfície, via monorrestituição, e determinar o término da área de oclusão. Portanto, todos os *groundels* entre o início e o término da área de oclusão, para uma dada direção radial, são rotulados como oclusos em um mapa de visibilidade. Tal procedimento é realizado para todas as direções radiais, até que todos os *groundels* sejam analisados. A desvantagem desse método é a necessidade de um MDS regular (necessidade de processo de interpolação), a impossibilidade de detecção de múltiplas oclusões (edificações que obstruem outras edificações, por exemplo) e a alta revisita próximo ao ponto nadir. Outros detalhes sobre essa metodologia podem ser obtidos em Oliveira e Galo (2013) e Oliveira et al. (2015a).

Angular: a fim de evitar algumas das desvantagens do método *Z-buffer*, Habib et al. (2007) apresentaram um método alternativo denominado Angular. A ideia principal deste método é utilizar como métrica a comparação entre ângulos, ao invés de distâncias, para identificação das áreas de oclusão. Os ângulos formados entre a direção nadir e o alinhamento entre CP e *groundels* tendem a aumentar conforme o *groundel* se afasta do ponto nadir no terreno (em direção radial). Essa característica permite identificar oclusões em regiões nas quais essa regra não é atendida. O decréscimo angular indica regiões oclusas. Além de modificar a métrica utilizada, Habib et al. (2007) propuseram duas novas formas de varredura do MDS (varredura em espiral e varredura radial adaptativa). Os problemas relacionados às edificações altas e estreitas, assim como as falhas nas áreas de oclusão e revisita em *groundels* próximo ao nadir são eliminados nesta abordagem. Porém, os dados de entrada são os mesmos do *Z-buffer* o que não elimina o problema oriundo das interpolações para geração de um MDS regularmente espaçado. Outros trabalhos com abordagem semelhante foram desenvolvidos por Antequera et al. (2008) e Zhong et al. (2011).

Em resumo, os métodos apresentados necessitam de informação tridimensional da superfície, que é fornecida por meio de um MDS regularmente espaçado, ou seja, informação oriunda de um processo de interpolação, sobre um conjunto de dados obtidos a partir de um SVLA ou a partir de técnicas fotogramétricas. O método projetivo, como apresentado, requer um MDC para sua execução, sendo necessários algoritmos específicos ou uma etapa de

edição manual para sua geração. Outra característica comum aos métodos descritos é a necessidade de análise de todas as células do MDS, para conferir suas visibilidades em relação ao CP, variando apenas a maneira com que o MDS é manipulado e as métricas utilizadas. É importante destacar que os métodos, recentemente desenvolvidos, buscam estratégias para a não utilização de MDC, visto que esse modelo é necessário quando se busca uma alta qualidade dos contornos das edificações no produto final, ortoimagem verdadeira.

As características comuns encontradas nos métodos existentes, citadas anteriormente, são consideradas desvantagens para o processo de detecção de oclusão. Tais aspectos serão abordados, a seguir, na apresentação da proposta deste trabalho.

1.3 Hipótese e objetivos

Ao analisar os métodos existentes, suas características e limitações, o trabalho em questão apresenta a seguinte hipótese:

“Dado um conjunto de imagens aéreas, e seus respectivos parâmetros de orientação interior e exterior, e um conjunto de pontos tridimensionais irregularmente espaçados, é possível, eficientemente, determinar áreas de oclusão usando gradientes de superfície sobre um poliedro, sem a necessidade de interpolação inicial dos dados ou do uso de um modelo digital de construção.”

Com isso, o objetivo central desta proposta consiste em explorar a métrica baseada no gradiente de superfície, determinado a partir de superfície poliédrica, obtida por meio da estruturada de dados TIN, gerada com base no critério de Delaunay, aplicada a dados de varredura LASER ou oriundos de técnicas fotogramétricas, visando à detecção de áreas de oclusão para geração de ortoimagem verdadeira.

Como objetivos específicos têm-se:

- Formulação do espaço de amostragem (superfície poliédrica construída por meio da estrutura de dados TIN) e desenvolvimento do conceito de gradientes radiais de superfície;
- Desenvolvimento de estratégia para construção do mapa de visibilidade com base no conceito de gradientes de superfície;
- Mosaicagem de ortofotografias verdadeiras usando diferentes funções de custo, com intuito de facilitar a avaliação do efeito da compensação de oclusão;

- Avaliação dos resultados obtidos, de maneira quantitativa e qualitativa, e comparação com resultados de outros métodos, visando à identificação de melhorias para o processo de detecção de oclusão proposto.

1.4 Potencial de contribuição da solução proposta

A proposta deste projeto é a utilização de um modelo de superfície, representado por meio de um poliedro – sólido geométrico – neste trabalho obtido a partir da estrutura de dados TIN, formada por um conjunto de pontos tridimensionais (nuvem de pontos) irregularmente espaçados, respeitando o critério de Delaunay, bem como o uso de gradientes de superfície ao longo do poliedro, para a identificação do início e do fim das áreas de oclusão, em direções radiais. Vale destacar que a abordagem proposta pode ser adaptada para poliedros formados por outras estruturas de dados, não apenas a TIN.

O uso de um poliedro para representação da superfície, evita processos de interpolação da nuvem de pontos originais, e conseqüentemente, a inserção de erros no novo conjunto de dados (como quando utilizada para a geração de malha regular). Outra vantagem da utilização de uma malha irregular triangulada é a possibilidade de se trabalhar com diferentes densidades de pontos ao longo da área de interesse – essa característica permite uma melhor representação da superfície e evita a redundância de informações em áreas com poucas discontinuidades que podem ser representadas por uma densidade menor de pontos (áreas planas, por exemplo). Como base na revisão da literatura realizada percebe-se que essa característica não é encontrada em nenhum dos métodos de detecção de oclusão para geração de ortoimagem verdadeira.

A não utilização de um MDC, previamente elaborado, também se destaca como aspecto vantajoso do método proposto, em relação ao método projetivo. Isso ocorre, pois, apesar de o MDC apresentar uma alta qualidade na definição das bordas das edificações (deficiência dos dados de varredura a LASER, por exemplo), a sua geração automática não é trivial e é difícil se obter um modelo de qualidade. Em geral, os MDCs são criados de maneira manual (restituição) ou semiautomática, o que, conseqüentemente, eleva o custo e o tempo de geração de ortoimagem verdadeira.

Diferentemente dos métodos apresentados, que fazem comparações entre distâncias ou ângulos, o método proposto aborda o uso de gradientes de superfície para identificação das áreas de oclusão sobre superfície poliédrica, o que caracteriza a sua originalidade. O uso desta

métrica evita a necessidade de verificação de todos os *groundels* presentes no MDS, diferentemente da utilização de uma grade regular de pontos.

A atual proposta difere em diversos aspectos importantes, se comparada com o trabalho desenvolvido anteriormente por Oliveira (2013). Foram obtidos avanços, como por exemplo, a utilização de uma representação poliédrica (via estrutura de dados TIN) ao invés de uma malha regular e a detecção de múltiplas oclusões (edificações que sobrepõem outras edificações), além da compensação (preenchimento) das áreas de oclusão e execução da etapa de mosaicagem das ortoimagens verdadeiras.

De maneira sucinta é possível fazer uma comparação das características dos métodos existentes (Projetivo, *Z-buffer*, Traçado de Raios, Baseado em Gradientes de Altura, e Angular) com a proposta deste projeto (*Surface-Gradient-Based Method*), utilizando-se o Quadro.

Quadro 1. Resumo das características dos métodos apresentados como estado da arte.

Métodos	A	B	C	D
Projetivo	-	-	✓	-
<i>Z-buffer</i>	✓	✓	-	✓
Traçado de Raios	✓	✓	-	-
Baseados em Gradientes de Altura	✓	✓	-	-
Angular	✓	-	-	-
Surface-Gradient-Based Method (proposto)	-	✓	-	-

Em que:

A: Necessidade do uso de um MDS regular (com resolução igual à imagem de saída);

B: Alta quantidade de revisita a *groundels* próximo ao nadir;

C: Necessidade de aplicação de um MDC;

D: Sensibilidade a presença de edificações altas e estreitas, e a relação entre o tamanho médio do GSD e o espaçamento do MDS.

Quatro dos cinco métodos apresentados utilizam, necessariamente, malhas regulares interpoladas a partir da nuvem de pontos original, geralmente definindo como resolução espacial o GSD da imagem de saída. Esta característica é o principal aspecto negativo dos métodos apresentados. Já a abordagem proposta necessita apenas do conjunto original de

pontos tridimensionais, sem interpolação. Em áreas com baixa densidade de pontos pode haver inserções de artefatos quando se utiliza um conjunto de dados interpolado. Outro fator importante a ser considerado é a possibilidade de trabalhar com diferentes densidades de pontos quando se usa uma superfície poliédrica (formada por pontos irregularmente espaçados), algo não trivial quando se utiliza um conjunto regular de pontos, e não observado nos métodos de detecção de oclusão descritos no estado da arte.

O método projetivo necessita de um MDC para execução, ao contrário do método proposto, que não necessita de um MDC para detecção de áreas de oclusão.

A métrica para os métodos Projetivos, Z-Buffer, Traçado de Raios, Baseado em Gradientes de Altura e Angular, são análises de projeções de arestas, distâncias, alturas, variações de alturas e ângulos, respectivamente. O método ora proposto utiliza a identificação de gradientes negativos de superfície como métrica para detectar as áreas de oclusão.

O método proposto leva em conta a superfície como um poliedro, já os demais métodos utilizam uma malha regular de pontos, e para o caso projetivo ainda há a inserção de informações sobre as edificações (MDC).

1.5 Estrutura da tese

Esta tese visa apresentar o conteúdo estudado e gerado durante o seu desenvolvimento e está estruturada em cinco capítulos.

No Capítulo 1 faz-se a imersão do leitor ao tema tratado nesta tese, apresentando-lhe de maneira breve os principais métodos utilizados para detecção de oclusão, a hipótese e os objetivos do presente trabalho, assim como o potencial de contribuição da proposta.

A fundamentação teórica, necessária para o entendimento e desenvolvimento da proposta, é apresentada no Capítulo 2, com destaque para a geração e representação de modelos digitais de superfície; dos modelos matemáticos responsáveis pela relação entre espaço imagem e espaço objeto; do processo de ortorretificação de imagens; do conceito de compensação/preenchimento de áreas de oclusão e mosaicagem de ortoimagem verdadeira; e das formas de avaliação a serem empregadas nos resultados obtidos.

O Capítulo 3 contém a descrição do método proposto, baseado em gradientes de superfície sobre um poliedro gerado por meio da estrutura de dados TIN, para detecção e compensação de áreas de oclusão, assim como a geração de mosaicos de ortoimagem verdadeira. O método foi dividido do seguinte modo: definição do espaço de busca;

determinação dos gradientes de superfície; identificação das áreas de oclusão e geração de mapa de visibilidade; e compensação de áreas de oclusão e realização da mosaicagem.

No Capítulo 4 são descritos os materiais utilizados nos experimentos realizados neste trabalho, assim como os recursos computacionais (equipamentos e *software*). Após as descrições dos materiais, são apresentados sete diferentes experimentos, juntamente com as respectivas discussões e análises.

Como resumo do que foi apresentado e discutido nesta tese de doutorado, o Capítulo 5 apresenta as conclusões obtidas acerca dos resultados, os quais permitem aceitar a hipótese proposta.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

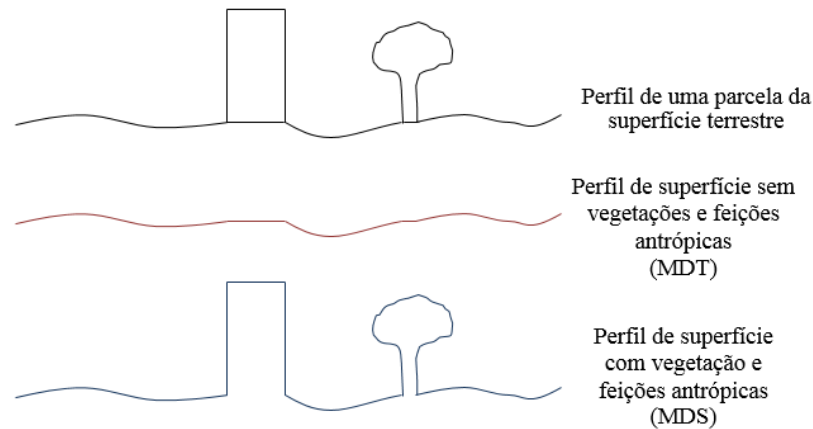
Esse capítulo contém uma revisão dos fundamentos necessários ao entendimento do processo de detecção de oclusão e geração de ortoimagem verdadeira, por meio do método proposto no capítulo seguinte.

2.1 Modelo digital de elevação

A necessidade de informações da superfície física da Terra é encontrada em inúmeras aplicações. Em relação às Ciências Cartográficas, mais especificamente à Fotogrametria, a representação da superfície é ponto-chave para execução de inúmeros projetos. Alguns exemplos de aplicações podem ser citados: geração de curvas de nível, projetos de rodovias, meteorologia, planejamento urbano, cálculo de declividade e volume, geração de ortoimagens, visualizações em três dimensões, dispersão de poluição, simulação de voo, dentre outros (EL-SHEIMY et al., 2005).

Pode-se gerar a representação da superfície por meio de diversas técnicas: levantamentos topográficos e geodésicos, SVLA, RADAR (*Radio Detection And Ranging*), restituição estereofotogramétrica, etc. Para diferentes aplicações, busca-se a melhor técnica para gerar a modelagem da superfície. As representações da superfície são denominadas, de maneira geral, por MDE (Modelo Digital de Elevação), o qual representa toda informação de elevação da superfície em formato digital. Quando esse modelo está associado apenas ao terreno, sem as feições antrópicas ou vegetação, este MDE é chamado MDT (modelo Digital de Terreno). Porém, quando a representação considera, também, os elementos sobre o terreno, como a vegetação e as feições antrópicas, esta representação passa a ser chamada de MDS (Modelo Digital de Superfície) (WOLF et al., 2014). Observa-se tal diferenciação na Figura 1.

Figura 1. Representação de diferentes tipos de MDE.



Segundo Li et al. (2005), os modelos digitais de elevação podem ser classificados em quatro categorias de modelagem: as baseadas em ponto, triângulo, grade e a híbrida, sendo as abordagens que utilizam triangulação e grade as mais utilizadas para as aplicações ligadas ao uso de geoinformação. A seguir serão descritas duas formas de aquisição/geração de modelos digitais de superfície, assim como uma contextualização sobre as representações baseadas em triângulos e grade.

2.1.1 Geração de modelo digital de superfície (MDS)

Os modelos digitais de superfície, como mencionado anteriormente, são representações tridimensionais da superfície, que contêm informações sobre a elevação do terreno e de objetos acima dele, como vegetação, edifícios, pontes, dentre outros. Essa representação é feita por meio de pontos tridimensionais (nuvem de pontos 3D), sejam esses pontos regular ou irregularmente espaçados.

As nuvens de pontos podem ser obtidas por diferentes técnicas. As observações, necessárias para geração dessa nuvem, podem ser coletadas por sensores de sensoriamento remoto, ativos ou passivos (HE et al., 2015). Os sensores ativos se tornaram fonte, comumente utilizada, de aquisição de nuvem de pontos tridimensionais com alta densidade.

Como sistemas ativos, citam-se os sistemas de varredura a LASER e os sistemas de luz estruturada (REMONDINO et al., 2014). Outra forma de aquisição ocorre por meio de técnicas fotogramétricas, as quais se baseiam tanto em correspondência de imagens de forma densa (DIM – *Dense Image Matching*), quanto de maneira esparsa (coleta estereoscópica manual, por exemplo). Atualmente, essas técnicas, juntamente com a determinação de coordenadas tridimensionais, proporcionam a geração de nuvens de pontos com alta acurácia,

tornando-se, assim, alternativa viável para representação de superfície (GRUEN, 2012). Anteriores ao DIM pode-se citar trabalhos que utilizam técnicas de correlação, operadores de interesse e a correspondência por meio de descritores, como por exemplo, o SIFT (*Scale-Invariant Feature Transform*), o SURF (*Speeded Up Robust Features*) e o ORB (*Oriented Fast and Rotated BRIEF*), apresentados por Lowe (1999), Bay et al. (2006) e Rublee et al. (2011), respectivamente.

Este subtópico apresentará uma explanação acerca dos sistemas de varredura a LASER aerotransportados e também sobre as técnicas fotogramétricas utilizadas para geração de conjunto de pontos 3D, assim como, uma comparação entre as duas fontes de dados, destacando algumas vantagens e desvantagens.

2.1.1.1 Sistema de varredura a LASER aerotransportado

O SVLA (Sistema de varredura a LASER aerotransportado) é um sistema ativo, ou seja, possui fonte de energia própria, não dependendo de fonte externa de iluminação. Essa energia, emitida pelo sistema, interage com objetos na superfície física da Terra e é detectada por meio de um sistema denominado LiDAR (*Light Detection And Ranging*), sendo este capaz receber os retornos dos pulsos emitidos e medir as respectivas distâncias (do sensor ao alvo). Para Shan e Toth (2008), a introdução da tecnologia LiDAR foi o fator mais impactante para o mapeamento topográfico na década de 90. Para projetos que necessitam de dados da superfície física da Terra, obtidos por SVLAs, a luz geralmente utilizada é o LASER (luz coerente) com comprimento de onda na faixa do espectro eletromagnético referente ao infravermelho, em geral, no intervalo entre 1040-1060 nm (BALTSAVIAS, 1999).

O sistema LiDAR do SVLA, portanto, mensura as distâncias entre o emissor do pulso LASER, acoplado à plataforma, e pontos na superfície da Terra. Essas medidas de distâncias, juntamente com informações de ângulo de varredura do SVLA, das posições e atitudes da plataforma e medidas de calibração entre todos os componentes do SVLA, permitem a determinação de coordenadas tridimensionais de diversos pontos no terreno, formando, assim, um conjunto de pontos (nuvem de pontos 3D).

Uma das utilidades do SVLA em projetos cartográficos, portanto, é fornecer nuvens de ponto que representem a superfície, gerada de maneira rápida, segura, automatizada e acurada. Estes dados podem ser utilizados em diversas aplicações relacionadas ao

mapeamento de florestas, à geração de modelos tridimensionais de áreas urbanas, ao mapeamento de linhas de transmissão de energia, dentre outros.

Segundo Mikhail et al. (2001) e Petrie e Toth (2008) os primeiros sensores LiDAR aerotransportados eram equipamentos que permitiam a determinações de perfis, ao longo da trajetória, ou seja, não havia um sistema de varredura capaz de emitir pulsos transversais à direção de voo durante o levantamento. Este sistema inicial era considerado limitado para algumas aplicações, como a modelagem 3D de áreas urbanas, pois, mesmo com a junção de linhas de voo distintas, a densidade de pontos por unidade de área seria baixa.

No início da década de 90, a finalidade principal dos estudos e aplicações dos dados LASER na Cartografia era a geração de modelos digitais de superfície e de terreno, MDS e MDT, respectivamente. Desenvolveram-se os SVLAs entre as décadas de 70 e 80, porém, sua vasta utilização teve início com a solução do posicionamento cinemático da plataforma com o emprego do método DGPS (*Differential Global Positioning System*) e determinação da atitude da plataforma por uma IMU (PETRIE e TOTH, 2008). Esses sistemas permitiram uma acurada referência a um sistema de coordenadas global, como, naquela ocasião, o WGS-84 (ACKERMANN, 1999). Para um alto desempenho dos SVLAs, o desenvolvimento de sistemas óptico-mecânicos de varredura foi essencial, pois permitiu a emissão e recepção de pulsos LASER em outras direções, além da linha de voo.

Para Baltsavias (1999), a utilização de dados LASER em mapeamentos aéreos pela comunidade científica teve início com Friederich Ackermann no final da década de 80, no Instituto de Fotogrametria da Universidade de Stuttgart – Alemanha. Uma década depois (final dos anos 90), o interesse por dados oriundos de SVLA cresceu bruscamente, sendo hoje mundialmente utilizados em diversas aplicações.

Para entender o princípio de emissão do LASER em um SVLA alguns conceitos devem ser estudados. Existem quatro princípios básicos: a Absorção, a Emissão Espontânea, a Inversão Populacional e a Emissão Estimulada de Radiação Eletromagnética, cujas definições e explicações podem ser encontradas em Kear (1973), Angelopoulou e Wright (1999) e Foth (2008).

A função da emissão do LASER em um SVLA é a possibilidade de mensuração de distâncias entre a plataforma e a superfície física da Terra. A partir do tipo de LASER utilizado, pode-se ter duas diferentes formas de mensurar as distâncias: via diferença de fase (LASER de onda contínua) ou via tempo de propagação do pulso LASER (WEHR e LOHR,

1999). O sistema LiDAR é o responsável pela detecção do pulso emitido pelo SVLA e refletido pela superfície, assim como pela mensuração da distância correspondente.

Para determinação das coordenadas tridimensionais de um ponto na superfície por meio de um SVLA, necessariamente deve-se realizar a integração de sensores, uma vez que o sistema LiDAR é capaz de mensurar a distância entre emissor do pulso e superfície, não sendo capaz de determinar posição, a variação de atitude da plataforma e o ângulo de incidência do raio LASER (ângulo de varredura). Após determinar a distância entre o sensor e um ponto na superfície, as coordenadas do mesmo podem ser matematicamente associadas a um sistema de referência global. Para tal, a distância obtida deve ser relacionada à posição (receptores GNSS) e atitude (IMU) da plataforma, e ao ângulo de varredura do SVLA, no instante de emissão do pulso LASER. Realiza-se esse procedimento para todos os pontos amostrados pelo SVLA durante o voo e, por fim, obtém-se um conjunto de dados tridimensionais da superfície (nuvem de pontos). Informações como intensidade do pulso recebido e número do retorno, podem estar contidas em cada ponto do conjunto de dados.

Para tal procedimento, alguns elementos são fundamentais, como a unidade de emissão e recepção do pulso, o conjunto óptico, o receptor GNSS, as estações de referência e a unidade de medida inercial. Autores como Baltsavias (1999), Wehr e Lohr (1999), Mikhail et al. (2001), El-Sheimy et al. (2005), Kraus (2007), Centeno e Mitishita (2007) e Habib (2008) destacam a importância de uma boa associação entre as informações oriundas desses componentes, pois o sincronismo entre os elementos elencados é o principal gargalo no funcionamento de um SVLA.

A seguir são apresentados os componentes de um SVLA (BALTSAVIAS, 1999; PETRIE E TOTH, 2008):

- Sistema de emissão e recepção do LASER: contém o conjunto óptico de emissão e recepção do LASER, detector de sinal, amplificador (necessário para emissão da luz), sistema de contagem de tempo e outros componentes eletrônicos;
- Conjunto óptico: após ser estimulado, o pulso LASER é direcionado ao espelho de varredura, que orienta o pulso à determinada direção. Ao ser enviado à superfície, o pulso interage com os objetos e retorna ao SVLA, e é coletado por meio de um receptor. Nessa etapa o sinal analógico observado é convertido para digital e filtrado (eliminação de ruídos). Esse sinal, então, é utilizado para cálculo da distância entre o emissor do pulso e a superfície.
- Receptor GNSS: elemento responsável pela coleta de observações necessárias para

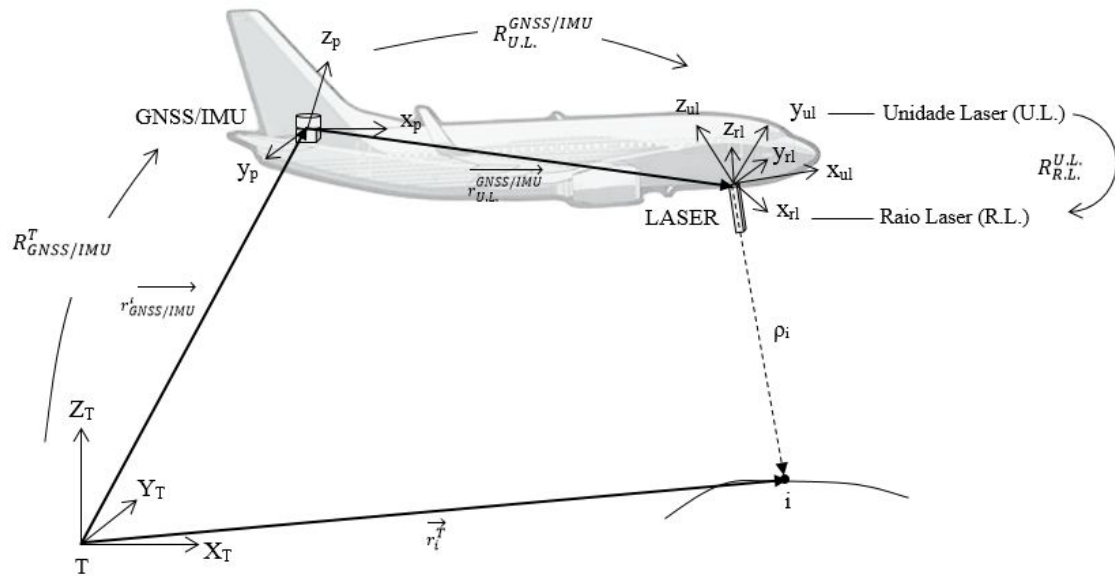
determinação de posições espaciais, em intervalos de tempo pré-determinados, da plataforma em que se encontra o SVLA;

- IMU: sistema necessário para mensuração de acelerações lineares e velocidades angulares da plataforma, que possibilitam a determinação de posições, e principalmente, da atitude da plataforma ao longo da trajetória do levantamento. Essas observações não são coletadas ao mesmo tempo em que são determinadas as posições espaciais estimadas pelo sistema GNSS, o que existe a necessidade de um sincronismo entre os diversos sistemas. A frequência de coleta das observações da IMU é mais alta que a da coleta do receptor GNSS;
- Estações GNSS de referência: utilizadas para pós-processamento e obtenção de posições acuradas para trajetória da plataforma.

A trajetória da plataforma pode ser determinada por pontos tridimensionais determinados com auxílio de receptores GNSS. Porém, os instantes de emissão e recepção do feixe LASER não necessariamente correspondem às observações GNSS; o mesmo ocorre para os dados oriundos do sistema de medição inercial. Torna-se, portanto, essencial um bom sincronismo entre estes sistemas (GNSS, IMU e emissor de pulso LASER), para que todos os pontos da trajetória, que tenham emitido/recebido pulso LASER, possuam coordenadas e valores de atitudes relativos à sua real posição no instante de coleta. Isso é fundamental para a obtenção de um conjunto acurado de pontos tridimensionais.

Outro fator importante é a relação entre os componentes do SVLA - todos devem estar referenciados entre si, ou seja, *a priori*, a calibração das distâncias e ângulos entre os componentes é necessária. Assim, tem-se um ambiente pronto para a obtenção das coordenadas tridimensionais dos pontos amostrados do terreno. A Figura 2 apresenta a relação entre o sistema de referência global, receptor GNSS, IMU, LASER e ponto na superfície.

Figura 2. Componentes de um SVLA e suas relações geométricas.



Adaptado de El-Sheimy et al. (2005).

Para o cálculo das coordenadas de um ponto genérico i na superfície utiliza-se a seguinte formulação, apresentada por El-Sheimy et al.(2005) e Habib (2008):

$$\vec{r}_i^T = \vec{r}_{GNSS/IMU}^T(t) + R_{GNSS/IMU}^T(t) \cdot R_{U.L.}^{GNSS/IMU} \cdot \vec{r}_{U.L.}^{GNSS/IMU} + R_{GNSS/IMU}^T(t) \cdot R_{U.L.}^{GNSS/IMU} \cdot R_{R.L.}^{U.L.}(t) \cdot \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ -\rho_i \end{bmatrix} \quad (1)$$

em que:

\vec{r}_i^T : coordenadas do ponto i no sistema de referência do terreno;

$\vec{r}_{GNSS/IMU}^T$: coordenadas do receptor GNSS/IMU no sistema de referência do terreno;

$\vec{r}_{U.L.}^{GNSS/IMU}$: distância entre receptor GNSS/ IMU e emissor/receptor do pulso LASER;

$R_{GNSS/IMU}^T$: matriz de rotação entre receptor GNSS/IMU e o sistema de referência do terreno;

$R_{R.L.}^{U.L.}$: matriz de rotação entre o raio LASER e a unidade LASER (ângulo de varredura);

$R_{U.L.}^{GNSS/IMU}$: matriz de rotação entre a unidade LASER e o receptor GNSS/IMU;

ρ_i : medida de distância entre o ponto i no terreno e a unidade LASER;

t : tempo a ser sincronizado entre todas as coletas (IMU, GNSS, LASER).

Por meio da Equação 1 é possível determinar as coordenadas tridimensionais do ponto i localizado na superfície. Essa formulação é aplicada para cada pulso LASER emitido/coletado pelo SVLA, obtendo-se assim uma nuvem de pontos 3D.

2.1.1.2 Técnicas fotogramétricas

Nesta seção serão apresentadas algumas considerações em relação às técnicas fotogramétricas, que são utilizadas para geração de nuvem de pontos 3D. Segundo Remondino et al. (2014), essas técnicas estabelecem correspondências entre primitivas extraídas de duas ou mais imagens e, a partir delas, determinam-se as coordenadas 3D de feições correlatas no espaço objeto, via equações de colinearidade ou modelo projetivo. Na área de Fotogrametria, essas técnicas são muito usadas para geração de modelos de superfícies, medição de pontos de controle e enlace, para processos de orientação e triangulação, e para extração de feições (GRUEN, 2012).

A ideia básica dessas técnicas é identificar, de maneira automática, pontos homólogos em diferentes imagens, geralmente tendo por base a geometria epipolar para redução do espaço de busca, e posteriormente criar um mapa de paralaxe em x para todos os pixels. Considerando que as paralaxes são inversamente proporcionais à distância entre câmara e o objeto, pode-se criar um mapa de profundidade - espaço imagem - ou uma nuvem de pontos 3D - espaço objeto (REMONDINO et al., 2014).

Para Gruen (2012), as técnicas de correspondências de imagem podem ser classificadas em: baseadas em área, baseadas em características (ou atributos) e as relacionais.

As correspondências baseadas em área utilizam a comparação de níveis de intensidade entre uma imagem de referência e uma de busca (GRUEN, 1985; KANADE e OKUTOMI, 1991; ACKERMANN, 1984). Neste método, uma janela é deslocada por toda a imagem de busca e uma função de similaridade retorna à posição em que houve maior compatibilidade (correspondência) entre as duas imagens – de referência e de busca. As funções de similaridade mais empregadas são a correlação cruzada, o erro quadrático e o coeficiente de correlação. Para o refinamento da posição de maior similaridade pode-se utilizar o método dos mínimos quadrados (GRUEN, 1985; FORSTNER, 1982).

A técnica baseada em características necessita, inicialmente, da extração de feições básicas de imagens, tais como bordas, quinas e interseções (HARRIS e STEPHENS, 1988; LOWE, 2004). Com essas feições extraídas, é possível identificar as correspondências entre imagens adjacentes. Geralmente, a utilização de feições faz com que o método seja mais estável, quando comparado ao uso de intensidades radiométricas (GRUEN, 2012).

A correspondência relacional é efetuada por meio da combinação de características estruturadas em uma árvore de busca. Para Shapiro e Haralick (1987), a correspondência

relacional considera a cena em estudo como um todo, e a análise depende da interpretação de vários objetos nesta área, considerando suas relações espaciais (área, comprimento, largura, ângulo, distâncias, entre outras).

Como apresentado por Remondino et al. (2014), um dos métodos que atualmente apresenta melhor desempenho para identificação de pontos homólogos aplicado à geração de superfície 3D (nuvem de pontos) é o Semi-Global Matching (SGM) desenvolvido por Heiko Hirschmüller (HIRSCHMÜLLER, 2005). Este método, em vez de considerar uma janela fixa para busca de correspondência (método local), tem por base a correspondência pixel a pixel através da minimização de função de custo global. Para outras informações sobre o método SGM indicam-se as seguintes referências: Hirschmüller (2005 e 2008). A vantagem do SGM em relação aos demais métodos globais é o tempo de processamento necessário para gerar nuvem de pontos.

Atualmente, encontram-se, em literatura específica, variações do SGM, como a apresentada por He et al. (2015). Nesta variação do SGM, o mapa de paralaxe é refinado por meio do uso de injunções de suavidade local e feições extraídas da nuvem de pontos. Os resultados obtidos melhoraram a representação 3D obtida pelo SGM e foi o método adotado para geração de parte dos dados aplicados nos experimentos deste trabalho.

2.1.1.3 SVLA *versus* técnicas fotogramétricas

Ao estudar ou utilizar SVLAs, surge uma comparação inevitável com a Fotogrametria. Isso ocorre devido à quantidade de aplicações que permitem o uso tanto de produtos obtidos por SVLA, quanto por Fotogrametria, ou por ambos em conjunto. Estes produtos vão desde MDT, MDS, análise temporal de superfícies, mapeamento de corredores à representação 3D de edificações. Diversos trabalhos que abordam esta comparação podem ser encontrados na literatura: Kraus e Pfeifer (1998), Baltsavias (1999), Ackermann (1999) e Axelsson (1999), Haala (2009), Gruen (2012), Remondino et al. (2014) e Granshaw (2015).

Esses autores citam diversas características dessas duas fontes de dados. Baltsavias (1999) apresenta as principais diferenças (tipo de sensor: ativo e passivo; geometria: polar e perspectiva central; cobertura: ponto e área; aquisição de informação: direta e indireta; georreferenciamento direto e indireto). Apesar de diversas comparações feitas por esses autores, todos concordam com a afirmação de que os SVLAs e a Fotogrametria se complementam em muitas aplicações, como é o caso deste trabalho, pois, a geração de

ortoimagem verdadeira requer dados que podem ser obtidos tanto dos SVLA quanto da Fotogrametria.

Ao se tratar especificamente de modelos de representação da superfície, conforme mencionado, diversas técnicas podem ser empregadas para a geração automática de MDS com qualidade equivalente ao SVLA. As duas maneiras de aquisição de dados (via SVLA ou Fotogrametria) possuem vantagens e desvantagens. Conforme descrito nos trabalhos mencionados no início desta subseção, as principais diferenças e características dessas formas de aquisição estão relacionadas aos seguintes itens:

- Com o advento dos veículos aéreos não tripulados (VANT) a aquisição de imagens se tornou algo rápido e fácil, permitindo uma grande exploração de dados tridimensionais oriundos de processamentos fotogramétricos. Porém, este tipo de plataforma possui limitações em relação ao peso que nela pode ser acoplado, não sendo muito utilizada para transportar SVLAs. Apesar disso, atualmente, diversos SVLA de pequena dimensão podem ser encontrados, como, por exemplo, o Velodyne®. Portanto sistemas com diferentes características podem ser utilizados em uma mesma plataforma, assim como em aerolevantamentos tradicionais;
- Os dados obtidos por SVLA possuem vantagens sobre os obtidos por técnicas fotogramétricas, em regiões onde se encontram as áreas homogêneas, padrões repetitivos, objetos em movimento e em áreas de vegetação (caso o interesse seja a filtragem do MDS para extração do MDT, por meio de métodos específicos como o apresentado por Axelsson (1999), cuja característica dos dados LASER de “penetração” na vegetação auxilia tal procedimento de filtragem);
- Outras vantagens das técnicas fotogramétricas são: alta densidade da nuvem de pontos, fácil registro entre imagem e pontos tridimensionais, melhor representação de bordas de edificações, dados mais intuitivos que os obtidos por SVLA (por ser simples a junção de informação radiométrica) e facilidade para representação da superfície utilizando dados já obtidos (onde o levantamento por SVLA não é mais possível – análise temporal).

As principais considerações a serem feitas antes de decidir a melhor opção para determinado levantamento são: os requisitos do projeto, o montante disponibilizado como recurso financeiro, a densidade e a acurácia desejada para nuvem de pontos utilizada.

2.1.2 Estrutura de dados para representação de modelo digital de superfície

Como descrito na subseção anterior, as nuvens de pontos podem ser obtidas por diferentes técnicas. Assim como a aquisição, a estruturação também pode ser realizada por métodos distintos, de acordo com a necessidade do projeto. Os modelos digitais de elevação podem ser estruturados como uma malha regular (grade) ou uma malha triangular irregular (TIN). As duas maneiras de se trabalhar com essas superfícies, retratadas nas subseções seguintes, possuem suas vantagens e desvantagens.

Ambas as estruturas de dados, grade e TIN, consideram a superfície como uma representação em 3D, onde cada altitude do modelo é descrita em função de uma posição horizontal. Com isso, nota-se a característica de cada ponto - X e Y - possuir apenas uma altitude correspondente - Z (MAYER et al., 2013), diferentemente de um MDC. A utilização destas estruturas de dados é fundamental para entendimento das relações internas do modelo (LI et al., 2005).

Neste instante vale resgatar o interesse do uso de um MDS no presente estudo, o qual visa representar uma superfície na forma de um poliedro a partir de um conjunto de dados obtidos por SVLA e por técnicas fotogramétricas. Portanto, para aplicação do método proposto neste trabalho, será empregado um conjunto de pontos irregularmente espaçados e organizados pela estrutura de dados TIN. Todavia, as duas maneiras de estruturação de dados, grade e TIN, serão descritas a seguir, visto que, todos os métodos apresentados como estado da arte utilizam a malha regular como estrutura de dados do MDS.

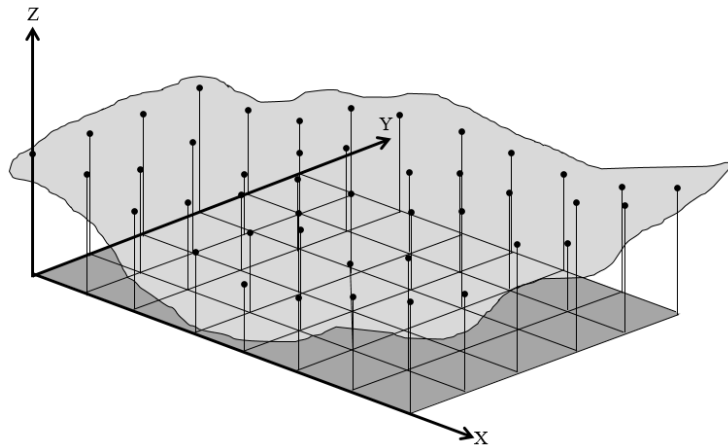
2.1.2.1 Malha regular

Para Mayer et al. (2013) uma estrutura em formato de grade possui uma amostragem regular na distribuição dos pontos, podendo ser comparada a uma imagem digital (*raster*), na qual as altitudes dos pontos são armazenadas, juntamente com o espaçamento da grade e o número de colunas e linhas. Esta é a forma mais usual de estruturação de dados. Porém, não é a representação mais indicada para áreas com variações abruptas de altura, ou seja, que possuem grandes descontinuidades ao longo da superfície (LI et al., 2005).

Uma das maneiras de gerar uma malha regular é por meio da interpolação de uma malha triangular irregular. Este procedimento pode ser executado por diferentes interpoladores, por exemplo, vizinho mais próximo, bilinear, ponderado pelo inverso da distância, *splines*,

krigagem, bicúbica, dentre outros (WOLF et al., 2014). Para uma explanação detalhada sobre esses interpoladores, recomenda-se El-Sheimy et al. (2005) e Li et al. (2005). Na Figura 3 verifica-se a representação de uma malha regular de pontos.

Figura 3. Representação de superfície por uma malha regular (grade).



Adaptado de Felgueiras e Câmara (2004).

Devido ao fato de possuir as características de uma imagem digital, essa estrutura de dados torna-se objeto de fácil manipulação e armazenamento. A suavidade da representação da superfície pode sofrer influência da resolução do MDS (MIKHAIL et al., 2001). Outra vantagem do uso da grade é a fácil integração com imagens de satélites e outros sensores remotos.

Assim como as vantagens, essa representação possui algumas desvantagens, como a redundância de informações sobre grandes áreas, cujo terreno possui declividade uniforme (área plana, por exemplo), ou mesmo a má representação de feições lineares (EL-SHEIMY et al., 2005), além da etapa de interpolação de um conjunto irregular de pontos necessária para se criar a grade regular. Outro fator é a dificuldade em se trabalhar com diferentes densidades ao longo da representação da superfície, característica essa intrínseca à estrutura de dados TIN.

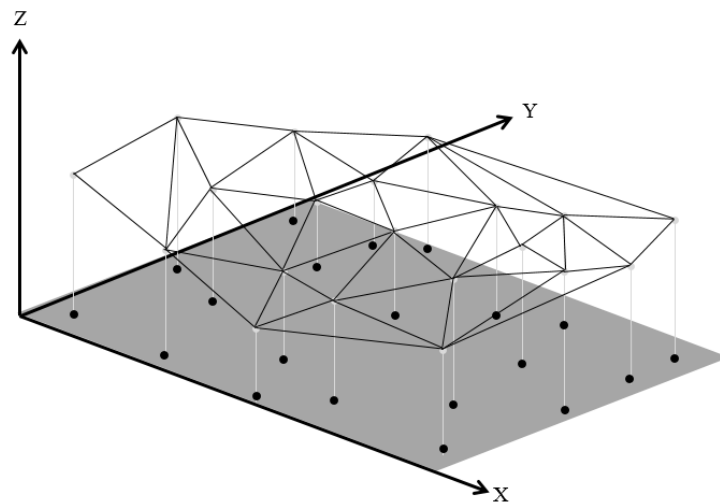
2.1.2.2 Malha triangular

A estrutura TIN pode ser definida como uma estrutura na qual os pontos irregularmente espaçados são interligados seguindo uma triangulação. Essa representação é formada por uma série de triângulos vizinhos conectados entre si, sendo suas características armazenadas na

estrutura de dados (LI et al., 2005). Esse tipo de estrutura permite a adaptação da densidade de pontos de acordo com o tipo de superfície (MAYER et al., 2013). Tal característica de adaptação torna a TIN uma estrutura de dados eficiente, pois utiliza menor número de pontos para a obtenção de uma representação semelhante ou superior à estrutura de grade regular (MIKHAIL et al., 2001).

A estrutura TIN, assim como a grade regular, possui vantagens e desvantagens. Pode-se citar como desvantagem a complexidade de manipulação e a realização de operações espaciais quando se utiliza uma TIN. Em contrapartida, regiões acidentadas podem ser melhores representadas, pois é possível utilizar uma quantidade maior de pontos para modelar tais regiões, além de gerar produtos com melhor acurácia. Além dessas vantagens, a TIN pode conter injunções em seu conteúdo (*breaklines*) que permitem uma melhor apresentação da superfície, como é o caso das informações sobre drenagem (EL-SHEIMY et al., 2005). A Figura 4 mostra uma superfície estruturada em forma de TIN.

Figura 4. Representação de superfície por uma malha triangular (TIN).



Adaptado de Felgueiras e Câmara (2004).

A estrutura TIN será utilizada neste projeto devido à possibilidade de se trabalhar com diferentes densidades ao longo da nuvem de pontos, além de não haver a necessidade de um processo de interpolação inicial – como ocorre na geração da malha regular. Apesar da maior complexidade de manipulação desta estrutura, é possível usar uma baixa densidade de pontos irregularmente espaçados e, ainda assim, conseguir resultados similares aos obtidos com o uso de grades regulares.

Segundo Li et al. (2005), a geração de uma triangulação comumente atende três requisitos básicos:

- Para um dado conjunto de pontos, a estrutura TIN resultante deve ser única, mesmo que o algoritmo utilizado inicie a análise a partir de pontos em diferentes localidades;
- A forma geométrica dos triângulos resultantes deve ser a mais equilateral possível, no caso de não haver nenhuma condição específica a qual o algoritmo deva seguir;
- Cada triângulo deve ser formado pelos pontos vizinhos mais próximos, ou seja, a soma dos comprimentos das arestas deve ser mínima.

Para obter uma triangulação com esses requisitos, deve-se adotar algum tipo de critério. A triangulação mais utilizada para representação de superfície é baseada no critério de Delaunay. Esse critério considera que, para cada triângulo, a circunferência passante pelos três vértices não deve conter nenhum ponto do conjunto de dados (DELAUNAY, 1934). Uma forma de gerar a triangulação de Delaunay é com o uso do Diagrama de Voronoi (DV), também conhecido por diagrama de Thiessen, Células de Wigner-Seitz ou estrutura de Dirichlet. A triangulação de Delaunay e o DV são estruturas duais, ou seja, possuem características que se relacionam, como apresentado por El-Sheimy et al. (2005) e Li et al. (2005).

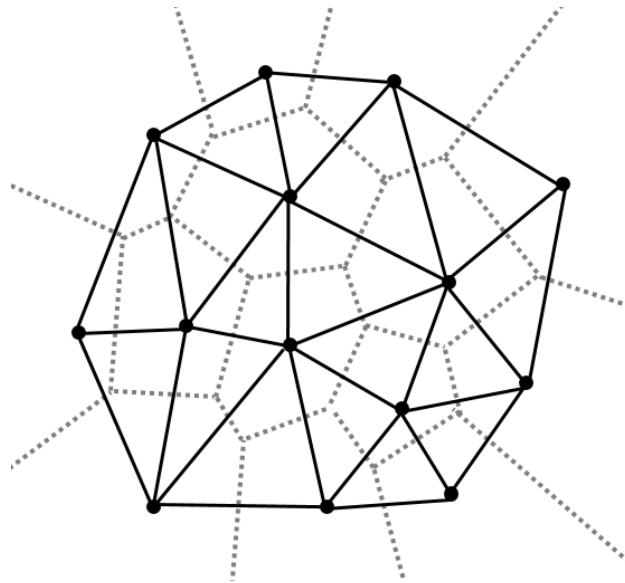
Segundo Lee e Schachter (1980), pode-se obter o DV pelo processo de crescimento de regiões. Este procedimento funciona do seguinte modo: suponha que cada ponto de um conjunto de dados seja um núcleo de uma célula de crescimento (célula de Voronoi). Todas as células irão crescer em todas as direções, afastando-se de seu núcleo, simultaneamente e de maneira uniforme. A borda ou limite de uma célula de crescimento será definido nos locais onde houver o contato com a borda de outra célula de crescimento – células vizinhas. O DV define uma estrutura geométrica formada por estas células.

Devido à característica de dualidade, se o DV for utilizado como base, é possível gerar a triangulação de Delaunay e vice-versa. Esta triangulação pode ser alcançada por meio da criação de linhas, conectando núcleos de células vizinhas do DV (EL-SHEIMY et al., 2005). Para isso, existem algumas condições, como as descritas por Lee e Schachter (1980):

- O conjunto de pontos $V = \{v_1, v_2, \dots, v_n\}$ não pode ser colinear, assim como não pode haver quatro pontos cocirculares em V .
- Para o conjunto V , uma aresta formada por v_i e v_j é uma aresta de Delaunay, se não houver nenhum ponto de V dentro da circunferência passante por v_i e v_j .
- Para o mesmo conjunto V , um triângulo, formado por v_i, v_j e v_k , é um triângulo de Delaunay, se a circunferência formada por seus vértices (v_i, v_j e v_k) não contiver nenhum ponto de V em seu interior.

A seguir, é mostrada uma representação da dualidade entre a triangulação de Delaunay e o Diagrama de Voronoi (Figura 5).

Figura 5. Dualidade entre diagrama de Voronoi (linhas tracejadas) e a triangulação de Delaunay (linhas contínuas).



Adaptado de Lee e Schachter (1980).

Como este trabalho se baseia na análise de triângulos, sobre uma nuvem formada por pontos irregularmente espaçados, o critério de Delaunay foi aplicado para determinar uma triangulação única. O diagrama de Voronoi, por sua vez, será utilizado no processo de mosaicagem das ortoimagens verdadeiras, visto que, sua característica assemelha-se à busca por pontos próximos ao ponto nadir no terreno, considerando estes como núcleos de células de Voronoi (como apresentado nos itens seguintes). Esta consideração será explicada em detalhes no Capítulo 3, que descreve o método proposto nesta tese.

2.1.2.3 Subamostragem de conjunto de pontos de modo adaptativo

A utilização de uma superfície poliédrica, formada pela estrutura de dados TIN, tem como vantagem a possibilidade de representação da superfície com diferentes densidades. Isso faz com que determinadas regiões e objetos possam ter amostragem adequadas às suas características. Como exemplo, cita-se uma região de terreno plano com a presença de algumas edificações. O terreno não precisa de uma alta densidade de pontos para ser representado, devido a sua característica plana. Já as edificações devem ser representadas por uma maior quantidade de pontos, em virtude da descontinuidade da superfície entre telhados, fachadas e terreno, portanto, quanto maior o número de pontos, melhor será a modelagem.

Com o avanço tecnológico, tornou-se fácil a aquisição de conjunto de pontos 3D em uma alta densidade, principalmente quando se trata de sistemas de varredura a LASER terrestres. Entretanto, para o caso aéreo, as nuvens de pontos oriundas de técnicas fotogramétricas também fornecem uma alta densidade de pontos – podendo ser superior aos dados de SVLA.

A alta densidade das nuvens de pontos tem alta influência na tarefa de processamento, principalmente no que concerne a manipulação e cálculo de descritores sobre esses dados. Para o método proposto nesta tese, quanto maior a densidade de pontos, maior o número de triângulos de Delaunay usados e, conseqüentemente, maior o tempo de processamento despendido para a detecção de áreas de oclusão. Considerando essa característica do processamento de nuvem de pontos, faz-se necessária uma explanação sobre o processo de subamostragem. A ideia da utilização de dados subamostrados é avaliar a influência da redução da densidade de pontos, na detecção de oclusão e geração de ortoimagem verdadeira, para um conjunto de dados de alta densidade.

Existem duas maneiras simples de subamostrar um conjunto de pontos, aleatoriamente ou via intervalos fixos. O método aleatório simplesmente exclui uma quantidade pré-estabelecida de pontos. Ao considerar intervalos fixos, uma porcentagem dos dados é excluída determinando que a cada n pontos, um é eliminado. O problema dessas duas abordagens é a perda de detalhes em áreas de baixa densidade de pontos – a qual contradiz a vantagem da utilização de uma representação TIN (LIN e HABIB, 2015).

Uma alternativa para solucionar esse problema é realizar o processo de subamostragem considerando densidade local de pontos, denominado estratégia adaptativa de subamostragem (AL-DURGHAM, 2014). A ideia geral deste método é determinar a densidade local de pontos

para uma dada vizinhança, obtida via análise de componentes principais ou via método baseado em cilindro adaptativo, como apresentado por Lari (2014), e realizar a subamostragem apenas das regiões que atendam a um critério pré-estabelecido de densidade mínima (AL-DURGHAM, 2014). Para realização da subamostragem é de extrema importância a caracterização da nuvem de pontos e estruturação da mesma, utilizando métodos como o *Kd-tree* (FRIEDMAN et al., 1977).

Parte dos dados utilizados neste trabalho foram subamostrados utilizando a técnica mencionada anteriormente, considerando a densidade local de pontos. Para maiores informações sobre esta abordagem sugere-se a trabalho de Lari (2014).

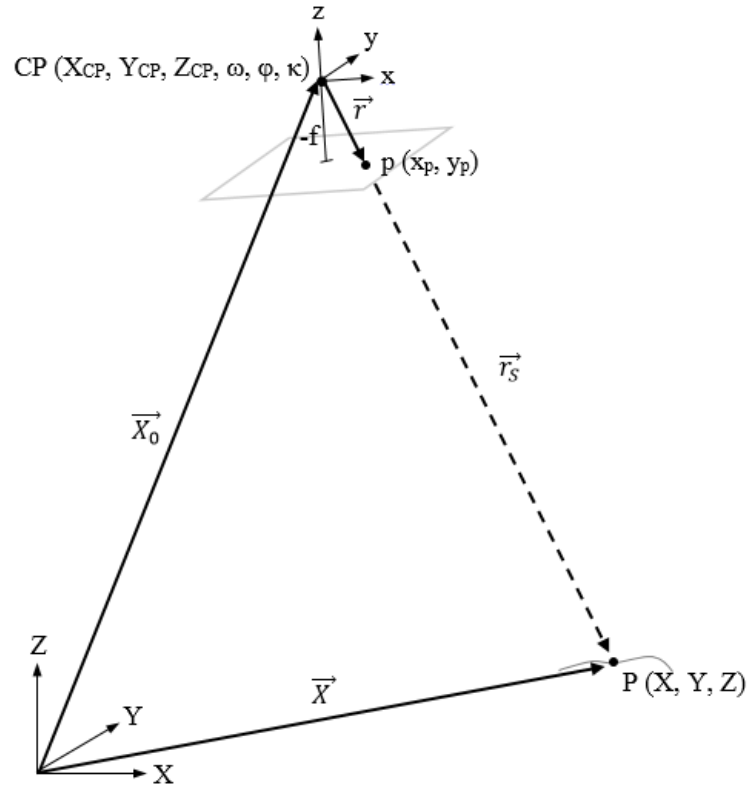
2.2 Modelo de colinearidade

As equações de colinearidade podem ser consideradas a base da Fotogrametria Analítica e Digital. Nessa formulação, a princípio, é considerada a relação entre um ponto no espaço objeto, o seu ponto correspondente na imagem, e o ponto que representa o centro perspectivo de uma câmara (KRAUS, 2007). No escopo deste trabalho, essas equações possuem grande importância, pois estão relacionadas tanto ao processo de ortorretificação quanto ao método de detecção de oclusão proposto.

As equações de colinearidade são criadas ao estabelecer que esses três pontos citados (CP, ponto na imagem e correspondente na superfície) formam uma reta. Para determinar matematicamente esta relação, pode-se realizar um desenvolvimento geométrico, via semelhança de triângulos (KRAUS, 2007), ou algébrico, via soma de vetores (MIKHAIL et al., 2001).

A seguir, descreve-se o desenvolvimento algébrico, adaptado de Mikhail et al. (2001), para obtenção das equações de colinearidade, tanto direta quanto inversa. Para melhor entendimento, todos os elementos necessários ao desenvolvimento das equações são apresentados na Figura 6.

Figura 6. Elementos necessários para desenvolvimento das equações de colinearidade.



Segundo Mikhail et al. (2001), os seis parâmetros de orientação exterior da imagem (X_{CP} , Y_{CP} , Z_{CP} , ω , φ , κ), as coordenadas de um ponto no terreno P (X , Y , Z) e seu correspondente na imagem p (x_p , y_p), já considerando o deslocamento do ponto principal e a correção dos erros sistemáticos, podem ser relacionados pela condição de colinearidade. Essa condição pode ser representada por vetores no sistema de coordenadas do espaço imagem ou do espaço objeto. Porém, a um desses sistemas deve-se aplicar uma translação, uma rotação e um fator de escala. Inicialmente, têm-se:

$$\vec{r} = \begin{bmatrix} x_p \\ y_p \\ -f \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$\vec{r}_s = \lambda^{-1} * M^T * \vec{r} \quad (3)$$

$$\vec{X} = \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$\vec{X}_0 = \begin{bmatrix} X_{CP} \\ Y_{CP} \\ Z_{CP} \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$M = \begin{bmatrix} \cos \varphi \cos \kappa & \cos \omega \sin \kappa + \sin \omega \sin \varphi \cos \kappa & \sin \omega \sin \kappa - \cos \omega \sin \varphi \cos \kappa \\ -\cos \varphi \sin \kappa & \cos \omega \cos \kappa - \sin \omega \sin \varphi \sin \kappa & \sin \omega \cos \kappa + \cos \omega \sin \varphi \sin \kappa \\ \sin \varphi & -\sin \omega \cos \varphi & \cos \omega \cos \varphi \end{bmatrix} \quad (6)$$

$$M = \begin{bmatrix} m_{11} & m_{12} & m_{13} \\ m_{21} & m_{22} & m_{23} \\ m_{31} & m_{32} & m_{33} \end{bmatrix} \quad (7)$$

em que:

\vec{r} é o vetor posicional do ponto p no espaço imagem;

\vec{r}_S é o vetor posicional do ponto p no espaço objeto;

\vec{X}_0 é o vetor posicional do CP no espaço objeto;

\vec{X} é vetor posicional do ponto P no espaço objeto;

M é a matriz de rotação em função da atitude do CP (ω, ϕ, κ);

λ é o fator de escala entre o espaço imagem e objeto.

Considera-se, algebricamente, que $\vec{X} = \vec{X}_0 + \vec{r}_S$. Para se determinar as coordenadas no espaço imagem (\vec{r}) em função do CP (\vec{X}_0) e do ponto no espaço objeto (\vec{X}) - colinearidade direta - aplica-se uma rotação e escala sobre o sistema do espaço-imagem, tendo a seguinte formulação:

$$\vec{r}_S = \vec{X} - \vec{X}_0 \quad (8)$$

$$\lambda^{-1} * M^T * \vec{r} = \vec{X} - \vec{X}_0 \quad (9)$$

$$\vec{r} = \lambda * M * (\vec{X} - \vec{X}_0) \quad (10)$$

Substituindo [2], [4], [5] e [7] em [10], têm-se:

$$\begin{bmatrix} x_p \\ y_p \\ -f \end{bmatrix} = \lambda * \begin{bmatrix} m_{11} & m_{12} & m_{13} \\ m_{21} & m_{22} & m_{23} \\ m_{31} & m_{32} & m_{33} \end{bmatrix} * \left(\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} X_{CP} \\ Y_{CP} \\ Z_{CP} \end{bmatrix} \right) \quad (11)$$

$$x_p = \lambda * [m_{11} * (X - X_{CP}) + m_{12} * (Y - Y_{CP}) + m_{13} * (Z - Z_{CP})] \quad (12)$$

$$y_p = \lambda * [m_{21} * (X - X_{CP}) + m_{22} * (Y - Y_{CP}) + m_{23} * (Z - Z_{CP})] \quad (13)$$

$$-f = \lambda * [m_{31} * (X - X_{CP}) + m_{32} * (Y - Y_{CP}) + m_{33} * (Z - Z_{CP})] \quad (14)$$

Isolando o valor de λ pela Equação 14, têm-se:

$$\lambda = \frac{-f}{m_{31} * (X - X_{CP}) + m_{32} * (Y - Y_{CP}) + m_{33} * (Z - Z_{CP})} \quad (15)$$

Substituindo [15] em [12] e [13], têm-se as equações de colinearidade direta:

$$x_P = -f * \frac{m_{11} * (X - X_{CP}) + m_{12} * (Y - Y_{CP}) + m_{13} * (Z - Z_{CP})}{m_{31} * (X - X_{CP}) + m_{32} * (Y - Y_{CP}) + m_{33} * (Z - Z_{CP})} \quad (16)$$

$$y_P = -f * \frac{m_{21} * (X - X_{CP}) + m_{22} * (Y - Y_{CP}) + m_{23} * (Z - Z_{CP})}{m_{31} * (X - X_{CP}) + m_{32} * (Y - Y_{CP}) + m_{33} * (Z - Z_{CP})} \quad (17)$$

De maneira análoga, a partir da Equação 9, é possível determinar as coordenadas planimétricas (X e Y) do ponto situado no espaço objeto. Para tal, é necessário ter informações altimétricas do terreno (Z a partir de um MDE). Assim, obtém-se o seguinte desenvolvimento:

$$\vec{X} = \vec{X}_0 + \vec{r}_S \quad (18)$$

$$\vec{X} = \vec{X}_0 + \lambda^{-1} * M^T * \vec{r} \quad (19)$$

Substituindo [2], [5] e [7] em [19], têm-se:

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_{CP} \\ Y_{CP} \\ Z_{CP} \end{bmatrix} + \lambda^{-1} * \begin{bmatrix} m_{11} & m_{21} & m_{31} \\ m_{12} & m_{22} & m_{32} \\ m_{13} & m_{23} & m_{33} \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} x_p \\ y_p \\ -f \end{bmatrix} \quad (20)$$

$$X = X_{CP} + \lambda^{-1} * [m_{11} * x_p + m_{21} * y_p + m_{31} * -f] \quad (21)$$

$$Y = Y_{CP} + \lambda^{-1} * [m_{12} * x_p + m_{22} * y_p + m_{32} * -f] \quad (22)$$

$$Z = Z_{CP} + \lambda^{-1} * [m_{13} * x_p + m_{23} * y_p + m_{33} * -f] \quad (23)$$

Isolando o valor de λ^{-1} a partir da Equação 23, tem-se:

$$\lambda^{-1} = \frac{Z - Z_{CP}}{m_{13} * x_p + m_{23} * y_p + m_{33} * -f} \quad (24)$$

Substituindo [24] em [21] e [22], têm-se as equações de colinearidade inversa:

$$X = X_{CP} + (Z - Z_{CP}) * \frac{m_{11} * x_p + m_{21} * y_p + m_{31} * -f}{m_{13} * x_p + m_{23} * y_p + m_{33} * -f} \quad (25)$$

$$Y = Y_{CP} + (Z - Z_{CP}) * \frac{m_{12} * x_p + m_{22} * y_p + m_{32} * -f}{m_{13} * x_p + m_{23} * y_p + m_{33} * -f} \quad (26)$$

O método proposto nesta tese utiliza as equações de colinearidade como modelo matemático para transformação de coordenadas entre espaço imagem e espaço objeto.

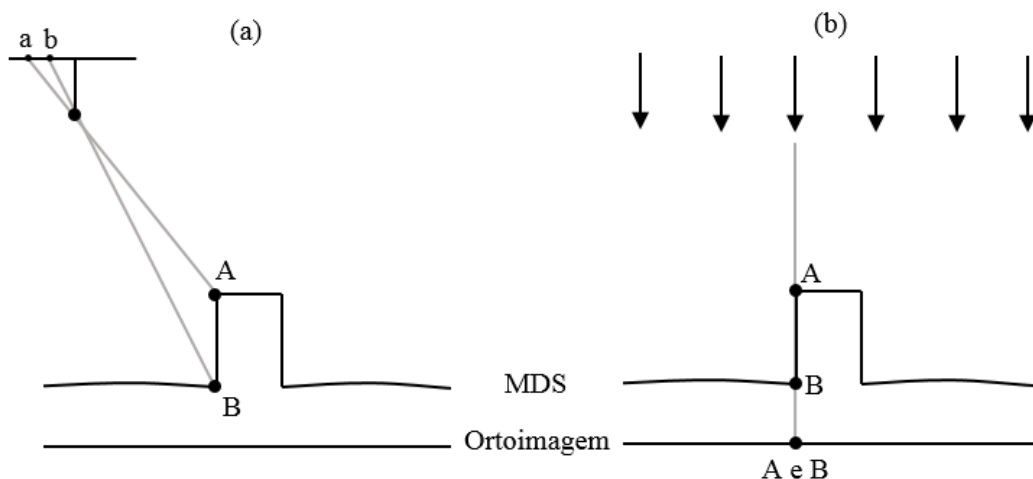
2.3 Ortorretificação de imagens

A ortorretificação convencional, como já dito, visa eliminar os efeitos causados pela atitude do sensor no instante da tomada da fotografia aérea, pelos erros inerentes ao sensor (erros sistemáticos) e devido ao deslocamento causado pela variação do relevo, sendo o produto gerado com essas correções a ortoimagem convencional.

O principal objetivo, portanto, é possibilitar o uso dessas imagens corrigidas em tarefas de medições, tais como ângulos, distâncias, áreas, perímetros, entre outras. Para isso, deve-se transformar o que foi adquirido em projeção de perspectiva central (Figura 7 (a)) em uma projeção ortogonal como nos mapas (Figura 7 (b)).

Na projeção de perspectiva central, objetos situados em uma mesma posição planimétrica, porém, com diferentes altitudes (comum no MDS), são projetados em diferentes posições na imagem, o que implica em não uniformidade na escala da imagem (Figura 7 (a)). Já na projeção ortogonal, a escala é mantida e todos os elementos da imagem são apresentados em suas corretas posições planimétricas (Figura 7 (b)) (MIKHAIL et al., 2001).

Figura 7. (a) Visada em perspectiva central. (b) Visada ortogonal.



Essa mudança de projeção é possível com o uso de um MDS e com os parâmetros de orientação interior e exterior do sensor utilizado na aquisição das imagens. O modelo digital de superfície é empregado para eliminar o deslocamento causado pela variação de altura de

objetos acima do terreno (pontos diferentes com as mesmas coordenadas planimétricas e diferentes coordenadas altimétricas) e permitir que a nova imagem seja reprojeta de forma totalmente ortogonal (NIELSEN, 2004).

Durante o processo de ortorretificação também é feito o refinamento de coordenadas, corrigindo-se as distorções radiais simétricas, distorções descentradas e refração atmosférica, além de reduzir as coordenadas ao ponto principal e considerar parâmetros de afinidade. Alguns autores apresentam a formulação matemática para tal refinamento, como é o caso de Conrady (1919), Brown (1966), Andrade e Olivas (1981), Andrade (1998), Wolf e Dewitt (2000), Mikhail et al. (2001) e Galo e Tommaselli (2011).

2.3.1 Método direto e indireto

O processo de ortorretificação pode ser realizado de forma direta ou indireta, conforme apresentado por Mikhail et al. (2001):

Processo direto: nesse método os pixels presentes na imagem (perspectiva central) são relacionados às células do MDE (*groundels*), utilizando-se as informações do CP, por meio da equação de colinearidade na forma inversa (Equações 25 e 26) e do processo de monorrestituição (RADWAN e MAKAROVIC, 1980). Com isso, para cada pixel da imagem é possível determinar suas respectivas coordenadas no sistema de referência terrestre e, conseqüentemente, na imagem de saída, ortorretificada. Desse modo, é possível atribuir os valores de brilho (informações radiométricas) presentes na imagem original para a imagem ortorretificada, após um processo de interpolação sobre a imagem de saída, para saber em qual pixel da ortoimagem essa tonalidade será atribuída.

Processo indireto: Inicialmente, cada pixel da imagem de saída (ortoimagem), a princípio “vazia” em termos de atributo, é relacionado a um elemento do MDE. Nesse instante, têm-se as coordenadas no terreno desses pontos, juntamente com os parâmetros de orientação do sensor (POI e POE), sendo, assim, possível determinar o valor correspondente na imagem – coordenadas fotogramétricas, por meio da equação de colinearidade direta (Equações 16 e 17) – e, posteriormente, transformá-las em coluna/linha. Tais valores são então utilizados no processo de interpolação do valor de brilho dos pixels da imagem de entrada, a fim de atribuir uma tonalidade apropriada ao pixel correspondente na ortoimagem que está sendo gerada.

Vale ressaltar que o tratamento dos erros sistemáticos ocorre de maneira distinta entre as equações de colinearidade direta e inversa, principalmente para o caso em que câmaras não métricas são usadas para aquisição de imagens. Detalhes sobre este procedimento de correção de erros sistemáticos podem ser encontrados em Machado et al. (2004).

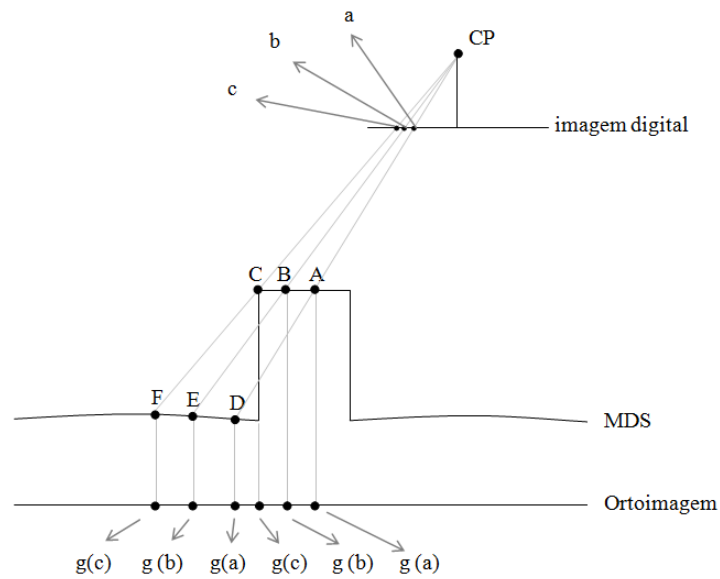
2.3.2 Duplo mapeamento e áreas de oclusão

Como mencionado, para ortorretificar uma imagem é necessária a utilização de um MDE (MDT ou MDS) como fonte de informação da superfície. Muitos projetos fotogramétricos executados no Brasil estão relacionados a mapeamento de áreas que englobam, em sua maioria, regiões rurais, sendo necessário o uso de um MDE que represente apenas o terreno, ou seja, um MDT. Porém, a aplicação de um MDT permite apenas a correção do deslocamento causado pela variação de altitude do terreno, não levando em conta os elementos sobre o mesmo, tais como árvores, edificações, pontes, dentre outros. Logo, para áreas urbanas, cuja densidade de edificações é alta, faz-se necessário o uso de um MDS, para que todos os objetos sobre o terreno sejam considerados no processo de ortorretificação, evitando, dessa forma, a representação de objetos em projeção não ortogonal.

Entretanto, o uso de um MDS no processo de ortorretificação implica no aparecimento de um efeito denominado duplo mapeamento, como apresentado por Nielsen (2004), Habib et al. (2007) e Oliveira (2013).

Analisando a Figura 8, é possível notar que esse efeito decorre da concorrência de mais de um *groundel* por um mesmo pixel da imagem de entrada. No exemplo, os pixels *a*, *b* e *c* possuem relação com mais de um *groundel* cada. O Pixel *a* relaciona-se com os *groundels* A e D; *b* com B e E; *c* com C e F. Porém, é possível observar que os *groundels* D, E e F pertencem ao terreno e não são visíveis ao CP. Portanto, durante o processo de ortorretificação, a ortoimagem será preenchida com tonalidades referentes apenas aos *groundels* A, B e C, gerando o efeito denominado duplo mapeamento. Essa ambiguidade pode ser observada pela repetição dos tons de cinza na ortoimagem: $g(a)$, $g(b)$ e $g(c)$.

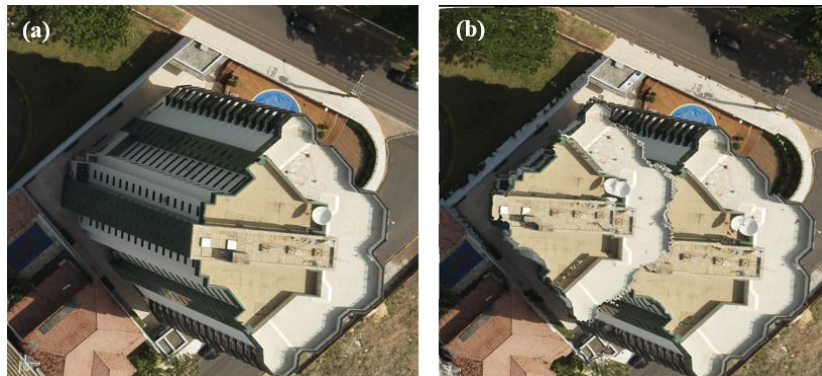
Figura 8. Concorrência entre *groundels* e o efeito de duplo mapeamento.



Adaptado de Habib et al. (2007).

Ao analisar a Figura 9 (a), percebe-se uma imagem que a princípio, em perspectiva central, apresenta a edificação como se estivesse “deitada” sobre a superfície do terreno (*layover*). Após o processo de ortorretificação com a utilização de um MDS como representação da superfície, os topos das edificações são projetados em suas corretas posições, porém com o efeito de duplo mapeamento (Figura 9 (b)). Neste produto, a representação original da imagem continua aparecendo como uma imagem “fantasma” – razão pela qual alguns trabalhos denominam este resultado de *ghost-image*, com em Nielsen (2004) e Günay et al.(2007).

Figura 9. (a) Imagem original com deslocamento da feição devido à projeção perspectiva. (b) Efeito de duplo mapeamento.



Fonte: Oliveira (2013).

O efeito de duplo mapeamento permite identificar, visualmente, a porção da imagem não visível a partir do CP. Essa região é denominada área de oclusão (Figura 10), sendo sua detecção e compensação, os objetivos principais deste trabalho.

Figura 10. Área de oclusão, representada em vermelho.



2.3.3 Ortoimagem convencional e verdadeira

Essencialmente, a diferença entre a ortorectificação convencional e a verdadeira se dá pela utilização ou não de um modelo digital de superfície, detecção de oclusão e compensação dessas áreas (preenchimento). Para Mikhail et al. (2001), uma representação fotográfica com correção apenas do efeito do deslocamento devido à variação do relevo, conseqüentemente com a mesma característica geométrica de um mapa topográfico (sem considerar as edificações), é denominada ortorectificação convencional.

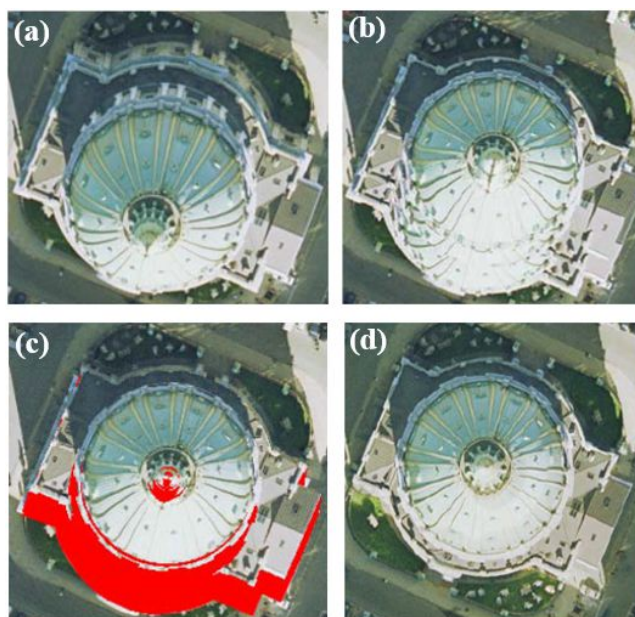
Para Habib et al. (2007), uma ortorectificação convencional é um produto caracterizado por ter uma escala uniforme e que mostra os objetos, ao nível do terreno, em sua real posição geográfica. Para Wolf e Dewitt (2000), uma ortorectificação convencional é uma fotografia que apresenta os objetos, ao nível do terreno, em sua posição ortorectificada verdadeira. Em Kraus (2007), encontra-se a definição de ortorectificação convencional como uma fotografia geometricamente correta, ou seja, transformada de uma perspectiva central para ortogonal, utilizando um MDT. Assim como em Wolf e Dewitt (2000), a definição encontrada em Mendonça Júnior (2010) é a de que uma ortorectificação convencional teve sua projeção central retificada para ortogonal, com eliminação das distorções decorrentes da tomada da própria fotografia e da variação do relevo.

O processo de ortorretificação, que considera todos os objetos sobre o terreno, gera um produto denominado ortoimagem verdadeira. Atualmente, esse termo é amplamente utilizado no meio científico e por empresas que trabalham com levantamentos aerofotogramétricos. Ao que tudo indica este termo iniciou-se com o trabalho de Amhar et al. (1998), sendo relacionado ao produto gerado pelo processo de ortorretificação, quando este utiliza um MDS como informação da superfície, ao invés de um MDT, e leva em consideração as oclusões causadas pelas feições presentes na superfície, além das respectivas compensações utilizando imagens adjacentes (preenchimento das áreas de oclusão).

O simples fato de utilizar um MDS no processo de ortorretificação, porém, não garante uma imagem com todas as feições perfeitamente retificadas, ou seja, com as áreas oclusas identificadas e reprojetaadas com as tonalidades corretas. Para isso, inicialmente, é necessária a identificação das oclusões e posterior preenchimento destas áreas, com informações radiométricas presentes em imagens adjacentes.

Com isso, tem-se uma imagem em escala única, com todos os elementos da superfície em posição ortogonal. Essa sequência pode ser observada na Figura 11, apresentada por Nilsen (2004): (a) imagem original, (b) duplo mapeamento, (c) detecção de oclusão e (d) preenchimento das áreas de oclusão com imagens adjacentes.

Figura 11. Sequência geral para geração de ortoimagem verdadeira. (a) Imagem original. (b) Efeito de duplo mapeamento. (c) Detecção de oclusão. (d) Preenchimento das áreas de oclusão com informações radiométricas de imagens adjacentes.



Fonte: Nielsen (2004).

Uma questão que deve ser destacada é o procedimento prático para geração de ortoimagem convencional, muitas vezes consideradas como ortoimagem verdadeira. Em muitas situações, o levantamento fotogramétrico é feito com grande sobreposição longitudinal e lateral e, também, com o uso de câmaras com distância focal que minimize os efeitos de oclusão. Dessa forma, é possível utilizar apenas as regiões centrais das imagens, nas quais os objetos sobre a superfície estão em projeção praticamente ortogonal. Esse tipo de abordagem é adequada, mas, a rigor, não caracteriza a geração de ortomagens verdadeiras, pois não há o tratamento de oclusões nem o preenchimento de tais áreas com informações radiométricas de imagens adjacentes. O que ocorre nesta abordagem é uma tentativa de minimizar os efeitos de deslocamento devido à variação de altura dos objetos sobre a superfície, ou seja, minimizar a presença de áreas de oclusão, o que não é possível por completo.

2.4 Mosaicagem de ortoimagem verdadeira

À medida que aumenta a área a ser mapeada, por meio de levantamentos fotogramétricos, é natural o uso de um maior número de imagens aéreas, para uma mesma escala de aquisição. Essas imagens devem ser coletadas com sobreposição longitudinal e lateral, para que seja possível a geração de um mosaico de ortomagens. O procedimento de junção de duas ou mais ortomagens, contíguas, a fim de se criar outra imagem que represente toda a área de interesse, é denominado mosaicagem (AGOURIS et al., 2004). A mosaicagem pode utilizar, como dado de entrada, tanto ortomagens convencionais quanto ortomagens verdadeiras. Para o caso em que se deseja gerar um mosaico com ortomagens verdadeiras, deve-se estabelecer um procedimento de seleção de qual imagem do bloco é a ideal para compensar radiometricamente uma determinada área de oclusão, o que pode ser feito por meio de uma função custo.

O produto final de um procedimento de mosaicagem – mosaico – possui as mesmas características de uma ortoimagem (escala constante) e radiometria balanceada, para que não haja diferenças visuais perceptíveis nas áreas de junção entre as imagens utilizadas (MILLER, 2004).

Segundo Nielsen (2004), as ortomagens contíguas (vizinhas) utilizadas para gerar o mosaico se conectam nas chamadas linhas de corte. A Figura 12 apresenta dois exemplos de linhas de corte, um com uma considerável diferença radiométrica (Figura 12 (b)), e outro onde não há uma alta variação radiométrica (Figura 12 (a)), porém, um mesmo objeto não

aparece em ambas as imagens (variação da cena durante as tomadas fotográficas). A posição exata em que as linhas são definidas pode ser obtida de maneira manual ou automática.

Figura 12. Exemplo de linhas de corte presentes em uma ortoimagem.



Para o procedimento de mosaicagem utilizando ortoimagens convencionais (baseadas em um MDT), é importante a definição, manipulação e tratamento destas linhas de corte, evitando, desse modo, que um mesmo objeto seja representado por dois diferentes pontos de vista, ou orientados para diferentes direções (devido às diferentes projeções centrais). Esse caso é comum em situações onde há edificações ao longo ou próximas à linha de corte. A Figura 13 apresenta um mosaico de ortoimagens convencionais em que é possível notar a má representação das edificações. Portanto, para estes produtos, a linha de corte não deve ser representada sobre objetos com variações de altura, devido ao diferente deslocamento em direções radiais para imagens adjacentes, e sim sobre superfícies sem variações, tais como ruas, rodovias e campo, onde este deslocamento não ocorre.

Figura 13. Efeitos encontrados em mosaico de ortoimagens convencionais de áreas urbanas.



As mesmas considerações, a respeito da localização da linha de corte, não precisam ser feitas quando se utilizam ortoimagens verdadeiras no processo de mosaicagem, pois todos os objetos acima do terreno estão projetados ortogonalmente, em razão da detecção e preenchimento de oclusões durante a ortorretificação. Com isso, há um alinhamento coerente das feições localizadas ao longo da linha de corte – para o caso em que sejam usadas imagens com parâmetros de orientação e MDS de boa qualidade. Conseqüentemente, para geração de mosaicos de ortoimagem verdadeira, apenas duas observações devem ser feitas:

- Determinar uma função de custo, para auxiliar a escolha da ortoimagem que fornecerá a informação radiométrica ideal (de acordo com o critério usado por esta função) para preenchimento das áreas de oclusão;
- Aplicar um procedimento para suavização das linhas de corte.

A seguir, serão apresentados métodos para a escolha da fonte da informação radiométrica e para a suavização de linhas de corte.

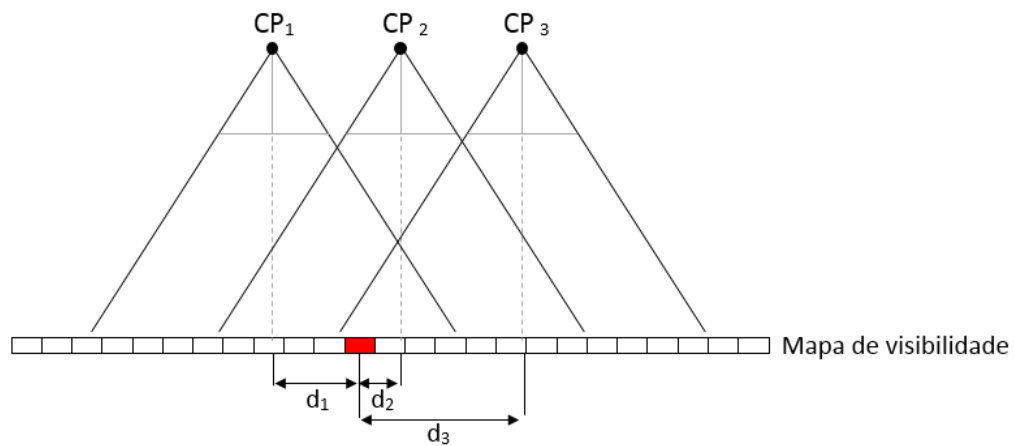
2.4.1 Funções de custo para a compensação de áreas de oclusão

As funções de custo diferenciam-se, basicamente, pela estratégia da escolha da imagem adjacente ideal para buscar informações radiométricas, visando o preenchimento de determinada área de oclusão. A seguir serão apresentadas as funções de custo, tendo por base os seguintes critérios: a proximidade com o ponto nadir e a orientação relativa da superfície em relação ao plano da imagem.

Proximidade com o ponto nadir: a função de custo mais comum, para processo de mosaicagem, considera que para um determinado pixel da ortoimagem, a imagem ideal para fornecer informação radiométrica é aquela cujo ponto nadir está mais próximo a ele. Quanto maior a distância entre um pixel e o ponto nadir, maior a influência de distorções presentes na imagem, devido à variação de relevo e ao conjunto de lentes (MIKHAIL et al., 2001). A aquisição de imagens com alta sobreposição longitudinal e lateral torna possível a utilização das regiões centrais de diversas imagens, minimizando, assim, as oclusões. Entretanto, essa alternativa não garante a identificação e a compensação das oclusões, e sim a diminuição deste efeito.

O procedimento baseado na proximidade do nadir seleciona a imagem ideal por meio da análise de distância (em 2D) entre o pixel da ortomagem que se deseja preencher e os pontos nadir de todas as imagens adjacentes do bloco. No exemplo destacado na Figura 14, o pixel em questão (em vermelho) é visível para todas as imagens. Porém, o ponto nadir mais próximo a ele refere-se à imagem 2 (CP_2), cuja distância d_2 é a menor. Portanto, é natural que a imagem 2 seja definida como fonte de informação radiométrica para o pixel em questão.

Figura 14. Função de custo baseada na proximidade com o ponto nadir no terreno.



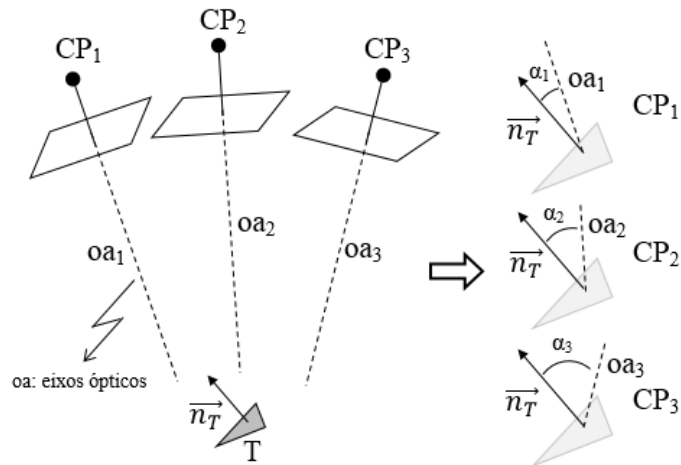
Outras explanações encontram-se nas seguintes referências: Schickler e Thorpe (1998) e Nielsen (2004).

Orientação relativa da superfície em relação ao plano da imagem: esta abordagem investiga as orientações de triângulos que representam a superfície em relação à direção dos eixos ópticos das câmaras, no instante de aquisição das imagens. A ideia principal deste procedimento é identificar qual imagem possui o eixo óptico mais paralelo à normal de um triângulo que se quer preencher com informações radiométricas – as quais formarão a imagem de saída. Esta função de custo foi utilizada por Schickler e Thorpe (1998), porém, na ocasião, os triângulos eram obtidos por meio de um MDC. Em Lari e Habib (2015) também é possível verificar tal procedimento, mas esta análise é feita sobre uma superfície plana segmentada (não triangular), com o objetivo de realizar a etapa de texturização de segmentos, extraídos de dados LASER, usando imagens aéreas.

A Figura 15 revela um cenário com três diferentes imagens. Os ângulos ($\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$) entre os vetores normais aos triângulos (\vec{n}_T) e os eixos ópticos das câmaras (oa_1, oa_2, oa_3), respectivamente, são apresentados. Para essa situação, α_1 é o menor ângulo, o que indica a

imagem 1 como uma potencial fonte de informação radiométrica, mesmo que o ponto nadir de CP_2 esteja mais próximo ao triângulo em questão.

Figura 15. Função de custo baseada na orientação da superfície em relação ao plano da imagem.



Alguns trabalhos, como os apresentados por Schickler e Thorpe (1998) e Nielsen (2004), também consideram a distância entre os *groundels* e as áreas de oclusão. Uma função que combina diferentes funções de custo pode ser aplicada para refinamento dos resultados.

No Capítulo 4 desta tese, referente aos experimentos e discussões, apresentar-se-á uma comparação de resultados obtidos por meio das duas funções de custo ora mencionadas.

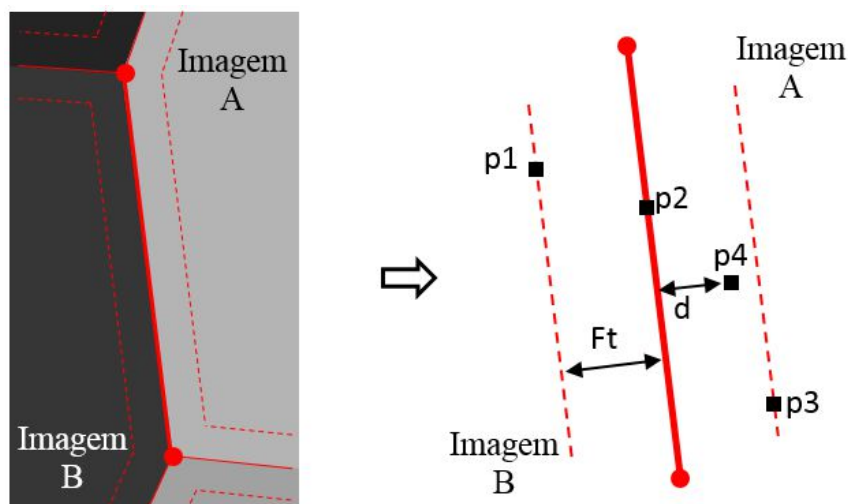
2.4.2 Método de suavização de linhas de corte

Após o processo de mosaicagem de ortoimagens verdadeiras, utilizando as imagens originais, nota-se a presença de linhas de corte no mosaico, devido à variação de iluminação em cada tomada de imagem, ao efeito de vinhete e à reflectância bidirecional. Portanto, visto que as imagens não passaram por um procedimento de ajuste radiométrico em bloco, surge a necessidade de uma compensação da resposta radiométrica de modo que não sejam percebidas diferenças ao longo das linhas de corte. Essas linhas podem ser geradas de maneira automática ou manual. Neste trabalho, a posição das linhas de corte serão as arestas das células do diagrama de Voronoi geradas ao considerar as posições dos CPs como pontos-semente (ou núcleos das células de Voronoi). Essa metodologia será descrita em detalhes no Capítulo 3, referente ao método proposto. A princípio, o procedimento apresentado nesta

subseção pode ser aplicado para a suavização de linhas de corte definidas por qualquer abordagem – automática ou manual.

O balanço de cores pode ser realizado por diferentes processos. Um deles é o método denominado *feathering*. Este procedimento visa eliminar a visualização das linhas de corte entre ortoimagens adjacentes, aplicando uma função de peso médio apresentada por Burt e Adelson (1983), na qual é feita a combinação linear dos valores de ND das imagens adjacentes. A Figura 16 apresenta todos os elementos necessários para o entendimento do método *feathering*. A linha de corte entre a imagem A e B é representada pela linha vermelha espessa. Para aplicar o *feathering* é necessário, *a priori*, definir uma área próxima à linha de corte, na qual se deseja considerar as tonalidades na função de peso médio. Essa área localiza-se entre as linhas serrilhadas vermelhas (Figura 16) e possui um *buffer* de largura igual a Ft (neste trabalho definido na ordem de 10 vezes o valor do GSD da ortoimagem final). A radiometria final dos pixels presentes no interior deste *buffer* será uma combinação linear dos valores de ND das duas imagens (A e B). A porcentagem de intensidade de cada imagem é definida de acordo com a distância d entre um pixel específico e a linha de corte. Assim, se a distância d for igual ou superior a Ft , a intensidade final do pixel será 100% da imagem correspondente à célula de Voronoi onde o ponto se localiza. Caso a distância d seja igual a zero (pixel localizado sobre a linha de corte), significa que o valor final será uma composição de 50% da imagem A e 50% da imagem B. Para um caso geral, a intensidade de saída será uma combinação linear das tonalidades das duas imagens, de acordo com a equação apresentada no Quadro 2, para o pixel $p4$. Para os exemplos apresentados na Figura 16, os valores de porcentagens para cada pixel p são descritos no Quadro 2.

Figura 16. Suavização via método *feathering*.



Quadro 2. Porcentagem de informação radiométrica de cada imagem, de acordo com os exemplos apresentados na Figura 16 para a suavização via *feathering*.

pixel	% da imagem A	% da imagem B
p1	0	100
p2	50	50
p3	100	0
p4	$\left[\frac{50 * d}{Ft} + 50 \right]$	$100 - \left[\frac{50 * d}{Ft} + 50 \right]$

2.5 Análise de qualidade

Como o objetivo principal deste trabalho é a detecção de áreas de oclusão a partir de um conjunto de pontos tridimensionais, devem-se realizar avaliações das áreas de oclusão detectadas pelo método proposto, assim como a qualidade do produto final (ortoimagem verdadeira). Duas formas de avaliação podem ser feitas: qualitativa e quantitativa.

A avaliação visual (qualitativa) é feita de forma intuitiva, pois visa basicamente uma análise da coerência do resultado. A ideia dessa avaliação é identificar se a área rotulada como oclusa realmente pertence à área de oclusão. Essa análise ajuda na validação de resultados durante a execução do método, além de servir como apoio para alterações na implementação do método proposto, no decorrer do seu desenvolvimento.

A avaliação quantitativa permite inferir numericamente sobre a coerência das áreas detectadas como oclusas, em relação ao que se considera como referência, bem como a comparação com diferentes métodos. Para que seja feita essa análise, a ser apresentada na discussão dos resultados, pode-se considerar o índice de qualidade denominado completude. Alguns trabalhos na literatura utilizam esses índices, como se observa em Wiedemann et al. (1998), Fazan e Dal Poz (2013) e Oliveira (2013). Para análise do mosaico de ortoimagens verdadeiras, é feita a avaliação do alinhamento de feições lineares (linhas de estacionamento, borda de telhado, etc.) presentes em áreas de transição entre duas ortoimagens.

Considerando essas duas formas de avaliação (completude e alinhamento de feições lineares), pode-se realizar uma comparação, tanto qualitativa quanto quantitativa, entre os resultados obtidos com o método proposto e dados de referência. A referência pode ser obtida por diferentes métodos encontrados na literatura, tais como: o *Z-buffer* e o Angular.

A aplicação do índice de completude pode ser encontrada em diferentes trabalhos. Em Wiedemann et al. (1998) esse índice foi aplicado para avaliar extração de feições lineares, comparando as feições extraídas com uma referência também linear (linhas x linhas). Já Fazan e Dal Poz (2013) utilizaram tal abordagem para avaliação de contornos de telhados extraídos de imagens aéreas, sendo comparadas feições lineares com uma referência expressa por um polígono (linhas x polígonos). Nesta tese, houve uma adaptação para o uso da completude relacionando informações pontuais (pixels) com áreas (polígonos).

Para o cálculo da completude é necessário dois conjuntos de dados: o polígono da área de oclusão utilizado como referência (criado manualmente, por exemplo) e também o conjunto de pixels detectados como oclusos pelo algoritmo considerado. A Figura 17 mostra em (a) a imagem original da edificação, em (b) o duplo mapeamento, em (c) o polígono de referência para oclusão (em vermelho), gerado manualmente, e em (d) o conjunto de pixels detectados como oclusos (em ciano).

Figura 17. Representação para entendimento do cálculo do índice de completude.

(a) Imagem original. (b) Duplo mapeamento. (c) Área de referência. (d) Detecção de oclusão.



Fonte: Oliveira (2013).

2.5.1 Índice de completude

A completude é o índice que mede a porcentagem da área de referência (polígono extraído manualmente – em vermelho na Figura 17 (c)), detectada também como oclusa pelo método proposto (pixels em ciano na Figura 17 (d)). O valor ideal esperado para esse índice é igual a 1, o que indica uma total completude do resultado de detecção de oclusão (100%).

$$\text{Completude} = \frac{\text{n}^{\circ} \text{ de pixels detectados como oclusos, internos ao polígono referência}}{\text{n}^{\circ} \text{ de pixels que formam o polígono de referência}}$$

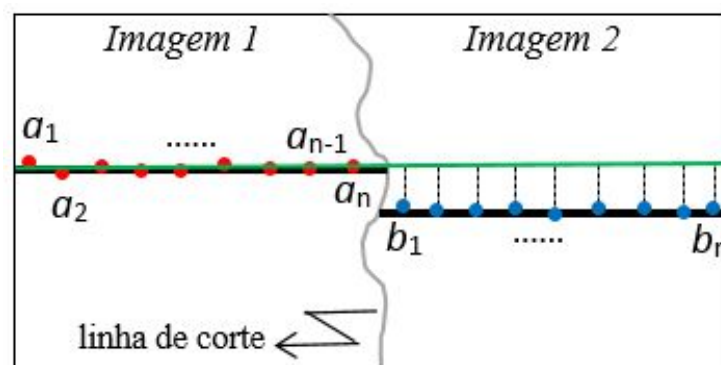
$$\text{Completude} \in [0; 1]$$

Outro índice de qualidade comumente utilizado é o nível de acerto – o qual apresenta a porcentagem dos pixels detectados como oclusos pelo método proposto, que realmente estão localizados dentro do polígono de referência (extraído manualmente, por exemplo), ou seja, a quantidade do resultado que foi rotulada corretamente. Entretanto, como apresentado por Oliveira (2013) e Oliveira et al. (2015a), este índice não tem impacto significativo quando se trata de geração de ortoimagens verdadeiras, pois toda área rotulada como oclusa (mesmo que detectada de forma errônea, ou seja, com baixo índice de acerto) será preenchida com informação condizente com a realidade, durante o processo de preenchimento de oclusão. Portanto, uma detecção de oclusão com baixo nível de acerto não implica na geração de produto final de má qualidade, diferentemente da completude.

2.5.2 Alinhamento de feições lineares em mosaicos

Após o processo de mosaicagem de ortoimagem verdadeira, no qual as áreas de oclusão já foram identificadas e compensadas com tonalidades de imagens adjacentes, deve-se analisar a qualidade da mosaicagem. Nesta etapa, o mosaico deve conter todas as feições alinhadas e bem representadas. Dependendo da qualidade dos parâmetros de orientação do sistema e do modelo digital de superfície, porém, o mosaico pode apresentar um mau alinhamento ao conectar imagens adjacentes (ANDRADE, 1998). Esses alinhamentos podem ser avaliados por meio de feições lineares. A Figura 18 apresenta os elementos necessários para o entendimento desse método de avaliação.

Figura 18. Alinhamento de feições lineares para a avaliação da qualidade geométrica de mosaicos.



Nota-se na Figura 18, a existência de uma feição linear L_1 (linha reta preta e espessa) que intercepta a linha de corte, sendo representada por duas imagens distintas (Imagem 1 e Imagem 2). A princípio, uma reta de referência (linha verde) é obtida utilizando os pontos que representam L_1 na Imagem 1 (a_1, a_2, \dots, a_n). O alinhamento do mosaico pode ser avaliado por meio do cálculo da distância média entre a linha de referência e os pontos que representam L_1 na Imagem 2 (b_1, b_2, \dots, b_n). O RMSE (*Root Mean Square Error*) pode ser considerado como uma medida de desalinhamento.

A análise do alinhamento é importante para a avaliação do produto obtido (mosaico de ortomagem verdadeira), devendo ser realizada antes da aplicação da suavização das linhas de corte, para facilitar a identificação das mesmas.

3. DETECÇÃO DE OCLUSÃO VIA MÉTODO BASEADO EM GRADIENTES DE SUPERFÍCIE

3.1 Considerações iniciais

O método proposto visa identificar áreas de oclusão em imagens aéreas, utilizando-se de um conjunto de pontos tridimensionais irregularmente espaçados, representados por um poliedro obtido por meio da estrutura de dados TIN. Ao triangular esses pontos, adotando-se o critério de Delaunay, uma superfície que representa a área de interesse é obtida – o poliedro. Essa estrutura, juntamente com as coordenadas limítrofes da área de interesse, assim como os POI da câmara, os POE das imagens, permite a definição de direções radiais e a identificação das áreas de oclusão.

Os deslocamentos radiais dos objetos presentes na imagem, tais como, edificações, árvores, pontes, etc., provocados pela variação de atitude da câmara e pela variação de relevo, ocorrem nestas direções, devido à projeção em perspectiva central em que são tomadas as imagens. Ao aplicar um procedimento de varredura para diversas direções radiais numa dada imagem, torna-se possível a identificação das áreas de oclusão, criando, assim, um mapa de visibilidade. Esse mapa armazena, para cada pixel da imagem de saída, a informação de visibilidade dos *groundels*.

Este trabalho apresenta como métrica o gradiente de altura da superfície (ou simplesmente gradiente de superfície), porém, considerando a nuvem de pontos original triangulada e representada como um poliedro – sem o uso de um processo de interpolação inicial e com diferentes densidades ao longo do MDS – o que o difere dos demais métodos encontrados na literatura, já descritos no Capítulo 1. Tais gradientes de superfície permitem identificar variações de altitude ao longo da superfície, em algumas direções. Essas variações são úteis para a identificação do início e, conseqüentemente, do fim das áreas de oclusão. Vale destacar que a nuvem de pontos utilizada como dado de entrada não deve conter *outliers* – sendo que tal procedimento de filtragem não será abordado neste trabalho.

O método proposto nesta seção pode ser considerado como uma melhoria de um estudo apresentado por Oliveira (2013), na qual alguns aspectos foram modificados. Dentre os pontos destacados como contribuição, em relação aos demais métodos, têm-se: a utilização de um poliedro como representação de superfície; o tratamento de múltiplas oclusões (intrínseco

ao método proposto); e a compensação de áreas de oclusão, considerando funções de custo, juntamente com o processo de mosaicagem.

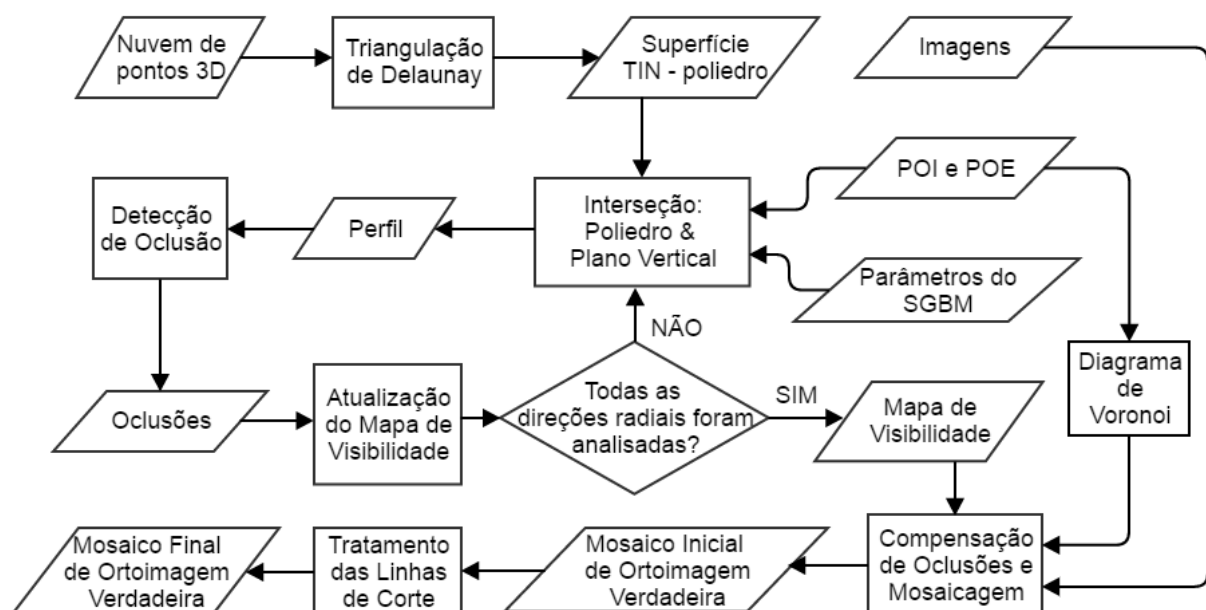
É relevante destacar que embora o processo de mosaicagem possa ser considerado como um procedimento à parte ao da detecção de oclusão, ele foi considerado como parte do método proposto, uma vez que após esta etapa é possível ter um ortomosaico. Assim, é possível fazer a avaliação da qualidade das ortoimagens geradas, por meio da análise do desalinhamento das feições em regiões próximas às linhas de corte.

O método apresentado nesta tese foi denominado “Método baseado em gradientes de superfície” ou apenas SGBM (*Surface-Gradient-Based Method*) e será exposto de agora em diante como SGBM.

A seguir, destacam-se as principais etapas do SGBM como pode ser visto no Fluxograma 1:

- Definição do espaço de busca (identificação do perfil – direção radial);
- Determinação dos gradientes de superfície;
- Identificação das áreas de oclusão e geração de mapa de visibilidade;
- Preenchimento de áreas de oclusão e mosaicagem de ortoimagens verdadeiras.

Fluxograma 1. Etapas que compõem o SGBM.



Na sequência será feito o detalhamento de cada uma dessas etapas, expondo a maneira com que o SGBM executa a detecção de oclusão e geração de ortomosaico verdadeira.

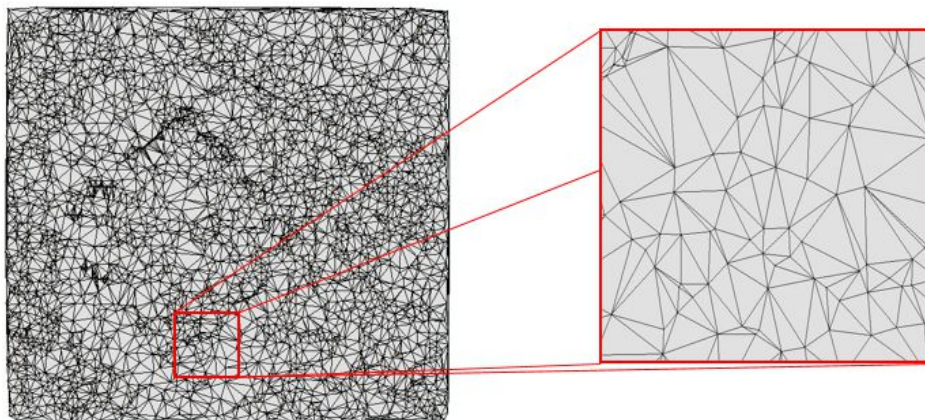
3.2 Definição do espaço de busca

O conjunto de pontos tridimensionais é, inicialmente, triangulado, seguindo-se o critério de Delaunay. Para esta etapa utilizaram-se funções capazes de realizar a triangulação, de acordo com o critério considerado, seguido de operações como a busca por triângulo que contém dado ponto, a identificação de triângulos vizinhos a um dado triângulo, dentre outros. Tais funções estão presentes na biblioteca Qhull (BARBER e HUHDANPAA, 2014).

O espaço de busca refere-se ao domínio obtido ao se explorar a superfície poliédrica. A maneira com que a superfície é analisada, em busca das oclusões, deve ter uma sequência lógica para que o método proposto possa ser implementado e executado. Em primeiro lugar, vale destacar a forma com que será representada a superfície. Com frequência, os dados de entrada necessitam de interpolações das alturas amostradas originalmente e, por conseguinte, incluem-se pontos que não representam com exatidão a superfície, além de não permitir a representação com diferentes densidades. Para evitar esse procedimento inicial de interpolação, resguardando a fidelidade das informações, definiu-se como alternativa a utilização de uma triangulação, por meio do critério de Delaunay, cuja ideia geral foi apontada na Subseção 2.1.

A Figura 19 apresenta um exemplo da estrutura de dados TIN, obtido pela triangulação de Delaunay, aplicada a um conjunto de pontos tridimensionais de uma dada região.

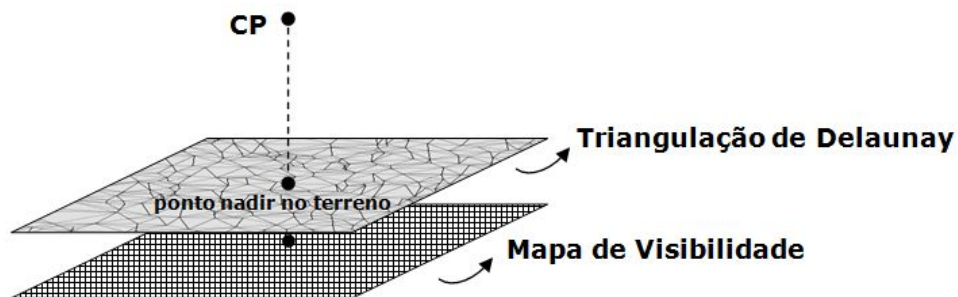
Figura 19. Estrutura de dados TIN via critério de Delaunay.



Considerando-se a triangulação (Figura 19) como correspondente à área total de cobertura de uma dada imagem aérea, pode-se determinar a projeção do ponto nadir sobre a superfície poliédrica - ponto nadir no terreno, conceito apresentado em Wolf e Dewitt (2000).

O conhecimento do triângulo que contém esse ponto é de extrema importância para a determinação das direções radiais. A busca por este triângulo é feita de forma hierárquica, identificando qual dos triângulos (faces do poliedro) contém em seu interior (considerando os vértices projetados em um datum) a projeção do CP – coordenadas planimétricas. Essa busca é feita, como mencionado anteriormente, por uma função da biblioteca Qhull, descrita no Capítulo 4.

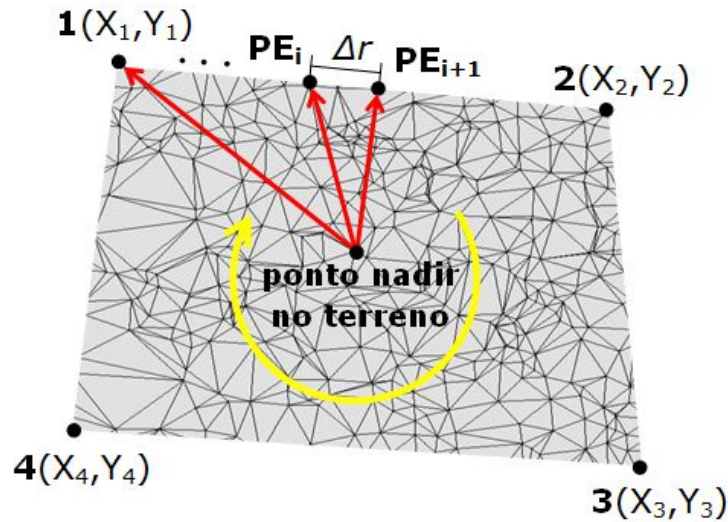
Figura 20. Ponto nadir sobre a superfície poliédrica e sobre o mapa de visibilidade.



Como mencionado, todo o deslocamento na imagem, devido à variação de altura na superfície, ocorre em direções radiais. Logo, as áreas de oclusão também ocorrem nessas direções, e a busca dessas regiões tem início no ponto nadir projetado no terreno e o término, em um ponto extremo (PE), correspondente a um dos pontos da borda da imagem (projetada na superfície poliédrica), ou seja, para cada direção radial utiliza-se um PE diferente. Cada direção radial, portanto, é formada por esses dois pontos, como pode ser observado na Figura 21.

Para aplicar o método proposto faz-se necessário conhecer o relevo em todas as direções radiais possíveis (perfis). As diferentes direções radiais são obtidas por meio da mudança de posição do PE, usando-se o parâmetro denominado Δr (distância entre duas posições sucessivas de PE). Esse parâmetro atualiza a coordenada do PE, de modo que esse ponto se desloque por toda a área limítrofe do poliedro subjacente à imagem. Essa mudança de direções radiais é realizada com início e término na posição 1 – no sentido horário (Figura 21). Para isso, é necessária a atualização das coordenadas X e Y do PE, de acordo com as formulações apresentadas no Quadro 3.

Figura 21. Determinação das direções radiais para detecção de oclusão.



Para a atualização de coordenadas do ponto PE, é necessário, inicialmente, calcular as distâncias entre os vértices da área de cobertura da imagem no espaço objeto. O número de vezes que as coordenadas do ponto PE são atualizadas (deslocamento de PE ao longo das laterais) é representado por n nas equações do Quadro 3 e pode ser determinado pela divisão entre a distância de vértices consecutivos da área de cobertura (em sentido horário) e o parâmetro Δr (considerando o valor inteiro da divisão). Para tal procedimento, utilizam-se as formulações do Quadro 3.

Quadro 3. Formulações para definições das direções radiais.

Lateral	Coordenadas X de PE	Coordenadas Y de PE	Nº de atualizações
1 – 2	$X_1 + \frac{i * \Delta r}{distância_{12}} * (X_2 - X_1)$	$Y_1 + \frac{i * \Delta r}{distância_{12}} * (Y_2 - Y_1)$	$0 \leq i \leq n_{12}$
2 – 3	$X_2 + \frac{i * \Delta r}{distância_{23}} * (X_3 - X_2)$	$Y_2 + \frac{i * \Delta r}{distância_{23}} * (Y_3 - Y_2)$	$0 \leq i \leq n_{23}$
3 – 4	$X_3 + \frac{i * \Delta r}{distância_{34}} * (X_4 - X_3)$	$Y_3 + \frac{i * \Delta r}{distância_{34}} * (Y_4 - Y_3)$	$0 \leq i \leq n_{34}$
4 – 1	$X_4 + \frac{i * \Delta r}{distância_{41}} * (X_1 - X_4)$	$Y_4 + \frac{i * \Delta r}{distância_{41}} * (Y_1 - Y_4)$	$0 \leq i \leq n_{41}$

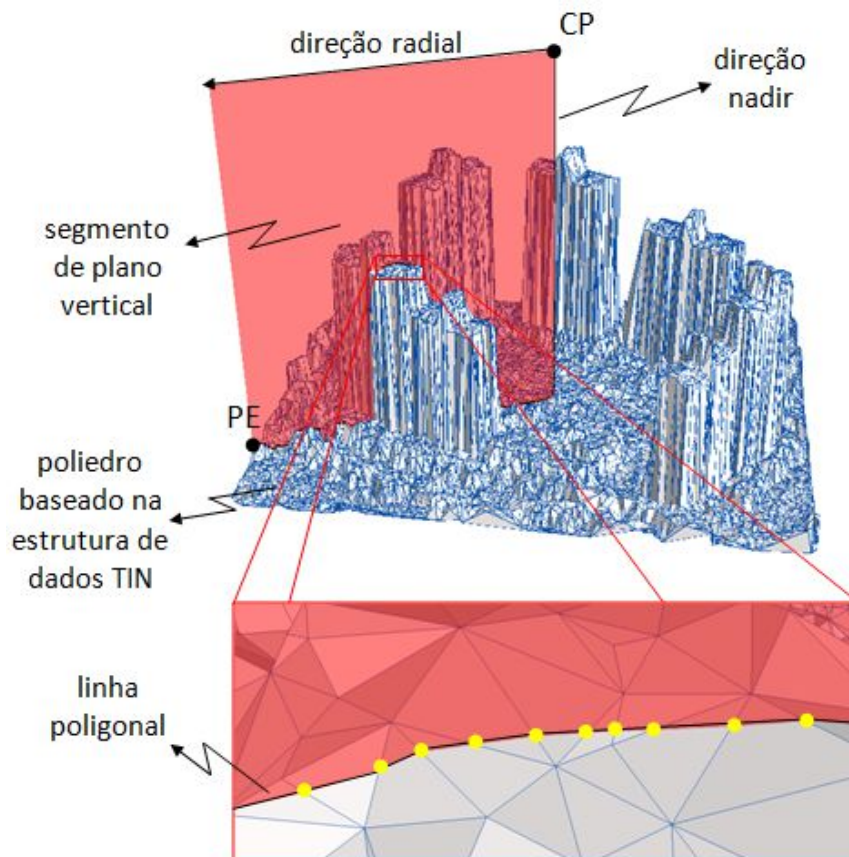
i : seqüência de atualizações das coordenadas de PE para cada lateral do MDS.

O término da detecção de oclusão se dá após todas as direções radiais estabelecidas serem analisadas (de acordo com o valor de Δr). É importante ressaltar que as coordenadas dos quatro vértices (1 a 4) são determinadas por meio do processo de monorrestituição.

O valor de Δr varia com a resolução desejada para a imagem de saída, e também em conformidade com a densidade aproximada da nuvem de pontos. Portanto, cada conjunto de dados requer um diferente valor de Δr (neste trabalho o valor utilizado para este parâmetro varia em torno do valor do GSD da imagem de saída). Vale ressaltar que este é um parâmetro de entrada do SGBM, que deve ser definido pelo usuário, de acordo com o conhecimento prévio sobre seus dados, assim como limitações no processamento (devido à quantidade de pontos do conjunto de dados e o equipamento utilizado).

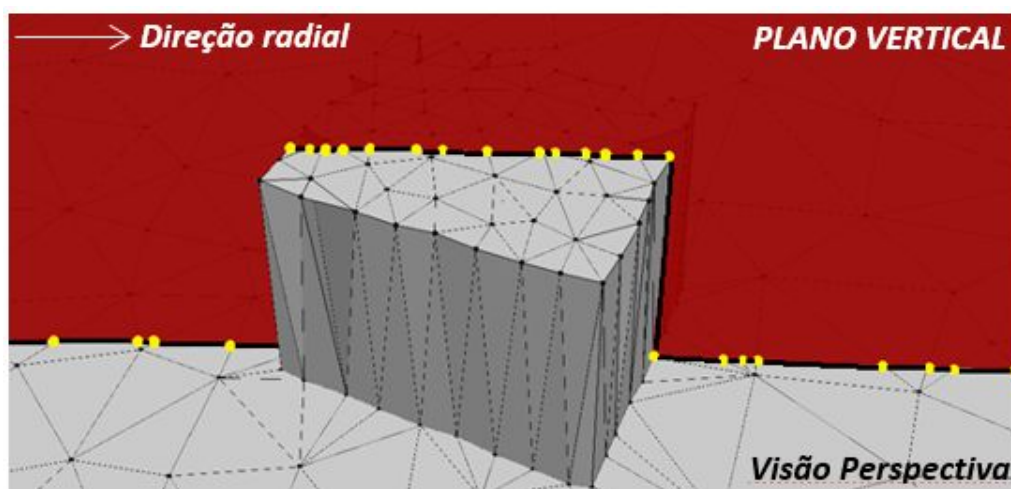
A Figura 22 contém a representação da superfície (via estrutura de dados TIN) e o plano vertical que representa a direção radial. Com a direção radial definida (para um dado ponto PE), realiza-se a interseção de um segmento de plano vertical – direção radial (em vermelho na Figura 22), formado por dois pontos: CP e PE, com a superfície poliédrica. As interseções deste segmento de plano com as arestas dos triângulos de Delaunay são pontos que formam uma linha poligonal (pontos em 3D) que representa o perfil desta direção radial (pontos amarelos em detalhe na Figura 22).

Figura 22. Representação do plano que intercepta o poliedro e determina os elementos da linha poligonal (perfil) para uma dada direção radial.



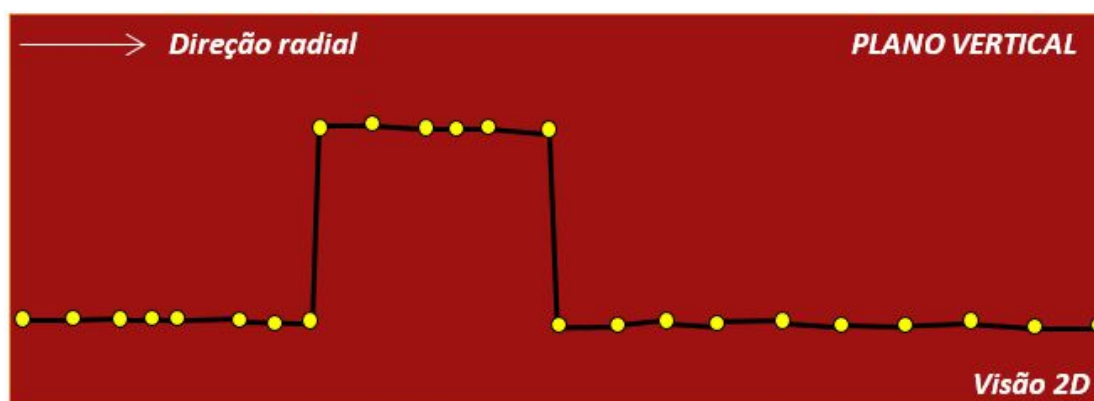
A Figura 23 apresenta essa linha poligonal, formada por segmentos de reta (em preto), juntamente com os vértices obtidos pela intersecção entre direção radial (plano vertical) e a superfície poliédrica. Cada segmento de reta formado entre dois desses vértices pertence a uma face do poliedro.

Figura 23. Intersecção de plano vertical com a superfície triangulada e obtenção da linha poligonal para uma direção radial – vértices em amarelo e segmentos de reta em preto.



Com a realização da intersecção, mostrada na Figura 23, é possível obter a linha poligonal (Figura 24), ao longo da qual a métrica proposta será aplicada. Posteriormente, torna-se possível a identificação do início das áreas de oclusão.

Figura 24. Linha poligonal (em preto) definida pela intersecção do plano vertical (em vermelho) e as faces do poliedro.



3.3 Determinação dos gradientes de superfície

O gradiente de superfície, ao longo das direções radiais (perfis), é a métrica adotada no método SGBM para detecção de oclusões. Os gradientes de superfície podem ser identificados por meio da variação da componente altimétrica entre pontos tridimensionais sucessivos, que formam o perfil, ao longo da direção radial, armazenados de maneira sequencial a partir do ponto nadir no terreno.

Ao obter a direção radial que será analisada, utiliza-se o seu perfil, de acordo com o atributo “Z” de cada um dos pontos. Assumindo que o perfil é composto por n pontos (interseção entre plano vertical e arestas das faces do poliedro), e que cada ponto possui altitude Z_i , com $i = \{1, 2, \dots, n-1, n\}$, pode-se fazer a determinação dos gradientes de superfície $\frac{\partial Z}{\partial r}$ na direção radial da seguinte forma:

$$\text{Se } 1 \leq i < n, \quad \frac{\partial Z}{\partial r_i} \cong \frac{Z_{i+1} - Z_i}{r_{i+1} - r_i}; \quad (27)$$

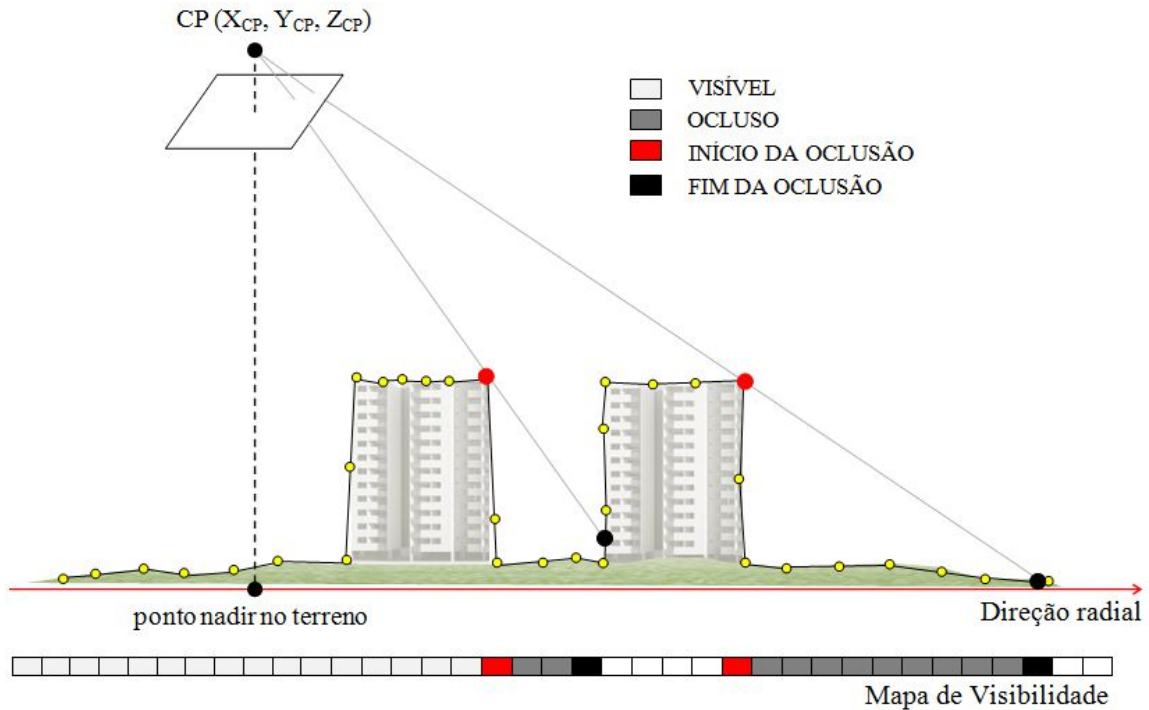
$$\text{Se } i = n, \quad \frac{\partial Z}{\partial r_i} \cong \frac{Z_n - Z_{n-1}}{r_n - r_{n-1}}; \quad (28)$$

Pode-se definir r de duas maneiras distintas, como segue:

- posição sequencial dos elementos do perfil (1, 2, ..., $n-1$, n), o que equivale a considerar apenas a variação de altura, no cálculo do gradiente, uma que o denominador das Equações 27 e 28 assumirá sempre o valor 1;
- distância entre i e o ponto nadir no terreno. Logo, para o cálculo do gradiente, a relação entre deslocamento planimétrico e variação de altura será considerada.

Os gradientes negativos, identificados para cada perfil, indicam a posição de início de áreas de oclusão, como apresentado pela Figura 25 (pontos em vermelho). Com os gradientes negativos identificados é possível iniciar a detecção das áreas de oclusão, projetando os mesmos na superfície poliédrica.

Figura 25. Representação do início de áreas de oclusão (gradientes negativos).



Neste trabalho, r foi considerado como a posição sequencial dos elementos do perfil, pois, mesmo que um objeto tenha pequena variação de altura (∂Z), de sinal negativo, ele deve ser considerado na detecção de oclusão, não sendo influenciado pelo espaçamento entre os elementos do perfil (∂r). Portanto, considera-se gradiente negativo, quando $\frac{\partial Z}{\partial r_i} < 0$ m. Entretanto, para que o usuário possa determinar quais objetos serão detectados, é utilizado um parâmetro positivo denominado Th . Esse parâmetro de entrada tem a função de permitir ao usuário selecionar quais tipos de estruturas (alturas de edificações, por exemplo) devem ser consideradas na detecção de oclusão, ou seja, é definido qual será a altura mínima dos objetos a serem identificados pelo método SGBM, por meio da seguinte formulação:

$$\text{Se } \frac{\partial Z}{\partial r_i} \leq -Th, \text{ então considera-se o objeto na detecção de oclusão.} \quad (29)$$

Para os projetos de Fotogrametria em que um operador irá restituir manualmente as feições presentes na cena, visando a determinação das oclusões, esse parâmetro corresponde ao que seria a resposta para a pergunta: “Quais feições devem ser restituídas?”, ou seja, feições com altura superior a Th (ou seja, gradiente de superfície $< -Th$) devem ser restituídas e consideradas no processo de detecção de oclusão. Portanto, assumindo que a oclusão seja

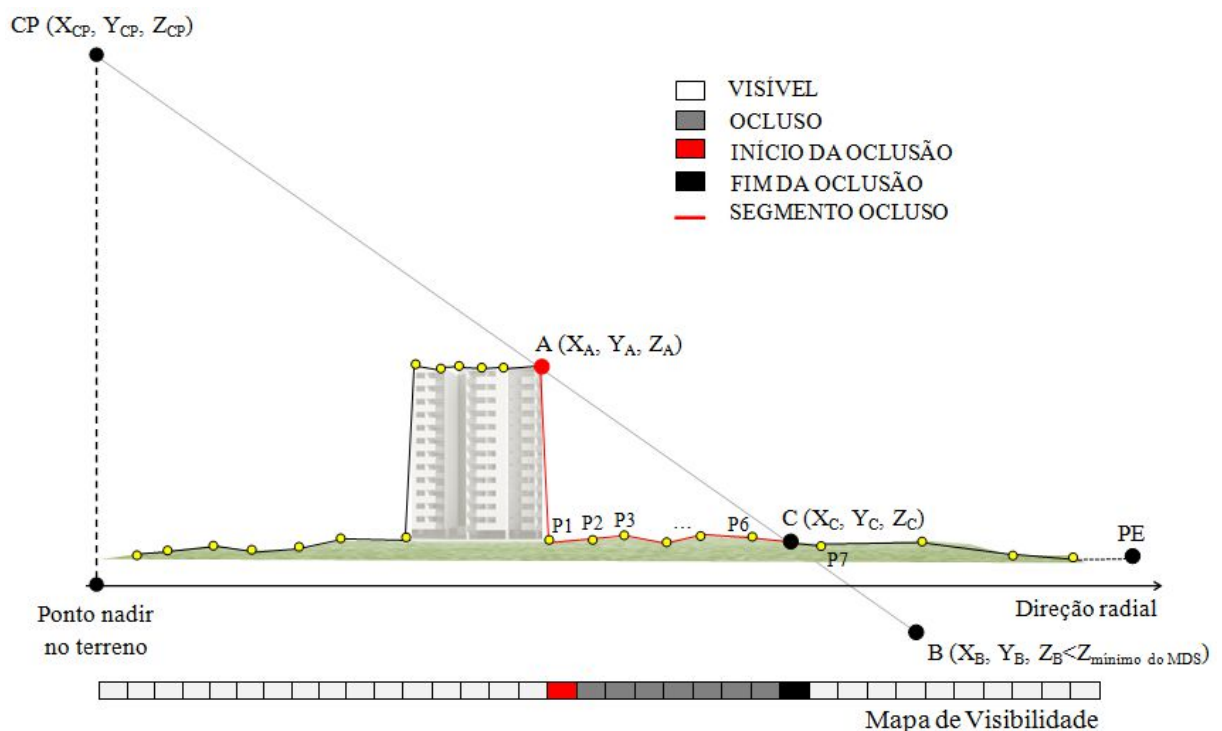
determinada apenas para edificações acima de 10 m, deve escolher $Th = 10$ m. Para o caso em que todos os objetos da superfície, independente da altura (como carros em ortomagem de pequena escala), sejam considerados, Th deve possuir um valor nulo. Porém, isso implica em maior sensibilidade do método na busca por oclusões devido a objetos nem sempre significativos para a aplicação em questão.

Com os gradientes negativos identificados (considerando o limiar estabelecido Th), têm-se os inícios das áreas de oclusão para determinada direção radial, e assim, torna-se possível a identificação do término destas áreas, e conseqüentemente de todo seu conteúdo, sendo este representado por um mapa de visibilidade.

3.4 Identificação de áreas de oclusão e geração de mapa de visibilidade

Com a identificação do início da oclusão, é possível realizar o processo de projeção do término da oclusão, por meio da análise de colinearidade entre CP, o início da oclusão e os segmentos de reta seguintes ao início da oclusão (de maneira sequencial), para uma determinada direção radial. A Figura 26 apresenta os elementos necessários para o entendimento do processo de identificação das áreas de oclusão.

Figura 26. Geometria utilizada para determinação das áreas de oclusão.



Por meio da linha poligonal formada para cada perfil, e também dos pontos de coordenadas conhecidas: CP e gradientes negativos (ponto 'A'), pode-se determinar o ponto de término das áreas de oclusão (ponto 'C').

Para cada gradiente negativo (X_A, Y_A, Z_A) identificado na etapa anterior, determinam-se as coordenadas do ponto 'B', considerando a colinearidade entre o ponto 'A' e o CP, de maneira que este esteja em uma altitude inferior à mínima observada no MDS. Essa condição garante que o segmento de reta que liga o CP e o ponto 'B', tenha interseção com uma face da superfície poliédrica. O ponto de interseção entre este segmento de reta (\overline{CPB}) e uma face do poliedro (triângulo de Delaunay) corresponde ao limite da área de oclusão formada pelo objeto que contém o ponto 'A' (edificação na Figura 26), indicando assim, o último triângulo ocluso.

Para a determinação do ponto 'C', interseção entre o segmento de reta (\overline{CPB}) e o poliedro (conjunto de segmentos de reta – linha poligonal), considera-se um sistema de coordenadas local (2D) estabelecido da seguinte forma:

- Origem no ponto nadir no terreno;
- Coordenada x (direção radial) é a distância planimétrica entre o ponto em questão e o ponto nadir no terreno;
- Coordenada y é a altitude do ponto em questão.

Como exemplo tem-se as coordenadas do CP ($x = 0$ m e $y = Z_{CP}$); as coordenadas do ponto nadir no terreno ($x = 0$ m e $y =$ altitude do ponto de intersecção entre a direção nadiral e a face do poliedro que contém o ponto nadir no terreno); as coordenadas do ponto 'B' ($x =$ distância planimétrica entre 'B' e o ponto nadir no terreno e $y =$ valor inferior à altitude mínima encontrada no MDS); e assim por diante.

Portanto, pode-se verificar qual dos segmentos de reta $\overline{P_1P_2}, \overline{P_2P_3}, \dots, \overline{P_{n-1}P_n}$, de maneira sequencial, gerados após o ponto 'A' e formados por vértices consecutivos com x e y conhecidos (vértices da linha poligonal), é intersectado pelo segmento de reta definido por CP e ponto 'B'. Essa verificação deve levar em consideração quatro possibilidades, como apresentada por O'Rourke (1998):

- Os segmentos de reta se sobrepõem, compartilhando-se de um mesmo ponto (situação que não ocorre no SGBM);
- Um vértice, de um dos segmentos de reta, está contido no outro segmento de reta, porém, o item anterior não é satisfeito (a exemplo, os segmentos \overline{CPB} e $\overline{AP_1}$);
- Os segmentos de reta não intersectam (a exemplo, os segmentos \overline{CPB} e $\overline{P_1P_2}$);
- Os segmentos de reta se intersectam, isto é, compartilham de um mesmo ponto e nenhum dos itens anteriores são satisfeitos (a exemplo, os segmentos \overline{CPB} e $\overline{P_6P_7}$). Sendo este a situação ideal para se identificar o término da área de oclusão.

Para a execução desta análise de definição do ponto de interseção (fim da área de oclusão), considerou-se as condições apresentadas em O'Rourke (1998). Para tal, é necessária a inserção das coordenadas de quatro pontos como dados de entrada: coordenadas dos pontos CP (x_{CP} , y_{CP}), 'B' (x_B , y_B) – fixas para todas as análises – e os dois vértices seguintes ao início da oclusão, de maneira sequencial (para o exemplo da Figura 26, os primeiros seriam x_A , y_A , x_{P_1} , y_{P_1}) - todos seguindo o sistema de coordenada 2D descrito nos parágrafos anteriores). Como dados de saída, obtêm-se as coordenadas do ponto de interseção C (x_C , y_C) entre o segmento de reta \overline{CPB} e o segmento de reta da linha poligonal, para a situação onde ocorre a interseção entre os mesmos (segmento de reta formado pelos vértices P_6 e P_7 , na Figura 26). Sendo assim, transformam-se as coordenadas do ponto 'C' para o sistema de referência da nuvem de pontos original. É relevante destacar que outras possibilidades poderiam ser consideradas nesta análise.

Essa abordagem de definição de um ponto abaixo da superfície poliédrica foi utilizada, pois, a função capaz de determinar o ponto de término da oclusão é a mesma usada para determinação dos pontos de interseção entre o plano vertical e as arestas dos triângulos de Delaunay na geração da linha poligonal. Essa função está contida na biblioteca de algoritmos *Computational Geometry in C*, descrita no Capítulo 4.

No exemplo da Figura 26, o ponto que representa a interseção é o ponto 'C'. Portanto, devido à alta densidade de pontos do MDS, pode-se considerar como ocluso todo o triângulo que contém este ponto. Isso pode causar uma extrapolação nas áreas de oclusão (caso o término da mesma – ponto 'C' – esteja localizado no meio do triângulo, por exemplo), porém, isso não é um problema, uma vez que, além destas áreas serem pequenas (devido à alta densidade de pontos) a extrapolação será compensada durante o preenchimento das oclusões.

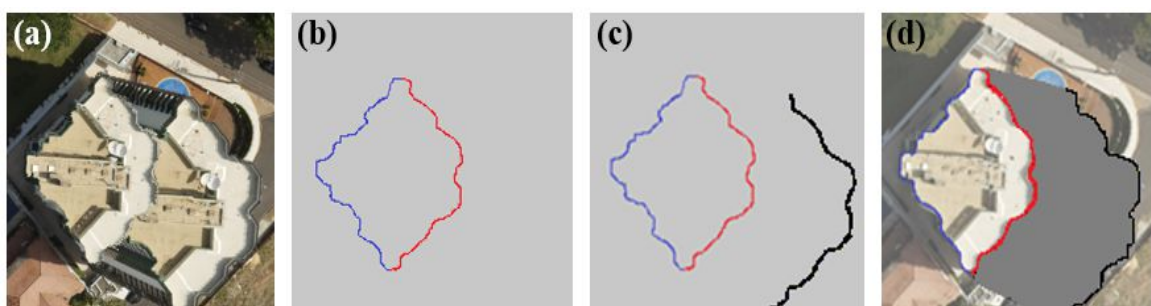
Após analisar todas as direções radiais (de acordo com Δr), tem-se uma lista de triângulos oclusos para a imagem em questão – o que permite a geração do mapa de visibilidade.

Uma vantagem desta metodologia em relação à apresentada em Oliveira (2013), além da não necessidade de uma malha regular e possibilidade de usar diferentes densidades de pontos, é o tratamento de múltiplas oclusões. Essa abordagem permitirá identificar todas as oclusões, mesmo aquelas formadas por edificações que escondem total ou parcialmente outra(s) edificação(ões), como a situação apresentada na Figura 25.

Estabelecidos, portanto, os triângulos de oclusão para toda a imagem, tem-se o mapa de visibilidade. Esse mapa é essencial para o processo de ortorretificação e geração de ortomagem verdadeira. Logo, um dos objetivos principais deste projeto seria alcançado – identificação das áreas de oclusão. O resultado desta detecção seria algo semelhante ao apresentado na Figura 27.

Na Figura 27 (a), observa-se o efeito de duplo mapeamento e em (b), (c) e (d) são mostrados, respectivamente: os gradientes positivos ($> 0 m$, em azul) e negativos ($\leq -Th$, em vermelho), o limite de oclusão projetado pelo método proposto (em preto) e a área de oclusão (em cinza) juntamente com a imagem ortorretificada. Vale ressaltar que as “linhas” apresentadas na Figura 27, são na verdade conjuntos de pontos, e o seu espaçamento varia de acordo com o valor de Δr utilizado.

Figura 27. (a) Imagem ortorretificada com uso de MDS, sem o tratamento da oclusão. (b) Identificação dos gradientes de superfície. (c) Projeção do fim das áreas de oclusão. (d) Ortomagem em conjunto ao mapa de visibilidade. Fonte: Oliveira (2013).



Na Figura 28 há um exemplo de ortorretificação com as áreas de oclusão identificadas (Figura 28 (b)). Nessa situação já é possível notar os telhados das edificações em sua correta posição ortogonal e o duplo mapeamento (Figura 28 (a)) substituído pelas áreas de oclusão detectadas.

Figura 28. (a) Efeito de duplo mapeamento. (b) Ortoimagem com oclusões detectadas.



3.5 Preenchimento de áreas de oclusão e mosaicagem

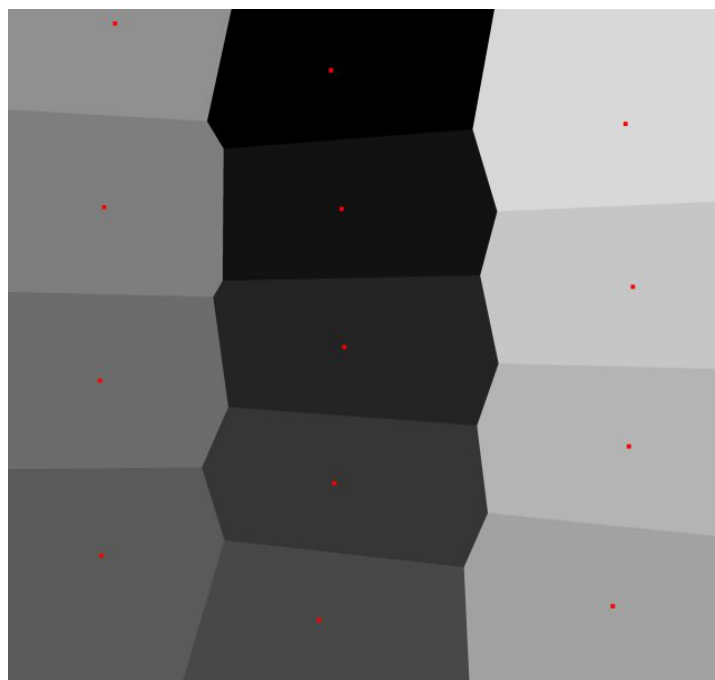
Com as áreas de oclusão detectadas, para cada imagem do bloco, é possível a busca por informações radiométricas, em imagens vizinhas, para que seja realizado o preenchimento destas áreas de oclusão. Para tal tarefa, é necessário considerar as informações contidas no mapa de visibilidade. Portanto, deve-se selecionar uma função de custo para considerar qual imagem adjacente deve ser utilizada para preenchimento das áreas de oclusão e realizar o processo de mosaicagem dessas imagens.

A princípio têm-se duas situações no mapa de visibilidade: áreas visíveis e áreas oclusas. Para as áreas visíveis (triângulos visíveis), considera-se a proximidade dos triângulos visíveis com os CPs das imagens, projetados na superfície poliédrica – função de custo apresentada na Subseção 2.4.1 (proximidade com o nadir). Para isso, é gerado o diagrama de Voronoi, utilizando as projeções dos CPs no poliedro – pontos nadir no terreno.

A Figura 29 apresenta estas projeções em pontos vermelhos, que formam 13 células de Voronoi (13 imagens) distribuídas em 3 faixas de voo, onde cada célula é representada por um tom de cinza diferente. Cada célula do DV representa a área que deve ser preenchida por uma determinada imagem (cujo ponto nadir no terreno é o núcleo da célula de Voronoi). Todos os pixels contidos nesta área serão representados pela imagem correspondente ao núcleo. Essa representação, formada pelo DV, pode ser considerada como um *layer* do mosaico de ortofotografias verdadeiras, pois possui resolução igual ao produto de saída (mosaico). Cada pixel deste *layer* e, conseqüentemente, do mosaico, contém uma lista com os identificadores de todos CPs, ordenados de acordo com a proximidade entre o pixel e os pontos nadir. Isso faz com que a função de custo, que considera a proximidade com o nadir,

seja estabelecida. Portanto, para todos os triângulos visíveis, o DV é utilizado para identificar qual imagem deve ser a fonte de informação radiométrica (CP com maior proximidade) para representação final.

Figura 29. Diagrama de Voronoi (DV) utilizado para mosaicagem das ortoimagens e suavização radiométrica das linhas de corte.



Para os triângulos oclusos, ainda observando a proximidade com os pontos nadir, identifica-se qual o CP compreende o ponto nadir no terreno mais próximo ao triângulo, e que possua visibilidade com o mesmo. O primeiro elemento da lista nunca será avaliado, pois, o CP com nadir no terreno mais próximo a este triângulo ocluso, é o CP utilizado no processo de detecção de oclusão (não visível ao triângulo em questão). Caso seja utilizada a função de custo, que leva em conta a orientação dos triângulos em relação ao plano da imagem, a mosaicagem não terá por base a estrutura da Figura 29. Nesse caso, a lista armazenará, ordenadamente, a sequência de CPs que possuem maior paralelismo entre vetor normal ao triângulo e eixo óptico das câmaras, no instante de aquisição das imagens. Portanto, verifica-se qual o eixo óptico possui maior paralelismo, assim como, visibilidade com o triângulo em questão.

Após decidir quais as imagens devem ser utilizadas para compensação das áreas de oclusão, faz-se o procedimento de mosaicagem e obtém-se o mosaico de ortoimagens verdadeiras inicial. Porém, esse produto possui descontinuidade radiométrica nas linhas de

corte devido às razões já colocadas anteriormente. Para corrigir esse efeito, aplica-se o procedimento denominado *feathering*, apresentado no Capítulo 2. O diagrama de Voronoi é uma alternativa para execução deste procedimento, pois as linhas de corte coincidem com as arestas das células de Voronoi. Logo, sabe-se a partir de quais linhas deve-se aplicar o *buffer* e suavizar as discontinuidades radiométricas. Os experimentos e resultados obtidos ao aplicar o SGBM serão apresentados e discutidos no Capítulo 4.

4. MATERIAIS, EXPERIMENTOS E DISCUSSÕES

Este capítulo apresenta a descrição dos materiais utilizados e experimentos executados para validação do método proposto.

4.1 Materiais

Utilizaram-se para execução dos experimentos realizados nesta tese três conjuntos de dados, os quais foram adquiridos por meio de levantamento aéreo em baixa altura de voo, característica esta que causa maior efeito nas áreas de oclusão e facilita a análise das detecções de oclusão e, conseqüentemente, dos mosaicos de ortoimagem verdadeira. Juntamente com os dados, são apresentados os equipamentos e *software* usados, que auxiliaram a implementação do SGBM.

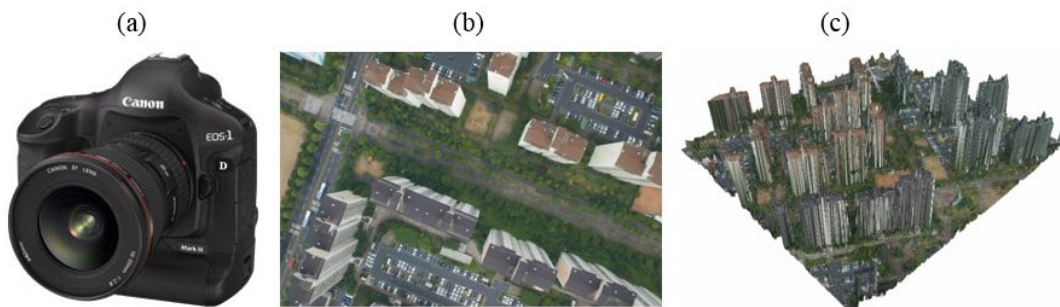
4.1.1 Conjuntos de dados

Para os experimentos apresentados a seguir usaram-se três conjuntos de dados, os quais são compostos por imagens aéreas, nuvem de pontos tridimensionais e informações sobre a câmara e orientação da plataforma. Os dados são oriundos de diferentes plataformas (levantamento aéreo utilizando helicóptero e veículo aéreo não tripulado – VANT) e câmaras (de médio e pequeno formato). Em seguida, esses conjuntos de dados serão descritos.

- **Conjunto de dados 1**

Para este conjunto, 13 imagens (Figura 30 (b)) foram coletadas por uma Canon EOS-1D (Figura 30 (a)), com elemento de resolução espacial médio de 10 cm, a uma altura aproximada de 240 m, adquiridas em uma área urbana da Coreia do Sul e disponibilizadas pelo *Digital Photogrammetry Research Group* (DPRG) da Universidade de Purdue – EUA. A nuvem de pontos tridimensionais obtida neste levantamento provém de um SVLA, com uma densidade média de 8 pontos/m² (Figura 30 (c)). Informações sobre o sensor estão contidas no Quadro 4.

Figura 30. Conjunto de dados 1. (a) Câmera Canon EOS-1D. (b) Exemplo de imagem coletada. (c) Nuvem de pontos obtida por SVLA.



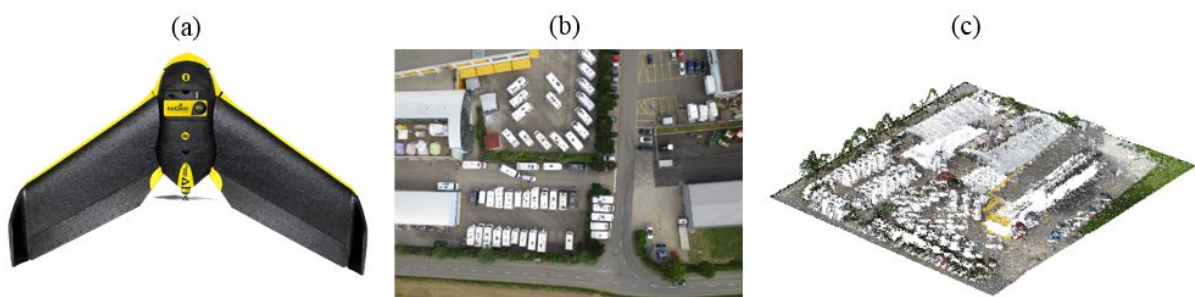
Quadro 4. Especificações da câmara utilizada no conjunto de dados 1.

Distância focal calibrada (mm)	28,46905		
Tamanho do pixel (μm)	11,5 x 11,5		
Tamanho do sensor em coluna e linha (pixels)	2464 x 1648		
Coordenadas do ponto principal (mm)	0,01940	0,02194	
Coef. distorção radial simétrica (k_1 , k_2 e k_3)	$-6,82871e^{-05}$	0,0	0,0
Coef. distorção descentrada (P_1 e P_2)	0,0	0,0	

- Conjunto de **dados 2**

Foram utilizadas 17 imagens no conjunto de dados 2 (Figura 31 (b)), sendo estas adquiridas com um VANT (eBee RTK – Figura 31 (a)), a uma altura aproximada de 120 m, e foram disponibilizadas pela empresa senseFly. Essas imagens foram obtidas por uma câmara de pequeno formato e possuem elemento de resolução espacial médio na ordem de 4 cm. Para geração da nuvem de pontos, utilizaram-se técnicas fotogramétricas (*software* Postflight Terra 3D). A densidade aproximada dessa representação de superfície é de 180 pontos/ m^2 (Figura 31 (c)). Informações sobre o sensor estão contidas no Quadro 5.

Figura 31. Conjunto de dados 2. (a) Plataforma eBee RTK. (b) Exemplo de imagem coletada. (c) Nuvem de pontos obtida por técnica fotogramétrica.



Quadro 5. Especificações da câmara utilizada no conjunto de dados 2.

Distância focal calibrada (mm)	4,38927		
Tamanho do pixel (μm)	1,339 x 1,339		
Tamanho do sensor em coluna e linha (pixels)	4608 x 3456		
Coordenadas do ponto principal (mm)	-0,00558	-0,14764	
Coef. distorção radial simétrica (k_1, k_2 e k_3)	$-5,60350e^{-04}$	$3,197590e^{-05}$	$8,781780e^{-07}$
Coef. distorção descentrada (P_1 e P_2)	$3,52262e^{-04}$	$-4,059728e^{-05}$	

- Conjunto de **dados 3**

Os dados descritos neste conjunto foram obtidos no DPRG. Foram utilizadas 81 imagens (Figura 32 (b)), coletadas com uma câmara GoProHero 3+ acoplada em um VANT (DJI Phantom 2), como apresentados na Figura 32 (a). Para geração da nuvem de pontos (Figura 32 (c)) foi utilizada a técnica fotogramétrica proposta em He et al. (2015). O elemento de resolução espacial médio é de 5 cm e a densidade média de pontos em torno de 4500 pontos/ m^2 . Informações sobre o sensor estão contidas no Quadro 6.

Figura 32. Conjunto de dados 3. (a) Plataforma DJI Phantom e câmara GoPro. (b) Exemplo de imagem coletada. (c) Nuvem de pontos obtida por técnica fotogramétrica.



Quadro 6. Especificações da câmara utilizada no conjunto de dados 3.

Distância focal calibrada (mm)	2,75142		
Tamanho do pixel (μm)	1,55 x 1,55		
Tamanho do sensor em coluna e linha (pixels)	3000 x 2250		
Coordenadas do ponto principal (mm)	0,013438	0,094593	
Coef. distorção radial simétrica (k_1, k_2 e k_3)	$-1,49175e^{-02}$	$8,79702e^{-04}$	$-2,56801e^{-07}$
Coef. distorção descentrada (P_1 e P_2)	$1,92895e^{-04}$	$1,84467e^{-05}$	

Como se pode notar na descrição dos conjuntos de dados, alguns possuem uma alta densidade da nuvem de pontos. Esse valor foi obtido considerando todos os pontos projetados em um plano, ou seja, uma nuvem de pontos que contém muitas feições verticais, como as paredes do conjunto de dados 3, contém uma grande quantidade de pontos por metro quadrado, pois todos os pontos que representam as paredes são projetados em um plano horizontal para se calcular a densidade.

4.1.2 Equipamentos utilizados para implementação e execução do SGBM

As etapas de implementação do algoritmo proposto e de execução dos experimentos foram realizadas utilizando-se os seguintes equipamentos:

- Notebook DELL – New Inspiron 15R (5537), com processador Intel® Core™ i7-4500U 2.40 GHz, memória RAM de 8 GB e 1 TB em disco rígido - adquirido com recursos da FAPESP (processo nº 2013/21647-2);
- Desktop DELL – XPS, com processador, Core™ i7-4770 3.40 GHz, memória RAM de 16 GB e 1 TB em disco rígido.

4.1.3 Bibliotecas e *software*

Para implementação do método proposto, algumas bibliotecas e *software* foram utilizados no decorrer do projeto. Alguns dos itens citados a seguir estão inseridos no código implementado, como funções auxiliares. Os *software* e bibliotecas utilizados são gratuitos, porém, de uso restrito à finalidade não comercial.

A escolha pelo uso de algumas funções já desenvolvidas está relacionada à complexidade de implementação e otimização requerida, não sendo esse o foco do presente trabalho, como é o caso da geração e manipulação da triangulação de Delaunay e diagrama de Voronoi. Em contrapartida, toda lógica do método proposto foi implementada em linguagem de programação C/C++.

A seguir serão apresentadas algumas bibliotecas e *software* utilizados para o desenvolvimento do presente trabalho.

- *Qhull*

No presente trabalho a biblioteca ‘Qhull’ é empregada para triangular um conjunto de pontos, adotando-se o critério de Delaunay, etapa necessária para detecção de oclusão via SGBM. Sobre esta triangulação é possível realizar diversas tarefas, tais como, identificar qual triângulo contém um dado ponto – essencial para a busca da face do poliedro que contém a projeção do CP (ponto nadir no terreno); identificar triângulos adjacentes a determinado triângulo – função esta usada para identificar os pontos de interseção entre o plano vertical e as arestas dos triângulos de Delaunay para determinação da direção radial; etc. As funções disponibilizadas são incorporadas ao algoritmo desenvolvido. Além da triangulação de Delaunay, a biblioteca *Qhull* também gera diagramas de Voronoi, importante no processo de mosaicagem via SGBM. Informações adicionais sobre a biblioteca podem ser encontradas em Barber e Huhdanpaa (2012).

- *LAStools*

A biblioteca ‘LAStools’ foi desenvolvida para a manipulação de dados de varredura a LASER e é composta por diversas funções, como classificação, filtragem, recorte, transformação, etc. As funções são, em sua maioria, livres e passíveis de utilização para nuvens de pontos obtidas por meio de técnicas fotogramétricas. Neste projeto, são utilizadas as funções livres de conversão entre arquivos de extensão “.las” para “.txt” e para cálculo da densidade média de pontos. Outros detalhes a respeito desta biblioteca podem ser encontrados em Isenburg (2014).

- *Code::Blocks*

O método proposto foi implementado em linguagem de programação C/C++. Para tal implementação foi usado o Code::Blocks como IDE (*Integrated Development Environment*). Esta IDE é gratuita e permite a comunicação entre as bibliotecas de funções utilizadas.

- *FugroViewer*

Este software é destinado a usuários de produtos fotogramétricos e dados tridimensionais (nuvem de pontos 3D). Diversas funções são disponíveis em versão gratuita, tais como: visualização de ortoimagens juntamente com nuvem de pontos, visualização de perfil, visualização em três dimensões, dentre outras. Neste trabalho o FugroViewer é utilizado, basicamente, para a visualização das nuvens de pontos e resultados intermediários obtidos pelo método proposto.

- *Digital Photogrammetric Program*

Como parte dos experimentos, os resultados de detecção de oclusão via SGBM foram comparados com os obtidos por outros métodos, como *Z-buffer* e Angular. Para execução destes métodos, utilizou-se o *Digital Photogrammetric Software*, cujo desenvolvimento foi realizado por membros do DPRG da Lyles School of Civil Engineering da Purdue University, principalmente o Dr. Changjae Kim da Universidade de Myongi – Coreia do Sul. O uso deste software é de extrema importância para comparações quantitativas e qualitativas dos resultados obtidos;

- *Computational Geometry in C*

Esta biblioteca possui diversas funções relacionadas à geometria analítica. Neste trabalho, utilizou-se a função responsável por determinação de interseções entre segmentos de reta, tanto para geração da linha poligonal formada pela interseção entre a direção radial e as faces da superfície poliédrica, quanto para identificação do término das áreas de oclusão. O conteúdo desta biblioteca é discutido e apresentado em O'Rourke (1998).

4.2 Experimentos

Esta seção apresenta os resultados experimentais obtidos para detecção de oclusão e geração de ortoimagem verdadeira via SGBM. Serão realizadas avaliações qualitativas e quantitativas sobre os resultados obtidos. Como avaliação quantitativa, será apresentado o cálculo de completude para duas áreas de interesse, juntamente com a comparação com outros métodos, cálculo de erro médio obtido em alinhamento de feições lineares que cruzam linhas de corte, e o tempo de processamento gasto para diferentes densidades da nuvem de pontos e resolução da imagem de saída. A seguir, tem-se a descrição dos experimentos e discussão dos resultados.

4.2.1 Detecção de áreas de oclusão

Como a detecção de oclusão é uma das etapas críticas para a geração de ortoimagem verdadeira, três exemplos obtidos pelo SGBM serão apresentados a seguir. Os resultados para os conjuntos de dados 1, 2 e 3 são mostrados nas Figuras 33, 34 e 35, respectivamente.

Nas figuras mencionadas, (a) corresponde à imagem original obtida durante o levantamento aéreo, (b) apresenta o resultado obtido para ortorretificação utilizando um MDS,

ao invés de MDT – efeito de duplo mapeamento, (c) contém o mapa de visibilidade, cuja representação em preto indica as áreas de oclusão e branco as áreas visíveis e (d) exibe a ortoimagem com áreas de oclusão detectadas pelo método proposto.

Figura 33. Detecção de oclusão para o conjunto de dados 1. (a) Imagem original. (b) Duplo mapeamento. (c) Mapa de visibilidade. (c) Ortoimagem com oclusões detectadas.

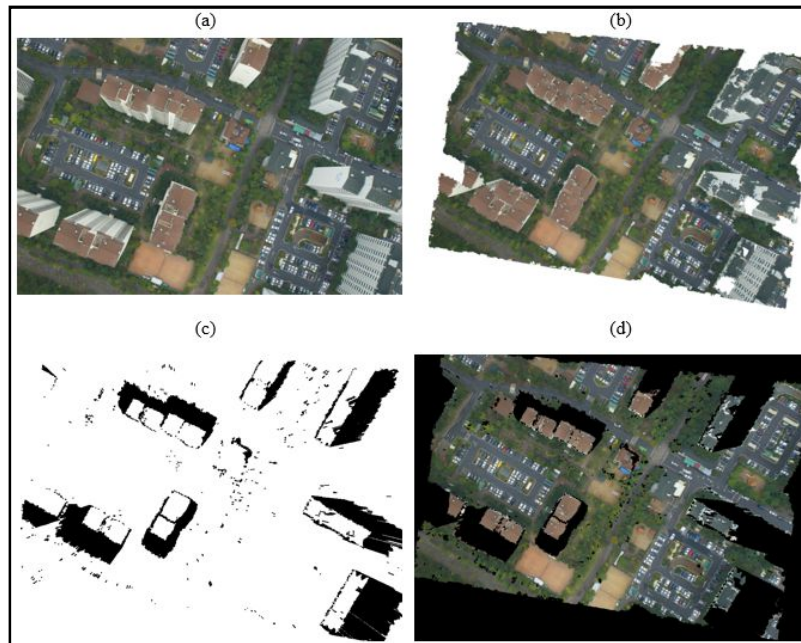
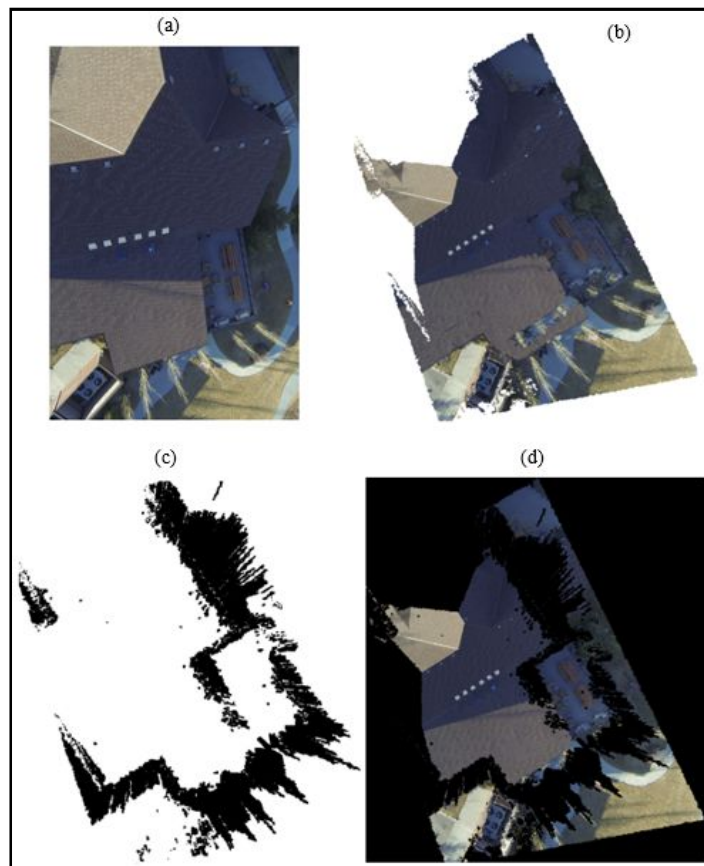


Figura 34. Detecção de oclusão para o conjunto de dados 2. (a) Imagem original. (b) Duplo mapeamento. (c) Mapa de visibilidade. (c) Ortoimagem com oclusões detectadas.



Figura 35. Detecção de oclusão para o conjunto de dados 3. (a) Imagem original. (b) Duplo mapeamento. (c) Mapa de visibilidade. (d) Ortoimagem com oclusões detectadas.



Ao analisar visualmente as Figuras 33, 34 e 35, pode-se notar a coerência na detecção de áreas de oclusão pelo método proposto e as corretas posições planimétricas (projeção ortogonal) dos telhados das edificações, como apresentado nos itens (b) e (d). Vale destacar que quanto mais completa a detecção das áreas de oclusão – áreas em preto nos itens (c) e (d), melhor a representação visual das ortomagens verdadeiras (produto final a ser apresentado nas subseções seguintes).

Como mencionado nos capítulos anteriores, o nível de acerto não possui tanta relevância quanto à completude, pois todos os pixels rotulados como oclusos serão preenchidos com informação radiométrica, provinda de imagens adjacentes. Portanto, os ruídos encontrados nos mapas de visibilidade (falsa oclusão – baixo nível de acerto) não são um problema para a geração do produto final, pois serão preenchidos utilizando imagens adjacentes, entretanto, implicam em maior processamento (maior quantidade de oclusões a serem preenchidas).

A seguir é apresentado um exemplo de detecção de oclusão para uma área com presença de múltiplas oclusões, edificações que obstruem outras edificações.

Figura 36. Detecção de múltiplas oclusões.

(a) Imagem original. (b) Efeito de duplo mapeamento. (c) Áreas de oclusão.



Pode-se notar na Figura 36 (a) que a edificação de maior dimensão obstrui quase que completamente a real posição ortogonal da edificação localizada no canto superior direito. A capacidade do SGBM em detectar múltiplas oclusões é uma clara melhoria em relação ao método desenvolvido em Oliveira (2013). Esse tipo de configuração é muito comum em centros urbanos, com alta densidade de edificações.

O principal problema encontrado ao se identificar áreas de oclusão está relacionado à má representação das bordas das edificações - problema este mais severo nas nuvens de pontos obtidas por SVLAs. Essa má representação faz com que as bordas das edificações possuam um aspecto serrilhado (*aliasing*), e conseqüentemente, o mesmo ocorre na detecção de oclusão e geração de ortoimagem verdadeira.

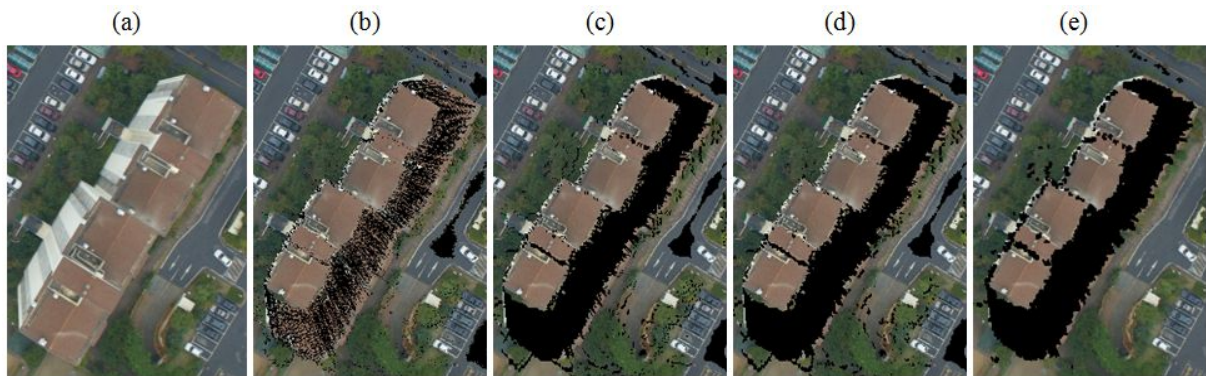
Outra dificuldade encontrada no método proposto, assim como nos demais, é o alto esforço computacional ao utilizar conjuntos de dados de alta densidade e pequena escala, ou seja, imagens que abrangem uma grande extensão territorial e são representadas por MDS com alto número de pontos. Algumas alternativas podem ser estudadas para melhorar o desempenho do método proposto, como por exemplo, o uso de processamento paralelo.

4.2.2 Comparação entre métodos e análise de completude

Tendo em vista a importância da completude da detecção da oclusão, a seguir é exibida uma comparação qualitativa e quantitativa desse índice de qualidade.

A Figura 37 revela a detecção de oclusão de uma mesma área pertencente ao conjunto de dados 1, obtida por quatro diferentes métodos descritos como estado da arte, *Z-buffer*, Angular via varredura em espiral, Angular via varredura radial (os três por meio do *software Digital Photogrammetric Software*) e o método proposto (SGBM), nas Figuras 37 (b), (c), (d) e (e), respectivamente.

Figura 37. Detecção de oclusão para diferentes métodos. (a) Imagem original. (b) *Z-buffer*. (c) Angular via varredura em espiral. (d) Angular via varredura radial. (e) Método SGBM.



O resultado obtido pelo método *Z-buffer* é visualmente menos completo que os demais, devido à quantidade de áreas de falsa visibilidade. Em contrapartida, os demais métodos, duas versões do Angular e SGBM, mostraram uma detecção de oclusão mais completa. Um aspecto que pode ser notado é a quantidade de oclusões ao nível de solo (ruas e estacionamentos) detectadas nas variações do método Angular, detecção esta não encontrada em grande quantidade no SGBM. Essas oclusões não são reais e pode ser considerado um aspecto negativo para os três primeiros métodos, apesar de ocorrerem devido a problemas nos dados de entrada (falhas de interpolação no MDS regular). Entretanto, o SGBM não sofre com este tipo de problema, visto que utiliza o conjunto de pontos original irregularmente espaçado e há a possibilidade de utilização do parâmetro Th .

O índice de completude é um importante indicador de qualidade para a avaliação de detecção de oclusão, pois, caso uma região não seja detectada em sua totalidade, isto é, parte dela considerada visível (como o resultado obtido pelo *Z-buffer*), o mosaico de ortoimagem

verdadeira terá representações incorretas, uma vez que certas áreas de oclusão continuarão com a tonalidade original (como por exemplo, as laterais das edificações).

Considerando este índice, duas áreas pertencentes ao conjunto de dados 1 foram avaliadas. Extraíu-se o polígono de referência (em vermelho na Figura 38) manualmente, a partir da imagem de duplo mapeamento, por meio da qual é possível definir exatamente o início e o fim das áreas de oclusão – desde que os parâmetros de orientação sejam de boa qualidade.

Os valores de completude para as áreas de oclusão da Figura 38 (a) e (b) são apresentados na Tabela 1. As áreas 1 e 2 utilizadas neste experimento estão contidas em imagens distintas do conjunto de dados 1. O tempo de processamento para a detecção de oclusão em cada imagem, nos respectivos métodos, também é apresentada na Tabela 1.

Figura 38. Análise de completude. (a) Área 1. (b) Área 2.

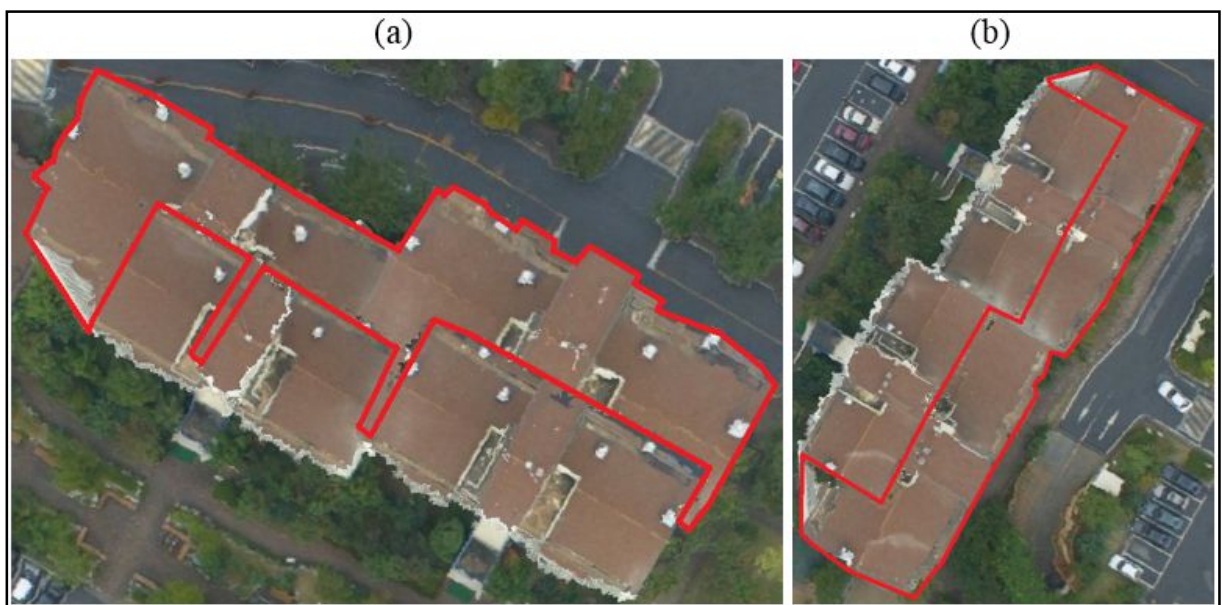


Tabela 1. Completude e tempo de processamento para as áreas apresentadas na Figura 38.

Métodos	Completude (%)		Tempo de Processamento (min.)	
	Área 1	Área 2	Área 1	Área 2
<i>Z-buffer</i>	45,30	53,98	2,57	2,50
Angular: espiral	93,28	83,99	1,00	1,01
Angular: radial	94,10	87,00	1,15	1,08
SGBM	96,54	91,80	1,15	0,90

Os valores de completude indicam uma vantagem no uso do SGBM em relação aos métodos *Z-buffer* e Angular. A fim de se detectar áreas de oclusão para a geração de ortomagem verdadeira, o método *Z-buffer* não deve ser aplicado diretamente para regiões que contêm alta densidade de edificações, em razão dos problemas com prédios altos e estreitos, além das falsas visibilidades decorrentes da mudança de escala entre topo e base das edificações, como indicado por Habib et al. (2007). Uma alternativa é a utilização de operadores morfológicos para preenchimentos das falhas na oclusão, como apresentado em Oliveira et al. (2014) ou a inserção de *pseudo-groundels*, como mencionado por Habib et al. (2007). Considerando o método Angular com varredura na direção radial, os índices de completude obtidos usando-se SGBM foram 2,4% e 4,8% superiores para a área 1 e 2, respectivamente. Portanto, o método Angular apresentou um resultado ligeiramente inferior ao SGBM, além de não possibilitar o uso de diferentes densidades ao longo do MDS.

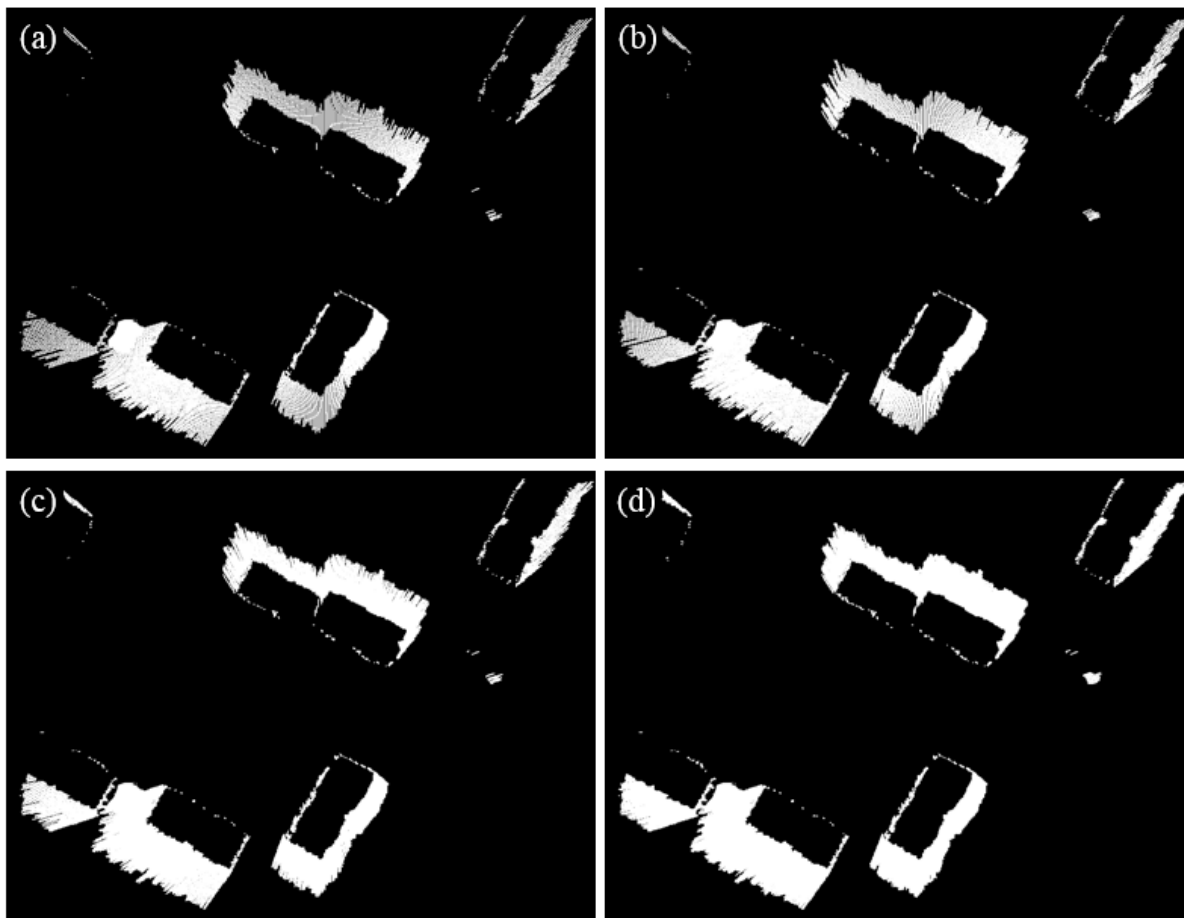
O tempo de processamento para detecção de oclusão nas imagens que contém as duas áreas deste experimento é semelhante, principalmente entre os métodos Angular e SGBM. É importante a busca por algoritmos eficazes, e neste caso o SGBM mostrou-se com alto nível de completude, com um tempo igual ou inferior ao método Angular. Um ponto importante a ser considerado é a necessidade de se gerar, *a priori*, uma grade regular para representação do MDS (procedimento de interpolação), sendo esta etapa essencial para aplicação dos métodos *Z-buffer* e Angular. Este experimento não considerou este tempo de pré-processamento nos valores da Tabela 1, o que evidencia um melhor desempenho do método proposto.

4.2.3 Análise de sensibilidade dos parâmetros Δr e Th

Como descrito no Capítulo 3, o SGBM utiliza dois parâmetros de entrada: o Δr e o Th . Ambos são responsáveis pela quantidade de oclusões a serem detectadas pelo método proposto. Os valores definidos para estes parâmetros podem ter influência no resultado obtido como produto final, influenciando na qualidade do mosaico de ortomagem verdadeira. A seguir serão apresentados dois experimentos em que se pode notar as diferenças no mapa de visibilidade (com GSD de 10 cm para este experimento) ao variar tanto o Δr (Figura 39), quanto o Th (Figura 40).

Figura 39. Aplicação do parâmetro Δr com os seguintes valores:

(a) 1 m. (b) 0,75 m. (c) 0,5 m. (d) 0,25 m.



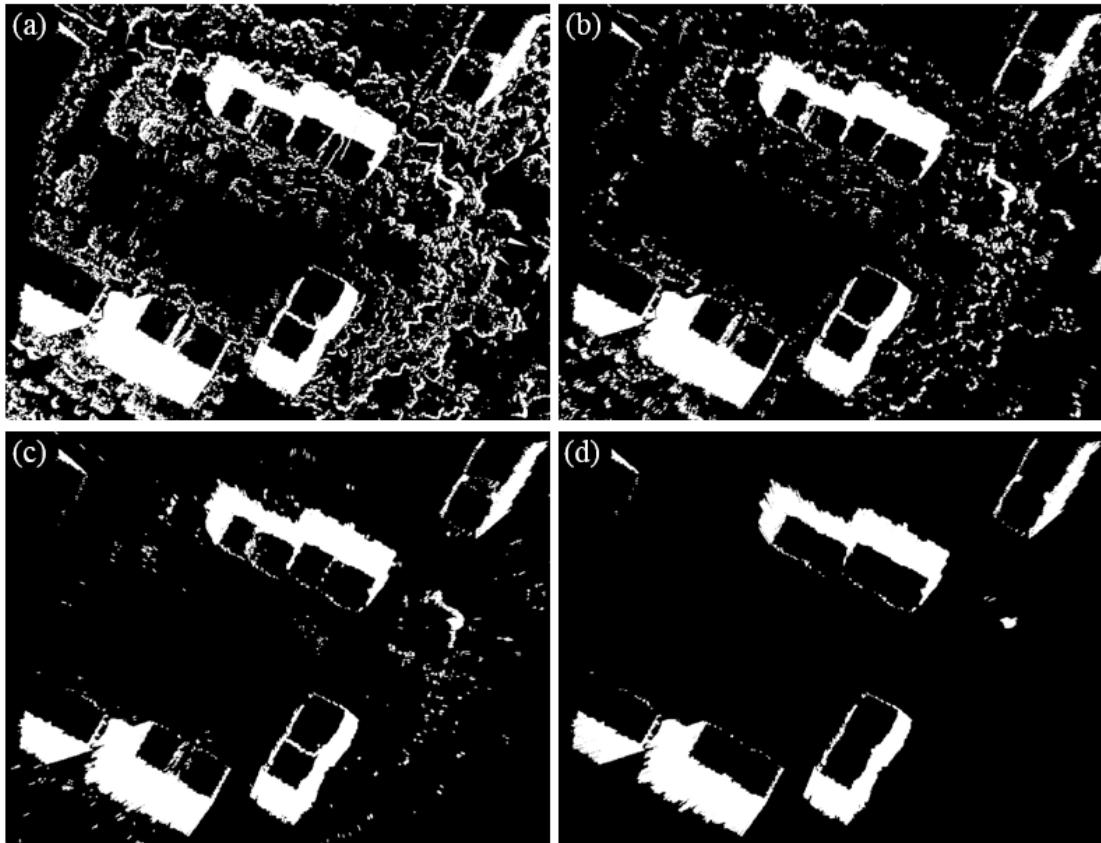
Ao analisar os resultados apresentados na Figura 39, nota-se a melhoria da detecção de oclusão ao utilizar valores menores para Δr . Isso ocorre devido à falha na determinação das direções radiais, ou seja, grandes valores de Δr fazem com que algumas radiais não sejam utilizadas, e como consequência, algumas faces do poliedro não sejam consideradas na detecção de oclusão, provocando falsas visibilidades (buracos/falhas nas áreas de oclusão).

Para levantamentos com uma grande quantidade de imagens, adquiridas com alta superposição longitudinal e lateral, não é necessário um valor muito pequeno para Δr (da dimensão do GSD da imagem de saída, por exemplo), pois, as falhas são compensadas por detecção de oclusões em imagens adjacentes, ou seja, mesmo que uma direção radial não seja observada em uma imagem (valor pequeno de Δr), nas imagens adjacentes ela ainda pode ser observada. Como consequência, diminui-se o tempo de processamento, pois uma menor quantidade de direções radiais será analisada para cada imagem.

A Figura 40 apresenta um experimento semelhante ao anterior, porém, utilizando o parâmetro Th , responsável pela variação mínima do gradiente de superfície a ser considerada na detecção de oclusão.

Figura 40. Aplicação do parâmetro Th com os seguintes valores:

(a) 1 m. (b) 3 m. (c) 5 m. (d) 10 m.



O parâmetro Th , como pode ser visto na Figura 40, tem grande influência na quantidade de objetos considerados na detecção de oclusão. Áreas urbanas, por exemplo, sofrem influência basicamente de grandes edificações, as quais podem ser consideradas, exclusivamente, ao definir um valor elevado para Th . Para tal, é necessário um prévio conhecimento da área de interesse. A variação deste parâmetro depende das características da área em estudo – altura dos elementos que causam oclusões, e conseqüentemente, afeta a qualidade da imagem de saída (o mosaico de ortoimagem verdadeira), para determinada aplicação. O parâmetro Th pode sofrer influência de pontos que representam as paredes das edificações, gerando falsas visibilidades (dependendo do valor utilizado). Nos exemplos apresentados na Figura 40, nota-se a seleção de apenas altas edificações, ao definir Th como

10 m, ou seja, apenas edificações com altura igual ou superior a 10 m serão consideradas no SBGM. O tempo de processamento também é reduzido ao aplicar tal valor. A seguir são apresentados dois mosaicos de ortoimagens verdadeiras utilizando o conjunto de dados 1, com diferentes parâmetros de entrada para o SGBM.

Figura 41. Mosaico de ortoimagem verdadeira com os seguintes parâmetros:

$$\Delta r = 1 \text{ m e } Th = 1 \text{ m.}$$



Figura 42. Mosaico de ortoimagem verdadeira com os seguintes parâmetros:

$$\Delta r = 0,25 \text{ m e } Th = 10 \text{ m.}$$



Ao observar os resultados apresentados nas Figuras 41 e 42, nota-se a importância de uma seleção adequada dos parâmetros Δr e Th . Para a Figura 41, apesar de considerar todos os objetos com mais de 1 m de altura, o valor de Δr fez com que diversas áreas possuam falsa visibilidade e, conseqüentemente, o mosaico final apresente diversos ruídos como em destaque na Figura 41 (próximos à edificação). Já para o resultado apresentado na Figura 42, este problema foi solucionado ao diminuir o valor de Δr . Portanto, é importante uma análise

prévia dos dados a serem utilizados, considerando o GSD requerido para a imagem de saída, a altura dos objetos que mais influenciam nas oclusões e a densidade dos pontos que formarão a superfície poliédrica, pois quanto mais denso o conjunto de pontos, menor a área das faces do poliedro e, conseqüentemente, maior a quantidade de direções radiais que devem ser analisadas (na imagem).

A grande dificuldade ao se utilizar o parâmetro Th neste trabalho é a sua definição, visto que edificações com a mesma altura, porém em localizações distintas (próximas e afastadas do ponto principal da imagem) causam oclusões com diferentes magnitudes. Este problema é minimizado ao se utilizar a função de custo que considera a proximidade com o nadir, durante o processo de mosaicagem e preenchimento de áreas de oclusão. Pois, evita que um objeto de baixa altura (não considerado com determinado valor de Th) cause uma oclusão representativa no produto final devido a sua localização afastada do ponto principal da imagem.

4.2.4 Funções de custo para compensação de áreas de oclusão

Ao aplicar o método proposto, as oclusões são detectadas na imagem e também armazenadas como triângulos. Portanto, têm-se triângulos oclusos ao longo da superfície para determinado CP. Como descrito no Capítulo 2, após a detecção das áreas de oclusão, deve-se compensá-las com informação radiométrica contida em imagens adjacentes, cuja visibilidade seja possível. Entretanto, normalmente, as áreas de oclusão são visíveis em mais de uma imagem adjacente, o que implica determinar qual dessas imagens é a ideal para preencher a área de oclusão. Essa tomada de decisão é feita por meio de uma função de custo (FC). Este experimento apresenta os diferentes resultados ao se aplicar as duas funções de custo descritas na Subseção 2.4.1:

- Proximidade com os pontos nadir de cada CP (FC_1);
- Orientação relativa entre superfície e plano da imagem (FC_2).

As Figuras 43 e 44 ilustram a compensação de oclusão, por meio das duas funções de custo, para o conjunto de dados 3. De maneira análoga, para os dados 2, são apresentados os resultados nas Figuras 45 e 46. As Figuras 43 e 45 contêm mosaicos de ortoimagem verdadeira obtidos com o uso da função de custo FC_2 , assim como três áreas em destaque para comparação com a função de custo FC_1 , cujos resultados são mostrados nas Figuras 44 e 46.

Figura 43. Ortoimagem verdadeira para o conjunto de dados 3, utilizando-se a função de custo que considera a orientação da superfície em relação ao plano da imagem.

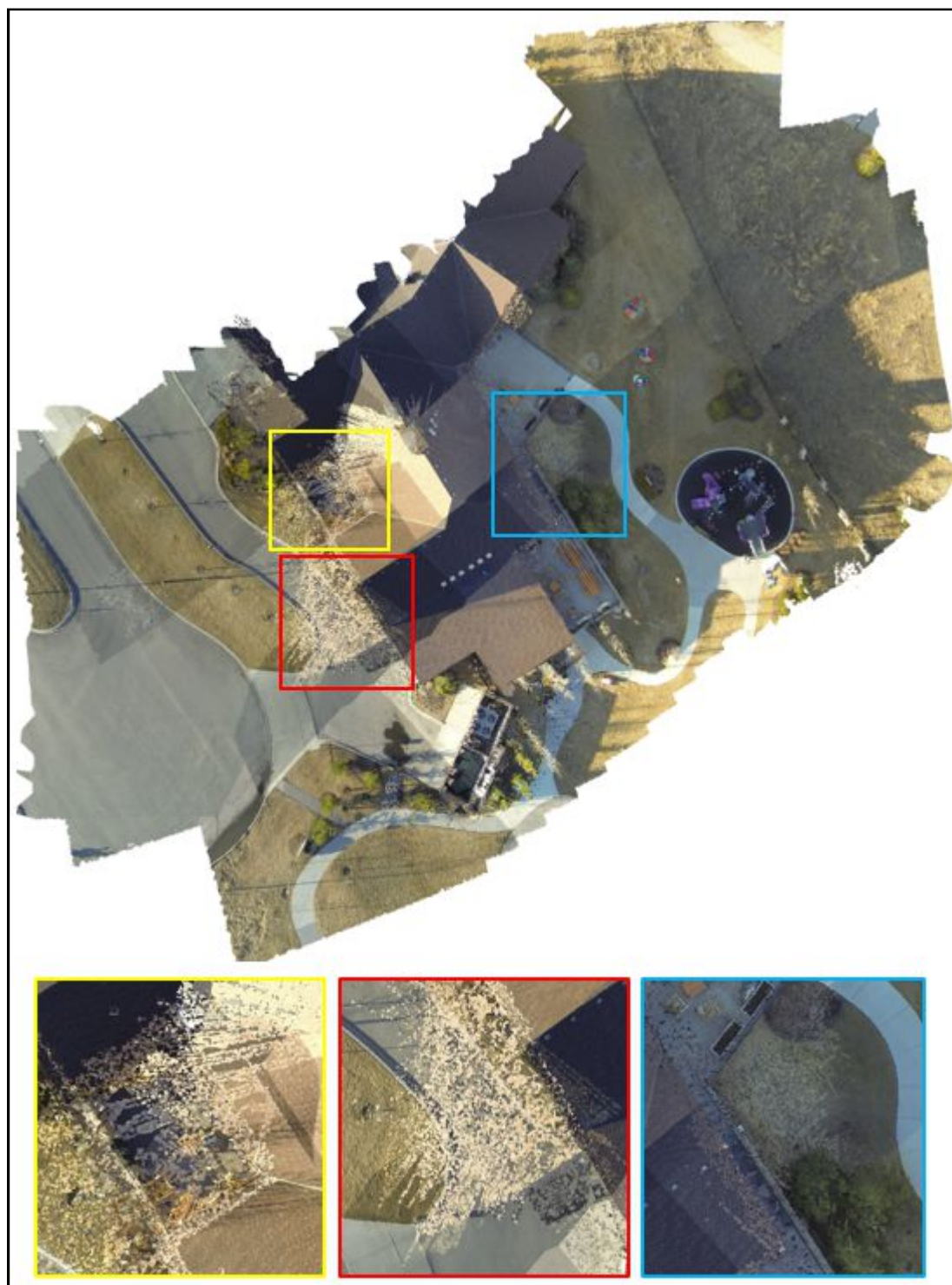


Figura 44. Ortoimagem verdadeira para o conjunto de dados 3, utilizando-se a função de custo que considera a proximidade entre *groundels* e pontos nadir no terreno.

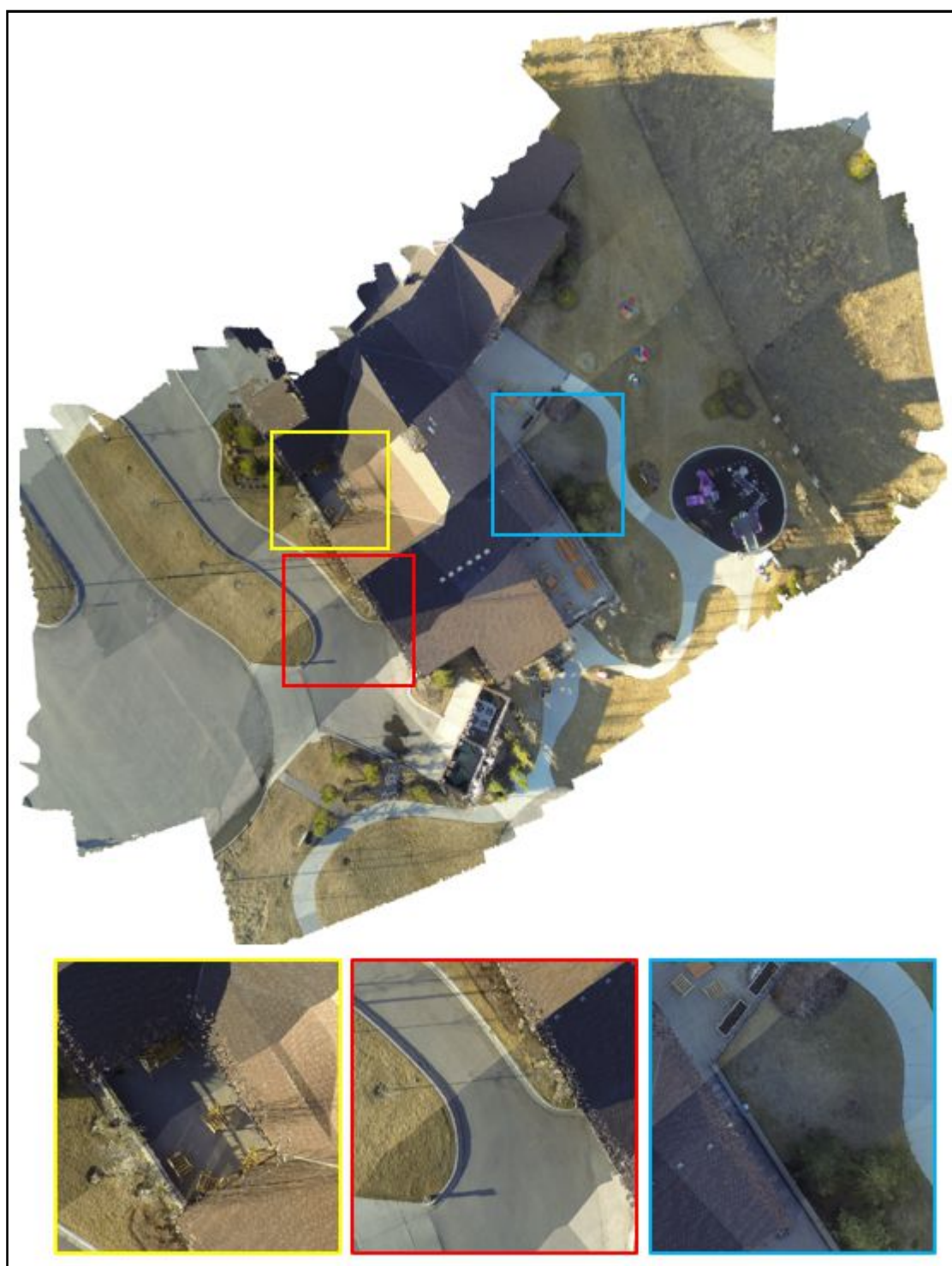


Figura 45. Ortoimagem verdadeira para o conjunto de dados 2, utilizando-se a função de custo que considera a orientação da superfície em relação ao plano da imagem.



Figura 46. Ortoimagem verdadeira para o conjunto de dados 2, a utilizando-se função de custo que considera a proximidade entre *groundels* e pontos nadir no terreno.



Após aplicar ambas as funções de custo, é possível notar as diferenças em determinadas áreas (em destaque nas Figuras 43, 44, 45 e 46). Essas diferenças ocorrem graças à variação nas orientações dos triângulos oclusos (vetores normais), sendo este, um importante atributo para função FC_2 . Devido à alta densidade de pontos, os triângulos abrangem uma menor área e conseqüentemente, pequenas variações nas altitudes de seus vértices causam uma grande mudança de orientação, o que ocasiona erros na escolha da imagem ideal para compensação radiométrica. Essa variação faz com que as áreas de oclusão, após compensadas, possuam ruídos, como se pode notar em detalhe nas Figuras 43 e 45.

Para a função de custo FC_1 , essa característica de conjunto de pontos com alta densidade não influencia nos resultados. Pode-se observar que os mosaicos (Figura 44 e 46) são menos ruidosos e possuem uma melhor representação da área de interesse. Portanto, optou-se pela função de custo FC_1 para compensação de oclusão neste trabalho.

Porém, ao utilizar a função de custo FC_2 , para superfícies que possuam uma maior área, como, por exemplo, um retângulo representando o telhado de uma edificação, essa heterogeneidade nas radiometrias, para uma mesma área, não ocorre. Essa característica pode ser observada no trabalho de Lari (2014). Portanto, para o SGBM esta não é uma função de custo ideal, porém, para outras aplicações, a mesma deve ser considerada.

4.2.5 Alinhamento de feições lineares em mosaicos de ortoimagem verdadeira

Ao gerar mosaicos de ortoimagem, deve-se garantir um bom alinhamento entre imagens adjacentes. A qualidade geométrica da representação dos objetos presentes na cena bem como das feições que são interceptadas por linhas de corte, ou seja, feições que possuem representações provindas de duas ou mais imagens adjacentes estão relacionadas à precisão do produto final.

As avaliações desses alinhamentos foram feitas para os conjuntos de dados 2 e 3, em virtude da melhor resolução espacial dessas imagens e também devido a existência de feições lineares que cruzam as linhas corte. É importante destacar que a qualidade de tais alinhamentos depende dos POI, da aerotriangulação ou dos POE provindos do sistema de georreferenciamento direto e da representação da superfície (MDS).

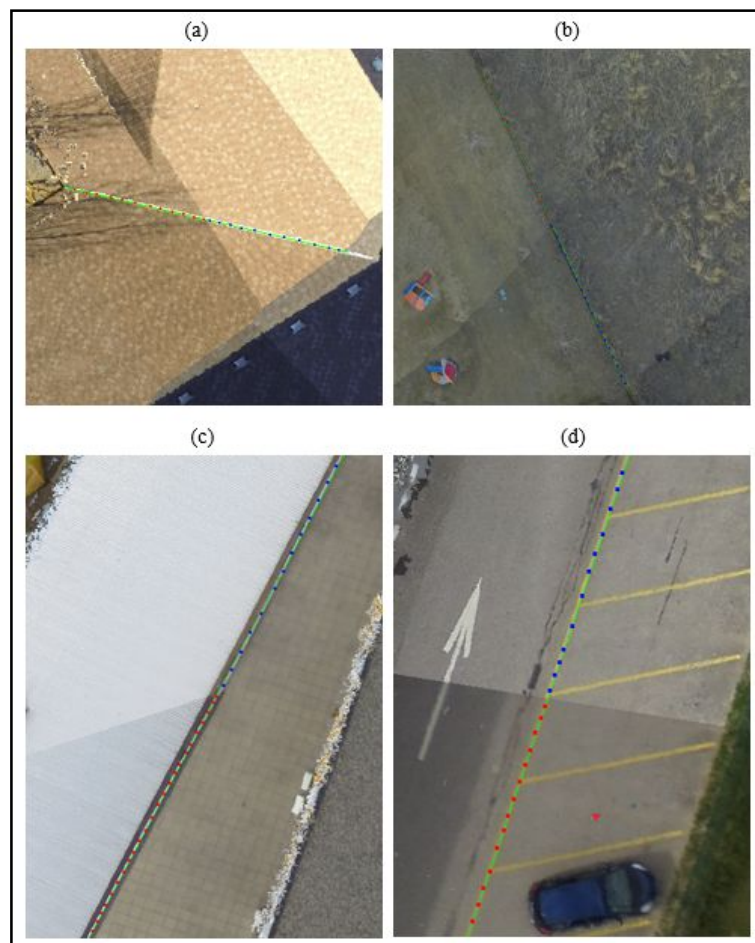
Para este experimento, as feições foram identificadas manualmente, antes do procedimento de balanceamento de cores via *feathering*, pois, após essa correção, torna-se

difícil a identificação das linhas de corte – resultados estes apresentados nos experimentos seguintes.

A Figura 47 indica as áreas utilizadas para análise do alinhamento. Em (a) e (c) têm-se alinhamentos presentes em cumeeiras de telhados; já (b) e (d) contêm feições lineares no nível do terreno.

Figura 47. Alinhamento de feições presentes no mosaico de ortoimagem verdadeira.

(a) Área 1. (b) Área 2. (c) Área 3. (d) Área 4.



Nas quatro situações apresentadas anteriormente, nota-se, visualmente, um alinhamento coerente entre as feições lineares, restando realizar apenas a correção das diferenças radiométricas, entre imagens adjacentes. De maneira quantitativa, pode-se observar, por meio da Tabela 2, que a raiz do erro médio quadrático do alinhamento (como descrito no Capítulo 2) tem magnitude inferior a 1 pixel (3 cm para este experimento), o que indica um bom alinhamento, de acordo com o padrão de acurácia posicional de dados geoespaciais da ASPRS (*American Society for Photogrammetry and Remote Sensing*), como apresentado em ASPRS

(2015). É possível, portanto, a extração de feições, a partir destes mosaicos de ortoimagem verdadeira, de maneira precisa.

Tabela 2. Análise de qualidade geométrica do alinhamento do mosaico.

Área	RMSE (pixel)	GSD (m)	RMSE (m)
1	0,10	0,03	0,003
2	0,14	0,03	0,004
3	0,63	0,03	0,019
4	0,37	0,03	0,011

4.2.6 Balanceamento radiométrico de linhas de corte

A percepção de diferenças radiométricas em mosaicos de ortoimagem pode causar problemas na extração de informação, tanto de forma manual quanto automática. Além de dificuldades na extração de feições, tais diferenças resultam em um produto de baixa qualidade visual. Portanto, é importante o controle dessas variações de tonalidade. Neste experimento dois mosaicos de ortoimagem verdadeira foram suavizados por meio do método *feathering*. As Figuras 48 e 49 apresentam uma imagem gerada e duas áreas em destaque, tanto para o mosaico sem balanceamento de cores (a), quanto para o produto final sem a presença de linhas de corte (b), pós-balanceamento de cores.

Figura 48. Mosaicagem para o conjunto de dados 1. Uso do *Feathering*: (a) Sem. (b) Com.

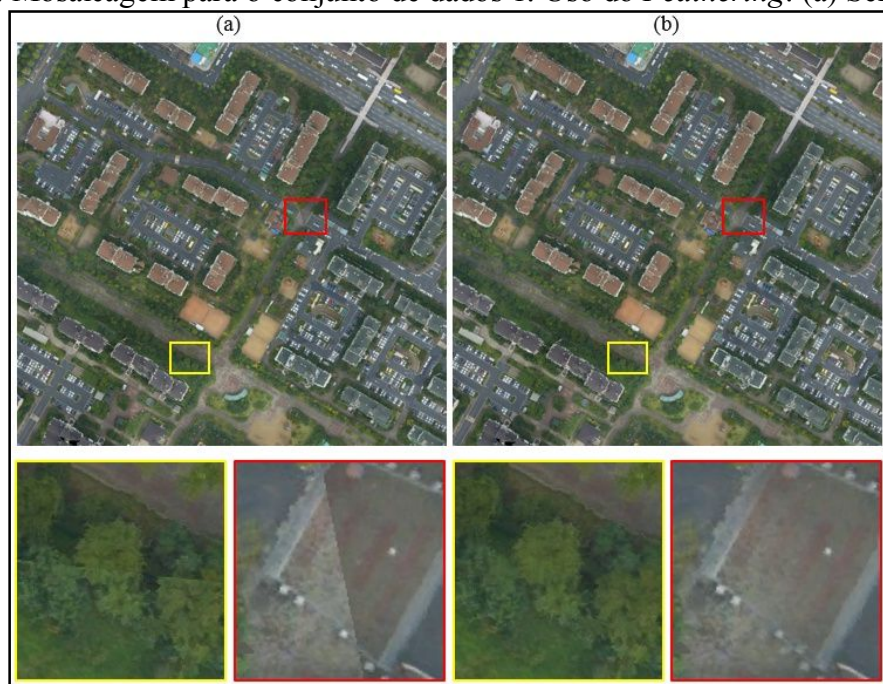
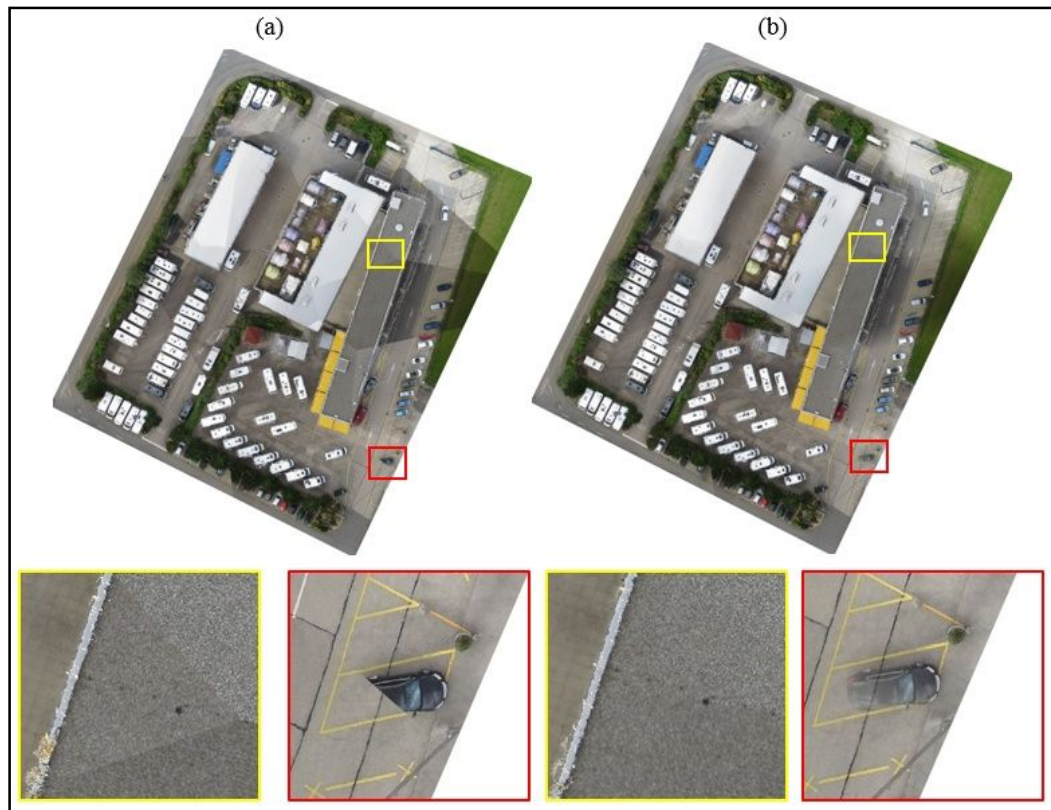


Figura 49. Mosaicagem para o conjunto de dados 2. Uso do *Feathering*: (a) Sem. (b) Com.

Ao analisar as Figuras 48 e 49, é possível notar visualmente a melhoria da qualidade do mosaico final, após aplicação do *feathering*. Este procedimento é comum na geração de mosaicos e não implica em degradação geométrica do produto final, desde que o bloco de imagens esteja bem orientado. Portanto, o SGBM utiliza o *feathering* como método para suavização de linhas de corte, para geração de mosaicos de ortoimagem verdadeira, sendo esta, livre de oclusões e de variações radiométricas ao longo das linhas de corte.

4.2.7 Efeito da subamostragem da nuvem de pontos na geração de ortoimagem verdadeira

A ideia principal deste experimento é verificar se, para a geração de mosaico de ortoimagens verdadeiras, a densidade da nuvem de pontos tem influência significativa no tempo de processamento dos dados e na qualidade do resultado final, ao utilizar o SGBM.

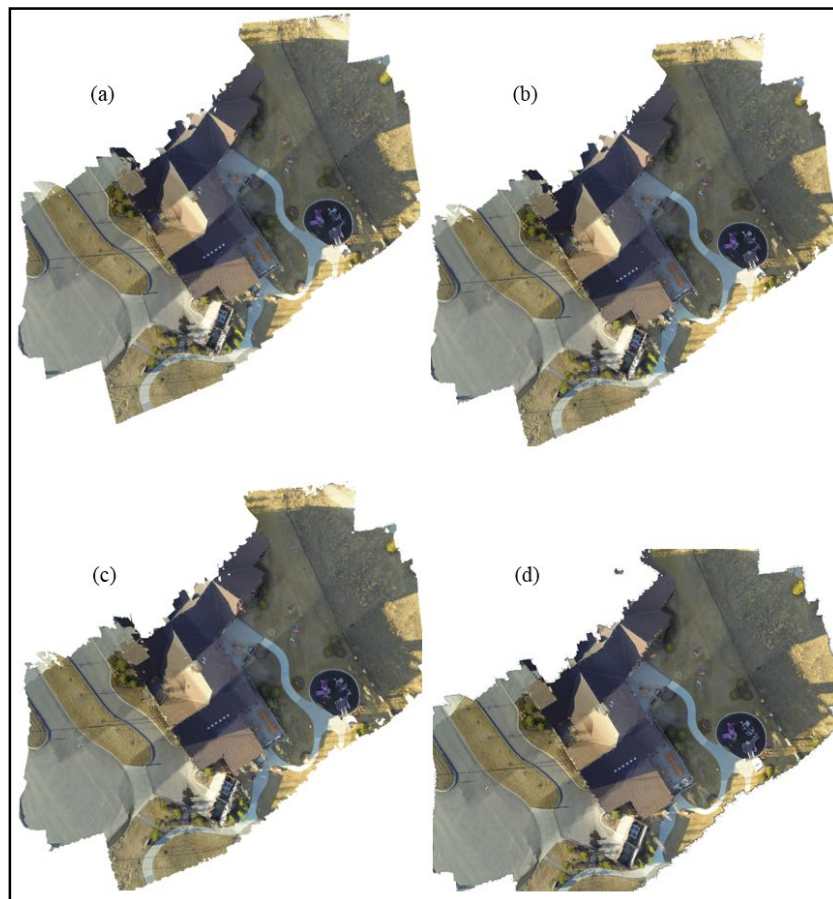
O uso de uma malha triangular como representação da superfície no método proposto permite o uso de diferentes densidades de pontos ao longo do modelo. Esta característica é uma vantagem do SGBM tanto pela possibilidade de amostrar a superfície, de maneira a se destacar determinadas feições (áreas com grandes discontinuidades), quanto pela opção de

subamostrar determinadas áreas, as quais não necessitam de uma grande quantidade de pontos para representá-las.

Neste experimento, o conjunto de dados 3 foi subamostrado em três diferentes densidades: 50 pontos/m², 10 pontos/m² e 5 pontos/m². Uma quarta densidade considerada (2,5 pontos/m²) origina-se de um SVLA. O processo de subamostragem foi realizado considerando a densidade local de pontos, como apresentado na Subseção 2.1.2.3.

A Figura 50 mostra o resultado para a mosaicagem de ortoimagem verdadeira, utilizando-se a estrutura de dados TIN com diferentes densidades de pontos (a) 50 pontos/m², (b) 10 pontos/m², (c) 5 pontos/m² e (d) 2,5 pontos/m².

Figura 50. Mosaico de ortoimagem verdadeira via SGBM com densidade variando em: (a) 50 pontos/m². (b) 10 pontos/m². (c) 5 pontos/m² e (d) 2,5 pontos/m².



Nota-se, de maneira geral, que a subamostragem das nuvens de pontos, que dão origem a detecção das áreas de oclusão, não influencia o processo de ortorretificação e a qualidade geométrica dos produtos finais, visto que, visualmente, os quatro produtos apresentados na Figura 50 são semelhantes. A seguir, nas Figuras 51 e 52, duas áreas extraídas dos mosaicos

apresentados na Figura 50 são destacadas (denominados detalhes 1 e 2) para melhor observação dos efeitos causados devido à subamostragem dos dados.

Figura 51. Detalhes 1 do mosaico em diferentes densidades.

(a) 50. (b) 10. (c) 5. (d) 2,5 pontos/m².

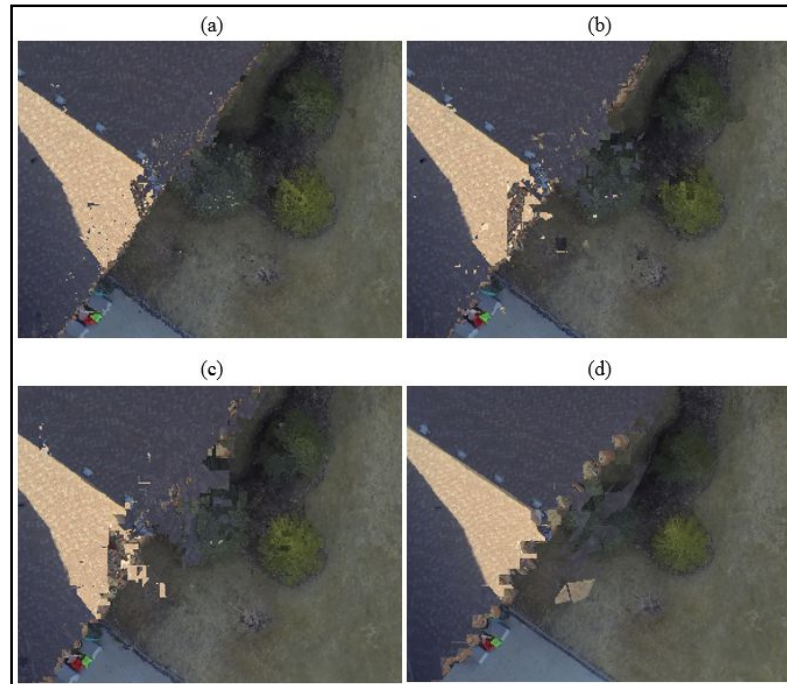
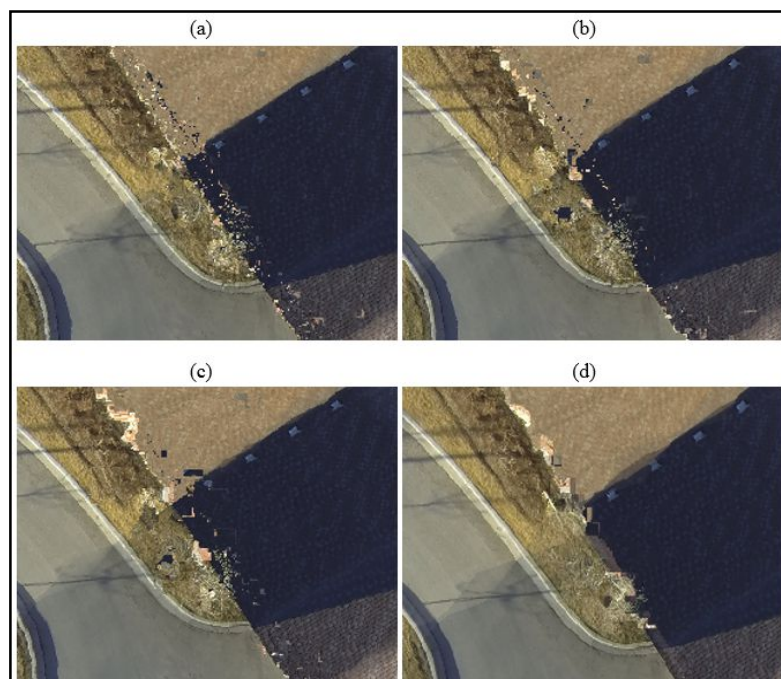


Figura 52. Detalhes 2 do mosaico em diferentes densidades.

(a) 50. (b) 10. (c) 5. (d) 2,5 pontos/m².



Ao analisar as Figuras 51 e 52, nota-se que conforme a densidade dos dados é reduzida, a qualidade, principalmente em áreas com presença de planos verticais (paredes), também diminui. Isso ocorre devido ao fato de que essas regiões se tornam mal representadas pela nuvem de pontos e, por conseguinte, a definição de áreas com descontinuidade (como as bordas das edificações) não são bem representadas. Porém, como se pode verificar, o resultado obtido com uma baixa densidade (2,5 pontos/m² nas Figuras 51 (d) e 52 (d)) não difere de maneira significativa daquele com uma alta densidade (50 pontos/m² nas Figuras 51 (a) e 52 (a)). Portanto, essa relação entre densidade da nuvem de pontos e qualidade do produto final deve sempre levar em consideração a aplicação que será dada para estes mosaicos.

Em relação ao tempo de processamento gasto ao variar as densidades da nuvem de pontos, observam-se as Tabelas 3 e 4, as quais são diferenciadas apenas pelo GSD da imagem de saída. Nota-se na Tabela 3, que a diferença no tempo de processamento varia bruscamente ao subamostrar uma nuvem de pontos de 50 para 2,5 pontos/m², reduzindo o tempo gasto em cerca de 64%. O mesmo ocorre ao utilizar uma diferente resolução para o mosaico final (Tabela 4), cuja redução foi na ordem de 90%.

Tabela 3. Tempo de processamento para o conjunto de dados 3 com os seguintes parâmetros:

GSD de 5 cm, Δr de 5 cm e Th de 2 m.

GSD de 5 cm	Oclusão (min.)	Mosaicagem (min.)	Total (min.)	Fator de Redução
50 pontos/m ²	62,1	8,9	71,0	referência f = 1
10 pontos /m ²	25,4	8,7	34,1	f = 0,48
5 pontos /m ²	19,6	8,3	27,9	f = 0,39
2,5 pontos /m ²	17,5	8,1	25,6	f = 0,36

Tabela 4. Tempo de processamento para o conjunto de dados 3 com os seguintes parâmetros:

GSD de 10 cm, Δr de 5 cm e Th de 2 m.

GSD de 10 cm	Oclusão (min.)	Mosaicagem (min.)	Total (min.)	Fator de Redução
50 pontos/m ²	46,0	3,95	49,95	referência f = 1
10 pontos /m ²	15,8	2,2	18,0	f = 0,36
5 pontos /m ²	11,1	2,0	13,1	f = 0,26
2,5 pontos /m ²	2,5	1,9	4,4	f = 0,08

Esse experimento tem grande valia, pois, apenas o método proposto nesta tese permite a utilização de uma nuvem de pontos tridimensionais irregularmente espaçados, para detecção de oclusões, o que permite uma taxa de redução considerável para o tempo de processamento, ao variar as densidades de pontos, e obtendo resultados semelhantes. Além de gerar mosaicos com resoluções iguais às imagens de entrada, não tendo influência da resolução do MDS utilizado, o que não é possível ao empregar os métodos descritos na Subseção 1.2.

5. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Este trabalho apresentou os conceitos fundamentais sobre a detecção de áreas de oclusão, etapa esta fundamental para a geração de ortoimagem verdadeira, utilizando como dados de entrada um conjunto de pontos tridimensionais irregularmente espaçados. Diversos métodos que abordam esse tema podem ser encontrados em literatura específica. A importância da ortoimagem verdadeira é observada em tarefas de extração de feições em áreas com presença de edificações, pois estas causam oclusões nas imagens, o que pode interferir na utilização de ortomagens em diversas aplicações. Essas áreas de oclusão devem, portanto, ser identificadas e compensadas, usando-se imagens adjacentes.

Como mencionado no Capítulo 1, os métodos encontrados como estado da arte possuem certas limitações, principalmente, no que se refere à modelagem dos dados tridimensionais da superfície. Essa representação da superfície é feita por meio de um conjunto de pontos regularmente espaçados, o que restringe a possibilidade de se trabalhar com diferentes densidades de pontos ao longo da área de interesse, opção esta que auxilia a modelagem de determinadas áreas. Em relação ao método projetivo, a desvantagem deste é a necessidade de modelos digitais de construção para detecção de oclusão, pois a geração deste modelo demanda interação de operador humano ou utilização de *software* específico, o que aumenta o custo do produto final, bem como o tempo de geração devido à etapa de pré-processamento.

Diante destas características, nesta tese propôs-se uma nova abordagem de detecção de oclusão para geração de ortoimagem verdadeira, visando avaliar a seguinte hipótese formulada:

“Dado um conjunto de imagens aéreas, e seus respectivos parâmetros de orientação interior e exterior, e um conjunto de pontos tridimensionais irregularmente espaçados, é possível, eficientemente, determinar áreas de oclusão usando gradientes de superfície sobre um poliedro, sem a necessidade de interpolação inicial dos dados ou do uso de um modelo digital de construção.”

Para isso, realizaram-se diversos experimentos usando três conjuntos de dados. Como os efeitos de oclusão são mais severos em imagens adquiridas com voos de baixa altura e um elevado ângulo de cobertura da câmara, os dados utilizados possuem tais características, sendo dois deles obtidos por uma plataforma VANT e outro por helicóptero. Dados oriundos dessas plataformas foram importantes neste trabalho, pois a utilização de câmaras de pequeno e médio formato, assim como a plataforma em si, é cada vez mais comum - o que implica na

necessidade de um procedimento fotogramétrico adequado. Isso tornou mais notável a importância da detecção e compensação das áreas de oclusão. Os pontos 3D referentes a estes conjuntos de dados foram obtidos por SVLA e por técnicas fotogramétricas, sendo um deles por ambas, o que permite a comparação dos resultados obtidos utilizando essas diferentes técnicas.

Ao analisar os resultados obtidos nas experimentações apresentadas, pode-se fazer as seguintes afirmações:

- O método proposto (SGBM) apresenta bons resultados, revelando alto grau de completude para as áreas de teste (96,54% e 91,8%), assim como alta coerência na detecção das oclusões, quando comparado visualmente com os métodos presentes no estado da arte. O tempo de processamento para detecção de oclusões mostrou a eficácia do método proposto quando comparado com os métodos do estado da arte;
- A utilização de uma malha triangular irregular (TIN), seguindo-se o critério de Delaunay, faz com que não seja necessário um processo inicial de interpolação dos dados e possibilita o emprego de diferentes densidades ao longo do MDS. Este aspecto pode melhorar os resultados, pois áreas mais acidentadas podem ser melhor representadas pela modificação da amostragem, além de acelerar o tempo de processamento (pela redução da amostragem em regiões em planas);
- É importante a utilização de parâmetros de entrada adequados (Δr e Th) para que sejam gerados mosaicos de ortoimagem verdadeira com boa qualidade. O parâmetro Th permite a seleção de determinadas edificações (altitudes mínimas) para consideração na detecção de áreas de oclusão, evitando alto processamento e a presença de ruídos;
- O uso do diagrama de Voronoi (além de um conjunto de parâmetros de orientação de boa qualidade e uma boa representação da superfície) contribuiu para a execução do processo de mosaicagem, por meio de uma função de custo, assim como, facilita a identificação das linhas de corte e, por sua vez, a suavização via *feathering*, que contribuiu para o balanceamento radiométrico do mosaico final;
- As funções de custo têm grande influência na compensação das áreas de oclusão. Para o caso em que a orientação da superfície em relação ao plano imagem é considerada, a densidade de pontos da superfície possui alto impacto no resultado obtido;

- Os mosaicos de ortoimagens verdadeiras, obtidos via SGBM, apresentam uma boa qualidade geométrica. Essa conclusão foi obtida com base na análise do alinhamento de feições lineares, presentes próximas às linhas de corte (erros no nível sub-pixel), o que indica uma boa orientação do bloco, representação de superfície e tratamento fotogramétrico;
- A utilização de dados provindos de plataformas do tipo VANT, juntamente com nuvem de pontos obtidos via técnica fotogramétrica, é uma alternativa rápida e viável, desde que os procedimentos fotogramétricos sejam executados de maneira adequada (calibração de câmara, refinamento de coordenadas e aerotriangulação). Caso contrário, não é possível extrair informações acuradas de dados coletados por este tipo de plataforma. Vale destacar que, atualmente, devido à legislação vigente, o uso destas plataformas em áreas urbanas é restrito. Entretanto, com o avanço da tecnologia e melhoria das medidas de segurança, seu uso poderá ser ampliado e, por conseguinte, métodos como o SGBM, poderão ser utilizados.

Como desvantagens do método proposto, pode-se citar:

- A necessidade de grande revisita aos *groundels* próximos ao ponto nadir. Este problema foi apresentado como possível desvantagem de métodos presentes no estado da arte. Porém, o SGBM também possui tal característica;
- A definição dos limiares Δr e Th . A escolha destes limiares, caso não seja adequada, pode causar falhas nas áreas de oclusão (falsa visibilidade) ou esforço computacional desnecessário. Portanto, é necessário certo conhecimento sobre os dados de entrada utilizados no método SGBM.

Como recomendações para trabalhos futuros, têm-se:

- A utilização de diferentes bibliotecas de funções computacionais, tais como a CGAL (*Computational Geometry Algorithms Library*), a PCL (*Point Cloud Library*), e outras, a fim de explorar novas funções e melhorar o desempenho do método proposto;
- Aplicação de uma função de custo para compensação de oclusão, capaz de considerar a qualidade dos parâmetros de orientação exterior (obtida após o procedimento de

aerotriangulação) na etapa de seleção da imagem ideal para preencher uma determinada área de oclusão;

- Implementação de alternativa para aplicação do método *feathering* para a situação em que menos de quatro imagens são utilizadas (número mínimo para determinação do diagrama de Voronoi), além de utilizar ajustamento radiométrico em bloco, o qual poderia ser uma alternativa para não utilização do *feathering*;
- A busca de metodologia para refinamento das bordas das edificações sem o uso de um modelo digital de construção;
- O uso dos gradientes de superfície, positivos e negativos, por meio do SGBM, para extração automática de modelos digitais de construção e modelagem tridimensional de áreas urbanas;
- Adequação do método proposto para sensores *pushbroom*, o qual, devido a sua geometria, não apresenta o problema de revisita a *groundels* próximo ao ponto nadir, além de permitir a aplicação dos métodos para a maioria dos sensores orbitais;
- A utilização de valores adaptativos para os parâmetros Δr e Th .

Como mencionado ao longo desta tese, a abordagem originalmente desenvolvida neste trabalho utiliza um conjunto de pontos irregularmente espaçados ao invés de uma grade regular, possibilitando o uso de densidades de pontos variadas e, conseqüentemente, a diminuição de esforço computacional, que ainda hoje é fator limitante para a geração rápida de mosaicos de ortoimagem verdadeira. Essa característica, que difere dos demais métodos encontrados na literatura, juntamente com os resultados apresentados e discutidos, permite a afirmação de que o método proposto apresenta contribuição na detecção de oclusão para geração de ortoimagem verdadeira.

REFERÊNCIAS

- ACKERMANN, F. Digital image correlation: Performance and potential application in photogrammetry. **The Photogrammetric Record**. v. 11, n. 64, p. 429-439. 1984.
- ACKERMANN, F. Airborne laser scanning: present status and future expectations. **ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing**. v. 54, p. 64-67. 1999.
- AGOURIS, P.; DOUCETTE, P.; STEFANIDIS, P. Automation and digital photogrammetric workstations. In: McGLONE, J. C.; MIKHAIL, E.; BETHEL, J. (Eds.) **Manual of photogrammetry**. 5ª edição. Bethesda: American Society for Photogrammetry and Remote Sensing. p. 949-981. 2004.
- AL-DURGHAM, M. M. The registration and segmentation of heterogeneous LASER scanner data. **Tese de Doutorado**. Universidade de Toronto. 2014.
- AMHAR, F.; JANSÁ, J.; RIES, C., The generation of true orthophotos using a 3D building model in conjunction with a conventional DTM. In: **The International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing**, v. 32, p.16-22. 1998.
- ANDRADE, J. B.; OLIVAS, M. A. A. Calibração de Câmaras Aerofotogramétricas. **Boletim da Universidade Federal do Paraná**, Curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas, Geodésia nº 26, Curitiba, 1981.
- ANDRADE, J. B.; **Fotogrametria**. Curitiba: SBEE, 1998. 258 p.
- ANGELOPOULOU, E.; WRIGHT, J. R. Laser scanner technology. **Technical report**. Universidade da Pensilvânia. 1999. 21p. Disponível em: < http://repository.upenn.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1083&context=cis_reports >. Acesso em: 28 abril 2016.
- ANTEQUERA, R.; ANDRINAL, P.; GONZÁLEZ, R.; BREIT, S.; DELGADO, J.; PÉREZ, J. L.; UREÑA, M.; MOLINA, S. Development of an integrated system of true ortho-rectification: The ATLAIS LRTO system. **The International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences**. v. 37, part B4, p. 253-258, 2008.
- ASPRS. ASPRS Positional Accuracy Standards for Digital Geospatial Data. **Photogrammetric Engineering & Remote Sensing**. v. 81, n. 3, p. A1-A26. 2015.
- AXELSSON, P. Processing of laser scanner data: algorithms and applications. **ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing**. v. 54, p. 138-147. 1999.
- BALTSAVIAS, E.P. Airborne laser scanning: existing systems and firms and other resources. **ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing**, v. 54, p. 164-198. 1999.
- BANG, K. I.; HABIB, A. F.; SHIN, S. W.; KIM, K. O. Comparative analysis of alternative methodologies for true ortho-photo generation from high resolution satellite imagery. **Anais da ASPRS Annual Conference**. Tampa, Florida. 2007.

- BARAZZETTI, L.; BROVELLI, M.; SCAIONI, M. Generation of true-orthophotos with lidar high resolution digital surface models. **The photogrammetric journal of Finland**, v. 21, n 1, p. 26-36. 2008.
- BARBER, C. B.; HUHDANPAA, H. **Qhull**. 2012. Disponível em <<http://www.qhull.org>>. Acesso em: 06 out. 2014.
- BAY, H.; TUYTELAARS, T.; GOOL, L. V. **SURF: Speed up robust features**. European Conference on Computer Vision. v. 1, p. 404-417. 2006.
- BROWN, D. C. Decentering distortion of lens. **Photogrammetric Engineering**, v. 32, n. 3, p. 444-462. 1966.
- BURT, P. J.; ADELSON, E. H. A multiresolution spline with application to image mosaics. **ACM Transactions on Graphics**. v. 2, n.4, p. 217-236, 1983.
- CATMULL, E. E. A subdivision algorithm for computer display of curved surface. **Tese de Doutorado**. Universidade de Utah. 1974.
- CENTENO, J. A. S.; MITISHITA, E. A. Laser scanner aerotransportado no estudo de áreas urbanas: A experiência da UFPR. **Anais do XIII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto**, Florianópolis, INPE, p. 3645-3652. 2007.
- CHEN, L.; TEO, T.; WEN, J.; RAU, J. Occlusion-Compensated True Orthorectification For High-Resolution Satellite Images. **The Photogrammetric Record**. v. 22, n. 117, p. 39-52. 2007.
- CONRADY, A. E. Decentred lens-systems. **Royal Astronomical Society**, v.79, p. 384-390. 1919.
- DELAUNAY, B. Sur la sphère vide. **Bulletin de l'académie des sciences de l'urss**. Classe des sciences mathématiques et naturalles. v. 6, p. 793-800. 1934.
- EL-SHEIMY, N.; VALEO, C.; HABIB, A. **Digital Terrain Modeling: acquisition, manipulation and applications**. London: Artech House, 2005. 526 p.
- FANGMING, Q.; WEI, L. Research on the Occlusion Processing Method for True Orthophoto. **Anais do VII International Conference on Image and Graphics**. p. 328-331. 2013.
- FAZAN, A. J.; DAL POZ, A. P. Rectilinear building roof contour extraction based on snakes and dynamic programming. **International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation**. v. 25, p. 1-10. 2013.
- FELGUEIRAS, C. A.; CÂMARA, G. Modelagem numérica de terrenos. In: CÂMARA, G.; DAVIS, C.; MONTEIRO, A. M. V. (Eds.) **Introdução à ciência da geoinformação**. São José dos Campos: INPE. cap. 7, 2004. Disponível em: <<http://www.dpi.inpe.br/gilberto/livro/intro>>. Acesso em: 21 fevereiro 2016.

- FORSTNER, W. On the geometric precision of digital correlation. **International Archives of Photogrammetry**. v. 24, n. 3, p. 176–189. 1982.
- FOTH, H. J. Principles of Lasers. In: LACKNER, M. **Lasers in Chemistry: Probing Matter**. Weinheim, Alemanha: Wiley-Vch Verlag GmbH & Co, 2008. 1554 p.
- FRIEDMAN, J. H.; BENTLEY, J. L.; FINKEL, R. A. An algorithm for finding best matches in logarithmic expected time. **ACM Transactions on Mathematical Software**. v. 3(3), p. 209-226, 1977.
- GALO, M.; TOMMASELLI, A. M. G. Calibração de Câmaras. In: Piteri, Marco A.; Rodrigues, José C. (Org.). **Fundamentos de visão computacional**. Presidente Prudente, Faculdade de Ciências e Tecnologia – UNESP. p. 53-112. 2011.
- GRANSHAW, S. I. Imaging technology 1430-2015: old masters to mass photogrammetry. **The Photogrammetric Record**. v. 30(151), p. 255-260, 2015.
- GRUEN, A. 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.
- GÜNAY, A.; AREFI, H.; HANH, M. True orthophoto production using LiDAR data. **The International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing**. v.XXXVI-4, 2007.
- HAALA, N. Comeback of digital image matching. **Proceedings of Photogrammetric Week**. Heidelberg – Germany. p. 289-301, 2009.
- HABIB, A. F.; KIM, E.; KIM, C. New Methodologies for True Orthophoto Generation. **Photogrammetric Engineering & Remote Sensing**. v.73, n. 1, p. 25-36. 2007.
- HABIB, A. F. Integration of lidar and photogrammetric data: triangulation and orthorectification. In: SHAN, J.; TOOTH, C. K. **Topographic laser ranging and scanning - principles and processing**. CRC Press. 2008. 590p.
- HARRIS, C.; STEPHENS, M. A combined corner and edge detector. In: **Alvey Vision Conference**, UK. p. 147–152. 1988.
- HE, F.; HABIB, A.; AL-RAWABDEH, A. Planar Constraint for an Improved UAV-image-based Point Cloud Generation. **The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences**, v. XL-1/W4, p. 269-274, 2015.
- HIRSCHMÜLLER, H. Accurate and efficient stereo processing by semi-global matching and mutual information. **Proceedings of IEEE Conference on Computer Vision and Pattern**. v. 2, p. 807-814, 2005.
- HIRSCHMÜLLER, H. stereo processing by semiglobal matching and mutual information. **Proceedings of IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence**. v. 30, n. 2, p. 328-341, 2008.

- ISENBURG, M. **LASTOOLS: Software for rapid converting, filtering, viewing, gridding, and compressing of LIDAR**. Disponível em: <<http://www.cs.unc.edu/~isenburg/lastools/>>. Acesso em 06 de out. de 2014.
- JENSEN, J. R. **Sensoriamento Remoto do Ambiente: Uma Perspectiva em Recursos Terrestres**. 2º edição. São José dos Campos: Parêntese editora, 2009. 597 p.
- KANADE, T.; OKUTOMI, M. A stereo matching algorithm with an adaptive window: theory and experiments. **IEEE International Conference on Robotics and Automation**, California. p. 1088-1095. 1991.
- KEAR, M. J. Understanding LASER. **Electronics & Power**. p. 359-361. 1973
- KRAUS, K. **Photogrammetry - Fundamentals and Standard Processes**. Bonn: Ferd. Dümmler Verlag, 1993, v. 1. 397 p.
- KRAUS, K. **Photogrammetry – Geometry from Images and Laser Scans**. 2º edição. Berlin: Walter de Gruyter. 2007. 448 p.
- KRAUS, K.; PFEIFER, N. Determination of terrain models in wooded areas with airborne laser scanner data. **ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing**. v. 53, n. 4, p. 193-203. 1998.
- LARI, Z. Adaptive processing of LASER scanning data and texturing of the segmentation outcome. **Tese de Doutorado**. Universidade de Calgary. 2014.
- LEE, D. T.; SCHACHTER, B. J. Two algorithms for constructing a Delaunay triangulation. **International Journal of Computer and Information Sciences**, v. 9, n. 3, p.219-242. 1980.
- LI, Z.; ZHU, Q.; GOLD, C. **Digital Terrain Modeling – Principles and Methodology**. Boca Raton: CRC Press, 2004. 318 p.
- LIN, Y. J.; HABIB, A. F. An adaptive down-sampling strategy for efficient point cloud segmentation. **In: Proceedings of the ASPRS 2015 Annual Conference**. Tampa, Florida, USA, 2015.
- LOWE, D. G. Object recognition from local scale-invariant features. **In: Proceedings of the International Conference on Computer Vision**, Corfu. Greece. p. 1150-1157, 1999.
- LOWE, D. G. Distinctive image features from scale-invariant keypoints. **International journal of computer vision**, v. 60, n. 2, p. 91-110. 2004.
- MACHADO, A. M. L.; MITISHITA, E. A.; SANTOS JÚNIOR, R. L. Estudo de caso: correção de erros sistemático em câmaras digitais não métricas. **Anais do I Simpósio em Ciências Geodésicas e Tecnologias da Geoinformação**, Recife, CTG/UFPE, 2004.
- MACHADO, A.; MITISHITA, E. A.; DELARA, R. Algoritmo para detecção automática de oclusões na geração de true orthophoto. **Série em Ciências Geodésicas**, v.5, Curitiba, p. 219-228. 2005.

- MAYER, H.; SESTER, M.; VOSSelman, G. Basic computer vision techniques. In: McGLONE, J. C. (Ed.) **Manual of photogrammetry**. 6ª edição. Bethesda: American Society for Photogrammetry and Remote Sensing, 2013. 1318 p.
- MENDONÇA JÚNIOR, M. G. Reconstrução de edificações para geração de ortoimagens verdadeiras com empregos de dados LIDAR. **Tese de Doutorado**. Universidade Federal do Paraná. Curitiba. 2010.
- MIKHAIL, E. M.; BETHEL, J. S.; McGLONE, J. C. **Introduction to Modern Photogrammetry**. Nova Iorque: John Wiley & Sons, Inc. 2001. 479 p.
- MILLER, S. Photogrammetric products. In: McGLONE, J. C.; E. MIKHAIL; BETHEL, J. (Eds.) **Manual of photogrammetry**. 5ª edição. Bethesda: American Society for Photogrammetry and Remote Sensing, p. 983-1013. 2004.
- NIELSEN, M. O. True Orthophoto Generation. **Dissertação de Mestrado**. Universidade Técnica da Dinamarca. Informatics and Mathematical Modelling. Kgs. Lyngby. 2004.
- OLIVEIRA, H. C. Detecção de áreas de oclusão para geração de ortoimagens verdadeiras utilizando dados LASER. **Dissertação de Mestrado**. Universidade Estadual Paulista. Presidente Prudente. Brasil. 2013.
- OLIVEIRA, H. C.; GALO, M. Occlusion detection by height gradient for true orthophoto generation, using LiDAR data". In: **The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Science**. v. XL-1/W, p. 275-280, 2013.
- OLIVEIRA, H. C.; GALO, M.; DAL POZ, A. P. Uso de morfologia matemática para o refinamento de detecção de áreas de oclusão por gradientes de altura. In: **Anais do XXVI Congresso Brasileiro de Cartografia**. 2014.
- OLIVEIRA, H. C., GALO, M., DAL POZ, A. P. Height-Gradient-Based Method for Occlusion Detection in True Orthophoto Generation. **IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters**. v. 12, p. 2222-2226, 2015a.
- OLIVEIRA, H. C.; HABIB, A. F.; DAL POZ, A. P.; GALO, M. Height Gradient Approach for Occlusion Detection in UAV Imagery. **The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences**. v. XL-1/W4, p. 263-268, 2015b.
- O'ROURKE, J. **Computational Geometry in C**. 2ª edição. New York: Cambridge University Press, 1998. 350p.
- PETRIE, G.; TOTH, C. K. Airborne and Spaceborne LASER Profilers and Scanners. In: SHAN, J.; TOTH, C. K. (Eds.) **Topographic Laser Ranging and Scanning - Principles and Processing**. Boca Raton: CRC Press. 2008. 590p.
- QIN, Z.; LI, W.; LI, M.; CHEN, Z.; ZHOU, G. A Methodology for True Orthorectification of Large-Scale Urban Aerial Images and Automatic Detection of Building Occlusions Using Digital Surface Model. In: **Proceedings of the IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium**. p. 729-731. 2003.

- RADWAN, M.; MAKAROVIC, B. Digital mono plotting system - improvements and tests. **In: Proceedings of the XIV Congress of the International Society for Photogrammetry.** p. 308-327, 1980.
- RAU, J. Y.; CHEN, N. Y.; CHEN, L. C. True orthophoto generation of built-up areas using multi-view images. **Photogrammetric Engineering & Remote Sensing.** v. 68, n. 6, p. 581-588. 2002.
- REMONDINO, F.; SPERA, M. G.; NOCERINO, E.; MENNA, F.; NEX, F. State of the art in high density image matching. **The Photogrammetric Record.** v. 29, n. 146, p. 144-166, 2014.
- ROGERS, D. F. **Procedural Elements for Computer Graphics.** New York: McGraw-Hill International Editions, 1985. 422p.
- RUBLEE, E.; RABAUD, V.; KONOLIGE, K; BRADSKI, G. ORB: an efficient alternative to SIFT or SURF. **In: Proceedings of the IEEE International Conference on Computer Vision,** v. 13, p. 2564-2571, 2011.
- SCHALKOFF, R. J. **Digital Image Processing and Computer Vision.** Singapore: John Wiley & Sons, 1989. 489 p.
- SCHICKLER, W.; THORPE, A. Operational procedure for automatic true orthophoto generation. **In: The International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing.** v. 32, Part 4. p. 527 – 532. 1998.
- SHAPIRO, L. G.; HARALICK, R. M. Relational matching. **Applied Optics.** v. 26, n. 10, p. 1845-1851, 1987.
- SHAN, J.; TOTH, C. K. **Topographic Laser Ranging and Scanning - Principles and Processing.** Boca Raton: CRC Press, 2008. 590p.
- SHARIAT, M.; AZIZI, A.; SAADATSERESHT, M. Analysis and the solutions for generating a true digital ortho photo in close range photogrammetry. **In: The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences.** v. 37. Part B4. Beijing. p. 439-442. 2008.
- SHENG, Y., Minimising Algorithm-Induced Artefacts in True Ortho-Image Generation: A Direct Method Implemented in The Vector Domain. **The Photogrammetric Record.** v. 22, n. 118, p. 116-198. 2007.
- VOLOTÃO, C. F. S. Geração de Ortoimagens para aplicações urbanas: desenvolvimento das equações e protótipo experimental. **Dissertação de Mestrado.** Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE). São José dos Campos. 2001.
- WANG, X.; XIE, J. A method for true orthophoto generation based on projection and iteration strategy. **In: ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences,** v. I-4, Melbourne, Australia. 2012.

- WEHR, A.; LOHR, U. Airborne laser scanning – an introduction and overview. **ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing**, v. 54, n. 2-3, p. 68-82. 1999.
- WIEDEMANN, C.; HEIPKE, C.; MAYER, H.; JAMET, O. Empirical evaluation of automatically extracted road axes. **Empirical Evaluation Methods in Computer Vision**, Ed. Bowyer. IEEE Computer Society Press, p. 172-187. 1998.
- WIMMER, R. True orthophoto generation. **Tese de Bacharelado**. Faculdade de Informática da Universidade de Ciências Aplicadas. Suíça. 2010.
- WOLF, P. R.; DEWITT, B. A. **Elements of Photogrammetry – with applications in GIS**. 3º edição. USA: McGraw-Hill, 2000. 608 p.
- WOLF, P. R.; DEWITT, B. A. WILKINSON, B. E. **Elements of Photogrammetry – with applications in GIS**. 4º edição. USA: McGraw-Hill Education, 2014. 676 p.
- WU, J.; JIE, S.; YAO, W.; STILLA, U. Building Boundary Improvement for True Orthophoto Generation by Fusing Airborne LiDAR Data. **In: Proceedings of the Joint Urban Remote Sensing Event**. p. 125-128. 2011.
- XIE, W.; ZHOU, G. Experimental Realization of Urban Large-Scale True Orthoimage Generation. **In: The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences**. v. 37. Part B1. Beijing, 2008.
- YOO, E. J.; LEE, D. C. True orthoimage generation by mutual recovery of occlusion areas. **GIScience & Remote Sensing**. v.53, n.2, p. 227-246, 2016.
- ZHONG, C.; LI, H.; HUANG, X. A fast and effective approach to generate true orthophoto in built-up area. **Sensor Review**. v. 31, n. 4, p. 341–348. 2011.
- ZHOU, G.; CHEN, W.; KELMELIS, J. A.; ZHANG, D. A comprehensive study on urban true orthorectification. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 43, n. 9, p. 2138-2147. 2005.