

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

NATÁLIA CARVALHO DE AMORIM

AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DA TÉCNICA STRUCTURE FROM MOTION PARA  
MAPEAMENTO DE CORREDORES

CURITIBA

2020

NATÁLIA CARVALHO DE AMORIM

AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DA TÉCNICA STRUCTURE FROM MOTION PARA  
MAPEAMENTO DE CORREDORES

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

Orientador: Prof. Dr. Edson Aparecido Mitishita

CURITIBA

2020

Catálogo na Fonte: Sistema de Bibliotecas, UFPR  
Biblioteca de Ciência e Tecnologia

A524a

Amorim, Natália Carvalho de  
Avaliação do desempenho da técnica structure from motion para  
mapeamento de corredores [recurso eletrônico] / Natália Carvalho de  
Amorim. – Curitiba, 2020.

Dissertação - Universidade Federal do Paraná, Setor de Ciências da  
Terra, Programa de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas , 2020.

Orientador: Edson Aparecido Mitishita

1. Fotogrametria. 2. Fotogrametria aérea. 3. Mapeamento. 4. Structure  
from Motion. I. Universidade Federal do Paraná. II. Mitishita, Edson  
Aparecido. III. Título.

CDD: 526.982

Bibliotecário: Elias Barbosa da Silva CRB-9/1894



## TERMO DE APROVAÇÃO

Os membros da Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em CIÊNCIAS GEODÉSICAS da Universidade Federal do Paraná foram convocados para realizar a arguição da dissertação de Mestrado de **NATALIA CARVALHO DE AMORIM** intitulada: **AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DA TÉCNICA STRUCTURE FROM MOTION PARA MAPEAMENTO DE CORREDORES**, sob orientação do Prof. Dr. EDSON APARECIDO MITISHITA, que após terem inquirido a aluna e realizada a avaliação do trabalho, são de parecer pela sua APROVAÇÃO no rito de defesa.

A outorga do título de mestre está sujeita à homologação pelo colegiado, ao atendimento de todas as indicações e correções solicitadas pela banca e ao pleno atendimento das demandas regimentais do Programa de Pós-Graduação.

CURITIBA, 13 de Julho de 2020.

Assinatura Eletrônica

23/07/2020 15:35:32.0

EDSON APARECIDO MITISHITA

Presidente da Banca Examinadora (UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ)

Assinatura Eletrônica

24/07/2020 18:51:05.0

HIDEO ARAKI

Avaliador Interno (UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ)

Assinatura Eletrônica

23/07/2020 15:40:45.0

ANTONIO MARIA GARCIA TOMMASELLI

Avaliador Externo (UNIVERSIDADE EST. PAULISTA JÚLIO DE MESQUITA FILHO/PR. PRUDENT)

*Dedico este trabalho ao meu noivo, Angelo A. Rodrigues,  
que não mediu esforços para tornar nossos sonhos realidade e também a todos que  
contribuíram de forma direta ou indireta em minha jornada acadêmica.*

## **AGRADECIMENTOS**

A Deus que sempre me deu força e ânimo para continuar.

Ao meu noivo, Angelo A. Rodrigues, por ter dividido comigo todos os momentos desta jornada, desde quando era apenas um sonho, até a sua realização.

Aos Professores do Programa de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas e à Universidade Federal do Paraná pela oportunidade de aprendizado técnico, científico e profissional.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pela concessão da bolsa de pesquisa.

Ao Professor Edson Aparecido Mitishita que, apesar das dificuldades e desafios que enfrentei, sempre se dispôs a ajudar da melhor forma possível e ao Professor Leonardo Ercolin pela sua colaboração na parte técnica operacional desta pesquisa.

Aos meus colegas de laboratório Niarkios, Felipe, Leonardo Biffi e Kalima por toda ajuda que ofereceram ao longo de minha jornada acadêmica. E também ao meu caro amigo Vinícius Emmel pela ajuda com os levantamentos realizados.

Também aos meus colegas de outros laboratórios por tornarem esta jornada muito mais agradável: Alex, Bossola, Daniel (Fluniel) e Rubens.

*"Bendito seja Deus, que não rejeitou a minha oração,  
nem tirou de mim a sua benignidade."  
(Bíblia Sagrada, Salmos 66, 20)*

## RESUMO

Os Veículos Aéreos não Tripulados têm se tornado cada vez mais presentes no contexto civil, sendo utilizados em diversas áreas do conhecimento. Aliados às técnicas de processamento de dados fotogramétricos e às novas abordagens desenvolvidas pela Visão Computacional, promoveram produtividade, economia e confiabilidade no processo de geração de produtos cartográficos em grandes escalas, através do alto nível de automatização proporcionada. Por este motivo, a técnica *Structure from Motion*, que tem seu funcionamento básico baseado na estereoscopia fotogramétrica, se tornou popular nas comunidades profissionais e científicas e atualmente é amplamente utilizada para fins de mapeamento. Desta forma, foram elaborados diversos estudos com o objetivo de determinar as melhores práticas, planejamento de voo e distribuição de pontos de apoio a utilizar para alcançar melhores exatidões no emprego do SfM, contudo a maioria destes estudos têm foco na geometria de um bloco de imagens e pouco se discute sobre a aplicação do SfM em projetos de engenharia que assumem a forma de um corredor, tais como rios, estradas, ferrovias e linhas de força. Sabendo que corredores apresentam fragilidades geométricas, torna-se importante a realização de estudos que buscam determinar as melhores práticas para o alcance de melhor exatidão no mapeamento de corredores. Neste contexto o objetivo deste trabalho é desenvolver um estudo teórico e propor procedimentos práticos para a realização de levantamentos aerofotogramétricos com o uso de faixas longas, processadas com aplicação da técnica SfM-MVS, utilizando um software especialista. Adicionalmente, os resultados obtidos serão comparados com resultados provenientes de programas de aerotriangulação. O corredor mapeado neste estudo possui aproximadamente 1,3 km de extensão e utilizou-se o recobrimento fotogramétrico de 80% de sobreposição longitudinal e 60% de sobreposição lateral, a uma altura de voo de aproximadamente 100 m. Três faixas foram adquiridas para verificar a influência da adição de faixas na exatidão e precisão alcançados. As coordenadas dos pontos de apoio foram extraídas do ortomosaico disponibilizado pelo projeto UFPR CampusMap. A análise da precisão e exatidão alcançada pelo processamento se dá através dos valores de erro médio quadrático dos resíduos dos pontos de apoio e das discrepâncias dos pontos de verificação, segundo a tolerância estabelecida neste estudo. Os resultados revelaram que, para o corredor estudado, alcança-se melhor exatidão quando pontos de apoio são inseridos a cada cinco bases. Além disso, a adição de faixas não proporciona redução significativa do valor do EQM das discrepâncias planialtimétricas dos pontos de verificação, sendo o mais importante para a redução deste valor, a quantidade de pontos de apoio empregada no ajustamento.

**Palavras-chaves:** SfM. Corredor. Metashape. LPS.

## ABSTRACT

Unmanned aerial vehicles have become increasingly present in the civil context, being used in several areas of knowledge. Combined with photogrammetric data processing techniques and new approaches developed by Computer Vision, they promoted productivity, economy, and reliability in the process of generating cartographic products. For this reason, the *Structure from Motion* technique, which has its basic function based on photogrammetric stereoscopy, has become popular in professional and scientific communities and is now widely used for mapping purposes. In this way, several studies were developed to determine the best practices, flight planning and distribution of support points to be used to achieve better accuracy in the use of the SfM, however, most of these studies focus on the geometry of a block of images and little is discussed about the application of SfM in engineering projects that take the form of a corridor, such as rivers, roads, railways, and power lines. Knowing that corridors have geometric weaknesses, it is important to carry out studies that seek to determine the best practices to achieve the best accuracy in corridor mapping. In this context the objective of this work is to develop a theoretical study and propose practical procedures for conducting aerophotogrammetric surveys using long strips, processed using the SfM-MVS technique, using specialist software. Additionally, the results obtained will be compared with results from conventional aerotriangulation programs. The corridor mapped in this study is approximately 1.3 km long and the photogrammetric covering of 80% longitudinal overlap and 60% lateral overlap was used, at a flight height of approximately 100 m. Three bands were acquired to verify the influence of the addition of bands on the accuracy and precision achieved. The coordinates of the support points were extracted from the orthomosaic provided by the UFPR CampusMap project. The analysis of the precision and accuracy achieved by the processing takes place through the values of Mean Square Error (MSE) of the residuals of the support points and the discrepancies of the verification points, according to the tolerance established in this study. The results revealed that, for the studied corridor, better accuracy is achieved when support points are inserted every five bases. Also, the addition of bands does not provide a significant reduction in the MSE value of the planialtimetric discrepancies of the verification points, the most important for the reduction of this value, the number of ground control points used in the adjustment.

**Key-words:** SfM. Corridor. Metashape. LPS.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

FIGURA 1 – REPRESENTAÇÃO EM COORDENADAS HOMOGÊNEAS . . . . .	24
FIGURA 2 – MODELO PINHOLE . . . . .	25
FIGURA 3 – ESPAÇO-ESCALA . . . . .	32
FIGURA 4 – MAGNITUDE E ORIENTAÇÃO DOS GRADIENTES . . . . .	34
FIGURA 5 – HISTOGRAMA DE ORIENTAÇÕES . . . . .	34
FIGURA 6 – GEOMETRIA EPIPOLAR . . . . .	38
FIGURA 7 – INTERSEÇÃO FOTOGRAMÉTRICA . . . . .	40
FIGURA 8 – STRUCTURE FROM MOTION . . . . .	42
FIGURA 9 – ÁREA DE ESTUDO . . . . .	46
FIGURA 10 – PLANO DE VOO . . . . .	47
FIGURA 11 – PONTOS DE APOIO E VERIFICAÇÃO . . . . .	49
FIGURA 12 – PONTOS DE APOIO E VERIFICAÇÃO . . . . .	50
FIGURA 13 – PONTOS DE APOIO E VERIFICAÇÃO . . . . .	50
FIGURA 14 – PONTOS DE APOIO E VERIFICAÇÃO . . . . .	51
FIGURA 15 – PONTOS DE APOIO E VERIFICAÇÃO . . . . .	51
FIGURA 16 – PONTOS DE APOIO E VERIFICAÇÃO . . . . .	52
FIGURA 17 – METODOLOGIA . . . . .	53
FIGURA 18 – EXPERIMENTO COM UM ÚNICO PONTO DE APOIO . . . . .	56
FIGURA 19 – EXPERIMENTOS EM UMA FAIXA . . . . .	63
FIGURA 20 – EXPERIMENTOS EM DUAS FAIXAS . . . . .	70
FIGURA 21 – EXPERIMENTOS EM TRÊS FAIXAS . . . . .	76
FIGURA 22 – AEROTRIANGULAÇÃO - EXPERIMENTO 1 . . . . .	82
FIGURA 23 – RESÍDUOS DAS OBSERVAÇÕES FOTOGRAMÉTRICAS AUTO- MÁTICAS . . . . .	84
FIGURA 24 – DIFERENÇAS ENTRE OS POE ESTIMADOS PELO METASHAPE E LPS . . . . .	85
FIGURA 25 – AEROTRIANGULAÇÃO - EXPERIMENTO 2 . . . . .	89
FIGURA 26 – RESÍDUOS DAS OBSERVAÇÕES FOTOGRAMÉTRICAS AUTO- MÁTICAS . . . . .	90
FIGURA 27 – DIFERENÇAS DOS PARÂMETROS DE ORIENTAÇÃO EXTERIOR- EXPERIMENTO 2 . . . . .	91

## LISTA DE TABELAS

TABELA 1 – EXPERIMENTO EM UMA FAIXA . . . . .	59
TABELA 2 – MÉDIA DAS DISCREPÂNCIAS DOS PONTOS DE VERIFICAÇÃO	61
TABELA 3 – EXPERIMENTO EM DUAS FAIXAS . . . . .	65
TABELA 4 – MÉDIA DAS DISCREPÂNCIAS DOS PONTOS DE VERIFICAÇÃO	67
TABELA 5 – EXPERIMENTO EM TRÊS FAIXAS . . . . .	71
TABELA 6 – MÉDIA DAS DISCREPÂNCIAS DOS PONTOS DE VERIFICAÇÃO	73
TABELA 7 – VALORES DE TRANSLAÇÃO . . . . .	78
TABELA 8 – VALORES DE POE PARA FAIXA SEM PONTOS DE APOIO . . .	79
TABELA 9 – VALORES DE POE PARA FAIXA COM UM PONTO DE APOIO .	79
TABELA 10 – EQM DOS RESÍDUOS E DISCREPÂNCIAS - EXPERIMENTO 1 .	80
TABELA 11 – MÉDIA DAS DISCREPÂNCIAS DOS PONTOS DE VERIFICAÇÃO	81
TABELA 12 – RESÍDUOS OBTIDOS DO EXPERIMENTO 2 . . . . .	87
TABELA 13 – MÉDIA DAS DISCREPÂNCIAS DOS PONTOS DE VERIFICAÇÃO - EXPERIMENTO 2 . . . . .	88
TABELA 14 – ESTIMATIVAS DOS PARÂMETROS DE ORIENTAÇÃO INTERIOR	91

## LISTA DE ABREVIATURAS E DE SIGLAS

**CP** Centro de Projeção

**DG** Diferença de Gaussianas

**EQM** Erro Quadrático Médio

**GNSS** *Global Navigation Satellite System*

**GSD** *Ground Sample Distance*

**LPS** *Leica Photogrammetric Suite*

**LiDAR** *Light Detection and Ranging*

**MVS** *Multi-View Stereo*

**PPK** *Post-Processing Kinematic*

**RANSAC** *Random Sample Consensus*

**RPA** *Remotely Piloted Aircraft*

**RTK** *Real Time Kinematic*

**SIFT** *Scale Invariant Features Transform*

**SPS** *Standart Positioning Service*

**SVD** *Singular Values Decomposition*

**SfM** *Structure from Motion*

**UAV** *Unmanned Aerial Vehicle*

**VANT** Veículo Aéreo não Tripulado

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>14</b>
1.1	CONSIDERAÇÕES INICIAIS	14
1.2	ESTADO DA ARTE	16
1.3	OBJETIVOS	18
1.3.1	Objetivos Específicos	18
1.4	JUSTIFICATIVA	19
<b>2</b>	<b>STRUCTURE FROM MOTION</b>	<b>20</b>
2.1	DEFINIÇÃO E EVOLUÇÃO HISTÓRICA	20
2.2	FUNDAMENTOS TEÓRICOS E MATEMÁTICOS	23
2.2.1	Noções Preliminares	23
2.2.1.1	Sistema de Coordenadas Homogêneas	23
2.2.1.2	O Modelo Pinhole	24
2.2.1.3	Decomposição em Valores Singulares	28
2.2.2	Algoritmo SfM	30
2.2.2.1	Detecção de Pontos-chave e determinação das correspondências	31
2.2.2.2	Eliminação de Falsas Correspondências	35
2.2.2.3	Orientação Relativa dos Pares e Reconstrução da Cena	37
2.2.2.4	Inicialização dos Parâmetros intrínsecos e das Coordenadas Tridimensionais dos Pontos Homólogos	39
2.2.2.5	Bundle Adjustment	42
2.2.2.6	Transformação de Similaridade	43
<b>3</b>	<b>MATERIAL E MÉTODOS</b>	<b>45</b>
3.1	MATERIAL	45
3.2	METODOLOGIA	45
3.2.1	Área de Estudo e Recobrimento Aéreo	45
3.2.2	Distribuição de Pontos de Apoio	47
3.2.3	Processamento das Imagens	52
3.2.3.1	Processamento com Metashape	52
3.2.3.2	Aerotriangulação com LPS	56
<b>4</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES</b>	<b>58</b>
4.1	EXPERIMENTOS REALIZADOS NO METASHAPE	58
4.1.1	Recobrimento aéreo do corredor com uma única faixa	58
4.1.2	Recobrimento aéreo do corredor com duas faixas	65

		13
4.1.3	Recobrimento do corredor em três faixas . . . . .	71
4.1.4	Estudo da utilização de um ponto de apoio . . . . .	77
4.2	EXPERIMENTOS REALIZADOS UTILIZANDO O LPS . . . . .	79
4.2.1	Experimento 1 . . . . .	79
4.2.2	Experimento 2 . . . . .	87
<b>5</b>	<b>CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES . . . . .</b>	<b>93</b>
	<b>REFERÊNCIAS . . . . .</b>	<b>96</b>

# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Os Veículos Aéreos não Tripulados, também citados na literatura como VANT, RPA (*Remotely Piloted Aircraft*) ou ainda UAV (*Unmanned Aerial Vehicle*), desenvolvidos inicialmente para finalidades militares, têm se tornado cada vez mais presentes no contexto civil, abrangendo diversas áreas do conhecimento (HARDIN; JENSEN, 2011). Os autores ainda comentam que é difícil atribuir uma única conceituação a tal equipamento, uma vez que encontram-se presentes no mercado modelos de diversos tamanhos, pesos, configurações e padrões que atendem às mais variadas necessidades e aplicações. Este equipamento é popularmente conhecido como Drone.

Para as aplicações fotogramétricas de baixo custo, atualmente são encontrados no mercado dois modelos de interesse: RPAs com sistema PPK (*Post-Processing Kinematic*) embarcado e os modelos RPA-SPS (*Standart Positioning Service*), sendo que o RPA-PPK permite que as observações do sensor GNSS embarcado no RPA sejam pós processadas, melhorando consideravelmente a exatidão alcançada pelo processamento, enquanto o RPA-SPS disponibiliza posicionamento baseado em sinais abertos do sistema GNSS (SOPCHAKI et al., 2018), que oferece posicionamento da plataforma com precisão absoluta de até 1,5 m. Outro modelo que pode ser encontrado no mercado é o RPA-RTK (*Real Time Kinematic*), que permite o posicionamento corrigido de erros sistemáticos em tempo real.

O crescente avanço da Visão Computacional, juntamente à Análise e Processamento Digital de Imagens, acabaram por trazer novas abordagens à Fotogrametria convencional, sendo a principal delas a técnica denominada *Structure from Motion* (SfM), que atualmente é amplamente difundida, uma vez que encontra-se implementada nos principais softwares do mercado. (JAVERNICK; BRASINGTON; CARUSO, 2014).

Em sua concepção, SfM trata-se do problema da determinação da posição tridimensional de pontos observados em um conjunto de imagens, sendo conhecido apenas um esparso conjunto de correspondências entre pontos detectados em diferentes imagens tomadas por um sensor em movimento. (SZELISKI, 2010).

No contexto das Geociências, a técnica SfM tem seu funcionamento básico baseado na estereoscopia fotogramétrica, isto é, consiste no problema de recuperar a geometria tridimensional de uma determinada superfície através de um conjunto de imagens desta mesma superfície tomadas de diferentes pontos de vista e com uma alta taxa de sobreposição (WESTOBY et al., 2012).

Além disso, a técnica SfM pode também ser definida como um conjunto de metodologias oriundas da Fotogrametria e da Visão computacional, que baseia-se em rotinas autônomas de observações de pontos, através de detectores e descritores como o SIFT e suas variantes, por exemplo, que são capazes de detectar pontos homólogos em imagens e estas ferramentas autônomas são empregadas juntamente com os modelos de ajustamento em blocos para determinação de coordenadas no espaço objeto (COLOMINA; MOLINA, 2014).

Os algoritmos de detecção automática de correspondências entre pontos em imagens digitais tiveram um alto impacto nas Ciências Geodésicas e especialmente na Fotogrametria, sendo estes algoritmos pilares fundamentais para a aplicação da técnica *Structure from Motion*. O impacto destas técnicas pode ser comparado ao impacto causado pelo advento do Laser Scanner aerotransportado e do sistema LiDAR (*Light Detection and Ranging*).

O conjunto de técnicas envolvidas no SfM produzem uma esparsa nuvem de pontos representando a superfície de interesse obtida através de um conjunto de imagens. Este resultado pode ainda ser melhorado através da aplicação das técnicas de *Multi-View Stereo* (MVS), que compreendem algoritmos de densificação, aumentando significativamente a densidade de pontos por unidade de área. Desta forma, é comum encontrar na literatura o uso do termo SfM-MVS (CARRIVICK; SMITH; QUINCEY, 2016).

A facilidade e comodidade oferecida por softwares especialistas que implementam as técnicas de SfM fizeram com que tais ferramentas rapidamente se popularizassem, tornando o processo de extração de informações geoespaciais cada vez mais rápido e com menor interferência do usuário. Para Carrivick e Smith (2019), a alta taxa de aceitação da técnica SfM-MVS por parte de pesquisadores e profissionais do mercado se deve ao fato de promover facilidade e democratização do uso dos VANTs, além de possibilitar a obtenção de informações confiáveis mesmo utilizando sensores de baixo custo, proporcionando ganho de tempo e diminuição de custos para o levantamento aerofotogramétrico.

A construção civil demanda, tanto na concepção do projeto, quanto na execução, a elaboração de produtos cartográficos de adequada precisão. Neste sentido, a automatização de processos se tornou um recurso indispensável nas áreas da engenharia e apresenta um elevado potencial para a produção de material cartográfico através da extração de geoinformações em imagens digitais.

Reinoso et al. (2018) comentam que a elaboração de diversos projetos de engenharia é apoiada no processamento de imagens e que, devido a evolução nas tecnologias associadas ao VANT e ao processamento de dados aerofotogramétricos, o uso da Fotogrametria como base para elaboração de projetos de engenharia tem se

tornado popular.

Este fato faz com que haja um grande interesse no uso da Fotogrametria Aérea apoiada por VANTs para elaboração de produtos cartográficos como suporte ao planejamento e execução de obras de engenharia. Contudo, devido a baixa autonomia de bateria dos VANTs, este equipamento é preferencialmente utilizado para levantamento de pequenas e médias áreas.

## 1.2 ESTADO DA ARTE

Diversos estudos investigam a precisão alcançada em levantamentos aerofotogramétricos utilizando VANTs, e aplicando da técnica SfM para capturar blocos de imagens para as mais diferentes aplicações, alguns destes estudos são mostrados na no Quadro 1:

QUADRO 1 - ESTUDOS SOBRE SFM REALIZADOS NOS ÚLTIMOS 10 ANOS

Ano	Título	Referência
2013	<i>Accuracy assessment of minimum control points for UAV photography and georeferencing</i>	Skarlatos et. al. (2013)
2015	<i>The Impact of the calibration method on the accuracy of point clouds derived using Unmanned Aerial Vehicles</i>	Harvin, Lucier, Osborn (2015)
2015	<i>Fixed-wing Micro Aerial Vehicle for Accurate Corridor Mapping</i>	Rehak e Saloud (2015)
2017	<i>Optimising UAV topographic surveys processed with structure-from-motion</i>	James et. al. (2017)
2018	Verificação da Qualidade de Ortomosaicos produzidos a partir de Imagens obtidas com Aeronaves Remotamente Pilotadas sem uso de pontos de apoio	Sopchaki et. al. (2018)
2018	<i>GNSS-assisted accurate corridor mapping with small UAV</i>	Zhou et. al. (2018)
2019	<i>Enhancing UAV-SfM 3D Model Accuracy in High-Relief Landscapes by Incorporating Oblique Images</i>	Nesbit e Hugenholtz (2019)
2020	<i>Streambank topography: An accuracy assessment of UAV-based and traditional 3D reconstructions</i>	Meinen e Robinson, (2020)

Fonte: O Autor

Harvin, Lucieer e Osborn (2015) estudaram a influência do método de calibração na acurácia de núvens de pontos obtidas a partir de imagens aéreas e verificaram também como o plano de voo pode influenciar na qualidade do modelo; James et. al. (2017) estudaram metodologias para melhorar a precisão de modelos digitais de elevação, obtidos pela técnica SfM, através do Método de Monte Carlo, isto é, através

de repetidas análises do mesmo cenário, variando apenas os parâmetros de processamento e a quantidade de pontos de controle, com o objetivo de entender como tais configurações contribuem para a precisão do modelo em cada caso; Sopchaki et. al. (2018) apresentaram estudos que objetivam analisar a precisão de ortomosaicos e MDEs gerados a partir de levantamento por RPA-SPS sem a utilização de pontos de apoio; Nesbit e Hugenholtz (2019) apresentaram um estudo coletando imagens aéreas com diferentes ângulos de inclinação e compararam as superfícies com relevos complexos geradas com um conjunto de dados advindos de um laser scanner terrestre. Tais estudos foram realizados para pequenas regiões e com geometria de voo que configuram blocos de imagens aéreas; E, por fim, Meinen e Robinson (2020) realizam um estudo comparativo entre a Fotogrametria Digital apoiada por VANT e a Fotogrametria Tradicional analisando a aplicação específica do mapeamento de encostas de rios, chegando a conclusão de que, para esta aplicação, a Fotogrametria apoiada por VANT e SfM apresenta menores valores de erro quadrático médio nas discrepâncias dos pontos de verificação.

Contudo, para o caso de levantamento aerofotogramétrico, específico em determinadas aplicações da engenharia, como o caso de mapeamentos de corredores, torna-se necessária a utilização de recobrimentos com condições geométricas e práticas diferentes das usualmente aplicadas na Fotogrametria VANT.

No tema específico de mapeamento de corredores, apresentam-se estudos que analisam a precisão de produtos cartográficos obtidos por SfM para levantamentos que configuram corredores: Skarlatos et. al. (2013) investigaram a precisão alcançada em ortomosaicos gerados por SfM, com e sem pontos de apoio, bem como para um bloco fotogramétrico e para um corredor, com base nos resultados obtidos, concluíram que, para levantamentos de corredores, a utilização da técnica de orientação direta do sensor é possível, quando não é necessário conhecer com elevada exatidão as coordenadas altimétricas, revelando a dificuldade de obter precisão altimétrica no ajustamento de corredores fotogramétricos.

Rehak e Skaloud (2015) realizaram estudos de caso para verificar a precisão no mapeamento de um bloco de imagens e de um corredor, chegando à conclusão que, para alcançar valores de acurácia entre 3-5 cm, é necessário conhecer a posição e atitude da câmera com elevada precisão.

Zhou et. al. (2018) estudaram a precisão obtida em pontos posicionados em um corredor no qual foi realizado um levantamento aerofotogramétrico apoiado por VANT. As coordenadas dos CPs coletadas pelo receptor GNSS foram pós processadas, obtendo coordenadas de elevada exatidão para as posições dos CPs. Os autores mostraram que, para a aplicação em questão, a inserção de um único ponto de apoio localizado no centro do corredor melhorou significativamente a acurácia nos pontos

de verificação. Desta forma, o estudo de Zhou et. al. (2018) confirma as constatações do trabalho de Rehak e Skaloud (2015), mostrando que a determinação precisa das coordenadas tridimensionais do CP possibilita a melhora da exatidão alcançada no processamento de corredores fotogramétricos.

Apesar de haver uma forte preocupação com a geometria de um corredor e os fatores que influenciam na qualidade posicional de produtos cartográficos gerados para estes casos, tais estudos não demonstram preocupação com o entendimento ou avaliação da performance da técnica SfM no mapeamento de corredores de um ponto de vista analítico, sendo a maioria destes estudos realizados utilizando a técnica de Orientação Direta do Sensor.

Neste sentido, surge a necessidade de estudos que investiguem a precisão alcançada em levantamentos que caracterizam o uso de faixas aerofotogramétricas extensas, bem como práticas e metodologias para a obtenção de melhor exatidão neste tipo de aerolevanteamento. Desta forma, o objetivo deste trabalho é desenvolver um estudo teórico e propor procedimentos práticos para a realização de levantamento aerofotogramétrico com o uso de faixas longas, processadas com aplicação da técnica SfM-MVS, utilizando um software especialista. Adicionalmente, os resultados obtidos serão comparados com resultados provenientes de programas de aerotriangulação convencional e serão discutidas as vantagens de aplicação de cada um destes processos no contexto de estudo de forma a investigar práticas que contribuem para alcance de maior confiabilidade nos resultados.

### 1.3 OBJETIVOS

O objetivo deste trabalho é investigar o desempenho de uma implementação da técnica *Structure from Motion* disponibilizada pelo programa computacional *Metashape* em diferentes configurações de voo e distribuições de pontos de apoio para mapeamento de corredores e, a partir dos resultados obtidos, propor uma metodologia para a realização do recobrimento aéreo pelo VANT Phantom 4 Pro apoiado por GNSS, bem como distribuição de pontos de apoio para aplicações que envolvem esta geometria. Realiza-se também a investigação acerca da aplicação da transformação de similaridade nos diferentes cenários estudados.

#### 1.3.1 Objetivos Específicos

Para atingir o objetivo geral da pesquisa, definem-se os seguintes objetivos específicos:

- Realizar um levantamento aerofotogramétrico que configura geometricamente um corredor.

- Aplicar a técnica SfM e verificar as discrepâncias nos pontos de apoio e resíduos nos pontos de verificação em diferentes geometrias de voo (faixa única, duas faixas de voo com alta taxa de recobrimento lateral, recobrimentos longitudinais de 60 e 80%) com diferentes configurações de pontos de controle.
- Comparar os valores de Erro Quadrático Médio (EQM) das discrepâncias das coordenadas dos pontos de verificação e os resíduos nos pontos de apoio obtidos via SfM com aqueles obtidos através da aerotriangulação tradicional;
- Realizar uma análise dos resíduos nas observações fotogramétricas realizadas de forma autônoma pelo *Metashape* através do emprego da aerotriangulação, uma vez que estes valores não são apresentados por este programa computacional.

#### 1.4 JUSTIFICATIVA

Atualmente a maioria dos estudos em levantamentos aerofotogramétricos são realizados de forma a obter um conjunto de faixas que configuram um bloco aerofotogramétrico. Contudo, existem aplicações que demandam outras configurações geométricas, como o caso do levantamento de rodovias, ferrovias, rios, entre outros. Projetos que envolvem estes tipos de aplicações demandam longos comprimentos de faixas e, dada a baixa autonomia de bateria dos VANTs, podem inviabilizar o levantamento de um bloco de imagens.

Neste sentido, é importante analisar os resultados oriundos da técnica SfM corredores, buscando práticas e distribuição de pontos de apoio que otimizam a confiabilidade dos resultados para fins de mapeamento.

## 2 STRUCTURE FROM MOTION E A FOTOGRAMETRIA

O entendimento dos conceitos e fundamentos matemáticos envolvidos na técnica *Structure from Motion*, juntamente com a relação entre estes fundamentos e a Fotogrametria, é indispensável para a investigação da confiabilidade dos resultados obtidos. Nesta seção serão abordados os fundamentos teóricos e matemáticos que compõem o SfM, suas semelhanças com a Fotogrametria, bem como sua importância para as Ciências Geodésicas e seu impacto na Fotogrametria.

### 2.1 DEFINIÇÃO E EVOLUÇÃO HISTÓRICA

O problema de reconstruir objetos na superfície terrestre a partir de um conjunto de imagens e sua representação em uma superfície plana ou tridimensional é um campo de estudo compartilhado entre a Visão Computacional e a Fotogrametria ao qual pesquisadores vêm se dedicando há décadas. Ao longo da história, diversos estudos foram realizados para a consolidação da solução deste problema.

No ramo da Fotogrametria, os primeiros experimentos realizados com o objetivo de usar a Fotogrametria para finalidades de mapeamento foram realizados pelo militar francês Aimé Laussedat, no ano de 1849, através da tomada de fotografias aéreas utilizando câmeras a bordo de balões. Contudo, as dificuldades ocasionadas pelas limitações tecnológicas da época, levaram Laussedat a concentrar seus esforços no desenvolvimento da Fotogrametria Terrestre (TOMMASELLI, 2009). Em 1859 Lasseudat entregou para a Comissão da Academia de Ciência, em Paris, um manuscrito contendo a metodologia para a determinação das coordenadas tridimensionais de um ponto no espaço objeto a partir de sua observação em um par de fotografias e por este motivo, Laussedat entrou para a história como o "Pai da Fotogrametria"(KRAUS, 1993).

Na área da Visão Computacional, o experimento científico realizado por Wallach e O'Connell (1953), conhecido como *Kinetic Depth Effect*, mostrou que é possível perceber visualmente a estrutura tridimensional de objetos desconhecidos em movimento através da projeção ortogonal de sua sombra.

Este estudo, advindo da área da Percepção Visual, motivou a realização de pesquisas com o intuito de possibilitar a reconstrução tridimensional de objetos a partir de suas projeções ortogonais realizada através de um sistema computacional controlado.

Nesta mesma década, em 1958, os estudiosos da Fotogrametria testemunhavam a criação do primeiro restituidor analítico ainda em estágios iniciais, de autoria de Helava, um fotogrametrista finlandês. Sua invenção não apresentava bom funci-

onamento devido a escassez de recursos computacionais da época e por isso, não foi aceito pela comunidade fotogramétrica, apesar disto, Helava é considerado um dos cientistas pioneiros no desenvolvimento de Estações Fotogramétricas Digitais (TOMMASELLI, 2009), (AALTO, s.d.).

Os pesquisadores da área da Visão Computacional observaram que a percepção tridimensional de um objeto em movimento pode ser obtida sem a necessidade de que todas as feições de tal objeto sejam projetadas, isto é, a estrutura de um objeto pode ser percebida projetando-se ortogonalmente apenas alguns pontos pertencentes a tal. Um dos experimentos que demonstram este efeito é conhecido como *The two cylinders demonstration* (ULLMAN, 1979).

Neste contexto, Ullman (1979) apresentou importantes contribuições nesta área, formalizando Teorema do Structure from Motion:

Dadas três cenas diferentes representando as projeções ortogonais de 4 pontos não coplanares que possuem uma rígida configuração, a estrutura e o movimento compatíveis com as três cenas são determinados de forma unívoca (ULLMAN, 1979, p. 410, tradução do autor).

A projeção ortogonal era a mais adequada para aquele contexto histórico, uma vez que todos os raios interceptam o plano de projeção segundo um mesmo ângulo, isto é, todos os raios são ortogonais ao plano de projeção, tornando os cálculos matemáticos menos complexos e promovendo o ganho de desempenho computacional.

Utilizar a projeção perspectiva, conforme explicado pelo autor, ocasionaria em perda de desempenho computacional dada a elevada complexidade dos cálculos realizados para feixes perspectivos que interceptam o plano projetivo segundo vários ângulos de inclinação. Além disso, no SfM, para a percepção tridimensional da cena era necessário que o objeto de interesse estivesse em movimento (simulado computacionalmente ou fisicamente). Neste aspecto é nítida uma das primeiras divergências entre a Fotogrametria Analítica e a técnica SfM: Enquanto SfM tinha seus cálculos realizados segundo a projeção ortogonal, a Fotogrametria trabalhava com base na projeção dos feixes perspectivos.

Através do estudo de Longuet-Higgins (1981) tornou-se possível reconstruir a estrutura de uma cena através de um par de planos contendo as projeções perspectivas desta cena. Em seu artigo, o autor apresenta a formulação matemática para calcular as coordenadas tridimensionais de 8 pontos a partir de suas projeções perspectivas em dois planos posicionados em diferentes localidades.

Ainda neste mesmo ano, Okamoto (1981) publicou seu estudo intitulado *Orientation and Construction of Models*, onde a orientação de pares de fotografias tomadas

por câmeras não métricas para o caso de aplicações de Fotogrametria a curta distância era discutida e a solução, isto é, o processo de orientação do par era realizado através da observação de cinco pontos observados nas fotografias.

Em 1987 Boles, Baker e Marimont (1987), pesquisadores da área da Visão Computacional, propuseram uma técnica para a reconstrução tridimensional de cenas estáticas através de uma sequência de imagens utilizando-se de fundamentos da Fotogrametria e visão estereo, bem como dos fundamentos da Geometria Epipolar. Os autores também perceberam que, quando as imagens são tomadas com uma distância reduzida entre os centros perspectivos das lentes, torna-se menos difícil a busca por características homólogas em pares de imagens.

Contudo, neste contexto, a técnica Structure from Motion ainda apresentava algumas limitações para sua aplicação. No caso da proposta de Boles, Baker e Marimont (1987), o processo era simplificado pelo fato de adotar-se uma base linear, isto é, as fotografias eram tomadas ao longo de uma linha reta com uma pequena distância entre si. Este procedimento, ao mesmo tempo que tornava a determinação das posições dos centros perspectivos nos momentos das tomadas menos complexo, dificultava a reconstrução tridimensional completa de objetos, uma vez que as posições de tomada eram muito próximas entre si, o que causava menores ângulos de intersecção, prejudicando a exatidão do ajustamento por feixes perspectivos.

As restrições quanto às posições da câmera foram eliminadas no estudo publicado por Heel (1990), que inovou o processo de reconstrução tridimensional através de imagens utilizando os gradientes de brilho das imagens para determinar as correspondências entre pontos homólogos e utilizando a elevada redundância, ocasionada pela necessidade de uma curta distância entre as tomadas, para minimizar o erro de projeção.

Desta forma, a solução do problema do Structure from Motion começava a se consolidar como uma técnica iterativa para reconstrução tridimensional, contudo ainda haviam restrições para que o procedimento fosse completamente automatizado.

A evolução tecnológica impulsionou fortemente o desenvolvimento de soluções robustas para a resolução do problema do SfM, sendo que atualmente esta técnica encapsula algoritmos e modelos matemáticos advindos de diversas áreas do saber, tais como: Fotogrametria, Visão Computacional e Processamento Digital de Imagens.

O advento dos algoritmos de detecção e descrição de pontos de interesse em imagens digitais, a popularização e modernização dos sistemas computacionais, bem como o advento da Fotogrametria assistida por computador trouxeram novas abordagens.

Algoritmos de detecção pontos de interesse, como o SIFT (LOWE, 2004) e

suas variantes, bem como os algoritmos de combinação de pontos homólogos contribuíram fortemente para a automatização dos processos de reconstrução tridimensional, tornando o processo rápido e com mínima interferência do usuário.

Os avanços científicos e tecnológicos alcançados tanto em Fotogrametria, quanto em Visão Computacional, juntamente com a alta demanda pela automatização dos processos de geração de produtos cartográficos com elevada exatidão para apoio aos projetos de engenharia, fez com que estas duas ciências combinassem seus respectivos estados da arte para a solução do problema do SfM.

Atualmente encontram-se disponíveis diversos softwares que contam com a técnica SfM para os mais diversos propósitos: Mapeamento, Robótica, Planejamento e tomada de decisões e etc. Na Fotogrametria, esta técnica se tornou fundamental para a automatização do processo de reconstrução, sendo utilizada principalmente para a finalidade de mapeamento.

## 2.2 FUNDAMENTOS TEÓRICOS E MATEMÁTICOS

### 2.2.1 Noções Preliminares

A compreensão do modelo de câmera adotado para a tomada de imagens e reconstrução da cena, bem como do sistema de coordenadas homogêneas, é fundamental para o entendimento das formulações envolvidas no *Structure from Motion*, por este motivo, as subseções 2.2.1.1, 2.2.1.2 e 2.2.1.3 são dedicadas exclusivamente a estes assuntos.

#### 2.2.1.1 Sistema de Coordenadas Homogêneas

Conforme explicado por Grussenmeyer e Khalil (2002), a forma de objetos imageados através da projeção perspectiva é distorcida durante o processo de transformação e não pode ser descrita pela geometria Euclidiana tradicional. Para resolver este problema utiliza-se Geometria Projetiva, mais especificamente o sistema de coordenadas homogêneas, eliminando assim as limitações que decorrem da utilização de um sistema de coordenadas euclidianas.

Em Geometria Euclidiana, um ponto  $x$  representado em  $R^2$  tem suas coordenadas definidas por um par ordenado, tal que  $x = (x, y)$ . Este mesmo ponto, representado em coordenadas homogêneas é definido como  $x' = (u, v, w)$ , isto é, uma tríade de coordenadas. A relação estabelecida entre as coordenadas homogêneas de um ponto, conforme explicado por Hartley e Zisserman (2003), são:

$$u = \frac{x}{w} \tag{2.1}$$

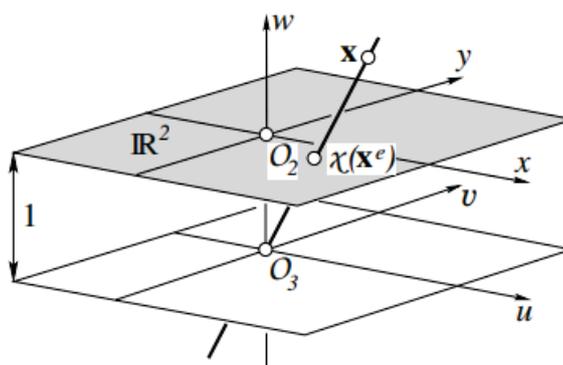
$$v = \frac{y}{w} \quad (2.2)$$

Desta forma é possível representar um ponto  $\mathbf{x}$  no espaço de coordenadas homogêneas e recuperar suas coordenadas euclidianas sempre que necessário. O mesmo processo é feito para representar um ponto no espaço  $R^3$  em coordenadas homogêneas.

As coordenadas homogêneas de um ponto  $\mathbf{x}$  são invariantes à multiplicação por um escalar diferente de zero, assim, pode-se dizer que  $\mathbf{x}$  e  $\lambda\mathbf{x}$  representam as coordenadas do mesmo ponto (FÖRSTNER; WROBEL, 2016).

A interpretação geométrica da representação em coordenadas homogêneas de um ponto  $\mathbf{x}$  é mostrada na Figura 1. Nesta figura estão representados o ponto  $\mathbf{x}$ , sua representação em coordenadas homogêneas  $\mathbf{x}^e$  e também o relacionamento entre o plano  $R^2$  e o espaço euclidiano  $R^3$  com origem definida em  $O_3$ . A linha que passa pelo ponto  $\mathbf{x}$  e intercepta o plano  $R^2$  e a origem do sistema euclidiano representa o conjunto de todos os pontos  $\lambda\mathbf{x}$ .

FIGURA 1 – REPRESENTAÇÃO EM COORDENADAS HOMOGÊNEAS



FONTE: Extraído de Forstner e Wrobel (2016)

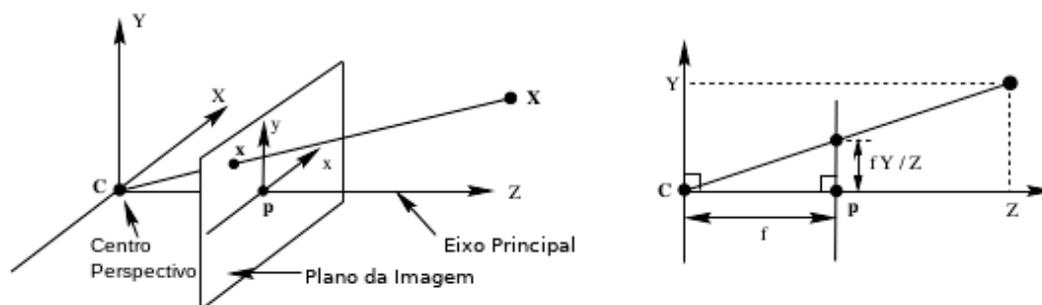
O ponto  $\mathbf{x}^e$  é o local onde a linha intercepta o plano  $R^2$  e a posição deste plano é definida pelo valor da coordenada homogênea  $w$ , que neste caso é igual a 1, desta forma, se  $w$  tivesse valor 2, a linha interceptaria o plano  $R^2$  em outra posição. Desta forma as coordenadas homogêneas do ponto  $\mathbf{x}$  são  $\mathbf{x}^e$ , tal que  $\mathbf{x}^e = (x, y, 1)$ .

### 2.2.1.2 O Modelo Pinhole

Conforme explicado por Wang e Wu (2011), em geometria projetiva um ponto é representado através do que se denomina por coordenadas homogêneas, fato que

permite que o relacionamento entre um ponto no espaço e sua representação em um plano seja estabelecido de forma linear. Desta forma, o modelo de câmera amplamente utilizado em Fotogrametria, denominado como modelo Pinhole é representado como:

FIGURA 2 – MODELO PINHOLE



FONTE: Adaptado de Hartley e Zisserman (2003)

Na Figura 2 tem-se a representação esquemática de uma câmera cuja posição do centro perspectivo coincide com a origem de um sistema cartesiano tridimensional. Um ponto  $X$  no espaço tem sua projeção em um ponto do plano da imagem, sendo o alinhamento formado por  $X$ ,  $x$ , e  $C$  um raio perspectivo. Nestas condições, como explicado por Wang e Wu (2011), pode-se estabelecer uma relação linear entre  $x$  e  $X$  expressa na Equação 2.3.

$$\lambda \begin{pmatrix} x \\ y \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} p_{11} & p_{12} & p_{13} & p_{14} \\ p_{21} & p_{22} & p_{23} & p_{24} \\ p_{31} & p_{32} & p_{33} & p_{34} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{pmatrix} \quad (2.3)$$

Onde  $\lambda$  é um fator de escala. A matriz  $P$  é conhecida como matriz projetiva e, neste caso específico, coincide com a matriz de calibração. Supondo que a distância focal  $f$  seja

igual a 1, tem-se uma matriz projetiva, tal que:

$$P_0 = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{pmatrix} = [I_3|0] \quad (2.4)$$

Contudo, dificilmente a câmera será posicionada na origem de um sistema de coordenadas, principalmente nas aplicações em Fotogrametria, as quais frequentemente adotam um sistema referencial geodésico tridimensional com origem no centro de massa da Terra, sendo neste caso impossível.

Para tais aplicações deve-se introduzir uma matriz de rotação e um vetor de translação que relacionam o sistema de coordenadas fotogramétricas com o sistema referencial tridimensional adotado. Isto seria equivalente a multiplicar a matriz projetiva  $P$  por uma matriz de transformação, como demonstrado por Wang e Wu (2011), chegando à Equação 2.5.

$$A = \begin{bmatrix} R & T \\ 0^T & 1 \end{bmatrix} \quad (2.5)$$

Note-se que a matriz  $A$  descreve a posição da câmera em relação a um sistema referencial cartesiano tridimensional, parâmetros conhecidos como extrínsecos ou ainda parâmetros de orientação exterior da câmera.

Outro fato importante a ser considerado na concepção do modelo pinhole é que a origem do sistema referencial de uma imagem não coincide com o centro perspectivo da câmera, ocasionando a necessidade de parâmetros que relacionem estas duas entidades, desta forma surge a matriz de calibração  $K$ , que é mostrada na Equação 2.6.

$$K = \begin{bmatrix} f & 0 & c_x \\ 0 & f & c_y \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.6)$$

Note-se que a matriz  $K$  representa os parâmetros intrínsecos, ou parâmetros de orientação interior de uma câmera, sendo  $f$  a distância focal e  $c_x, c_y$  as coordenadas do ponto principal no sistema referencial da imagem. Tendo conhecimento destes conceitos, pode-se redefinir a matriz projetiva  $P$  para o caso geral como:

$$P = KP_0A = K[R|T] \quad (2.7)$$

Assim, a Equação 2.3 pode ser reescrita da seguinte forma:

$$\lambda x = PX = K[R|T]X \quad (2.8)$$

A Equação 2.8 descreve um ponto  $x$  observado no plano da imagem como uma função da matriz de calibração  $K$ , da matriz de rotação  $R$  e de um vetor de translação  $T$ , bem como de suas coordenadas tridimensionais no espaço objeto  $X$ . A notação  $[R|T]$  refere-se a uma matriz aumentada composta pela matriz de rotação e pelo vetor de translação.

Desta forma, a Equação 2.8 é o modelo fundamental utilizado na reconstrução tridimensional e determinação dos parâmetros de orientação de uma câmera dentro da abordagem do Structure from Motion.

Neste ponto é possível realizar uma comparação entre o modelo apresentado na Equação 2.8 e as equações de colinearidade, modelo largamente empregado na Fotogrametria. Conforme demonstrado por Derenyi (1996), as equações de colinearidade são deduzidas da condição de que dois vetores,  $a$  e  $A$ , (que representam um feixe de luz) são colineares. Assim:

$$a = kA \quad (2.9)$$

Em que  $k$  representa um fator de escala. interpretando  $a$  como o vetor das coordenadas de um ponto no espaço imagem e  $A$  como as coordenadas deste mesmo ponto no espaço objeto, então:

$$\begin{pmatrix} x_a \\ y_a \\ -f \end{pmatrix} = kR \begin{pmatrix} X_A - X_L \\ Y_A - Y_L \\ Z_A - Z_L \end{pmatrix} \quad (2.10)$$

Na equação 2.10 já é possível notar algumas semelhanças com o modelo apresentado na Equação 2.8. A rotação  $R$  e a translação demonstradas na Equação 2.10, que descrevem os parâmetros de orientação exterior da câmera no momento da tomada da imagem, também aparecem em 2.8 e a notação vista em 2.10 é similar à notação de coordenadas homogêneas, sendo a coordenada  $w$  igual à distância focal. Expandindo a matriz  $R$ , resolvendo as multiplicações, tem-se que:

$$x_a - x_0 = k[r_{11}(X_A - X_L) + r_{12}(Y_A - Y_L) + r_{13}(Z_A - Z_L)] \quad (2.11)$$

$$y_a - y_0 = k[r_{21}(X_A - X_L) + r_{22}(Y_A - Y_L) + r_{23}(Z_A - Z_L)] \quad (2.12)$$

$$-f = k[r_{31}(X_A - X_L) + r_{32}(Y_A - Y_L) + r_{33}(Z_A - Z_L)] \quad (2.13)$$

Dividindo as equações 2.11 e 2.12 pela equação 2.13, tem-se que:

$$x_a - x_0 = -f \frac{r_{11}(X_A - X_L) + r_{12}(Y_A - Y_L) + r_{13}(Z_A - Z_L)}{r_{31}(X_A - X_L) + r_{32}(Y_A - Y_L) + r_{33}(Z_A - Z_L)} \quad (2.14)$$

$$y_a - y_0 = -f \frac{r_{21}(X_A - X_L) + r_{22}(Y_A - Y_L) + r_{23}(Z_A - Z_L)}{r_{31}(X_A - X_L) + r_{32}(Y_A - Y_L) + r_{33}(Z_A - Z_L)} \quad (2.15)$$

As Equações 2.14 e 2.15 são conhecidas como Equações de Colinearidade e são o modelo fundamental empregado na Fotogrametria para o estabelecimento da relação entre as coordenadas de um ponto observado em uma imagem e suas coordenadas no espaço objeto (DERENYI, 1996).

A modelagem matemática realizada para solucionar o problema da recuperação das coordenadas tridimensionais de um ponto no espaço objeto, no caso da Fotogrametria diverge do modelo utilizado pela Visão Computacional no relacionamento estabelecido entre as coordenadas do ponto observadas na fotografias e as coordenadas no mesmo do espaço objeto. Na Fotogrametria este relacionamento é estabelecido de forma não linear, não empregando a representação em coordenadas homogêneas.

As principais diferenças práticas entre os modelos adotados pela Fotogrametria e Visão Computacional se revelam em termos de estabilidade numérica, esforço computacional, número de pontos de apoio necessários para a estimativa de parâmetros e convergência da aplicação do Método dos Mínimos Quadrados (GRUEN; HUANG, 2013). Os autores ainda comentam que a adoção das Equações de Colinearidade ocasiona perda de desempenho computacional, enquanto a adoção do modelo que relaciona o espaço imagem e o espaço objeto de forma linear requer a adoção de uma maior quantidade de pontos de apoio e bem distribuídos no espaço, porém proporciona ganho de desempenho computacional.

### 2.2.1.3 Decomposição em Valores Singulares

Quando a modelagem de um problema requer a solução de um sistema de equações superabundante, uma forma segura de obter a solução consiste na redução da matriz  $A$  para formas canônicas através de transformações ortogonais (GOLUB; VAN LOAN, 1996), Strang e Borre (1997) completam esta afirmação quando comentam que a solução de um sistema de equações lineares homogêneas por SVD se torna mais simples e clara.

A Decomposição em Valores Singulares, também conhecida como Decomposição SVD (*Singular Values Decomposition*), é uma das soluções mais empregadas para resolução de sistemas de equações lineares aproximando a solução por mínimos quadrados (STRANG; BORRE, 1997) (SZELISKI, 2010).

Seja um sistema de equações lineares, o qual sua forma matricial é:

$$Ax = b \quad (2.16)$$

Onde:

- $A$  é uma matriz de  $m$  linhas por  $n$  colunas;
- $x$  é um vetor  $n$ -dimensional;
- $b$  é um vetor  $m$ -dimensional.

Conforme explicado por Strang e Borre (1997), a decomposição em valores singulares demonstra que sempre é possível encontrar uma matriz ortogonal  $V$  e outra matriz  $U$ , tal que:

$$y = Vx \quad (2.17)$$

$$c = Ub \quad (2.18)$$

Igualando as duas equações e manipulando algebricamente, tem-se que

$$UAV^T Vx = Ub \quad (2.19)$$

Desta forma, a decomposição em valores singulares demonstra que qualquer matriz  $A_{m \times n}$  de números reais pode ser escrita como:

$$A_{m \times n} = U_{m \times n} S_{n \times n} V_{n \times n}^T \quad (2.20)$$

Conforme explicado por Szelisk (2010), as matrizes  $U$ ,  $S$  e  $V^T$  assumem a seguinte forma:

$$U = \begin{vmatrix} u_{1,1} & & u_{1,n} \\ \vdots & \dots & \vdots \\ u_{m,1} & & u_{m,n} \end{vmatrix} \quad (2.21)$$

$$S = \begin{vmatrix} \sigma_0 & & \\ & \ddots & \\ & & \sigma_n \end{vmatrix} \quad (2.22)$$

$$V^T = \begin{vmatrix} v_1^T \\ \vdots \\ v_n^T \end{vmatrix} \quad (2.23)$$

O autor ainda comenta que as matrizes  $U$  e  $V$  são ortonormais, isto é, a multiplicação da sua transposta por ela mesma resulta em uma matriz identidade. A matriz  $S$  é a matriz dos valores singulares.

A decomposição SVD é de fundamental importância para a solução de sistemas de equações lineares, pois a expansão em séries de Taylor da matriz  $A$ , isto é (SZELISK, 2010):

$$A = \sum \sigma_j u_j v_j^T \quad (2.24)$$

Onde:

- $\sigma_j$  são os valores singulares contidos na matriz  $S$ ;
- $u_j$  são os elementos diagonais da matriz  $U$ ;
- $v_j^T$  são os elementos diagonais da matriz  $V^T$ .

A Equação 2.24 torna possível obter a melhor aproximação para a solução do sistema  $Ax = b$ . Desta forma, a decomposição SVD é largamente aplicada para a estimativa dos parâmetros envolvidos no problema do *Structure from Motion*.

### 2.2.2 Algoritmo SfM

Conforme explicado por Carrivick, Smith e Quincey (2016), o SfM, quando no contexto das geociências, compreende um conjunto de algoritmos oriundos de diferentes áreas do conhecimento, o que torna o SfM um conjunto de técnicas empregadas para obter como produto final a representação tridimensional de um objeto. Nesta seção são abordados os principais algoritmos envolvidos no processo, bem como a importância de cada um no processo. O fluxo de trabalho para a reconstrução tridimensional pelo SfM, adaptado de Moons, Vergauwen e Gool (2010), é mostrado abaixo:

1. Encontre pontos-chave e estabeleça correspondências entre eles;
2. Elimine Falsas Correspondências;
3. Determine a Orientação Relativa do Primeiro par;
4. Para cada imagem subsequente, faça:
  - a) Encontrar pontos homólogos entre a imagem e a anterior;
  - b) Estimar a matriz de Projeção;
  - c) Atualizar a Estrutura e Inicializar novos pontos
5. Aplique o Bundle Adjustment;
6. Aplique a Transformação de Similaridade

Cada um destes passos é explicado em detalhes nas subsecções a seguir.

### 2.2.2.1 Detecção de Pontos-chave e determinação das correspondências

O algoritmo amplamente utilizado para este procedimento é o SIFT (Scale Invariant Features Transform), por isto este trabalho terá foco na abordagem dos métodos envolvidos neste.

Conforme explicado por Lowe (2004), o algoritmo funciona através do emprego de quatro etapas principais:

- Detecção em diferentes espaços-escala.
- Localização de pontos-chave.
- Determinação da orientação.
- Descrição.

A detecção de pontos em diferentes escalas é feita através do processo de convolução, utilizando um kernel Gaussiano, com a imagem. Esta convolução é expressa matematicamente a seguir:

$$L_{x,y,\sigma} = G_{x,y,\sigma} * I_{x,y} \quad (2.25)$$

$$G_{x,y,\sigma} = \frac{1}{2\pi\sigma^2} e^{-(x^2+y^2)/2\sigma^2} \quad (2.26)$$

Em que G é o kernel gaussiano, I é a imagem de entrada e L é a imagem resultante da convolução entre G e I. Contudo, o autor ainda explica que, para melhor eficiência na detecção de pontos de interesse, deve-se utilizar a função Diferença de Gaussianas (DG) para a convolução com a imagem. Assim, a função diferença de gaussianas é expressa da seguinte forma:

$$D_{x,y,\sigma} = (G_{x,y,k\sigma} - G_{x,y,\sigma}) * I_{x,y} \quad (2.27)$$

Portanto:

$$D_{x,y,\sigma} = L_{x,y,k\sigma} - L_{x,y,\sigma} \quad (2.28)$$

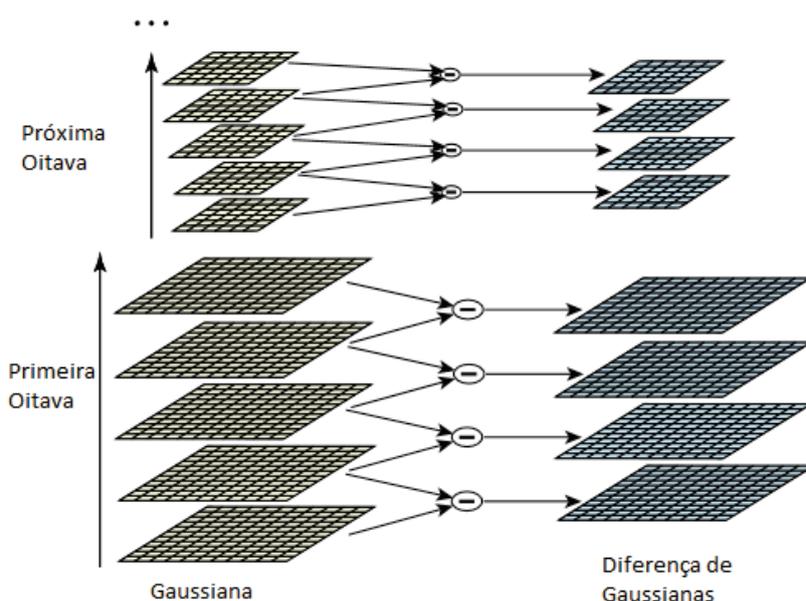
O valor atribuído a  $\sigma$  varia dentro de um intervalo predefinido. Para cada valor de  $\sigma$  calcula-se um par de imagens gaussianas, sendo uma  $G_\sigma$  e a próxima  $G_{k\sigma}$  conforme representado na Figura 3. As DG são calculadas subtraindo-se cada par de

imagens gaussianas, que resulta nas imagens DG representadas em azul na Figura 3. O conjunto de todas as oitavas forma o Espaço-Escala.

Desta forma, a busca por pontos notáveis é iniciada, sendo estes pontos definidos como valores máximos ou mínimos da função DG. A determinação dos pontos notáveis é feita através da comparação de cada ponto pertencente à imagem com seus oito vizinhos situados na mesma oitava e com seus nove vizinhos na próxima escala, bem como na anterior. Caso este ponto seja maior ou menor do que todos os outros, tem-se detectado um ponto de interesse (candidato a keypoint).

Depois que os candidatos são encontrados, torna-se necessário realizar uma nova seleção como objetivo de descartar candidatos que não sejam estáveis, isto é, candidatos que apresentam baixos contrastes ou foram mal localizados em uma determinada região de interesse (borda, bolhas, etc) e também determinar precisamente suas localizações na imagem.

FIGURA 3 – ESPAÇO-ESCALA



FONTE: Adaptado de Lowe (2004)

A posição detectada durante a comparação com as vizinhanças deve ser refinada e para tal, realiza-se o ajuste de uma função quadrática 3D, método proposto por Brow e Lowe (2002). Esta função é definida como a expansão de  $D_{x,y,\sigma}$ , deslocada da origem, desprezando-se os termos de ordem superior a 2:

$$D(x) = D + \frac{\delta D^T}{\delta x} x + \frac{1}{2} x^T \frac{\delta^2 D}{\delta x^2} x \quad (2.29)$$

A função  $D(x)$  é definida de tal forma que a origem é o próprio ponto amostrado. Desta forma, para um candidato detectado, sua posição  $x$  é dada por:

$$x = \frac{-\delta^2 D^{-1}}{\delta x^2} * \frac{\delta D}{\delta x} \quad (2.30)$$

Conforme explicado por Lowe (2004), utiliza-se um valor limiar para descartar pontos amostrados que apresentam valores menores que o valor adotado como limiar.

Após a precisa determinação da posição dos pontos candidatos, bem como a eliminação de pontos instáveis no espaço-escala, deve-se iniciar a etapa de atribuição da orientação de cada ponto, de forma a descrevê-los com base nas propriedades locais da imagem.

Calcula-se, para cada imagem, em cada escala, os valores de magnitude do gradiente local e a sua orientação, conforme apresentado por Lowe (2004), utilizando as seguintes equações:

$$m(x, y) = \sqrt{(L_{(x+1,y)} - L_{(x-1,y)})^2 + (L_{(x,y+1)} - L_{(x,y-1)})^2} \quad (2.31)$$

$$\theta_{(x,y)} = \tan^{-1} \left( \frac{L_{(x,y+1)} - L_{(x,y-1)}}{L_{(x+1,y)} - L_{(x-1,y)}} \right) \quad (2.32)$$

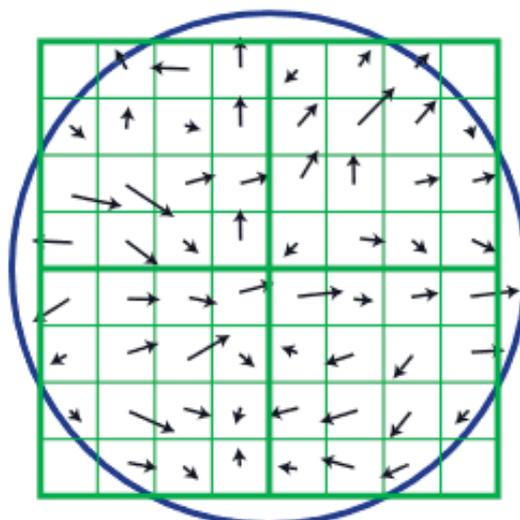
Para cada ponto contido em uma região ao redor do ponto de interesse detectado são calculados os valores de magnitude e orientação do gradiente. Estes valores são ponderados de acordo com uma janela gaussiana circular (indicada na figura 2 em azul), na qual o valor de  $\sigma$  é 1.5 vezes o valor da escala na qual o ponto de interesse está sendo amostrado.

Na Figura 4 estão representadas graficamente as magnitudes e as direções dos gradientes em cada local. Note-se que trata-se de uma região da imagem de dimensões 8x8 que é subdividida em 4 sub-regiões de tamanho 4x4.

Os valores de orientação dos gradientes em cada sub-região são acumulados em um histograma que possui 10 classes com amplitude que inicia-se em 0º e vai até 360º, desta forma, cada classe do histograma de orientações equivale a 10º. A Figura 5 demonstra a representação do histograma de orientações para 4 sub-regiões.

No exemplo representado na Figura 5 tem-se quatro histogramas com oito classes (representadas graficamente pelas setas) que são construídas acumulando os valores de orientação dos gradientes dentro destas oito classes. Utilizando estas grandezas são construídos os descritores locais.

FIGURA 4 – MAGNITUDE E ORIENTAÇÃO DOS GRADIENTES

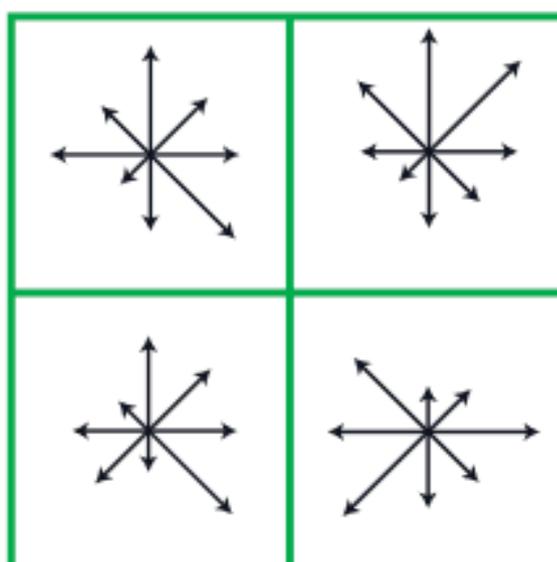


Magnitude e orientação dos gradientes

FONTE: Adaptado de Lowe (2004)

O descritor é um vetor contendo os valores que correspondem aos comprimentos das setas representadas na Figura 5, por exemplo, contudo o tamanho da região utilizada para cálculo das magnitudes e orientações pode variar de acordo com a necessidade de aplicação. Desta forma o descritor de um ponto-chave exemplificado na Figura 5 seria um vetor de 32 elementos ( $2 \times 2 \times 8 = 32$ ).

FIGURA 5 – HISTOGRAMA DE ORIENTAÇÕES



FONTE: Adaptado de Lowe (2004)

Experimentos realizados pelo autor mostraram que melhores resultados são alcançados quando utiliza-se 8 sub-regiões contendo histogramas de 8 classes, isto é, o descritor ideal é um vetor de 128 elementos ( $4 \times 4 \times 8 = 128$ ). Desta forma, para cada ponto-chave é calculado um vetor descritor, gerando-se um conjunto de pontos-chave juntamente com seus descritores que são utilizados para o estabelecimento das correspondências entre pontos-chave em diferentes imagens da mesma cena.

A etapa de estimativa de correspondências entre pontos-chave (keypoint matching) pode ser empregada utilizando-se diferentes estratégias. Contudo, Lowe (2004) conclui que o melhor candidato a correspondência de um ponto-chave é o seu vizinho mais próximo na outra imagem da mesma cena, isto é, busca-se estabelecer a correspondência entre pontos candidatos que possuam vetores descritores com a menor distância euclidiana entre si.

#### 2.2.2.2 Eliminação de Falsas Correspondências

Antes de realizar os cálculos relativos à geometria epipolar dos pares, deve-se empregar rotinas de eliminação de falsas correspondências (outliers), uma vez que a determinação dos parâmetros da matriz fundamental não é robusta a outliers.

Para tal, uma das soluções que pode ser empregada é o algoritmo RANSAC (*Random Sample Consensus*). Fischler e Bolles (1981) explicaram o RANSAC como um novo paradigma para estimativa de parâmetros, uma vez que as soluções até então conhecidas admitiam todo o conjunto de dados como verdadeiros, isto é, os dados não estariam contaminados por outliers, enquanto o RANSAC busca eliminar possíveis

inconsistências nos dados para só então estimar uma solução robusta.

---

**Algoritmo 1: RANSAC**

---

**Entrada:**  $P, n$   
**Saída:**  $P'$

- 1 **início**
- 2     Selecione aleatoriamente um subconjunto de  $P$  com  $n$  elementos
- 3     Determine o modelo  $M1$  que melhor se adapta ao subconjunto  $n$
- 4     Verifique quantos elementos  $n'$  de  $P$  adequam-se ao modelo  $M1$  dentro de uma tolerância  $t$
- 5     **se**  $n1 > qt$  **então**
- 6         Use  $n'$  para definir um novo modelo  $M1'$
- 7     **senão**
- 8         Selecione aleatoriamente um novo subconjunto  $n2$  de  $P$
- 9         Repita o procedimento desde a linha 3
- 10    **fim**
- 11 **fim**
- 12 **retorna**  $P'$

---

O Algoritmo 1 representa o paradigma do RANSAC conforme explicado por Fischler e Bolles (1981). Dado um conjunto de dados  $P$  e um problema que é solucionado utilizando um modelo que necessite de pelo menos  $n$  elementos de  $P$  para que se estime a solução, executa-se o Algoritmo 1, onde  $n'$  é denominado consenso de  $n$  e  $qt$  é um valor limiar para o tamanho do conjunto  $n'$ .

O modelo  $M1$ , para o caso de eliminação de outliers em um conjunto de correspondências, é a matriz fundamental, que relaciona a projeção de um ponto observado em uma imagem  $x$  com o mesmo ponto  $x'$  observado na outra imagem, através da Equação 2.33.

$$xFx' = 0 \quad (2.33)$$

Desta forma, a cada iteração é selecionado um conjunto mínimo de pontos, determina-se a matriz fundamental que se ajusta a este conjunto, para então estimar os inliers e os outliers segundo este modelo.

Quando não é possível encontrar consenso entre os dados depois de um certo número de tentativas, o algoritmo encerra suas tarefas retornando falha em determinar a solução. Caso contrário, é retornado um conjunto  $P'$  de pontos que são denominados inliers, isto é, pontos que provavelmente não estão contaminados com erros grosseiros.

### 2.2.2.3 Orientação Relativa dos Pares e Reconstrução da Cena

Após a etapa de detecção e atribuição de correspondências entre os pontos-chave em todo o conjunto de imagens, a próxima etapa a ser empregada é a orientação relativa das imagens. Na Fotogrametria os modelos empregados para este procedimento são as equações de colinearidade ou ainda as equações de coplanaridade. Na Visão Computacional este procedimento é realizado através de equações lineares utilizando modelos deduzidos da Geometria Epipolar.

Moons, Gool e Vergauwen (2008) explicam que a determinação da Matriz Fundamental  $F$  é indispensável para a determinação de correspondências entre as imagens, uma vez que limita a região de busca por pontos homólogos à linha epipolar. A Figura 6 mostra a representação da geometria epipolar entre um par de imagens.

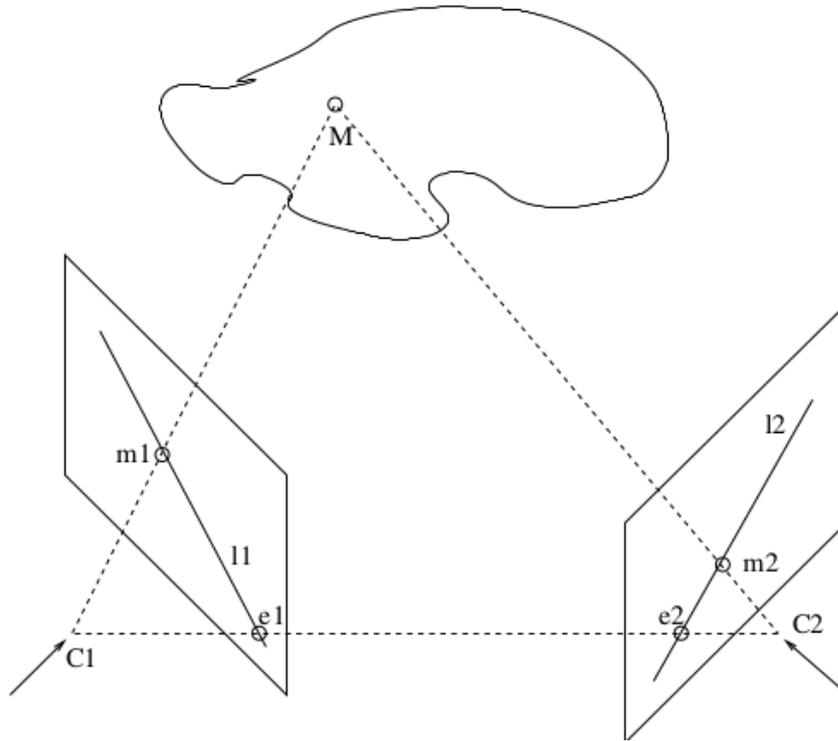
Na Figura 6 é possível notar alguns parâmetros, sendo eles:

- $C_1$  e  $C_2$ : A posição dos centros perspectivos da câmera no momento de cada tomada.
- O plano formado por  $C_1$ - $C_2$ - $M$ : É denominado plano epipolar, fundamental para definir a relação entre o espaço objeto e as imagens e, desta forma realizar a determinação tridimensional de um ponto.
- $m_1$  e  $m_2$ : As projeções de um ponto  $M$ , no espaço objeto, em cada uma das imagens.
- $e_1$  e  $e_2$ : São os epipolos, sendo definidos como os pontos onde a linha da base do plano epipolar intersepta os planos das imagens. Todas as linhas epipolares em uma imagem se encontram no epipolo.
- As linhas  $e_1$ - $m_1$  e  $e_2$ - $m_2$ : São denominadas linhas epipolares, definidas pela interseção do plano epipolar com as duas imagens.

A representação algébrica da relação apresentada na Figura 6 é a Matriz Fundamental  $F$  e sua determinação matemática é feita utilizando-se pontos homólogos presentes nas duas imagens (HARTLEY, ZISSEERMAN; 2003).

A matriz fundamental pode ser determinada conhecendo-se os parâmetros intrínsecos da câmera, ou ainda quando estes são desconhecidos. Contudo, como este trabalho foca no SfM, que determina tanto a estrutura tridimensional quanto os parâmetros intrínsecos, será abordada a determinação de  $F$  quando os parâmetros intrínsecos desconhecidos.

FIGURA 6 – GEOMETRIA EPIPOLAR



FONTE: Moons, Gool e Vergauwen (2008)

Dado um conjunto de pares de pontos (homólogos) entre duas imagens, a matriz fundamental é determinada como explicam Moons, Gool e Vergauwen (2008).

Seja  $f$  um vetor que contém os elementos da matriz fundamental:

$$f = [F_{11} \ F_{12} \ F_{13} \ F_{21} \ F_{22} \ F_{23} \ F_{31} \ F_{32} \ F_{33}]^T$$

E sejam os pontos  $m_1 = [x_1 \ y_1 \ 1]^T$  e  $m_2 = [x_2 \ y_2 \ 1]^T$ , representados na Figura 6, o primeiro par de pontos homólogos de um conjunto contendo 8 pares. Desta forma, para cada par de correspondências, temos uma equação que assume a seguinte expressão:

$$[x_2x_1 \ x_2y_1 \ x_2 \ y_2x_1 \ y_2y_1 \ y_2 \ x_1 \ y_1 \ 1]f = 0 \quad (2.34)$$

Assim, para um conjunto de 8 pares, tem-se um sistema de equações lineares homogêneas com 8 equações e 9 incógnitas. O sistema de equações lineares para  $n$  pares de pontos homólogos é apresentado na Equação 2.35.

$$\begin{vmatrix} x_2x_1 & x_2y_1 & x_2 & y_2x_1 & y_2y_1 & y_2 & x_1 & y_1 & 1 \\ & & & \vdots & & & & & \\ x_{2n}x_{1n} & x_{2n}y_{1n} & x_{2n} & y_{2n}x_{1n} & y_{2n}y_{1n} & y_{2n} & x_{1n} & y_{1n} & 1 \end{vmatrix} * \begin{vmatrix} F_{11} \\ \vdots \\ F_{33} \end{vmatrix} = 0 \quad (2.35)$$

Este problema pode ser resolvido utilizando um procedimento denominado Decomposição em Valores Singulares, também conhecido como SVD (Singular Value Decomposition).

O sistema de equações é escrito em forma matricial, então a Equação 2.35 é reescrita como:

$$Cf = 0 \quad (2.36)$$

Sendo  $C$  uma abstração da matriz apresentada na Equação 2.35. Aplicando a SVD em  $C$  tem-se três matrizes  $USV^T$  e chega-se à solução, sendo esta a última coluna da matriz  $V$ .

#### 2.2.2.4 Inicialização dos Parâmetros intrínsecos e das Coordenadas Tridimensionais dos Pontos Homólogos

Nesta etapa são obtidos os primeiros valores para os parâmetros de orientação interior, bem como os valores para o conjunto de coordenadas 3D dos pontos homólogos no espaço objeto.

Deve-se estabelecer valores iniciais para a matriz de projeção de cada um das câmeras. Define-se uma matriz de projeção como (HARTLEY, ZISSEERMAN; 2003):

$$P = KR[I | -C] \quad (2.37)$$

Onde  $K$  é denominada como a matriz de calibração da câmera e  $R$  uma matriz de rotação que relaciona o sistema referencial tridimensional adotado no espaço objeto com o sistema referencial fotogramétrico. A matriz  $K$ , para câmeras digitais, é tal que:

$$K = \begin{bmatrix} f & 0 & c_x \\ 0 & f & c_y \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.38)$$

Sendo  $f$  a distância focal e  $c_x, c_y$  as coordenadas do ponto principal.

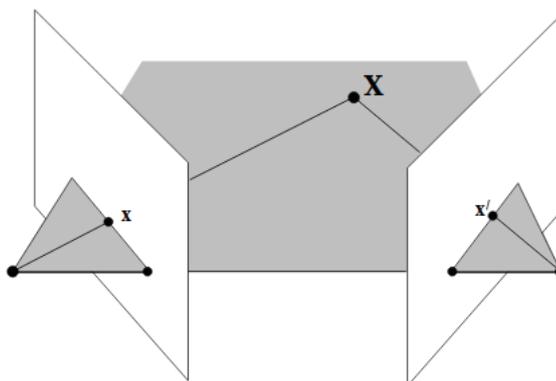
Contudo, sendo  $K$  desconhecida, utiliza-se a matriz fundamental para inicialização de  $P$  e adota-se  $R$  como sendo uma matriz identidade, assim, conforme mostrado por Moons, Gool e Vergauwen (2008):

$$P_1 = [I_{3 \times 3} | 0_3] \quad (2.39)$$

$$P_2 = [[e_{12}] \times F_{12} - e_{12}^T | ae_{12}] \quad (2.40)$$

A matriz  $P_1$  é inicializada como um matriz identidade aumentada com um vetor coluna nulo de três elementos. A matriz  $P_2$  é inicializada utilizando parâmetros presentes na matriz fundamental, bem como as coordenadas do epipolo na segunda imagem.

FIGURA 7 – INTERSEÇÃO FOTOGRAMÉTRICA



FONTE: HARTLEY, ZISSEERMAN; 2003

Tendo as matrizes projetivas para as duas câmeras inicializadas, torna-se possível empregar a interseção fotogramétrica no primeiro par, isto é, calcular as coordenadas 3D para os pares de pontos no primeiro par. A Figura 7 ilustra o processo de interseção fotogramétrica (na literatura pode-se encontrar também o termo Triangulação).

Através do modelo pinhole é deduzido o modelo matemático que soluciona o problema apresentado na Figura 3. Desta forma, conforme apresentado por Hartley e Zisserman (2004), o modelo matemático é:

$$x = PX \quad (2.41)$$

$$x' = P'X \quad (2.42)$$

Sendo  $x$  e  $x'$  as coordenadas do ponto X observadas nas duas fotografias,  $P_1$  e  $P_2$  as matrizes de projeção das câmeras utilizadas e  $X$  as coordenadas do mesmo ponto no espaço objeto. Reescrevendo as equações 2.15 e 2.16, tem-se:

$$x \times (PX) = 0 \quad (2.43)$$

$$x' \times (P'X) = 0 \quad (2.44)$$

Chegando, desta forma, a um sistema de equações lineares homogêneas que pode ser escrito na forma  $Ax = 0$ , então a solução é obtida novamente por SVD. Seja  $P = (P_1 \ P_2 \ P_3)^T$  um vetor onde cada elemento deste vetor é uma linha da matriz projetiva  $P$ . A matriz  $A$  para decomposição em valores singulares, demonstrada por Hartley e Zisserman (2004), é expressa como:

$$A = \begin{vmatrix} xP_3^T - P_1^T \\ yP_3^T - P_2^T \\ x'P_3'^T - P_1'^T \\ y'P_3'^T - P_2'^T \end{vmatrix} \quad (2.45)$$

Tendo o primeiro par com suas matrizes projetivas inicializadas, bem como os pontos 3D da estrutura calculados, inicia-se o processo de cálculo das matrizes projetivas de cada uma das próximas imagens e atualização da estrutura.

Cada uma das imagens subsequentes é adicionada ao modelo e utiliza-se os pontos homólogos presentes na atual imagem e na anterior para estimativa da matriz projetiva da imagem atual, bem como atualização da estrutura 3D. A Figura 8 ilustra este procedimento.

Para a próxima imagem adicionada calcula-se a matriz projetiva  $P$  através das correspondências entre os pontos tridimensionais já calculados pela triangulação aplicada no primeiro par e os pontos detectados na nova imagem adicionada ao modelo.

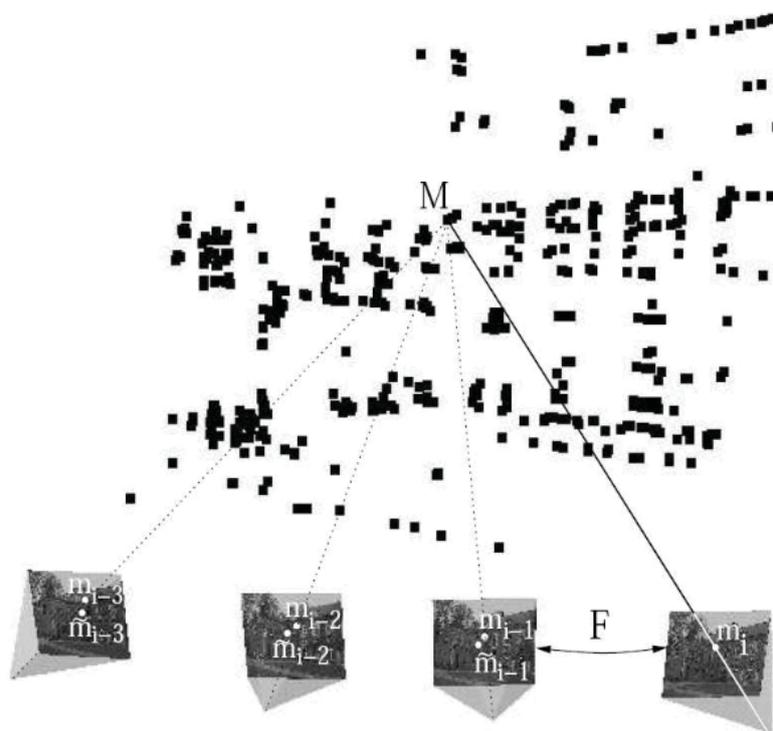
Hartley e Zisserman (2004) mostram o modelo matemático empregado para cálculo de  $P$  através as correspondências entre 3D e 2D:

$$x_i = PX_i \quad (2.46)$$

Onde  $x_i$  é o vetor de coordenadas de um ponto observado na imagem,  $X_i$  é o mesmo ponto representado no referencial do espaço objeto e  $P$  é a matriz projetiva. Pode-se manipular a Equação 2.20 e reescrevê-la da seguinte forma:

$$\begin{vmatrix} 0^T & -wX_i^T & y_iX_i^T \\ w_iX_i^T & 0^T & -x_iX_i^T \end{vmatrix} * \begin{vmatrix} P_1 \\ P_2 \\ P_3 \end{vmatrix} = 0 \quad (2.47)$$

FIGURA 8 – STRUCTURE FROM MOTION



FONTE: Moons, Gool e Vergauwen (2008)

Novamente tem-se um sistema de equações lineares homogêneas que pode ser resolvido por SVD, sendo  $(x, y, w)$  as coordenadas homogêneas de um ponto observado no espaço imagem.

Tendo a matriz projetiva da nova imagem deve-se atualizar a estrutura 3D adicionando as linhas das equações referentes aos pontos observados nas imagens anterior e atual. Este procedimento é repetido até que não haja mais imagens a serem adicionadas ao modelo.

#### 2.2.2.5 Bundle Adjustment

Conforme explicado na seção 2.2.2.3, a reconstrução tridimensional é um procedimento iterativo realizado entre pares de imagens (podem ser utilizadas outras abordagens, como um trio de imagens), desta forma, em cada etapa do procedimento erros sistemáticos são propagados e, portanto, devem ser minimizados (Moons, Gool e Vergauwen, 2008).

Apesar dos algoritmos envolvidos no SfM serem desenvolvidos em pesquisas da Visão Computacional, o procedimento utilizado para ajuste global da estrutura 3D, bem como otimização dos parâmetros de orientação da câmera é o Bundle Adjustment, método advindo da Fotogrametria.

Desta forma, deve-se adotar um modelo funcional que permita expressar as

observações nas imagens como uma função dos parâmetros a serem otimizados.

$$m_{ki} = (P_k, M_i) \quad (2.48)$$

A Equação 2.48 mostra um ponto  $m_{ki}$  observado em uma imagem  $k$  como uma função da matriz projetiva  $P_k$  e do vetor  $M_i$  que representa a coordenada deste mesmo ponto no espaço objeto.

Moons, Gool e Vergauwen (2008) explicam que os pontos extraídos de forma automática nas imagens são considerados fixos, enquanto o conjunto de pontos 3D, os parâmetros de orientação interior e exterior devem ser otimizados de forma a minimizar o somatório dos erros.

Este problema é solucionado por ajustamento por mínimos quadrados utilizando o método paramétrico (Gauss-Markov), no qual as observações são representadas como função dos parâmetros. O vetor das correções diferenciais é calculado e os parâmetros são modificados a cada iteração.

$$\delta p = (A^T W A)^{-1} A^T W L \quad (2.49)$$

A Equação 2.49 mostra a solução para o cálculo do vetor de correção dos parâmetros, conforme mostrado por Gemael, Machado e Wandressen (2015), sendo  $\delta p$  o vetor das correções diferenciais,  $A$  a matriz jacobiana das derivadas parciais do modelo funcional em relação aos parâmetros,  $W$  é a matriz dos pesos e  $L$  é o vetor das diferenças entre valores calculados e observados.

O vetor  $\delta p$  é calculado e seus valores são somados aos parâmetros até que um critério de parada seja atingido.

#### 2.2.2.6 Transformação de Similaridade

Conforme demonstrado nas equações 2.39 e 2.40, a estrutura tridimensional da cena é determinada segundo um sistema referencial projetivo. Para aplicações em Fotogrametria é essencial que a cena seja representada em um sistema cartesiano tridimensional ou em um sistema de projeção cartográfica que aproxima-se de um referencial cartesiano tridimensional.

Desta forma, torna-se necessário o emprego de uma transformação geométrica para a determinação das coordenadas tridimensionais dos pontos no referencial apropriado para aplicações em engenharia.

Carrivick, Quincey e Smith (2016) explicam que a transformação a ser aplicada é a transformação de similaridade, que é uma transformação envolvendo sete

parâmetros, conforme representada na Equação 2.50 (FÖRSTNER; WROBEL, 2016).

$$X_{metrico} = \lambda * R * X_{proj} + T \quad (2.50)$$

Sendo  $\lambda$  um fator de escala,  $R$  é uma matriz de rotação de dimensões 3x3,  $T$  é um vetor de translação,  $X_{metrico}$  o vetor de coordenadas de um ponto de apoio e  $X_{proj}$  o vetor de coordenadas de um ponto calculado via triangulação. Esta transformação, para o caso tridimensional, é modelada segundo sete parâmetros: três parâmetros de rotação, três parâmetros de translação e um fator de escala.

Para a determinação destes parâmetros é necessário que pelo menos 3 pontos de apoio sejam conhecidos (dois pontos com X,Y e Z e um pelo menos com Z), sendo esta a condição mínima para a determinação.

A solução é obtida por ajustamento por mínimos quadrados. O modelo funcional escreve as coordenadas dos pontos de apoio como observações em função dos parâmetros, logo tem-se:

$$X_{metrico} = f(\lambda, R, T) \quad (2.51)$$

Linearizando a função por expansão em séries de Taylor, desprezando os termos de ordem superior a 1, aplica-se o ajustamento pelo método paramétrico (Gauss-Markov), sendo a solução determinada iterativamente por (GEMAEL; MACHADO; WANDRESEN, 2015):

$$\Delta P = (A^T P A)^{-1} A^T P L \quad (2.52)$$

Em que  $\Delta P$  é o vetor de correções diferenciais para cada um dos sete parâmetros. Tendo a solução para os parâmetros, aplica-se a transformação em todo o conjunto de pontos obtidos via triangulação, obtendo desta forma um novo conjunto de pontos representados em um referencial adequado.

### 3 MATERIAL E MÉTODOS

Apresenta-se nesse capítulo a metodologia a ser seguida para alcançar os objetivos do estudo proposto. Apresentam-se os equipamentos e recursos computacionais utilizados para a coleta e processamento dos dados, bem como os procedimentos realizados em cada etapa da realização deste trabalho.

#### 3.1 MATERIAL

Os recursos utilizados para a realização do estudo foram disponibilizados pelo Programa de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas da Universidade Federal do Paraná, bem como serão disponibilizados recursos particulares, desta forma são listados em:

- RPA Phantom 4 Pro, equipamento particular do Professor Leonardo Ercolin;
- Programa Computacional Agisoft *Metashape*;
- *Leica Photogrammetric Suite 2011* (LPS);
- Base de dados do Projeto UFPR Campus Map para aquisição de pontos de apoio e verificação;
- Ambiente de desenvolvimento *Spyder 4* para geração dos gráficos;
- Ambiente de desenvolvimento *Visual Studio Code* para desenvolver as rotinas necessárias para conversão de arquivos do padrão *Metashape* para LPS.

#### 3.2 METODOLOGIA

##### 3.2.1 Área de Estudo e Recobrimento Aéreo

A área de estudo localiza-se nas dependências do Centro Politécnico da Universidade Federal do Paraná. A Figura 9 mostra o corredor que se estende por aproximadamente 1,3 quilômetros, abrangendo os limites norte a sul do campus.

Apesar de o estudo ter como principal objetivo a análise da qualidade posicional alcançada para uma faixa única, serão adicionadas ao projeto de pesquisa mais duas faixas para verificar as vantagens do uso de faixas adicionais com elevado recobrimento lateral entre faixas. O recobrimento fotogramétrico será realizado de forma que as imagens tenham 80% de sobreposição longitudinal e 60% de sobreposição lateral.

FIGURA 9 – ÁREA DE ESTUDO



FONTE: O Autor

Recobrimentos acentuados entre faixas foram adotados para aumentar a redundância de medidas nos pontos de ligação de faixas e melhorar o desempenho do programa computacional *Metashape* na realização das medidas automáticas nesses pontos.

Desta forma, o estudo analisa diferentes configurações de recobrimento aéreo sendo estas: Corredor mapeado em uma faixa, duas e três faixas para melhor entendimento do desempenho do SfM no mapeamento de corredores.

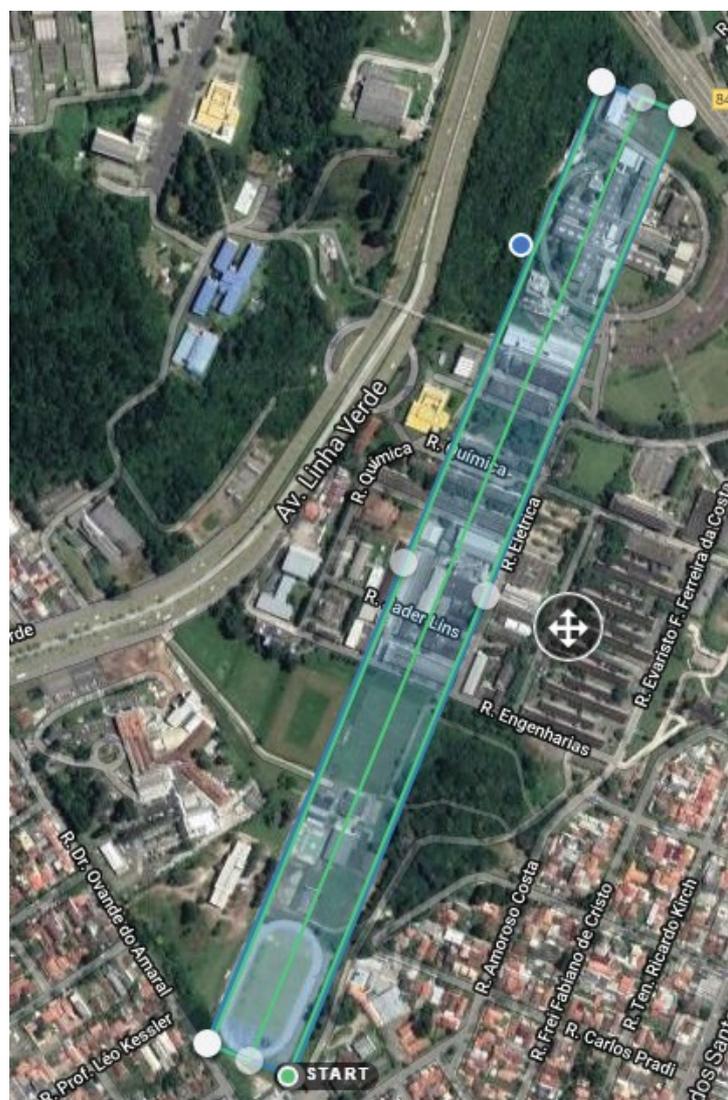
O voo foi realizado a uma altura de aproximadamente 100 metros utilizando o RPA Phantom 4 Pro que dispõe de receptor GNSS-SPS acoplado, sensor inercial e câmera possuindo distância focal fornecida pelo fabricante igual a 8,8 milímetros. Além das características técnicas citadas, vale ressaltar que o Phantom 4 Pro conta com um obturador de alta velocidade, o que elimina a distorção causada pelo efeito *Rolling Shutter*.

A câmera do RPA conta com um sensor CMOS de 1 polegada, de dimensões 4864 × 3648 pixels. Logo, cada pixel possui cerca de 2,61 micrômetros. Vale ressaltar que estes são parâmetros fornecidos pelo fabricante. A Figura 10 mostra o trajeto realizado pelo RPA para aquisição das imagens, sendo a linha de voo percorrida representada pelas linhas verdes, formando três faixas paralelas.

Esta altura de voo permite alcançar GSD de aproximadamente 3,0 centímetros

por pixel, permitindo a observação de feições fotoidentificáveis nas fotografias, tais como cantos de faixas de pedestres e cantos de faixas de sinalização de trânsito, com alta confiabilidade.

FIGURA 10 – PLANO DE VOO



FONTE: Drone Deploy

### 3.2.2 Distribuição de Pontos de Apoio

Os pontos de apoio serão utilizados para melhorar a exatidão do referencial geodésico determinado pelas coordenadas dos CPs, obtidas diretamente pelo receptor GNSS instalado na plataforma VANT. As coordenadas planialtimétricas dos pontos de apoio e verificação serão extraídas do ortomosaico disponibilizado na base de dados cartográficos fornecida pelo projeto UFPR Campus Map da Universidade Federal do Paraná.

O ortomosaico do projeto UFPR Campus Map possui resolução espacial de 5 cm. Este ortomosaico apresenta valores de erro planimétrico total de 6 cm, e o MDE disponibilizado pelo projeto apresenta erro altimétrico total de 4 cm, valores obtidos nas informações técnicas e estatísticas do ortomosaico (DELAZARI; FILHO; PEIXOTO, 2018). A estimativa da acurácia esperada foi realizada conforme apresentado por Kraus (2011), que descreve a acurácia alcançada pelo ajustamento fotogramétrico como uma função da escala da fotografia e da proporção entre a base e a altura de voo. Desta forma, o valor esperado para o EQM das discrepâncias planimétricas dos pontos de verificação é de 8,6 cm, enquanto o valor esperado para o EQM das discrepâncias altimétricas dos pontos de verificação é de 15 cm.

Diferentes quantidades de pontos de apoio serão testadas com o objetivo de definir aquela com a qual se alcança os valores de discrepâncias esperados nos pontos de verificação. Iniciando com pontos de apoio inseridos a cada quinze bases, posteriormente utilizando pontos de apoio inseridos a cada dez bases e, por fim, utilizando pontos de apoio distribuídos a cada cinco bases.

Com o objetivo de verificar a influência da adição de faixas no bloco, as distribuições já citadas serão testadas para os cenários de uma, duas e três faixas. Assim, é possível verificar se a adição de faixas torna possível reduzir a quantidade de pontos de apoio utilizados para alcançar a exatidão esperada com a menor quantidade de pontos de apoio possível.

As configurações de pontos de apoio ilustradas nas Figuras 11 a 16 serão testadas no software *Metashape* para determinar qual dentre estas apresenta o cenário mais favorável para a redução da quantidade de pontos de apoio a serem utilizados para o mapeamento do corredor mantendo a exatidão tolerável. Desta forma serão testadas as seguintes distribuições de pontos de apoio:

- **Pontos de apoio a cada quinze bases:** Esta configuração de distribuição de pontos de apoio está representada na Figura 11 para o experimento com uma faixa e na Figura 14 para os experimentos com duas e três faixas. Novamente tomam-se pontos que no experimento anterior eram de apoio e são, neste experimento, considerados de verificação. A configuração de pontos de apoio a cada quinze bases e pontos de verificação para os experimentos em duas e três faixas é a mesma.
- **Pontos de apoio a cada dez bases:** As Figuras 12 e 15 mostram a distribuição de pontos de apoio a cada dez bases para uma faixa (fig. 12), duas e três faixas (fig. 15). Conforme pode ser observado, alguns pontos que no experimento anterior eram de apoio passam a ser considerados como verificação de forma que os pontos de apoio agora estejam posicionados a cada dez bases. A configuração

de pontos de apoio a cada dez bases e pontos de verificação para os experimentos em duas e três faixas é a mesma.

- **Pontos de apoio a cada cinco bases:** Conforme mostrado nas Figuras 11 e 14, serão inseridos pontos de apoio a cada cinco bases. Na Figura 11 os pontos de verificação estão alinhados pelo fato do corredor estar levantado em apenas uma faixa, tornando menor a área disponível para observação dos pontos. Na Figura 14 está apresentada a distribuição de pontos de apoio inseridos a cada cinco bases para o experimento com duas e três faixas. A configuração de pontos de apoio a cada cinco bases e pontos de verificação para os experimentos em duas e três faixas é a mesma.

Considera-se o melhor caso de configuração de pontos de apoio para ser utilizado no mapeamento do corredor aquele que permita obter valores de EQM planialtimétrico nas coordenadas dos pontos de verificação que atendam a tolerância de 6 cm em planimetria e 4 cm em altimetria.

FIGURA 11 – PONTOS DE APOIO E VERIFICAÇÃO



FONTE: O Autor

FIGURA 12 – PONTOS DE APOIO E VERIFICAÇÃO



FONTE: O Autor

FIGURA 13 – PONTOS DE APOIO E VERIFICAÇÃO



FONTE: O Autor

FIGURA 14 – PONTOS DE APOIO E VERIFICAÇÃO



FONTE: O Autor

FIGURA 15 – PONTOS DE APOIO E VERIFICAÇÃO



FONTE: O Autor

FIGURA 16 – PONTOS DE APOIO E VERIFICAÇÃO



FONTE: O Autor

### 3.2.3 Processamento das Imagens

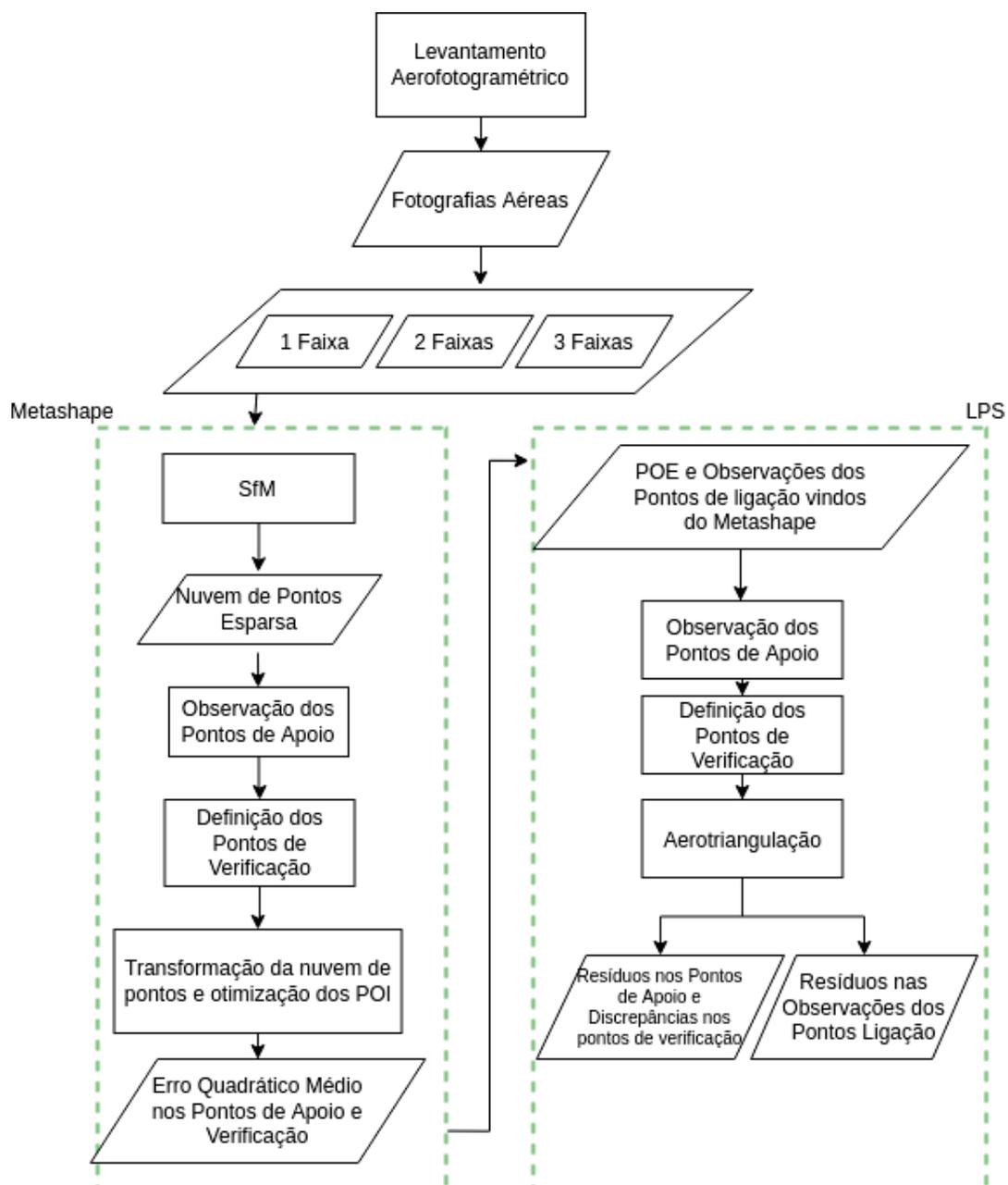
O fluxograma da Figura 17 representa esquematicamente a metodologia a ser aplicada no processamento das imagens. Nas próximas subseções cada etapa do estudo é explicada em detalhes.

Primeiramente as imagens serão processadas utilizando o programa computacional Agisoft *Metashape* empregando a técnica SfM. Adicionalmente será empregado software LPS para realizar a comparação entre as discrepâncias de coordenadas tridimensionais nos pontos de verificação obtidos via SfM com o *Metashape* e os obtidos com a aerotriangulação (*bundle adjustment*) no software Erdas LPS.

#### 3.2.3.1 Processamento com Metashape

Nesta etapa acontece a aplicação do SfM ao conjunto de imagens obtendo-se uma nuvem de pontos, gerada com os valores dos centros de projeção determinados com medidas GNSS do sensor residente na plataforma aérea VANT, que registra observações com aproximadamente 1,5 m de precisão nominal horizontal e 50 cm de precisão nominal vertical, conforme mostram as especificações técnicas do equipamento (DJI, s.d.). Esta nuvem de pontos é utilizada pelo *Metashape* para gerar o ortomosaico que será o objeto de estudo desta pesquisa.

FIGURA 17 – METODOLOGIA



FONTE: O autor

Utilizam-se os pontos de apoio para melhorar a exatidão da nuvem de pontos e, por fim, gerar um ortomosaico para cada experimento no qual serão feitas as análises das discrepâncias nos pontos de verificação.

As configurações de pontos de apoio e verificação representadas nas figuras 11 a 16 são empregadas com o objetivo de determinar qual a melhor configuração de pontos de apoio através da análise dos valores de EQM nas discrepâncias dos pontos de verificação, com base na exatidão tolerável estabelecida para este estudo (8,6 cm em planimetria e 15 cm em altimetria).

Iniciam-se os experimentos aplicando o SfM ao conjunto de imagens do corredor em uma única faixa utilizando a distribuição de apoio mostrada na Figura 11 com pontos de apoio posicionados de cinco em cinco bases. Posteriormente utiliza-se a distribuição de pontos de apoio representada na Figura 12 posicionando pontos de apoio de dez em dez bases e, por último, realiza-se o processamento com o corredor em uma faixa com pontos de apoio posicionados de quinze em quinze bases (fig. 13).

O mesmo procedimento é repetido para os experimentos em duas e três faixas, contudo, novos pontos de apoio e verificação são adicionados a estes experimentos para que a geometria da distribuição de pontos de apoio e verificação no bloco não fique deficiente. Para o caso de duas e três faixas com pontos de apoio inseridos de cinco em cinco bases, a Figura 14 ilustra a distribuição destes pontos. E, por fim, as figuras 15 e 16 mostram as distribuições de pontos de apoio para duas e três faixas com pontos de apoio posicionados de dez em dez e de quinze em quinze bases, respectivamente.

As análises das discrepâncias tridimensionais das coordenadas dos pontos de verificação e dos resíduos das coordenadas dos pontos de apoio obtidos dos processamentos realizados com as diferentes configurações de faixas e pontos de apoio serão realizadas através dos valores da média e dos EQM das coordenadas tridimensionais de pontos de verificação.

Será realizada também uma análise estatística descritiva para verificar a presença de tendência nos valores das discrepâncias através do cálculo da média e do desvio padrão das discrepâncias nos pontos de verificação. Sabendo que, em um conjunto de observações livres de tendência, a média absoluta das discrepâncias tende a zero, realiza-se esta análise para os pontos de verificação em cada experimento.

Em todos os experimentos os parâmetros de orientação interior serão determinados pela autocalibração empregada pelo *Metashape*. Adota-se o modelo de Conrady-Brown, desta forma os parâmetros a serem ajustados pelo *Metashape* são: Distância Focal, Coordenadas do Ponto Principal, Coeficientes de distorção Radial Simétrica ( $K_1, K_2, K_3$ ) e Coeficientes de Distorção Descentrada ( $P_1, P_2, P_3$ ).

Conforme encontrado na literatura (MOONS; VERGAUWEN; VAN GOOL, 2008), (CARRIVICK; SMITH; QUINCEY, 2016), (WESTOBY et al., 2012) e também no manual do usuário do programa computacional *Metashape*, para melhorar a exatidão da nuvem de pontos gerada via SfM, utiliza-se uma transformação de similaridade R3. Sabe-se que a condição mínima para o ajuste dos parâmetros de uma transformação de similaridade é dispor de três pontos de apoio. Contudo, o programa *Metashape* melhora a exatidão da nuvem de pontos, mesmo com a utilização de um único ponto de apoio.

Desta forma, com o objetivo de verificar se uma transformação como a isogonal 3D é empregada ou não, foi realizado um experimento empregando o SfM no conjunto de imagens e, posteriormente, utilizando um único ponto de apoio será empregada a transformação de similaridade para fixação do referencial geodésico. A Figura 18 mostra a localização deste ponto de apoio em vermelho. Os demais pontos são os pontos de verificação, representados na cor azul.

Formulam-se três hipóteses para o processo que o *Metashape* realiza quando o bloco dispõe de um único ponto de apoio:

1. A transformação Isogonal 3D é utilizada empregando as coordenadas do CPs com as de um unico ponto de apoio;
2. Uma simples translação tridimensional é empregada entre o ponto de apoio e o ponto equivalente a este na nuvem de pontos;
3. Um novo bundle adjustment é empregado com injeção posicional no ponto de apoio.

Tais hipóteses foram testadas com a realização dos seguintes procedimentos:

1. Verifica-se se houve mudança nos valores dos parâmetros de orientação exterior das imagens próximas ao ponto de apoio (três imagens nas quais este ponto aparece): Este processo permite estimar se houve a aplicação de um Bundle Adjustment, uma vez que havendo mudança nos POE, pode-se inferir que o sistema não emprega uma transformação geométrica, mas reajusta os POE, fazendo com que as hipóteses 1 e 2 sejam descartadas não sendo necessários os próximos dois passos. Vale ressaltar que, apesar do processo de aerotriangulação poder modificar os valores dos POE de todas as imagens, a observação de apenas três fotografias nas quais o ponto de apoio é observado é suficiente para este estudo.
2. Caso o procedimento anterior não elimine as hipóteses 1 e 2, descarta-se a hipótese 3 e calcula-se o vetor definido pela diferença entre as coordenadas do mesmo ponto de apoio na nuvem transformada e na nuvem SfM: Desta forma obtém-se um vetor de translação R3.
3. Observa-se mais dois pontos, tanto na nuvem SfM, quanto na nuvem transformada com apenas um ponto de apoio e calcula-se o vetor de translação obtido também para estes. Os três pontos a serem observados estão apresentados na Figura 18. Caso os valores de translação não sejam iguais, descarta-se a segunda hipótese e adota-se a primeira.

FIGURA 18 – EXPERIMENTO COM UM ÚNICO PONTO DE APOIO



FONTE: Google Earth

### 3.2.3.2 Aerotriangulação com LPS

Os experimentos realizados com o *Metashape* geram, além do ortomosaico, um conjunto de dados sendo estes: Os parâmetros de orientação interior ajustados pelo programa computacional por calibração em serviço (*on-the-job*), parâmetros de orientação exterior das fotografias ajustados e as coordenadas fotogramétricas dos pontos de ligação observados de forma autônoma.

Das experimentações anteriores será definido o melhor caso, que será obtido, com base nas análises de precisões e exatidões dos resultados das experimentações realizadas com a utilização do programa *Metashape*, isto é, a melhor configuração de pontos de apoio e numero de faixas. Deste caso, as coordenadas fotogramétricas medidas e parâmetros obtidos com o software *Metashape* (POI e POE) serão utilizadas pelo software LPS para a realização da Aerotriangulação (*Bundle Adjustment*). O objetivo deste experimento é verificar a qualidade destas medidas fotogramétricas realizadas de forma automáticas pelo *Metashape*. Devido a impossibilidade de realizar esse procedimento nos resultados apresentados no programa *Metashape*, os resíduos dessas medidas, obtidas do processamento da aerotriangulação (LPS) serão verificados.

Neste sentido serão realizados dois experimentos:

- Aerotriangulação fixando os parâmetros de orientação exterior com a precisão nominal do receptor GNSS acoplado no Phantom 4 Pro, fixando os pontos de

apoio com as precisões advindas das informações técnicas do ortomosaico disponibilizado pelo projeto UFPR Campus Map. Este experimento permite verificar a qualidade dos POE ajustados pelo *Metashape* através da comparação entre com os valores de POE estimados na aerotriangulação realizada pelo LPS. Os valores residuais dos POE serão acumulados em um histograma de frequências e serão também apresentadas a discrepâncias nas coordenadas dos pontos de verificação e resíduos nos pontos de apoio. Neste experimento, POI advindos do *Metashape* são fixados de forma absoluta;

- Repete-se o primeiro experimento com a diferença de que a distância focal é fixada com a precisão estimada pelo *Metashape*. Neste caso, além de verificar os resíduos e discrepâncias nos parâmetros e pontos de apoio, verifica-se também a exatidão da distância focal estimada pelo *Metashape* através da análise do seu resíduo. Realiza-se este experimento devido a impossibilidade da realização de uma pré-calibração, ocasionada pela pandemia do Covid-19, na qual as autoridades competentes sugeriram a continuidade da pesquisa em regime de trabalho remoto.

Todos as medidas fotogramétricas, tanto pontos de apoio, quanto pontos de ligação, serão exportados do *Metashape* para serem processados no LPS. Por se tratarem de dois softwares desenvolvidos por empresas diferentes, não há uma forma direta de exportar estes dados de um software para outro, por este motivo foi implementada uma biblioteca de funções em C++ que faz a conversão entre os formatos de arquivos do *Metashape* e LPS.

A experimentação com o uso do LPS (fototriangulação) com a fixação dos parâmetros de orientação exterior e interior permitiu verificar as precisões das medidas fotogramétricas autônomas nos pontos de verificação e da estimação dos POEs no *Metashape*. Essas precisões não são apresentadas no relatório de resultados obtidos no programa *Metashape*.

De posse das informações convertidas do padrão *Metashape* para o Erdas LPS, realizou-se também a análise dos resíduos nas observações automáticas realizadas no *Metashape*. Desta forma, para cada um dos experimentos, estes valores serão acumulados em um histograma de frequências com o objetivo de analisar a qualidade das observações realizadas de forma autônoma.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Apresentam-se neste capítulo os resultados obtidos nesta pesquisa. Inicia-se abordando os experimentos realizados com o *Metashape* e a determinação da melhor configuração de apoio e faixas para o mapeamento de corredores com recobrimento VANT. Posteriormente discutem-se os experimentos realizados com o programa Erdas LPS.

### 4.1 EXPERIMENTOS REALIZADOS NO METASHAPE

#### 4.1.1 Recobrimento aéreo do corredor com uma única faixa

A Tabela 1 mostra os valores de EQM das discrepâncias das coordenadas tridimensionais dos pontos de verificação e também o EQM dos resíduos das coordenadas tridimensionais dos pontos de apoio para cada um dos experimentos realizados utilizando o *Metashape*. As Figuras 19 (a), (c) e (e) mostram a dispersão das discrepâncias planimétricas nos pontos de verificação em torno do valor médio e as Figuras 19 (b), (d) e (f) mostram os valores das discrepâncias das coordenadas altimétricas dos pontos de verificação em relação ao ponto central igual a zero.

Conforme mostra a Tabela 1, o experimento de mapeamento do corredor com uma única faixa, utilizando pontos de apoio inseridos a cada quinze bases, resultou nas discrepâncias das coordenadas dos pontos de verificação, EQMs planimétrico e altimétrico apresentando valores de 9,839 cm e 7,196 cm, respectivamente. O valor do EQM planimétrico encontra-se cerca de 1,24 cm acima da tolerância planimétrica estabelecida. Contudo, o valor do EQM das discrepâncias altimétricas dos pontos de verificação encontra-se dentro da tolerância esperada. No caso dos pontos de apoio, observam-se valores EQM planimétricos e altimétricos dos resíduos com valores de 3,4 cm e 1,8 cm, respectivamente. Estes valores encontram-se abaixo das tolerâncias adotadas neste estudo que são 8,6 e 15 cm respectivamente. Piores resultados de exatidão eram esperados neste experimento, pois com a inserção de pontos de apoio a cada quinze bases, aparecem regiões sem pontos de apoio, o que facilita a ocorrência de deformações nas conexões entre fotos, afastando a determinação dos POEs das fotografias da exatidão esperada.

Continuando a análise dos resultados apresentados na Tabela 1, analisam-se agora os resultados para o caso de pontos de apoio inseridos a cada dez bases. Observa-se que o aumento no número de pontos de apoio degrada a precisão do ajustamento realizado pelo *Metashape*, uma vez que o EQM planimétrico dos resíduos dos pontos de apoio apresentou um aumento de 1,629 cm em relação ao experimento

de mapeamento realizado com pontos de apoio inseridos a cada quinze bases. Este resultado é esperado, uma vez que a quantidade de pontos de apoio utilizados para o ajustamento dos parâmetros foi incrementada, isto é, a inserção de mais pontos de apoio diminuiu os graus de liberdade do ajustamento realizado, ocasionando valores mais elevados de resíduos dos pontos de apoio. Porém, percebe-se que a exatidão alcançada nas coordenadas planimétricas dos pontos de verificação aumentou, pois o EQM planimétrico resultante (Disc. Plan) das coordenadas planimétricas dos pontos de apoio apresentou uma redução de aproximadamente 2,0 cm em relação ao caso anterior, porém o mesmo não ocorre com o valor de EQM altimétrico, que apresenta um aumento de 0,47 cm em relação ao experimento anterior, resultando em uma leve degradação da exatidão altimétrica. Desta forma, é evidente que, para o caso do mapeamento do corredor em uma única faixa, com pontos de apoio inseridos a cada dez bases, os valores de EQM planimétrico resultante e altimétrico atendem a exatidão esperada para este estudo, isto é, os valores de EQM são menores do que 8,6 cm em planimetria e 15 cm em altimetria.

TABELA 1 – EXPERIMENTO EM UMA FAIXA

<b>15 Bases</b>				
<b>EQM dos Resíduos nos Pontos de Apoio</b>				
Quant. Pts. Apoio	X (cm)	Y (cm)	Z (cm)	Disc. Plan. (cm)
15	2,082	2,685	1,780	3,397
<b>EQM das Discrepâncias nos Pontos de Verificação</b>				
Quant. Pts. Verif.	X	Y	Z	Disc. Plan.
34	6,089	7,729	7,196	9,839
<b>10 Bases</b>				
<b>EQM dos Resíduos nos Pontos de Apoio</b>				
Quant. Pts. Apoio	X	Y	Z	Disc. Plan.
22	3,023	4,014	2,373	5,026
<b>EQM das Discrepâncias nos Pontos de Verificação</b>				
Quant. Pts. Verif.	X	Y	Z	Disc. Plan.
27	5,877	5,186	7,668	7,838
<b>5 Bases</b>				
<b>EQM dos Resíduos nos Pontos de Apoio</b>				
Quant. Pts. Apoio	X	Y	Z	Disc. Plan.
36	3,614	4,430	2,950	5,717
<b>EQM das Discrepâncias nos Pontos de Verificação</b>				
Quant. Pts. Verif.	X	Y	Z	Disc. Plan.
13	2,921	5,254	5,690	6,019

FONTE: O Autor

A seguir, discutem-se os resultados obtidos no experimento de mapeamento do corredor em uma única faixa com pontos de apoio inseridos a cada cinco bases,

neste experimento observa-se novamente um aumento dos valores dos resíduos das coordenadas dos pontos de apoio com a utilização de 36 pontos de apoio, sendo o valor do EQM planimétrico resultante dos resíduos dos pontos de apoio de aproximadamente 5,72 cm, isto é, houve um incremento de aproximadamente 0,7 cm no valor do EQM dos resíduos planimétricos dos pontos de apoio, resultado esperado, uma vez que é oriundo da redução dos graus de liberdade. O valor alcançado no EQM dos resíduos planimétricos dos pontos de apoio atende à tolerância estabelecida neste estudo. Nos pontos de verificação é possível notar a significativa melhora na exatidão com a redução do EQM planimétrico resultante de 7,838 cm para 6,019 cm, ou seja, alcançou-se uma redução de aproximadamente 1,82 cm no valor do EQM resultante planimétrico das discrepâncias das coordenadas dos pontos de verificação. O valor do EQM das discrepâncias altimétricas dos pontos de verificação também apresentou uma evidente redução de 1,98 cm. Desta forma, pode-se concluir que, para o caso de mapeamento do corredor em uma única faixa, a utilização de pontos de apoio inseridos a cada cinco bases possibilitou alcançar melhor exatidão nos pontos de verificação, ou seja, a utilização da configuração de cinco bases proporcionou os menores valores de EQM resultante planimétrico e EQM altimétrico das coordenadas dos pontos de verificação.

Para verificar a presença de tendências no valores das discrepâncias tridimensionais dos pontos de verificação, analisa-se a Tabela 2, que mostra as médias das discrepâncias tridimensionais dos pontos de verificação e os valores calculados e tabelados para o indicador estatístico t de Student. Os gráficos de dispersão das discrepâncias das coordenadas planimétricas dos pontos de verificação em torno da discrepância planimétrica média juntamente com os gráficos das discrepâncias altimétricas para cada distribuição de pontos de apoio são apresentados na Figura 19.

Em um conjunto de dados livres de erros sistemáticos, espera-se que a média absoluta das discrepâncias tridimensionais seja igual a zero. Analisando a Tabela 2 pode-se perceber que o caso de mapeamento do corredor em uma faixa com pontos de apoio inseridos a cada quinze bases apresenta os maiores valores de discrepâncias médias em Y (2,0 cm) e Z (3,87 cm), enquanto o valor médio das discrepâncias em X é de aproximadamente 0,21 cm. Verificando os valores de t calculado e tabelado para o caso da configuração de 15 bases, percebe-se que as componentes planimétricas apresentam valores de t calculado menores que o valor de t tabelado, podendo então ser consideradas livres de tendências.

Para uma melhor compreensão desta análise de tendências planimétricas, observa-se também a Figura 19 (a), que mostra a dispersão das discrepâncias planimétricas em torno do valor médio. Conforme pode ser observado na Figura 19 (a), a maioria dos pontos que apresentam discrepâncias Y negativas encontram-se no

TABELA 2 – MÉDIA DAS DISCREPÂNCIAS DOS PONTOS DE VERIFICAÇÃO

<b>15 Bases</b>			
	<b>X (cm)</b>	<b>Y (cm)</b>	<b>Z (cm)</b>
Média	0,209	2,030	3,868
t calc.	0,1969	1,5643	3,6628
$t_{(33,10/2)}$	1,6924		
Tendencioso	Não	Não	Sim
<b>10 Bases</b>			
	<b>X</b>	<b>Y</b>	<b>Z</b>
Média	2,099	1,672	1,572
t calc.	1,9508	1,7377	1,0681
$t_{(26,10/2)}$	1,7056		
Tendencioso	Sim	Sim	Não
<b>5 Bases</b>			
	<b>X</b>	<b>Y</b>	<b>Z</b>
Média	-0,483	0,035	2,428
t calc.	-0,5817	0,0234	1,6361
$t_{(12,10/2)}$	1,7823		
Tendencioso	Não	Não	Não

FONTE: O Autor

intervalo entre 0 e -0,05 m, com exceção dos pontos VC16 e VC19 que apresentam valores de discrepâncias Y entre -0,05m e -0,11m. Em contrapartida, observando os pontos que apresentam discrepâncias Y positivas, percebe-se que estes pontos se apresentam mais dispersos e ocupando um intervalo de posições no gráfico entre 0,00 m e 0,20 m, sendo o caso do ponto VC34 o mais crítico apresentando discrepância Y de aproximadamente 26 cm, fatores que contribuem para o deslocamento do valor médio (ponto vermelho) em Y. Desta forma fica evidente a presença da tendência nos valores de discrepâncias das coordenadas Y dos pontos de verificação.

Continuando a análise da Tabela 2, para o caso de 15 bases, agora para o valor médio das discrepâncias altimétricas juntamente com o gráfico da Figura 19 (b), que mostra os valores das discrepâncias altimétricas obtidos no experimento com pontos de apoio inseridos a cada quinze bases, nota-se que a grande maioria dos valores de discrepâncias altimétricas são positivas. Dentre as discrepâncias positivas, treze valores de discrepâncias altimétricas estão acima do valor de 5 cm, enquanto os valores dos demais pontos se apresentam abaixo deste valor, evidenciando assim a tendência positiva nas discrepâncias das coordenadas altimétricas dos pontos de apoio. O valor calculado do indicador t, conforme apresentado na Tabela 2, é maior que o valor tabelado, desta forma pode-se concluir que o valor médio das discrepâncias altimétricas é significativamente diferente de zero, logo a presença da tendência altimétrica é comprovada. Os elevados valores de discrepâncias altimétricas são esperados, uma vez que o emprego de pontos de apoio a cada quinze bases ocasiona a ocorrência

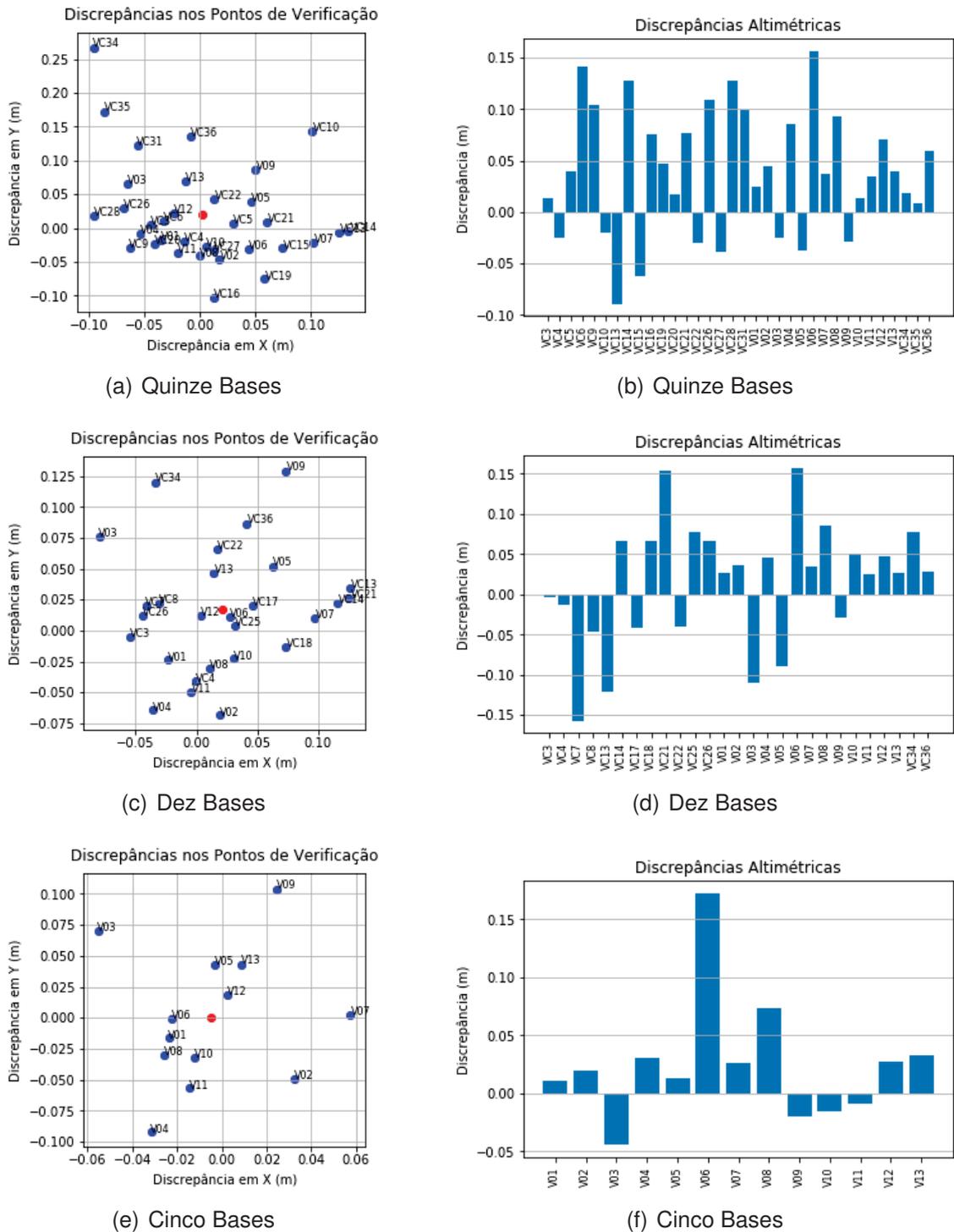
de extensas regiões sem pontos de apoio, fazendo com que erros sistemáticos não compensados sejam propagados nestas regiões.

Com a utilização da configuração de dez bases observa-se, conforme mostra a Tabela 2, que o valor médio das discrepâncias na coordenada X dos pontos de verificação sofre um incremento de aproximadamente 1,9 cm e um leve decremento de 0,36 cm na média das discrepâncias na coordenada Y, quando comparados ao caso anterior (15 bases). Os valores de t calculados para X e Y são maiores do que o valor tabelado. Desta forma, pode-se concluir que as discrepâncias planimétricas obtidas do experimento realizado com recobrimento do corredor em uma única faixa e pontos de apoio inseridos a cada dez bases são tendenciosas. O gráfico da Figura 19 (c) mostra a representação visual das discrepâncias planimétricas (azul) e do valor médio (vermelho) para o caso de dez bases. Analisando o gráfico da Figura 19 (c), pode-se perceber que os pontos VC13, VC21 e VC14 apresentam valores de discrepâncias em X de aproximadamente 13 cm, contribuindo significativamente para o deslocamento positivo do valor médio em X, da mesma forma que as discrepâncias planimétricas nas coordenadas Y dos pontos VC34, V09 e VC36, apresentando valores de aproximadamente 12,5 cm, contribuem para o deslocamento positivo do valor médio em Y, tornando evidente as tendências em X e Y no experimento com pontos de apoio inseridos a cada dez bases.

Prosseguindo a análise dos valores médios das discrepâncias das coordenadas dos pontos de verificação, obtidos no experimento com pontos de apoio inseridos a cada dez bases, analisa-se agora a média altimétrica. A inserção de pontos de apoio a cada dez bases ocasionou um significativo decremento no valor da média das discrepâncias altimétricas, cerca de 2,30 cm, em comparação com o experimento anterior. O teste de hipóteses realizado descartou a hipótese da existência de tendência altimétrica, uma vez que o valor de t calculado é menor que o valor de t tabelado, conforme apresenta a Tabela 2 (10 bases). Os dados apresentados no gráfico da Figura 19 (d) mostram os valores de discrepâncias altimétricas para o experimento de dez bases. Diferentemente do caso anterior (quinze bases, fig. 19 (b)), três valores de discrepâncias altimétricas negativas se apresentam com valor maior que 10 cm, o que contribui para o decremento observado na média das discrepâncias altimétricas que atingiu o valor de 1,57 cm no caso de dez bases. Desta forma, pode-se perceber que a utilização de pontos de apoio inseridos a cada dez bases eliminou a tendência altimétrica.

Analisa-se agora a Tabela 2 para o experimento com pontos de apoio inseridos a cada cinco bases. A utilização desta distribuição de pontos de apoio proporcionou significativas reduções nos valores de discrepância média planimétrica, cerca de 1,6 cm de decremento absoluto no valor da discrepância média X e 1,64 cm de redução

FIGURA 19 – EXPERIMENTOS EM UMA FAIXA



FONTE: O Autor

no valor médio das discrepâncias nas coordenadas Y dos pontos de verificação. Os valores de  $t$  calculados para X e Y são menores que o valor tabelado, conforme pode-se observar na Tabela 2, implicando que as discrepâncias planimétricas para o experimento realizado utilizando a configuração de cinco bases não são tendenciosas. O gráfico da Figura 19 (e) complementa as informações mostradas na Tabela 2 para o

experimento de cinco bases. Conforme pode ser observado no gráfico da Figura 19 (e), as discrepâncias planimétricas dos pontos de verificação encontram-se distribuídas em torno do valor médio de forma aproximadamente simétrica: A discrepância da coordenada Y do ponto V09 (aprox. 10 cm) compensa o valor da discrepância em Y do ponto V04 (aprox. -10 cm), assim como a discrepância na coordenada X do ponto V07 (aprox. 6 cm) compensa o valor da discrepância na coordenada X do ponto V03 (aprox. -6 cm), fazendo com que o valor médio das discrepâncias das coordenadas planimétricas se aproximem do valor zero, diminuindo consideravelmente o valor médio das discrepâncias planimétricas e eliminando a tendência estatística observada no caso anterior (Tabela 2, dez bases).

Partindo para a análise altimétrica do experimento com pontos de apoio inseridos a cada cinco bases, obtém-se um valor de discrepância média altimétrica de aproximadamente 2,43 cm, conforme mostra a Tabela 2 para o caso altimétrico de cinco bases. Isto representa um incremento de 0,86 cm no valor da média das discrepâncias altimétricas. O valor calculado para o indicador t é de aproximadamente 1,63 cm, sendo menor que o valor tabelado, implicando que as discrepâncias altimétricas obtidas do experimento com apoio distribuído a cada cinco bases são livres de tendências. Para entender o motivo deste comportamento, analisa-se o gráfico da Figura 19 (f), que mostra os valores das discrepâncias altimétricas nos pontos de verificação para o experimento realizado com pontos de apoio inseridos a cada cinco bases. Dos treze pontos de verificação representados na Figura 19 (f), onze apresentam discrepâncias altimétricas menores que 5 cm, enquanto o ponto V06 se destaca com o valor de discrepância altimétrica de aproximadamente 17 cm, contribuindo de forma significativa para o deslocamento do valor médio das discrepâncias altimétricas. Poderia-se excluir o ponto V06 do conjunto de pontos de verificação para diminuir o valor médio das discrepâncias altimétricas, contudo isto não foi feito, pois o ponto V06 apresenta valores de discrepâncias planimétricas de aproximadamente -2,0 cm em X e 0,0 cm em Y, e analisando as coordenadas deste ponto extraídas do ortomosaico, não se identificaram erros de digitação ou de observação deste ponto. Também foi verificada sua posição na Figura 13 e observou-se que o ponto V06 encontra-se bem localizado, próximo a quatro pontos de apoio. Assim sendo, aceita-se este ponto no conjunto de pontos de verificação.

A única configuração de apoio que não atendeu à precisão planimétrica esperada neste estudo foi a de quinze bases, que apresentou EQM das discrepâncias planimétricas de 9,839 cm, sendo a tolerância de aproximadamente 8,6 cm. Apesar de todas as demais configurações de apoio testadas neste experimento atenderem à precisão esperada, pode-se concluir que a melhor configuração de pontos de apoio para o mapeamento do corredor utilizando uma única faixa é aquela na qual pontos de apoio são inseridos a cada cinco bases, pois proporcionou os menores valores de EQM

das discrepâncias planimétricas e altimétricas, bem como a eliminação de tendências nas discrepâncias planimétricas.

#### 4.1.2 Recobrimento aéreo do corredor com duas faixas

A Tabela 3 mostra os valores de EQM das discrepâncias das coordenadas tridimensionais dos pontos de verificação e também o EQM dos resíduos das coordenadas tridimensionais dos pontos de apoio para cada um dos experimentos realizados com o recobrimento aéreo de duas faixas no software *Metashape*. As Figuras 20 (a), (c) e (e) mostram a dispersão das discrepâncias planimétricas nos pontos de verificação em torno do valor médio e as Figuras 20 (b), (d) e (f) mostram os valores das discrepâncias das coordenadas altimétricas dos pontos de verificação em relação ao ponto central igual a zero.

TABELA 3 – EXPERIMENTO EM DUAS FAIXAS

<b>15 Bases</b>				
<b>EQM dos Resíduos nos Pontos de Apoio</b>				
Quant. Pts. Apoio	X (cm)	Y (cm)	Z (cm)	Disc. Plan. (cm)
20	3,371	3,871	1,986	5,134
<b>EQM das Discrepâncias nos Pontos de Verificação</b>				
Quant. Pts. Verif.	X	Y	Z	Disc. Plan.
56	7,170	6,630	10,950	9,765
<b>10 Bases</b>				
<b>EQM dos Resíduos nos Pontos de Apoio</b>				
Quant. Pts. Apoio	X	Y	Z	Disc. Plan.
31	4,030	4,480	2,211	6,025
<b>EQM das Discrepâncias nos Pontos de Verificação</b>				
Quant. Pts. Verif.	X	Y	Z	Disc. Plan.
45	4,842	4,928	7,520	6,909
<b>5 Bases</b>				
<b>EQM dos Resíduos nos Pontos de Apoio</b>				
Quant. Pts. Apoio	X	Y	Z	Disc. Plan.
51	4,281	4,553	3,351	6,250
<b>EQM das Discrepâncias nos Pontos de Verificação</b>				
Quant. Pts. Verif.	X	Y	Z	Disc. Plan.
25	4,922	4,565	6,350	6,714

FONTE: O Autor

Analisando-se os resultados dos EQMs do experimento realizando com a configuração de pontos de apoio de 15 bases, mostrados na Tabela 3, verifica-se que o valor do EQM das discrepâncias planimétricas é de aproximadamente 9,765 cm. Este resultado é similar àquele obtido no experimento de recobrimento com uma

faixa, conforme mostra a Tabela 1, caso de quinze bases, que apresentou EQM das discrepâncias planimétricas com o valor de 9,839 cm. Este resultado revela que a adição de uma segunda faixa ao recobrimento não resultou em ganho significativo de exatidão planimétrica nos pontos de verificação, podendo inferir que estes resultados são equivalentes.

Prosseguindo com a análise do caso de quinze bases, observa-se que o EQM das discrepâncias altimétricas nos pontos de verificação apresenta o valor de 10,95 cm, isto representa um incremento de aproximadamente 3,75 cm no EQM das discrepâncias altimétricas em relação ao experimento de recobrimento com uma única faixa. Nesta configuração testada, não era esperado esse decréscimo de exatidão altimétrica, pois com duas faixas ocorre uma geometria mais favorável (número de medidas) nas conexões entre fotos. Entretanto, com o aumento de área recoberta, aumentaram também as regiões com deficiência de pontos de apoio, fazendo com que as discrepâncias altimétricas dos pontos de verificação inseridos nestas regiões contribuam para o incremento do valor do EQM das discrepâncias altimétricas.

Para o caso de pontos de apoio distribuídos a cada dez bases, observa-se também uma equivalência entre os valores de EQM planimétrico e altimétrico obtidos no experimento de recobrimento do corredor com uma e duas faixas. No caso de uma única faixa, com a configuração de pontos de apoio de 10 bases (Tabela 2), o valor do EQM é 7,838 cm, enquanto no caso de recobrimento com duas faixas e mesma configuração de pontos de apoio, o valor é de 7,520 cm. O valor do EQM altimétrico para a configuração de pontos de apoio com 10 bases em uma única faixa foi de 7,668 cm e no caso de mesma configuração de pontos de apoio com recobrimento de duas faixas foi de 6,909 cm (Tab. 3, dez bases). Com estes resultados de EQMs, planimétrico e altimétrico, obtidos com a configuração de 10 bases para os pontos de apoio com faixa única e duas faixas, pode-se concluir que as exatidões planimétrica e altimétrica, obtidas nos dois experimentos são equivalentes.

A equivalência entre os valores de EQM planimétricos e altimétricos em experimentos com recobrimentos com uma e duas faixas é também observada nos experimentos realizados com a configuração de pontos de apoio de cinco bases. O valor do EQM planimétrico para o caso de uma única faixa foi de 6,019 cm (Tab. 1) e no caso de duas faixas, o valor obtido foi de 6,714 cm (Tab. 3). Sendo a diferença entre estes dois valores menor do que 1 cm, pode-se considerá-los como equivalentes. Com relação à altimetria, os valores de EQM das discrepâncias altimétricas apresentados nas Tabelas 1 e 3, caso de cinco bases, também são equivalentes, apresentando diferença menor que 1 cm.

Analisando também os valores dos EQMs dos resíduos planimétricos e altimétricos apresentados nas Tabelas 1 e 3, para todos os casos, percebe-se que também

há uma equivalência entre estes valores. Desta forma, é possível concluir que a adição de uma segunda faixa ao recobrimento proporciona precisões e exatidões equivalentes ao recobrimento com uma única faixa.

Na Tabela 4 apresentam-se os valores de médias das discrepâncias planimétricas e altimétricas nos pontos de verificação. São apresentados também os valores do indicador estatístico t de Student obtidos para o teste de hipóteses ao nível de significância de 0,10 para a análise de tendências. Realiza-se a análise destes valores em conjunto com os gráficos da Figura 20, que mostra a dispersão das discrepâncias planimétricas em torno do valor médio e também as discrepâncias altimétricas em torno do central igual a zero.

TABELA 4 – MÉDIA DAS DISCREPÂNCIAS DOS PONTOS DE VERIFICAÇÃO

<b>15 Bases</b>			
	<b>X (cm)</b>	<b>Y (cm)</b>	<b>Z (cm)</b>
Média	1,647	1,716	4,022
t calc.	1,7515	1,9883	2,9283
$t_{(55,10/2)}$	1,6370		
Tendencioso	Sim	Sim	Sim
<b>10 Bases</b>			
	<b>X</b>	<b>Y</b>	<b>Z</b>
Média	-0,898	0,5727	-0,463
t calc.	-1,25	0,77	-0,4095
$t_{(44,10/2)}$	1,6794		
Tendencioso	Não	Não	Não
<b>5 Bases</b>			
	<b>X</b>	<b>Y</b>	<b>Z</b>
Média	1,7654	0,4168	-0,7061
t calc	1,8826	0,4492	-0,5481
$t_{(24,10/2)}$	1,7109		
Tendencioso	Sim	Não	Não

FONTE: O Autor

Observando os valores de médias das discrepâncias planimétricas nos pontos de verificação mostrados nas Tabelas 4 e 2, dos experimentos realizados com a configuração de 15 bases, faixa única e duas faixas, nota-se que existe uma diferença significativa entre as médias na componente X. No experimento com duas faixas o valor médio neste eixo é maior, como pode-se ver no valor da média igual a 1,647 cm (Tab. 4), enquanto que no caso de uma única faixa, o valor da média é igual a 0,209 cm (Tab. 2). Neste experimento, a componente X apresentou tendência, sendo o valor de t calculado maior que o valor tabelado, conforme apresenta a Tabela 4, caso de 15 bases. O gráfico da Figura 20 (a) mostra a dispersão das discrepâncias planimétricas e pode-se

observar que os valores positivos de discrepâncias em X encontram-se mais dispersos em comparação com os pontos que apresentam discrepâncias negativas em X, fazendo com que o valor médio sofra um deslocamento positivo em X. Na componente Y o valor médio das discrepâncias planimétricas, obtido para o experimento de recobrimento com duas faixas e configuração de quinze bases, é de 1,716 cm (Tab. 4), isto representa um decréscimo de aproximadamente 0,3 cm no valor médio da componente Y da média das discrepâncias planimétricas em relação ao experimento de recobrimento com uma única faixa e mesma configuração de apoio (Tab. 2), além disto, pode-se observar na Tabela 4 que a componente Y continua sendo tendenciosa, mesmo com a adição da segunda faixa, no caso da configuração de apoio de 15 bases. Desta forma, pode-se considerar que a adição da segunda faixa não resultou em mudança significativa na componente Y do valor médio das discrepâncias planimétricas. No caso das discrepâncias altimétricas, os valores das médias (Tabelas 4 e 2), obtidos nos experimentos com a configuração de apoio de 15 bases, faixa única e duas faixas, podem ser considerados como sendo equivalentes, pois a diferença entre eles é de aproximadamente 0,15 cm.

Considerando agora os valores médios das discrepâncias planimétricas dos pontos de verificação, obtidos no experimento de recobrimento com duas faixas e configuração de pontos de apoio de dez bases, observa-se que as componentes X e Y se aproximam do valor zero, apresentando os valores de -0,898 cm em X e 0,572 cm em Y, conforme mostra a Tabela 4. Em uma comparação com o valor médio das discrepâncias planimétricas apresentados na Tabela 2, para a configuração de dez bases em uma única faixa, verifica-se que a adição da segunda faixa ocasionou a redução do valor médio nas componentes X e Y da média das discrepâncias planimétricas e a eliminação das tendências nestas componentes, uma vez que os valores de t calculado, apresentados na Tabela 2, encontram-se fora da região crítica para rejeição da hipótese nula. Este comportamento é explicado pelo gráfico da Figura 20 (c) que mostra a dispersão das discrepâncias planimétricas dos pontos de verificação em torno do valor médio para o experimento de recobrimento com duas faixas e configuração de apoio de dez bases. É possível notar que a maioria dos pontos encontra-se ao lado esquerdo do eixo de valor zero, contribuindo assim para o valor negativo da componente X da média das discrepâncias planimétricas evidenciada na Tabela 4, contudo o teste de hipóteses realizado mostrou que este valor médio não é significativamente diferente de zero.

A média das discrepâncias altimétricas para o experimento de recobrimento com duas faixas e configuração de dez bases apresenta o valor de -0,463 cm (Tab. 4). Comparando com o valor apresentado na Tabela 2, distribuição de dez bases, nota-se que a inserção da segunda faixa reduziu de forma significativa o valor médio das discrepâncias altimétricas, contudo o tornou negativo. O valor médio das discrepâncias altimétricas não foi considerado significativamente diferente de zero, uma vez que o

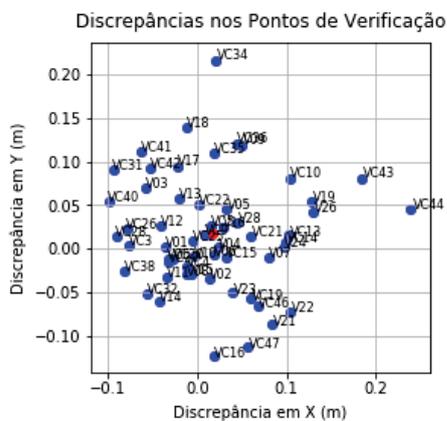
valor de  $t$  calculado, apresentado na Tabela 4, não se encontra na região crítica para rejeição da hipótese nula, logo as discrepâncias altimétricas, obtidas do experimento de recobrimento de duas faixas e configuração de apoio de dez bases, estão livres de tendência. Observando os valores de discrepâncias altimétricas mostrados no gráfico da Figura 20 (d), nota-se que os valores de discrepâncias altimétricas apresentam, em sua maioria, valores negativos, o que contribui para o valor médio negativo observado na Tabela 4.

Observando agora os valores médios obtidos no experimento de recobrimento com duas faixas e configuração de pontos de apoio a cada cinco bases, mostrados na Tabela 4, percebe-se que o valor médio da componente X é de 1,7654 cm e da componente Y é de 0,4168 cm. Estes valores representam um acréscimo no valor médio das discrepâncias planimétricas em relação ao experimento de recobrimento com uma única faixa utilizando a mesma configuração de pontos de apoio (Tab. 2), revelando que a adição da segunda faixa afastou a média das discrepâncias planimétricas do valor zero. O teste de hipóteses realizado revelou que a componente X das discrepâncias dos pontos de verificação apresenta-se tendenciosa. Analisando o gráfico da Figura 20 (e) é possível compreender que o afastamento do valor médio (ponto vermelho) em relação ao valor zero no eixo X ocorre devido a distribuição dos pontos azuis (disc. planimétricas) ocuparem um maior intervalo (0 a 15 cm) ao lado direito (positivo) do gráfico.

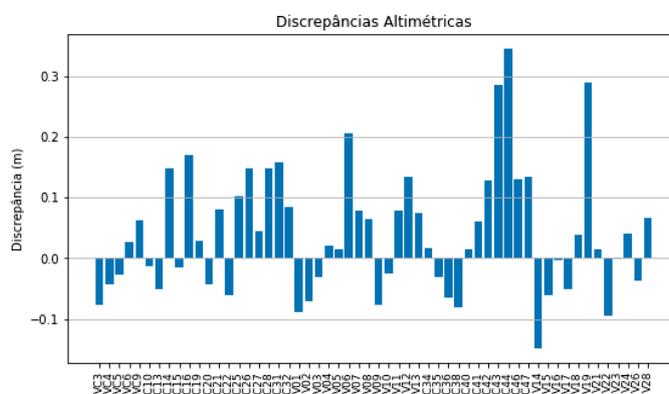
Analisando agora o valor médio das discrepâncias altimétricas, obtido no experimento de recobrimento com duas faixas e configuração de pontos de apoio a cada cinco bases, apresentado na Tabela 4, observa-se que a média das discrepâncias altimétricas apresenta o valor de -0,706 cm. Este valor, se comparado com o que foi obtido com o experimento realizado com uma única faixa e mesma configuração de pontos de apoio (Tab. 2), é aproximadamente 1,72 cm menor. Além disso, houve uma mudança de sinal no valor da média, contudo, conforme pode-se observar na Tabela 4, rejeita-se a hipótese de tendência nas discrepâncias altimétricas, uma vez que o valor de  $t$  calculado não se encontra na região crítica. Observando o gráfico das discrepâncias altimétricas obtido do experimento de recobrimento com duas faixas e pontos de apoio inseridos a cada cinco bases, conforme mostra a Figura 20 (f), é possível notar que as discrepâncias altimétricas, em sua maioria, apresentam valores negativos, contudo, no cálculo da média estes valores negativos são compensados pelos valores positivos evidenciados principalmente nos pontos V06, V19 e V28 que contribuem significativamente para a compensação das discrepâncias negativas, resultando em um menor valor médio nas discrepâncias altimétricas.

Esperava-se que a inserção da segunda faixa proporcionasse melhoras na exatidão do processamento do bloco de imagens, isto é, redução dos valores de EQMs

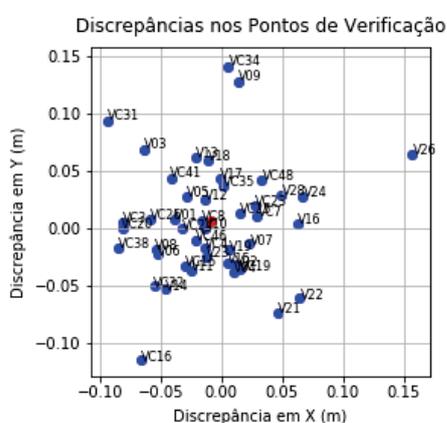
FIGURA 20 – EXPERIMENTOS EM DUAS FAIXAS



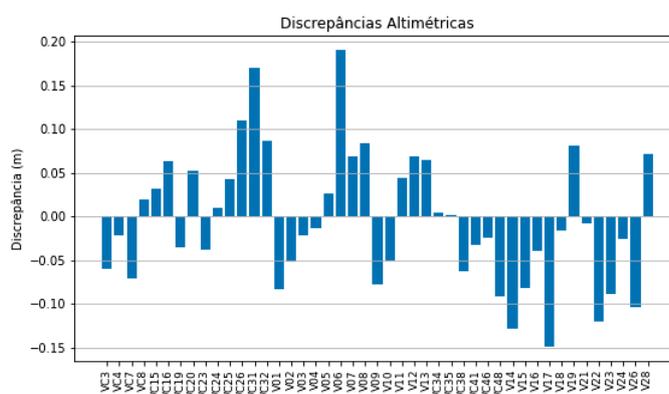
(a) Quinze Bases



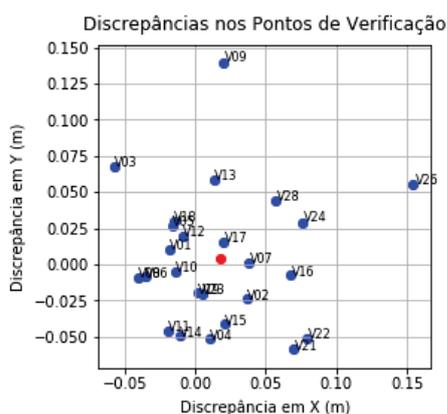
(b) Quinze Bases



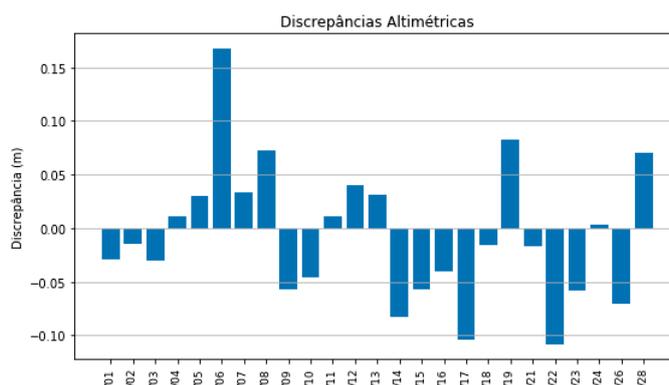
(c) Dez Bases



(d) Dez Bases



(e) Cinco Bases



(f) Cinco Bases

FONTE: O Autor

altimétricos e planimétricos dos pontos de verificação, contudo, a com a proximidade entre os valores de EQM das discrepâncias altimétricas e planimétricas dos casos de uma e duas faixas pode-se concluir que, no caso do corredor estudado, a adição de uma segunda faixa não necessariamente implica em melhora significativa da exatidão alcançada no processamento do bloco. Porém, neste conjunto de experimentos, pode-se

verificar que a adição da segunda faixa ocasionou a redução dos valores médios das discrepâncias altimétricas, tanto com a configuração de pontos de apoio de dez e cinco bases e também a eliminação das tendências observadas nos experimentos de configurações de apoio realizados no caso de recobrimento do corredor com uma única faixa.

#### 4.1.3 Recobrimento do corredor em três faixas

Os valores de EQM dos resíduos dos pontos de apoio e discrepâncias dos pontos de verificação para o experimento de recobrimento do corredor em três faixas são apresentados na Tabela 5. Os valores médios das discrepâncias planimétricas e altimétricas e valores do indicador estatístico t de Student, obtidos com a utilização de cada configuração de apoio, são apresentados na Tabela 6 e os gráficos da Figura 21 complementam estas informações mostrando a dispersão das discrepâncias planimétricas (Fig 21 a, c, e) e os valores de discrepâncias altimétricas (Fig 21 b, d, f) para cada uma das distribuições de pontos de apoio.

TABELA 5 – EXPERIMENTO EM TRÊS FAIXAS

<b>15 Bases</b>				
<b>EQM dos Resíduos nos Pontos de Apoio</b>				
Quant. Pts. Apoio	X (cm)	Y (cm)	Z (cm)	Disc. Plan. (cm)
20	3,670	4,413	1,989	5,524
<b>EQM das discrepâncias dos Pontos de Verificação</b>				
Quant. Pts. Verif.	X	Y	Z	Disc. Plan.
56	6,465	6,271	10,075	9,00
<b>10 Bases</b>				
<b>EQM dos Resíduos nos Pontos de Apoio</b>				
Quant. Pts. Apoio	X	Y	Z	Disc. Plan.
31	4,090	4,523	2,241	6,098
<b>EQM das discrepâncias dos Pontos de Verificação</b>				
Quant. Pts. Verif.	X	Y	Z	Disc. Plan.
45	4,823	4,867	7,480	6,851
<b>5 Bases</b>				
<b>EQM dos Resíduos nos Pontos de Apoio</b>				
Quant. Pts. Apoio	X	Y	Z	Disc. Plan.
51	4,242	4,783	3,760	6,393
<b>EQM das discrepâncias dos Pontos de Verificação</b>				
Quant. Pts. Verif.	X	Y	Z	Disc. Plan.
25	4,571	4,486	6,370	6,404

FONTE: O Autor

Conforme mostra a Tabela 5, no experimento de recobrimento do corredor com

três faixas e pontos de apoio distribuídos a cada quinze bases, o valor do EQM das discrepâncias planimétricas dos pontos de verificação é de 9 cm. Comparando este valor com aquele obtido no experimento de recobrimento com duas faixas e mesma configuração de apoio, conforme mostrado na Tabela 3, nota-se que a diferença entre os valores de EQM é de aproximadamente 0,76 cm. Assim sendo, pode-se considerar os valores de EQM obtidos nos experimentos de recobrimento com duas e três faixas e configuração de apoio de quinze bases, sendo equivalentes, e com esses resultados obtidos pode se concluir que a adição da terceira faixa não possibilitou maior exatidão planimétrica no ajustamento do bloco de imagens.

Prosseguindo a análise dos valores de EQM obtidos do experimento de recobrimento com três faixas e pontos de apoio inseridos a cada quinze bases, observa-se que o valor do EQM das discrepâncias altimétricas dos pontos de verificação é de 10,075 cm. Em comparação com o valor de EQM das discrepâncias altimétricas obtidas no experimento de recobrimento com duas faixas (Tab. 3, quinze bases), percebe-se que a adição da terceira faixa reduziu o valor do EQM das discrepâncias altimétricas em aproximadamente 0,87 cm e, desta forma, pode-se concluir que a adição da terceira faixa não ocasionou melhoria significativa na exatidão do ajustamento realizado pelo *Metashape*.

No experimento de pontos de apoio distribuídos a cada dez bases, recobrimento de três faixas, conforme mostra a Tabela 5, observa-se que o valor do EQM das discrepâncias planimétricas é de 6,851 cm. De forma similar, o experimento realizado com recobrimento de duas faixas e mesma configuração de pontos de apoio obteve valor de EQM das discrepâncias planimétricas de 6,9 cm (Tab. 3, dez bases), por isto, estes valores podem ser considerados equivalentes. No caso altimétrico, o mesmo comportamento é observado, uma vez que no experimento de recobrimento com três faixas obteve-se o valor de 7,48 cm para o EQM das discrepâncias altimétricas, conforme mostra a Tabela 5, caso de dez bases e, no caso do recobrimento com duas faixas e mesma distribuição de pontos de apoio, o valor do EQM das discrepâncias altimétricas dos pontos de verificação foi de 7,52 cm (Tab. 3, dez bases). Sendo explícita a equivalência entre as exatidões alcançadas nos experimentos de recobrimento com duas e três faixas, conclui-se que a adição da terceira faixa não proporciona melhora significativa às exatidões planimétrica e altimétrica alcançadas no ajustamento realizado pelo *Metashape* utilizando a configuração de apoio de dez bases.

Verificam-se agora os valores de EQM das discrepâncias altimétricas e planimétricas obtidos do experimento de recobrimento com três faixas e pontos de apoio inseridos a cada cinco bases, valores apresentados na Tabela 5, na seção de 5 bases. Observa-se que o valor do EQM das discrepâncias das coordenadas planimétricas dos pontos de verificação é de 6,393 cm. O valor obtido do experimento com mesma confi-

guração de apoio e recobrimento de duas faixas foi de 6,714 cm (Tab. 3, cinco bases). Verificando o valor de EQM das discrepâncias das coordenadas altimétricas dos pontos de verificação, apresentado na Tabela 5, percebe-se que, no caso de recobrimento com três faixas, o valor do EQM altimétrico é 6,37 cm, enquanto no experimento de recobrimento de duas faixas, o valor do EQM das discrepâncias altimétricas foi de 6,35 cm. Desta forma, pode-se concluir que os valores de EQM das discrepâncias das coordenadas planimétricas e altimétricas nos casos de recobrimento com duas e três faixas e configuração de pontos de apoio a cada cinco bases, como sendo equivalentes.

TABELA 6 – MÉDIA DAS DISCREPÂNCIAS DOS PONTOS DE VERIFICAÇÃO

<b>15 Bases</b>			
	<b>X (cm)</b>	<b>Y (cm)</b>	<b>Z (cm)</b>
Média	1,314	1,727	4,015
t calc.	1,5403	2,1252	3,2231
$t_{(55,10/2)}$	1,6730		
Tendencioso	Não	Sim	Sim
<b>10 Bases</b>			
	<b>X</b>	<b>Y</b>	<b>Z</b>
Média	-0,866	0,593	-0,373
t calc.	-1,1974	0,8152	-0,3326
$t_{(44,10/2)}$	1,6794		
Tendencioso	Não	Não	Não
<b>5 Bases</b>			
	<b>X</b>	<b>Y</b>	<b>Z</b>
Média	1,665	0,052	-0,771
t calc.	1,9174	0,5775	0,5980
$t_{(24,10/2)}$	1,7109		
Tendencioso	Sim	Não	Não

FONTE: O Autor

A Tabela 6 apresenta os valores das médias das discrepâncias planimétricas e altimétricas, bem como o valor do indicador estatístico t calculado e tabelado para cada configuração de pontos de apoio utilizada no experimento de recobrimento do corredor em três faixas.

Percebe-se que os valores médios das discrepâncias planimétricas dos pontos de verificação, obtidos no experimento de recobrimento de três faixas e configuração de apoio de quinze bases, apresentam valores de 1,314 cm em X e 1,727 cm em Y. Estes valores são muito próximos àqueles apresentados na Tabela 4, que mostra os valores médios das discrepâncias planimétricas dos pontos de verificação obtidos do experimento de recobrimento com duas faixas e configuração de apoio de quinze bases, 1,647 cm em X e 1,716 cm em Y. A componente Y das discrepâncias planimétricas

apresenta-se tendenciosa, conforme pode-se observar na Tabela 6. O gráfico da Figura 21 (a) apresenta a dispersão das discrepâncias planimétricas em torno do valor médio obtido do experimento de recobrimento com três faixas e configuração de apoio de quinze bases. Observa-se na Figura 21 (a) que os pontos que ocupam o lado positivo do eixo X estão dispersos em um intervalo de (0 a 20 cm) e por isso acabam contribuindo significativamente para o deslocamento positivo da média na componente X. No eixo Y um comportamento equivalente é observado. Sendo pequena a diferença entre valores médios observados nos experimentos de recobrimento de duas e três faixas, configuração de apoio de quinze bases, pode-se concluir que não foi possível eliminar completamente a presença de tendência nas discrepâncias planimétricas com a adição da terceira faixa, ou seja, os valores médios planimétricos são equivalentes, contudo houve eliminação da tendência apenas na componente X das discrepâncias planimétricas.

O valor médio das discrepâncias altimétricas observado na Tabela 6, obtido do experimento de recobrimento com três faixas e configuração de apoio de quinze bases é de 4,015 cm. Este valor também é equivalente ao valor médio das discrepâncias altimétricas obtido do experimento de recobrimento de duas faixas e mesma configuração de apoio, que foi 4,022 cm (Tab. 4, 15 bases). Através do teste de hipóteses realizado ao nível de significância de 10%, observou-se que as discrepâncias altimétricas obtidas deste experimento são tendenciosas, os valores da estatística t são apresentados na Tabela 6. Na Figura 21 (b) é possível notar que a grande maioria das discrepâncias altimétricas apresentam valores positivos e, desta forma, contribuem para o deslocamento positivo do valor médio das discrepâncias altimétricas. Isto posto, é possível considerar que os experimentos com recobrimento de duas e três faixas, no caso de pontos de apoio inseridos a cada quinze bases, apresentam valores equivalentes de média das discrepâncias altimétricas.

Verificando-se agora os valores médios das componentes planimétricas das discrepâncias dos pontos de verificação do experimento de recobrimento em três faixas e configuração de apoio de dez bases, conforme apresenta a Tabela 6, observa-se que o valor médio das discrepâncias na componente X é de -0,866 cm e, em Y, o valor é de 0,593 cm. Através do teste de hipóteses realizado, pode-se observar que as componentes planimétricas obtidas do experimento com a configuração de apoio de dez bases estão livres de tendência. Este comportamento do valor médio é elucidado observando o gráfico da Figura 21 (c), que mostra a dispersão das discrepâncias planimétricas em torno do valor médio, para o experimento de recobrimento com três faixas e configuração de apoio de dez bases. É possível notar que o valor médio negativo na componente X é causado pela quantidade de pontos dispostos no lado negativo do eixo X que acabam contribuindo para o deslocamento negativo da componente X das discrepâncias planimétricas. A distribuição das discrepâncias em torno do eixo Y é

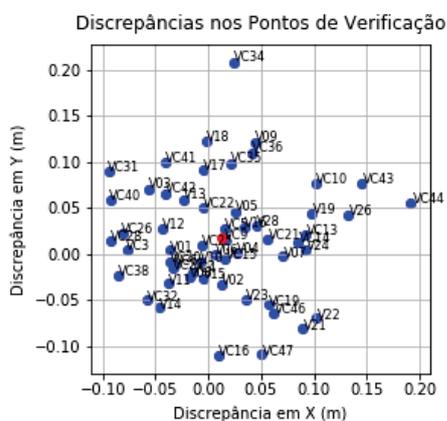
próxima à simétrica, contudo, pontos no intervalo entre (10 a 25 cm) contribuem para o leve deslocamento positivo da componente Y da média das discrepâncias planimétricas. Comparados aos valores de média das discrepâncias planimétricas mostrados na Tabela 4, caso de dez bases, nota-se que a diferença entre os valores médios obtidos dos experimentos de recobrimento com duas e três faixas e configuração de apoio de dez bases, é submilimétrica. Pode-se concluir desta forma que os valores médios entre estes dois experimentos também são equivalentes.

A média das discrepâncias altimétricas, obtidas no experimento de recobrimento com três faixas e configuração de apoio de dez bases, apresenta valor de -0,373 cm. Conforme mostra a Tabela 6, através do teste de hipóteses realizado ao nível de significância de 10%, percebe-se que as discrepâncias altimétricas são livres de tendência neste caso. O gráfico da Figura 21 (d) complementa esta informação mostrando os valores das discrepâncias altimétricas. Percebe-se que a utilização da configuração de dez bases modificou o comportamento observado no gráfico da Figura 21 (b), uma vez que as discrepâncias altimétricas, em sua maioria, apresentam valores negativos no experimento de configuração de dez bases. Contudo, em uma comparação com os valores médios das discrepâncias altimétricas obtidos do experimento de recobrimento com duas faixas e mesma configuração de apoio, já apresentados na Tabela 4, a equivalência entre os experimentos é evidente, uma vez que as diferenças entre os valores médios são milimétricas.

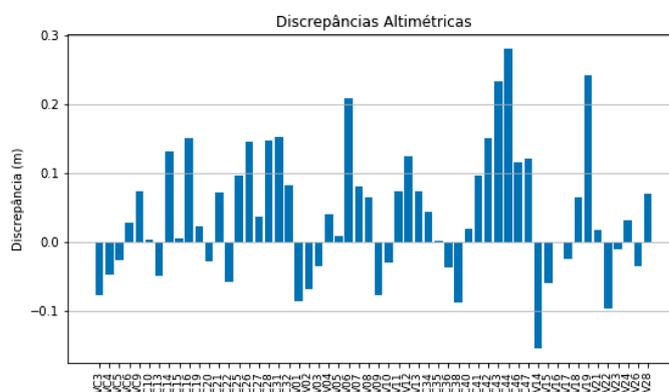
Verificam-se agora os valores médios obtidos do experimento de recobrimento com três faixas e configuração de apoio de cinco bases, apresentados na Tabela 6, seção de 5 Bases. A componente X da média das discrepâncias planimétricas apresenta o valor de 1,665 cm e a componente Y apresenta o valor de 0,052 cm. Neste caso de configuração de apoio, apenas a componente X apresentou-se tendenciosa. O gráfico apresentado na Figura 21 (e) revela que o ponto V25 contribuiu significativamente para a tendência evidenciada na componente X. Os valores de média das discrepâncias planimétricas obtidos nos experimentos de recobrimento com três faixas, se comparados com aqueles obtidos do experimento com recobrimento de duas faixas e mesma configuração de apoio (Tab. 4, cinco bases), podem ser considerados equivalentes, pois apresentam diferenças milimétricas entre si.

A média das discrepâncias altimétricas observada na Tabela 6, configuração de apoio de cinco bases, apresenta o valor de -0,771 cm. Este valor representa um decréscimo de aproximadamente 0,7 mm no valor médio das discrepâncias altimétricas em relação ao valor médio obtido do experimento de recobrimento com duas faixas e mesma configuração de apoio (Tab. 6, 5 bases) que foi de -0,706 cm. Assim sendo, pode-se considerar que estes valores médios são equivalentes e isto implica que não houve modificação significativa nos valores médios das discrepâncias altimétricas com

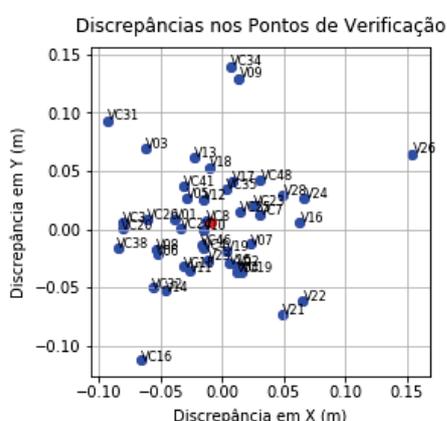
FIGURA 21 – EXPERIMENTOS EM TRÊS FAIXAS



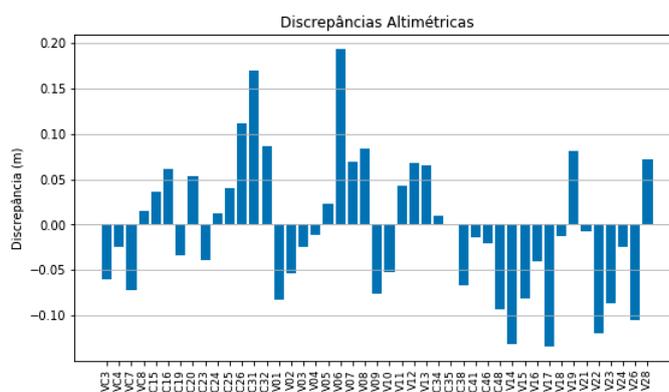
(a) Quinze Bases



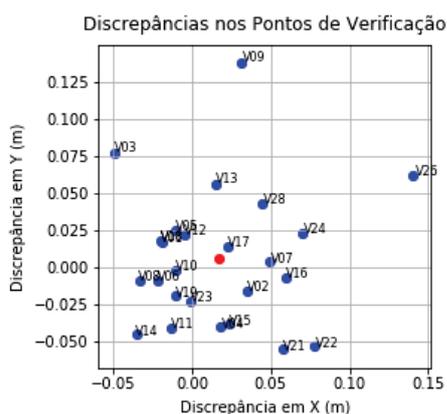
(b) Quinze Bases



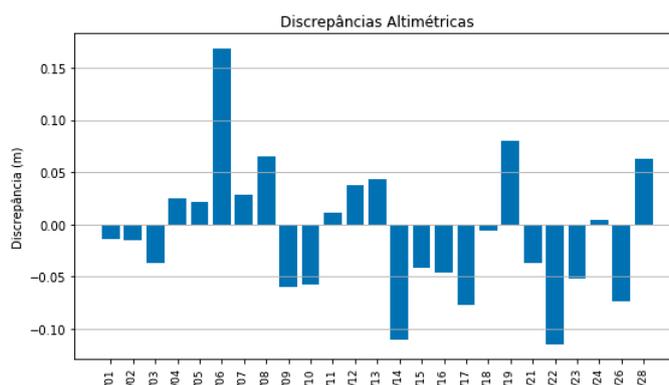
(c) Dez Bases



(d) Quinze Bases



(e) Cinco Bases



(f) Cinco Bases

FONTE: O Autor

a adição da terceira faixa. No gráfico da Figura 21 (f) é possível notar que a maioria dos valores de discrepâncias altimétricas apresentam valores negativos, contudo, os pontos V06, V08, V19 e V28 compensam o cálculo da média, aproximando o valor médio das discrepâncias altimétricas de zero.

Os resultados obtidos do experimento de recobrimento do corredor com três faixas evidenciou que a adição da terceira faixa não ocasiona a redução dos valores de EQM das discrepâncias planimétricas e altimétricas dos pontos de verificação, isto é, a adição da terceira faixa não proporcionou ganhos significativos na exatidão alcançada no ajustamento realizado pelo *Metashape*.

Em todos os casos de recobrimento fotogramétrico foram testadas as mesmas configurações de pontos de apoio (quinze, dez e cinco bases), os valores de EQM das discrepâncias dos pontos de verificação foram equivalentes, mostrando que a configuração de pontos de apoio adotada é mais crítica para a exatidão alcançada pelo ajustamento em comparação à quantidade de faixas utilizadas no mapeamento do corredor em estudo.

Em todos os casos testados a tolerância altimétrica de 15 cm estabelecida para este estudo foi alcançada nos valores de EQM das discrepâncias altimétricas dos pontos de verificação. Porém, a tolerância planimétrica de 8,6 cm não foi alcançada em nenhum dos experimentos realizados com a configuração de apoio de quinze bases.

Como os valores de EQM das discrepâncias planimétricas de todos os casos de recobrimento podem ser considerados equivalentes, adota-se como melhor caso aquele que apresentou os menores valores de EQM das discrepâncias dos pontos de verificação que se mostrou isento de tendências, isto é, adota-se o caso de recobrimento do corredor com uma faixa e pontos de apoio inseridos a cada cinco bases para a realização do estudo comparativo utilizando o software Erdas LPS.

#### 4.1.4 Estudo da utilização de um ponto de apoio

Conforme já mencionado anteriormente, um dos objetivos desse estudo de mestrado é procurar elucidar como o sistema *Metashape* reajusta uma nuvem de pontos com a adição de pontos de apoio no conjunto. Sabendo-se que somente um ponto de apoio não permite determinar os parâmetros de uma transformação de similaridade R3 com um ajustamento por mínimos quadrados, foi realizado um experimento com o objetivo de verificar se somente uma translação R3 é aplicada na nuvem de pontos obtida com o procedimento SfM.

Foram analisadas as coordenadas de três pontos de apoio, apresentados na Figura 18 (b). As suas coordenadas foram obtidas, no referencial geodésico, nas nuvens de pontos, resultantes dos processamentos SfM sem pontos de apoio e da nuvem com um único ponto de apoio. Desta forma, um vetor de translação foi calculado entre estas duas nuvens. As Equações 4.1, 4.2 e 4.3 mostram como foi calculado o vetor de

translação em cada ponto.

$$Tx = X_{1PA} - X_{sfm} \quad (4.1)$$

$$Ty = Y_{1PA} - Y_{sfm} \quad (4.2)$$

$$Tz = Z_{1PA} - Z_{sfm} \quad (4.3)$$

Sendo a notação  $1PA$  coordenadas da nuvem de pontos obtida com um ponto de apoio e  $sfm$  coordenadas da nuvem de pontos, gerada sem pontos de apoio.

A Tabela 7 mostra os resultados obtidos para cada um dos três pontos observados, sendo o Ponto 1 aquele que foi empregado para a obtenção da nuvem de pontos com somente um ponto de apoio.

TABELA 7 – VALORES DE TRANSLAÇÃO

Translação	Tx (m)	Ty (m)	Tz (m)
<b>Ponto 1</b>	0,059188933	-2,31708915	16,61790937
<b>Ponto 2</b>	-0,341492339	-1,92266547	15,38854722
<b>Ponto 3</b>	-0,415953743	-1,36686764	14,33171838

FONTE: O autor

Conforme observado na Tabela 7, os três pontos observados apresentam valores diferentes para as componentes do vetor de translação. Desta forma é possível concluir que o "Metashape" não aplicou somente uma translação na nuvem SfM, pois se assim fosse, as translações (Tx, Ty e Tz) nos outros dois pontos (2 e 3) seriam iguais às existentes no Ponto 1.

Outra hipótese seria de que o *Metashape* realiza um novo reajustamento, por exemplo, Bundle Adjustment com injeção de posição no único ponto, redefinindo as posições dos pontos de ligação bem como os parâmetros de orientação exterior e interior tomando como complemento as coordenadas dos centros perspectivos próximos ao ponto de apoio. Desta forma, foram verificados se os parâmetros de orientação exterior de algumas imagens, próximas ao Ponto 1, variavam entre os dois processamentos (sem pontos de apoio e somente um ponto de apoio). Os resultados são mostrados nas Tabelas 8 e 9.

TABELA 8 – VALORES DE POE PARA FAIXA SEM PONTOS DE APOIO

<b>Faixa sem Pontos de Apoio</b>						
<b>Fotografia</b>	$X_c$ (m)	$Y_c$ (m)	$Z_c$ (m)	$\omega$	$\phi$	$\kappa$
DJI_1098.JPG	677540,841	7184048,792	975,583	-0,405°	0,379°	163,092°
DJI_1099.JPG	677535,190	7184035,386	975,114	-0,432°	0,380°	162,836°
DJI_1100.JPG	677529,394	7184021,917	974,926	-0,360°	0,371°	162,822°

FONTE: O autor

TABELA 9 – VALORES DE POE PARA FAIXA COM UM PONTO DE APOIO

<b>Faixa com um Ponto de Apoio</b>						
<b>Fotografia</b>	$X_c$ (m)	$Y_c$ (m)	$Z_c$ (m)	$\omega$	$\phi$	$\kappa$
DJI_1098.JPG	677541,267	7184047,927	978,725	-0,924°	0,684°	163,213°
DJI_1099.JPG	677535,656	7184034,501	978,475	-0,971°	0,699°	162,956°
DJI_1100.JPG	677529,889	7184021,041	978,485	-0,921°	0,697°	162,946°

FONTE: O autor

Verifica-se que houveram variações nos parâmetros de orientação exterior das imagens, confirmando a evidência da aplicação de um provável Bundle Adjustment quando um ponto de apoio foi adicionado ao conjunto. Contudo, não se pode apresentar os detalhes do procedimento utilizado. Trabalhos futuros serão realizados para melhor elucidar o procedimento utilizado.

## 4.2 EXPERIMENTOS REALIZADOS UTILIZANDO O LPS

Apresentam-se nesta seção os resultados do estudo comparativo dos resultados obtidos com processamento de uma faixa única nos programas *Metashape* e LPS. O conjunto de fotografias, observações fotogramétricas, parâmetros de orientação exterior e interior, distribuições de pontos de apoio e verificação do melhor caso, definido na experimentação realizada no *Metashape*, foram utilizados para realizar os experimentos fotogramétricos no programama computacional Erdas LPS.

Estes resultados são mostrados e discutidos em duas partes, isto é, nas duas próximas subseções, uma para cada experimento realizado e, por fim, são feitas discussões sobre as diferenças observadas entre as estimativas realizadas pelo *Metashape* e pelo LPS.

### 4.2.1 Experimento 1

Neste experimento os valores de POE, estimados pelo *Metashape*, foram utilizados como valores iniciais, sendo atribuídos os valores da precisão nominal dos sensores embarcados no Phantom 4 Pro para o desvio padrão dos POE, isto é, utilizou-se 1,5 m para o desvio padrão das coordenadas planimétricas do CP, e 0,5 m para

a componente altimétrica das coordenadas do CP e para as precisões dos ângulos de atitude do sensor, atribuiu-se o valor de  $0.01^\circ$ . A distância focal, também estimada pelo *Metashape* no processo de calibração em serviço, foi fixada de forma absoluta, as observações fotogramétricas realizadas de forma autônoma foram fixadas com o valor de 1 pixel para o desvio padrão de ambas as componentes (x, y). Adota-se o valor de 1 pixel para o desvio padrão das medidas fotogramétricas pelo fato da distinção das feições fotoidentificáveis serem de difícil interpretação quando menores que 1 pixel. As coordenadas dos pontos de apoio foram fixadas com as mesmas precisões de 5 cm (X, Y) para as coordenadas planimétricas 3 cm para a componente altimétrica (Z), valores apresentados pelas informações técnicas da base de dados cartográficos do projeto UFPR CampusMap. Os valores de EQM dos resíduos dos pontos de apoio, discrepâncias dos pontos de verificação, bem como dos resíduos das observações fotogramétricas destes pontos, obtidos desta experimentação, são apresentados na Tabela 10.

TABELA 10 – EQM DOS RESÍDUOS E DISCREPÂNCIAS - EXPERIMENTO 1

<b>EQM dos Resíduos nos Pontos de Apoio</b>				
Quant. Pts. Apoio	X (cm)	Y (cm)	Z (cm)	Disc. Plan. (cm)
36	8,51	6,66	10,85	10,81
<b>EQM das Discrepâncias nos Pontos de Verificação</b>				
Quant. Pts. Verif.	X	Y	Z	Disc. Plan.
13	8,24	5,50	16,26	9,90
<b>EQM dos Resíduos das Observações Fotogramétricas</b>				
Pontos de Apoio (px)		Pontos de Verificação (px)		
X	0,482	X		0,325
Y	1,000	Y		0,400

FONTE: O Autor

Analisando os valores de EQM apresentados na Tabela 10, observa-se que a resultante planimétrica do EQM dos resíduos dos pontos de apoio apresenta o valor de 10,81 cm, enquanto que, nos pontos de verificação, o valor da resultante planimétrica do EQM das discrepâncias dos pontos de verificação apresenta o valor de 9,90 cm. Comparando estes valores com aqueles obtidos do processamento da faixa fotogramétrica utilizando o *Metashape*, conforme mostra a Tabela 1, caso de 5 bases, percebe-se que a resultante do EQM dos resíduos dos pontos de apoio apresentou o valor de 5,717 cm e a resultante planimétrica do EQM das discrepâncias dos pontos de verificação apresentou o valor de 6,019 cm. Desta forma, observa-se que o processamento da faixa fotogramétrica realizado com o LPS apresentou maiores valores de EQM dos resíduos e das discrepâncias planimétricas em relação aos valores obtidos do experimento realizado com o *Metashape*.

Continuando a análise dos valores de EQM apresentados na Tabela 10, agora para as discrepâncias e resíduos altimétricos, observa-se que o valor do EQM dos resíduos altimétricos é 10,85 cm. O valor de EQM dos resíduos altimétricos alcançado no experimento de processamento da faixa fotogramétrica com o *Metashape*, conforme mostra a Tabela 1, foi 2,950 cm. O valor do EQM das discrepâncias altimétricas dos pontos de verificação, obtido do experimento de aerotriangulação da faixa fotogramétrica e apresentado na Tabela 10, é de 16,26 cm, enquanto o valor obtido do experimento de processamento da faixa com o *Metashape* (Tab. 1), foi de 5,690 cm. Os elevados valores observados no experimento de aerotriangulação da faixa fotogramétrica ocorrem pelo fato dos parâmetros de orientação interior, estimados pelo *Metashape* e passados ao Erdas LPS, serem estimados pelo processo de calibração em serviço.

Ainda analisando os valores apresentados na Tabela 10, agora o EQM dos resíduos das observações fotogramétricas dos pontos de apoio e verificação, percebe-se que o EQM dos resíduos das medidas dos pontos de verificação apresentam valores menores que 0,5 pixel, valores considerados aceitáveis, enquanto os valores de EQM dos resíduos das medidas dos pontos de apoio são de 0,482 pixel em X e 1,00 pixel em Y, valores também aceitáveis.

TABELA 11 – MÉDIA DAS DISCREPÂNCIAS DOS PONTOS DE VERIFICAÇÃO

	<b>X (cm)</b>	<b>Y (cm)</b>	<b>Z (cm)</b>
Média	4,62	-0,41	8,25
t calc.	2,345	-0,260	2,042
$t_{(12,10/2)}$	1,7823		
Tendencioso	Sim	Não	Sim

FONTE: O Autor

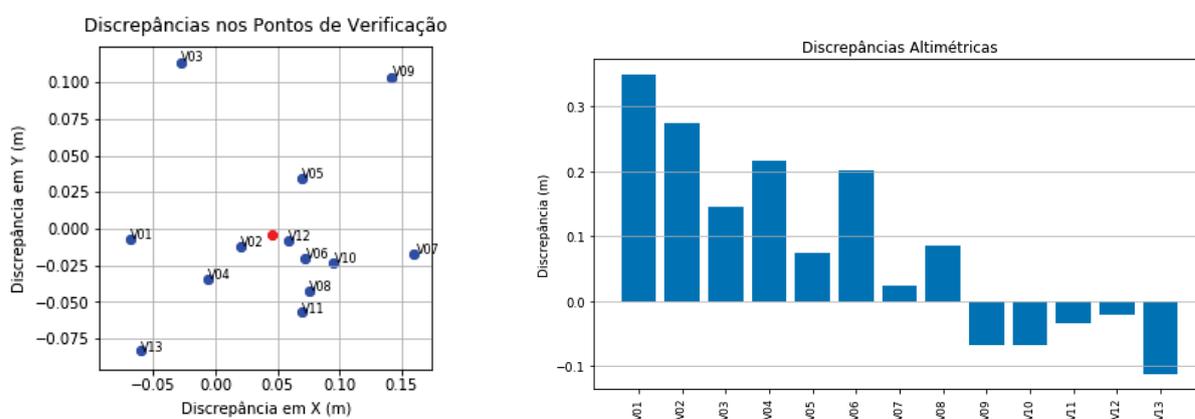
Na Tabela 11 apresentam-se os valores médios das componentes planialtimétricas das discrepâncias dos pontos de verificação e os valores calculados e tabelado do indicador estatístico t de Student para a análise de tendências. Complementando estas informações, a Figura 22 apresenta o gráfico de dispersão das discrepâncias planimétricas em torno do valor médio (Fig 22 a) e os valores de discrepâncias altimétricas em torno do valor central igual a zero (Fig 22 b).

Os valores médios das componentes planimétricas, apresentados na Tabela 11, são 4,62 cm em X e 0,41 cm em Y. Estes valores médios são maiores do que aqueles obtidos do experimento de processamento da faixa fotogramétrica utilizando o *Metashape* (-0,48 cm em X e 0,035 cm em Y), apresentados na Tabela 2. O valor de t calculado para a componente X das discrepâncias dos pontos de verificação encontra-se dentro da região crítica para rejeição da hipótese nula, isto é, as discrepâncias dos

pontos de verificação obtidas do experimento de aerotriangulação da faixa utilizando o Erdas LPS são tendenciosas em X. Observando o gráfico da Figura 22 a, que mostra a dispersão das discrepâncias planimétricas em torno do valor médio, percebe-se que a maioria dos pontos apresentam valores de discrepâncias positivas na componente X, contribuindo para o afastamento positivo do valor médio em relação ao ponto zero. Assim sendo, pode-se concluir que os valores médios das discrepâncias planimétricas obtidos do experimento de aerotriangulação da faixa fotogramétrica são maiores do que aqueles obtidos do experimento realizando com o *Metashape*, resultando em tendência na componente X das discrepâncias planimétricas.

Prosseguindo a análise dos valores médios das discrepâncias dos pontos de verificação, agora para a componente altimétrica apresentada na Tabela 11, observa-se que a média das discrepâncias altimétricas apresenta o valor de 8,25 cm. O valor obtido do experimento de processamento da faixa com o *Metashape* foi de 2,428 cm (Tab. 2). Como o valor de t calculado para o valor médio da componente altimétrica das discrepâncias dos pontos de verificação é maior que o valor de t tabelado, conclui-se que as discrepâncias altimétricas obtidas deste experimento são tendenciosas. O gráfico da Figura 22 b complementa esta discussão apresentando os valores das discrepâncias altimétricas dos pontos de verificação. Observa-se que quatro pontos (V01, V02, V04 e V06) apresentando valores de discrepâncias altimétricas superiores a 20 cm contribuem significativamente para o afastamento positivo do valor médio em relação ao valor zero. O valor médio das discrepâncias altimétricas obtido do experimento de aerotriangulação da faixa fotogramétrica foi cerca de 3,4 vezes maior do que o valor médio das discrepâncias altimétricas obtido do experimento realizado com o *Metashape*.

FIGURA 22 – AEROTRIANGULAÇÃO - EXPERIMENTO 1



(a) Disc. Planimétricas dos pontos de verificação

(b) Disc. Altimétricas dos pontos de Verificação

FONTE: O Autor

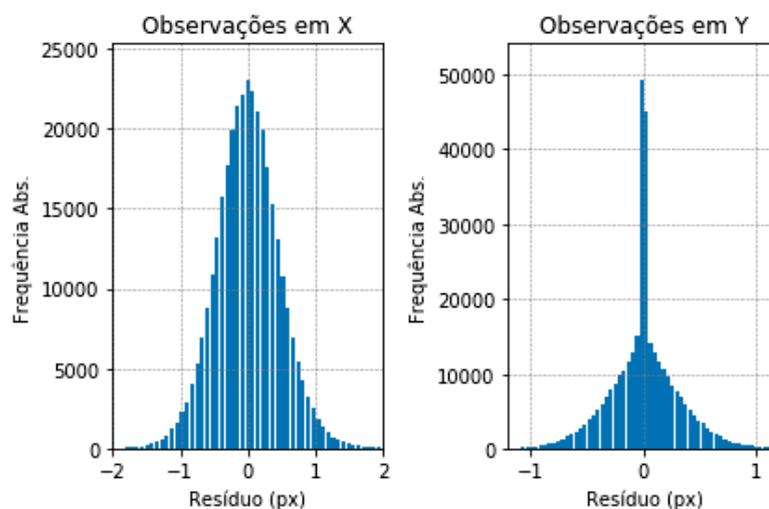
Isto posto, percebe-se que as exatidões obtidas do experimento de aerotriangulação da faixa fotogramétrica utilizando o Erdas LPS, empregando os parâmetros de orientação exterior estimados pelo *Metashape* como valores iniciais, fixando os pontos de apoio com as precisões utilizadas pelo *Metashape*, fixando absolutamente a distância focal e utilizando as medidas fotogramétricas dos pontos de ligação fornecidas pelo *Metashape*, foram inferiores àquelas obtidas do experimento de processamento da faixa fotogramétrica utilizando o *Metashape*. Contudo, é importante salientar que *Metashape* e Erdas LPS empregam diferentes técnicas (SfM e Aerotriangulação) fotogramétricas para o ajuste dos parâmetros (POE e POI) e que os POI inseridos no Erdas LPS foram determinados no processo de calibração em serviço pelo *Metashape*, isto é, os POI foram estimados de acordo com as condições operacionais do voo e dos pontos de apoio utilizados no experimento, fator que contribui significativamente para os elevados valores de médias e discrepâncias, principalmente altimétrica, observadas neste experimento.

Analisa-se agora os resíduos das observações fotogramétricas realizadas de forma autônoma pelo software *Metashape* através dos histogramas de frequências dos valores de resíduos de um total de 341.275 observações de pontos de ligação, conforme apresentados na Figura 23. O histograma apresentado ao lado esquerdo da Figura 23 mostra que a grande maioria dos valores de resíduos das observações fotogramétricas em X, cerca de 95,53% dos valores de resíduos em X, apresentam-se dentro do intervalo entre (0 a  $\pm 1$  pixel), enquanto que o grupo de resíduos nas observações em X com valores superiores a 1 pixel totalizam cerca de 4,47% dos valores de resíduos. O maior valor de resíduo nas observações fotogramétricas em X foi de 1,82 pixel. Observando o histograma apresentado ao lado direito da Figura 23, percebe-se que a amplitude do histograma de resíduos das observações fotogramétricas em Y é aproximadamente 1 pixel menor em relação ao histograma apresentado ao lado esquerdo. Cerca de 98,65% dos valores de resíduos encontram-se dentro do intervalo de (0 a  $\pm 1$  pixel), enquanto apenas 1,35% dos valores apresentam-se acima de 1 pixel sendo o valor máximo de resíduo obtido das observações em Y de 1,147 pixel.

Através dos padrões apresentados pelos dois gráficos da Figura 24 é possível perceber que as medidas fotogramétricas em Y apresentam maior precisão em relação às medidas fotogramétricas em X. Isto sugere a existência de uma possível dificuldade de detecção de erros nas medidas fotogramétricas dos pontos de ligação em X por parte do *Metashape*, pois um erro de medida na componente X, dependendo da geometria, poderá ser absorvido na coordenada Z.

Na Figura 24 estão apresentados os histogramas de frequências dos resíduos

FIGURA 23 – RESÍDUOS DAS OBSERVAÇÕES FOTOGRAMÉTRICAS AUTOMÁTICAS



FONTE: O Autor

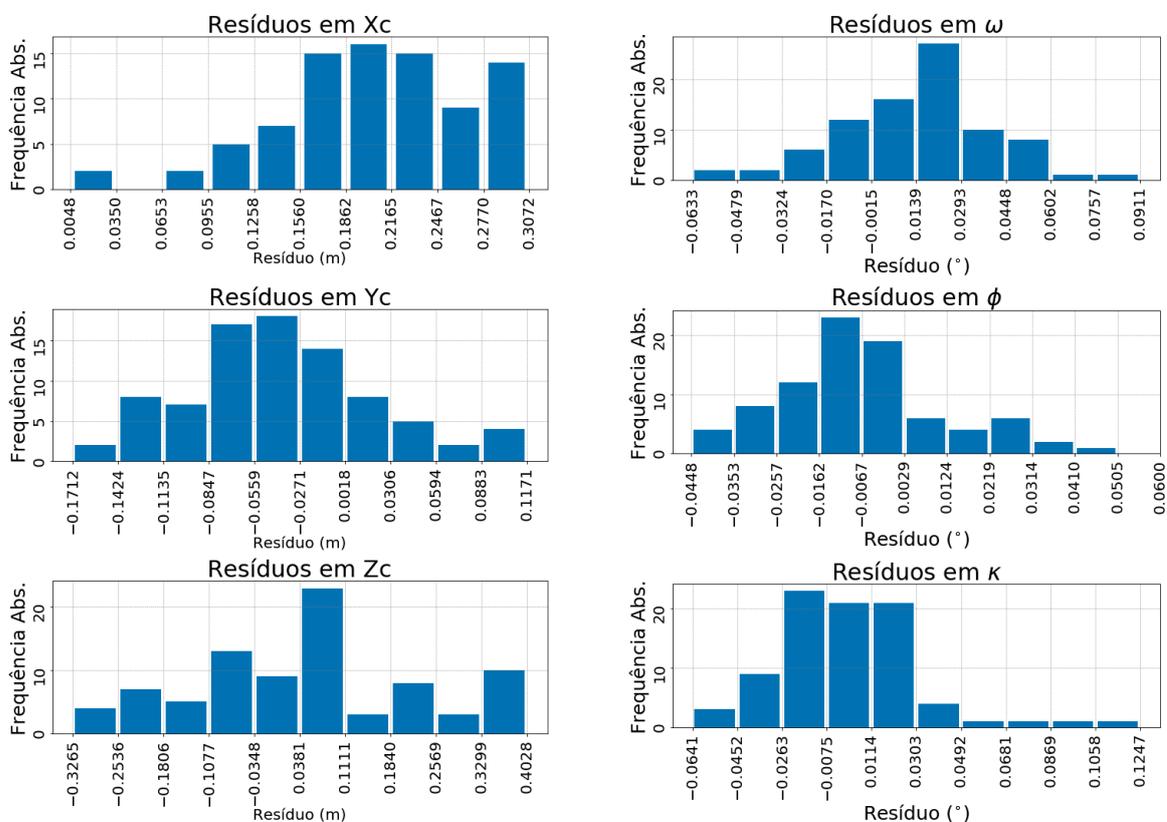
dos parâmetros de orientação exterior estimados pelo Erdas LPS. Os resíduos nas componentes planialtimétricas das coordenadas do CP no momento da exposição são apresentados na Figura 24 a, enquanto a Figura 24 b mostra os resíduos nos ângulos de atitude do sensor.

Observando a Figura 24 a, mais especificamente os histogramas de frequências dos resíduos nas componentes  $X_c$  e  $Y_c$  das coordenadas do CP, percebe-se que os resíduos das estimativas da componente  $X_c$ , em sua maioria (81 imagens), apresentam valores entre (-0,15 m a 0,30 m), valores que são aceitáveis, e os demais valores de resíduos apresentam-se dentro do intervalo de (0,004m a 0,156 m). No caso da componente  $Y_c$ , a maioria dos valores de resíduos (cerca de 49 valores) encontram-se dentro do intervalo de (-0,084 m a 0,0018 m), estando estas fotografias na região próxima ao centro da faixa. Os demais valores de resíduos apresentam-se mais elevados, chegando a atingirem -17,12 cm e 11,71 cm. Tais valores apresentam-se em fotografias próximas ao início e fim da faixa fotogramétrica.

Ainda observando a Figura 24 a, agora para o caso da componente altimétrica das coordenadas do CP no momento da exposição ( $Z_c$ ), percebe-se que os resíduos da componente variam dentro de um intervalo de (-0,3256 m a 0,4028 m), valores consideravelmente maiores quando comparados com aqueles observados para as componentes planimétricas das coordenadas tridimensionais do CP ( $X_c$  e  $Y_c$ ). Este fato pode ser ocasionado pela imprecisão na determinação da distância focal determinada pelo *Metashape* no processo de autocalibração, uma vez que existe uma forte correlação entre a componente  $Z_c$  e a distância focal, pois esta maior amplitude de resíduos só é observada na componente  $Z_c$  das coordenadas do CP.

Analisa-se agora a Figura 24 b, que apresenta os histogramas de frequências

FIGURA 24 – DIFERENÇAS ENTRE OS POE ESTIMADOS PELO METASHAPE E LPS



(a) Coordenadas Planialtimétricas do CP

(b) Angulos de Atitude

FONTE: O Autor

dos resíduos dos ângulos de atitude do sensor no momento da exposição. Observando o histograma de distribuição de frequências dos resíduos no ângulo ômega (rotação no eixo X), percebe-se que a grande maioria (73 imagens) dos valores de resíduos encontram-se dentro do intervalo de  $(-0,0324^\circ$  a  $0,0602^\circ)$ , o que equivale a um intervalo de  $(-1' 56,6''$  a  $3' 36,7'')$ . No caso do ângulo phi (rotação no eixo Y), percebe-se que a maioria dos resíduos, 48 imagens, concentram-se no intervalo de  $(-0,0448^\circ$  a  $0,0124^\circ)$ , o que equivale a um intervalo de  $(-2' 41,28''$  a  $44,64'')$  e, por fim, observa-se no histograma de resíduos das estimativas do ângulo kappa (rotação no eixo Z), nota-se que a maioria dos valores de diferenças, um total de 65 imagens, encontram-se dentro do intervalo de  $(-0,0263^\circ$  a  $0,0303^\circ)$ , isto é, um intervalo de  $(-1' 34''$  a  $1' 49'')$ . No caso dos ângulos de orientação do sensor, observou-se que, quanto mais próximas as imagens do início e do final da faixa fotogramétrica, maiores são os valores de resíduos dos ângulos de orientação do sensor.

Neste estudo não foi possível determinar de forma pontual a causa da ocorrência dos elevados valores de resíduos observados neste experimento. Por se tratar de um programa computacional privado, o *Metashape* é distribuído com código fonte

fechado, o que impossibilita uma investigação com maior rigor acerca das técnicas empregadas no processamento da faixa fotogramétrica, desta forma, formulam-se as seguintes hipóteses:

- A imprecisão da determinação da distância focal no processo de calibração em serviço faz com que erros sistemáticos não compensados sejam propagados elevando os valores dos resíduos das observações fotogramétricas dos pontos de verificação;
- O *Metashape* elimina automaticamente observações fotogramétricas entre os pontos de ligação que apresentam valor de erro de projeção superior a um limiar antes de realizar a otimização dos POI e POE, resultando em menores valores de erros de projeção dos pontos utilizados no processamento da faixa fotogramétrica;
- A terceira hipótese, que apresenta-se como a mais provável para justificar essas diferenças entre processamentos, está relacionada com o conjunto de observações fotogramétricas de pontos de ligação utilizados no processamento da faixa fotogramétrica com o Erdas LPS não é o mesmo conjunto de observações fotogramétricas dos pontos de ligação utilizados pelo *Metashape*, ou seja, o conjunto de pontos utilizado no LPS é o resultante da uma densificação de pontos, realizada após a estimação dos POEs.

De acordo com os valores de EQM obtidos das análises de resíduos nos pontos de apoio e discrepâncias nos pontos de verificação, pode-se concluir que as exatidões do ajustamento da faixa fotogramétrica realizado utilizando o LPS foram menores em comparação àquelas obtidas do processamento da faixa fotogramétrica utilizando o *Metashape*, porém as precisões alcançadas nos pontos de apoio foram melhores em comparação àquelas alcançadas utilizando o *Metashape*. A diferença mais evidente foi no valor do EQM das discrepâncias altimétricas obtido do experimento realizado com o LPS, que praticamente apresentou o dobro do valor obtido com o processamento utilizando o *Metashape*.

Novamente é importante ressaltar que o estudo realizado não compara as estimativas realizadas pelo *Metashape* e pelo Erdas LPS como sendo iguais. Os dois programas computacionais implementam diferentes paradigmas, sendo que os dados gerados pelo *Metashape* foram exportados para o Erdas LPS. Desta forma, o experimento realizado não atesta a inferioridade ou superioridade na qualidade posicional alcançada por um dos programas utilizados, mas que, por se tratarem de diferentes paradigmas, os dados gerados pelo *Metashape* não podem ser utilizados para o processamento com o Erdas LPS.

#### 4.2.2 Experimento 2

O Experimento 2 é uma repetição do Experimento 1, com a diferença de que os parâmetros de orientação interior são, neste experimento, injuncionados com a precisão estimada pelo programa computacional *Metashape*. O valor da precisão da distância focal e das fotocoordenadas do ponto principal fornecido pelo *Metashape* foi de 0,00261 mm. Os valores de EQM dos resíduos das coordenadas tridimensionais dos pontos de apoio, discrepâncias das coordenadas dos pontos de verificação e dos resíduos das observações fotogramétricas destes pontos obtidos neste experimento são apresentados na Tabela 12.

TABELA 12 – RESÍDUOS OBTIDOS DO EXPERIMENTO 2

<b>EQM dos Resíduos nos Pontos de Apoio</b>				
Quant. Pts. Apoio	X (cm)	Y (cm)	Z (cm)	Disc. Plan. (cm)
36	8,31	6,37	10,91	10,47
<b>EQM das Discrepâncias nos Pontos de Verificação</b>				
Quant. Pts. Verif.	X	Y	Z	Disc. Plan.
13	8,05	5,40	16,12	9,69
<b>EQM dos Resíduos das Observações Fotogramétricas</b>				
Pontos de Apoio (px)		Pontos de Verificação (px)		
X	0,481	X	0,325	
Y	1,000	Y	0,399	

FONTE: O Autor

Observa-se na Tabela 12 que os valores de EQM dos resíduos planimétricos e altimétricos são de 10,47 cm e 10,91 cm, respectivamente. Os valores de EQM dos resíduos planimétricos e altimétricos obtidos do Experimento 1 foram de 10,81 cm e 10,85 cm, logo é possível perceber que a fixação da distância focal com a precisão estimada pelo *Metashape* não proporcionou diferenças significativas nos valores de resíduos dos pontos de apoio.

Analisando agora os valores de EQM das discrepâncias planimétricas e altimétricas dos pontos de verificação, conforme mostra a Tabela 12, observa-se que o valor do EQM das discrepâncias planimétricas é de 9,69 cm, enquanto o valor do EQM das discrepâncias altimétricas é de 16,12 cm. Em uma comparação com os valores de EQM planimétricos e altimétricos das discrepâncias dos pontos de verificação obtidos do Experimento 1 (Tab. 10), que foram 9,90 cm e 16,26 cm, pode-se concluir que não houve mudança significativa dos valores de EQM das discrepâncias dos pontos de verificação com o emprego da aerotriangulação injuncionando os parâmetros de orientação interior. Desta forma, estes valores podem ser considerados como equivalentes. Estes elevados valores de discrepâncias não eram esperados. Pode-se inferir que a

geometria desfavorável à quebra de correlações entre os POE e POI contribui de forma significativa para o aumento nos valores de discrepâncias dos pontos de verificação observados neste experimento.

Analisando agora os valores dos resíduos das observações fotogramétricas dos pontos de apoio e verificação apresentados na Tabela 12, percebe-se que os valores de resíduos das observações dos pontos de verificação apresentam-se abaixo de 0,5 pixel, sendo valores aceitáveis. Os valores de EQM dos resíduos das medidas fotogramétricas dos pontos de apoio apresentam-se dentro da tolerância de 1 pixel, sendo que na componente Y o valor é de exatamente 1 pixel.

TABELA 13 – MÉDIA DAS DISCREPÂNCIAS DOS PONTOS DE VERIFICAÇÃO - EXPERIMENTO 2

	<b>X (cm)</b>	<b>Y (cm)</b>	<b>Z (cm)</b>
Média	4,57	-0,29	8,50
t calc.	2,345	-0,260	2,042
$t_{(12,10/2)}$	1,7823		
Tendencioso	Sim	Não	Sim

FONTE: O Autor

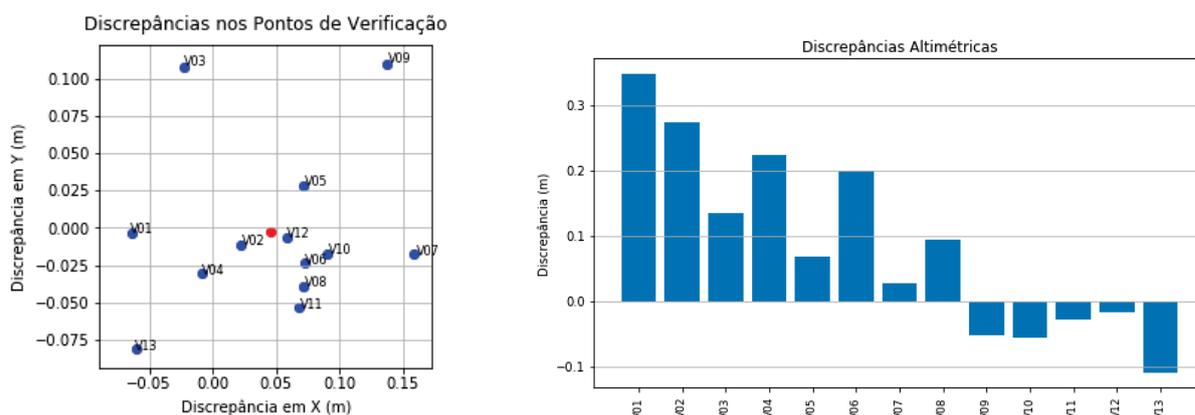
A Tabela 13 apresenta os valores médios das discrepâncias planimétricas e altimétricas dos pontos de verificação, obtidos do experimento de aerotriangulação da faixa fotogramétrica injuncionando os parâmetros de orientação interior. Também são apresentados os valores do indicador estatístico t de Student, bem como os resultados do teste de hipóteses realizados para a análise de tendências. As Figuras 25 a e b complementam estas informações apresentando o gráfico de dispersão das discrepâncias planimétricas em torno do valor médio (Fig. 25 a) e os valores das discrepâncias altimétricas em torno do valor central igual a zero (Fig. 25 b).

Observa-se que os valores médios das componentes planimétricas das discrepâncias dos pontos de verificação são de 4,57 cm em X e -0,29 cm em Y. Ambos os valores podem ser considerados equivalentes ao valor médio das discrepâncias planimétricas obtidos do Experimento 1 (Tab. 11), que foram de 4,62 cm em X e -0,41 cm em Y. Conforme apresenta a Tabela 13, a componente X das discrepâncias planimétricas dos pontos de verificação apresenta-se novamente tendenciosa. O gráfico da Figura 25 a mostra que os valores de discrepâncias planimétricas se distribuem, em sua maioria, ao lado positivo do eixo X e ao lado negativo do eixo Y, porém os altos valores de discrepâncias ao lado positivo do eixo Y compensam o cálculo da média aproximando-a do valor zero no eixo Y.

Analisando agora a componente altimétrica do valor médio das discrepâncias

dos pontos de verificação, apresentado na Tabela 13, observa-se que o valor médio obtido do Experimento 2 é de 8,50 cm. Este valor pode ser considerado equivalente ao valor médio das discrepâncias altimétricas obtidas do Experimento 1 (Tab. 11), que foi de 8,25 cm. A tendência evidente na componente altimétrica das discrepâncias dos pontos de verificação foi confirmada pelo teste de hipóteses realizado, conforme pode ser observado na Tabela 13. A Figura 25 b apresenta os valores das discrepâncias altimétricas e revela que a maioria das discrepâncias altimétricas apresentam valores positivos com os pontos V01 a V04 contribuindo significativamente para o deslocamento positivo do valor médio das discrepâncias altimétricas. Pode-se concluir que a aplicação de injunções à distância focal e às fotocoordenadas do ponto principal não ocasionou redução significativa dos valores médios das discrepâncias planialtimétricas e altimétricas dos pontos de verificação e não possibilitou a eliminação de tendências nas componentes X e Z dos valores médios das discrepâncias dos pontos de verificação.

FIGURA 25 – AEROTRIANGULAÇÃO - EXPERIMENTO 2



(a) Disc. Planimétricas dos pontos de verificação

(b) Resíduos das Observações Fotogramétricas

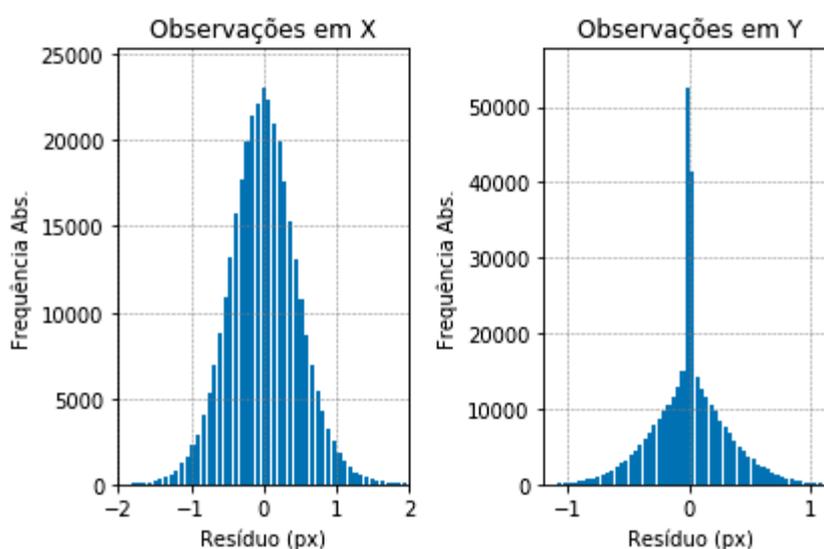
FONTE: O Autor

Na Figura 26 estão apresentados os histogramas de frequências dos resíduos das observações fotogramétricas dos pontos de ligação realizadas de forma automática pelo *Metashape*.

Analisando o lado esquerdo da Figura 26, que apresenta a distribuição de frequências dos resíduos das observações fotogramétricas dos pontos de ligação em X, nota-se que 95,57% dos valores de resíduos apresentam-se dentro do intervalo de  $(0 \text{ a } \pm 1 \text{ px})$ , enquanto que apenas 4,43% dos valores de resíduos apresentam-se acima de 1 pixel. Em uma comparação com as distribuições de frequências dos resíduos das medidas fotogramétricas obtidas do Experimento 1 (Fig. 23), é possível notar que as distribuições de frequências de resíduos das medidas fotogramétricas em X podem ser consideradas equivalentes, uma vez que não há diferença significativa entre estas.

Observando agora o histograma de distribuição de frequências dos resíduos das observações fotogramétricas em Y, dos pontos de ligação, apresentado ao lado direito da Figura 26, é possível notar que 98,65% dos valores de resíduos encontram-se dentro do intervalo de  $(0 \text{ a } \pm 1 \text{ px})$ , com apenas 1,35% dos valores de resíduos estando acima de 1 pixel. Assim como no Experimento 1 (Fig. 23), novamente observa-se que as medidas fotogramétricas em Y dos pontos de ligação apresentam maior precisão em relação às medidas feitas na componente X, sugerindo uma possível dificuldade em detectar erros nas medidas fotogramétricas em X, erros estes que, a depender da geometria, podem ser absorvidos na componente Z.

FIGURA 26 – RESÍDUOS DAS OBSERVAÇÕES FOTOGRAMÉTRICAS AUTOMÁTICAS



FONTE: O Autor

A Tabela 14 apresenta os valores de distância focal e fotocoordenadas do ponto principal estimadas pelo *Metashape* no processo de calibração em serviço e também estes mesmos parâmetros estimados pelo Erdas LPS quando utiliza-se os POE e medidas fotogramétricas dos pontos de ligação advindos do *Metashape* e também injuncionam-se estes parâmetros com as precisões estimadas pelo *Metashape*. As Figuras 27 a e b apresentam os resíduos nos parâmetros de orientação exterior realizadas pelos dois programas computacionais.

As diferenças entre as estimativas das fotocoordenadas do ponto principal, conforme mostra a Tabela 14, são de 0,002 mm na componente x e de 0,0163 mm na componente y. Estas diferenças se refletem nos resíduos das coordenadas tridimensionais do CP no momento da exposição, conforme pode-se observar na Figura 27 a, principalmente o histograma da distribuição de frequência dos resíduos em Yc,

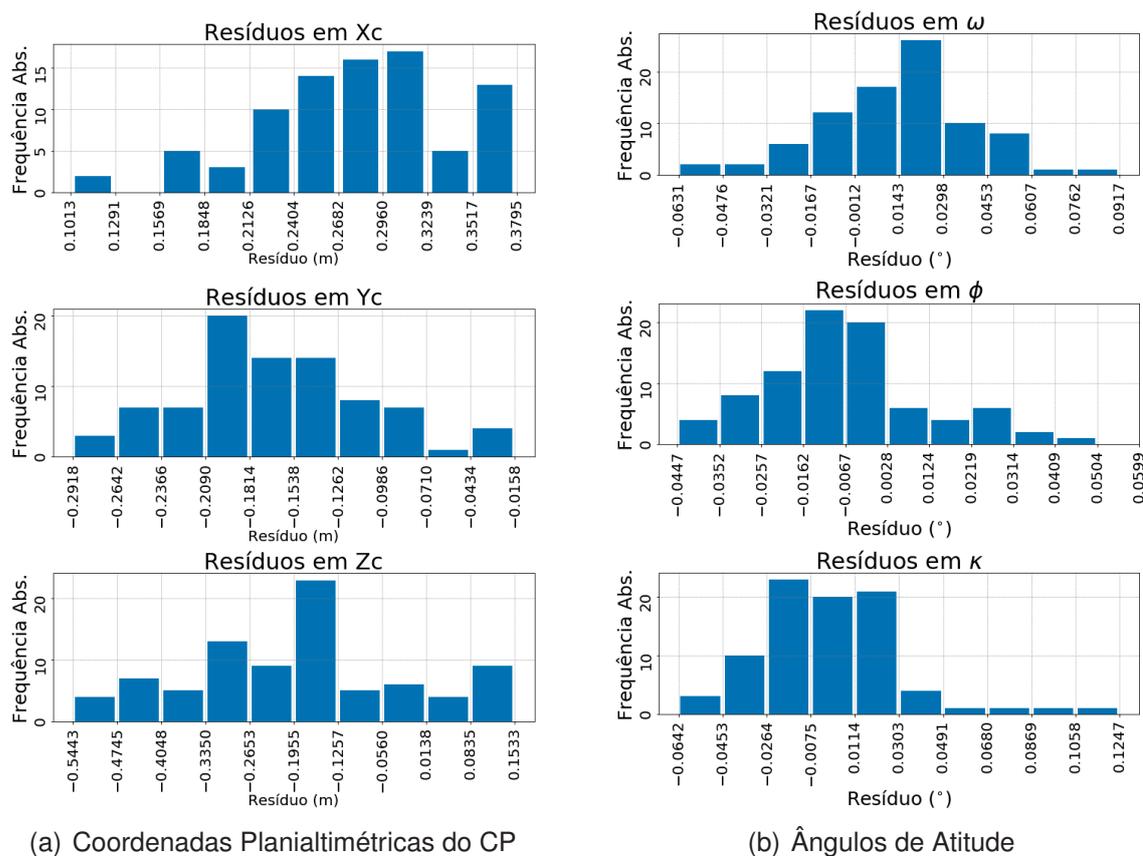
que apresenta uma maior amplitude de valores de resíduos quando comparado ao histograma do Experimento 1. Isto ocorre devido a correlação existente entre as fotocordenadas do ponto principal e as coordenadas planimétricas do CP no momento da exposição.

TABELA 14 – ESTIMATIVAS DOS PARÂMETROS DE ORIENTAÇÃO INTERIOR

Parâmetros de Orientação Interior (mm)		
	Metashape	Erdas LPS
$x_0$	0,0153	0,0103
$y_0$	0,00836	-0,0080
$f$	9,5473	9,5260

FONTE: O Autor

FIGURA 27 – DIFERENÇAS DOS PARÂMETROS DE ORIENTAÇÃO EXTERIOR-EXPERIMENTO 2



FONTE: O Autor

A diferença entre as estimativas de valores para a distância focal é de aproximadamente 0,0213 mm. Esta significativa diferença também reflete-se nas diferenças das estimativas da componente Z das coordenadas tridimensionais do CP no momento

da exposição, conforme mostra a Figura 27 a, mais especificamente no histograma de distribuição de frequências das diferenças de estimativas de  $Z_c$ . Conforme pode-se observar, a amplitude do conjunto de diferenças compreende um intervalo de (-0,5443 m a 0,1553 m), sendo que, no Experimento 1 (Fig. 24 a), a amplitude dos valores de diferenças era centimétrica variando entre (-0,3265 cm a 0,4028 cm).

Analisando agora as diferenças das estimativas dos ângulos de orientação do sensor no momento da exposição, conforme mostra a Figura 27 b, percebe-se que a maioria dos valores (72 imagens) de diferenças no ângulo  $\omega$  (rotação no eixo X) encontram-se dentro do intervalo de (-0,0167° a 0,0453°), o que equivale a um intervalo de (-1' 0,12" a 2' 43,08"). No caso do ângulo  $\phi$  (rotação em Y), observa-se que a maioria dos valores de diferenças (64 imagens) encontram-se dentro do intervalo de (-0,0447° a 0,0028°), intervalo este que equivale a (2' 40,92" a 10"). E, por fim, observando o gráfico de distribuição de frequências das diferenças no ângulo  $\kappa$  (rotação no eixo Z), percebe-se que a maioria dos valores de diferenças apresentam-se dentro do intervalo de (-0,0453° a 0,0303°), intervalo que equivale a (-2' 43,1" a 1' 49,08"). Em todos os casos de diferenças entre as estimativas entre os ângulos de orientação, as maiores diferenças ocorreram nas imagens mais próximas ao início e ao final da faixa.

Apresentados os valores de EQM dos resíduos dos pontos de apoio e verificação, resíduos das observações fotogramétricas e diferenças de estimativas dos POE e POI realizados pelos dois programas computacionais, pode-se concluir que não houve melhora significativa da exatidão alcançada pelo ajustamento da faixa fotogramétrica quando a distância focal e as fotocoordenadas do ponto principal são injuncionadas. E também não houve redução dos valores médios das discrepâncias dos pontos de verificação e, conseqüentemente, não houve eliminação das tendências observadas nas componentes X e Z das discrepâncias dos pontos de verificação.

De uma forma geral, observou-se que a injunção da distância focal e das fotocoordenadas do ponto principal ocasionou um aumento na amplitude dos resíduos dos POE, principalmente na componente  $Z_c$  das coordenadas tridimensionais do CP, devido a variação da distância focal. É importante ressaltar que não foi possível determinar de forma pontual o motivo pelo qual estas diferenças de estimativas ocorrem, uma vez que o *Metashape* é um programa computacional de código fechado.

## 5 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Este trabalho realizou uma investigação acerca da qualidade posicional alcançada pela técnica *Structure from Motion* (SfM), implementada no programa computacional *Metashape*, para a aplicação no mapeamento de corredores. O corredor foi levantado em três faixas fotogramétricas e os casos de uma, duas e três faixas foram analisados. Diferentes configurações de apoio foram testadas e a análise da qualidade posicional foi realizada através dos valores de EQM dos resíduos das coordenadas tridimensionais dos pontos de apoio e das discrepâncias das coordenadas dos pontos de verificação. Na sequência, foi realizada também uma análise de tendência das discrepâncias das coordenadas dos pontos de verificação para cada conjunto de experimentos. Baseado nos resultados obtidos dos experimentos realizados utilizando o programa computacional *Metashape*, pode-se concluir que:

- O corredor fotogramétrico, que apresenta uma fragilidade geométrica devido a dificuldade da quebra de correlações entre POE e POI, requer o emprego de uma maior quantidade de pontos de apoio;
- A adição de faixas não necessariamente implicou em uma possibilidade de redução significativa do valor do EQM das discrepâncias dos pontos de verificação do corredor analisado, sendo o fator mais importante para o alcance de melhor exatidão, quando utilizando o *Metashape*, a quantidade de pontos de apoio empregada. Desta forma, no caso deste estudo, a adição de faixas fotogramétricas ao corredor não permitiu a redução da quantidade de pontos de apoio a ser empregada no ajustamento;
- A adição de faixas também não ocasionou decremento no valor médio das discrepâncias dos pontos de verificação. Para que o valor médio das discrepâncias dos pontos de verificação apresente redução significativa, a maior quantidade de pontos de apoio deve ser utilizada, isto é, pontos de apoio inseridos a cada cinco bases.

Uma análise comparativa entre *Metashape* e LPS também foi realizada com o intuito de verificar a qualidade das observações automáticas dos pontos de ligação realizadas pelo *Metashape* e as diferenças entre as estimativas dos parâmetros (POE e POI) estimados por este programa. Os parâmetros de orientação exterior, utilizados como valores aproximados, parâmetros de orientação interior e observações fotogramétricas dos pontos de ligação, realizadas de forma autônoma pelo *Metashape*, foram exportados para o Erdas LPS através da elaboração de uma biblioteca de funções que

converte estes dados em um formato que possibilite sua inserção no Erdas LPS. Assim, através dos resultados obtidos das experimentações realizadas utilizando o Erdas LPS, pode-se concluir que:

- Os valores de EQM das discrepâncias das coordenadas tridimensionais dos pontos de verificação, bem como os valores médios das discrepâncias tridimensionais dos pontos de verificação, obtidos de ambos os experimentos realizados com o Erdas LPS, foram maiores em relação a aqueles obtidos da experimentação utilizando o *Metashape*;
- Os resíduos das observações fotogramétricas dos pontos de ligação, realizadas de forma automática pelo *Metashape* apresentam-se, em sua maioria, valores menores que 1 pixel, contudo, neste estudo, os resíduos na componente x apresentam maior amplitude do que os resíduos na componente y, revelando que as medidas fotogramétricas em y apresentam maior precisão;
- O refinamento da distância focal e coordenadas do ponto principal no LPS não permitiu melhorar as precisões e exatidões no experimento de auto-calibração realizado. Estas deficiências podem estar relacionadas com correlações diretas entre os parâmetros no ajustamento, uma vez que o corredor foi representado em uma única faixa, sem a adição de imagens oblíquas e sem a adoção de diferentes alturas de voo, impossibilitando a quebra de correlações entre os a distância foca e fotocoordenadas do ponto principal com as coordenadas tridimensionais do centro de projeção das imagens.

As diferenças entre as metodologias empregadas em cada programa computacional (*Metashape* e Erdas LPS) contribuem para as diferentes exatidões e precisões alcançadas nos experimentos realizados, contudo, novamente ressalta-se que o estudo realizado não atesta a superioridade ou inferioridade das técnicas que estes empregam, uma vez que não é possível conhecer de forma direta os métodos implementados em ambos os programas.

Quanto às diferenças entre as estimativas dos parâmetros de orientação exterior, não foi possível determinar a causa exata da ocorrência destas diferenças, uma vez que o *Metashape* é um programa computacional de código fechado, fato que impossibilita conhecer os métodos e técnicas empregadas no processamento da faixa fotogramétrica.

Além disto, a realização deste trabalho enfrentou dificuldades ocasionadas pela ocorrência da pandemia do Covid-19, sendo a principal delas a impossibilidade da realização de uma pré-calibração da câmera do equipamento VANT utilizado, um procedimento fundamental no desenvolvimento do estudo realizado.

Isto posto, pode-se sugerir como recomendações futuras os seguintes tópicos:

- Realizar pesquisas comparativas para verificar os valores de EQM das discrepâncias dos pontos de verificação e resíduos dos pontos de apoio empregando uma pré-calibração da câmera do equipamento VANT;
- Realizar estudos que objetivam determinar se o *Metashape* utiliza alguma técnica de eliminação de observações fotogramétricas com elevados valores de resíduos, segundo um limiar, para o emprego do ajustamento;
- Realizar estudos que buscam verificar a influência da adição de imagens oblíquas e imagens tomadas com diferentes alturas de voo na precisão e exatidão alcançadas pelo ajustamento empregado pelo *Metashape* para o mapeamento de corredores.

## REFERÊNCIAS

- AALTO. **Uki Helava**. [S.l.: s.n.]. Disponível em: <<<https://foto.aalto.fi/seura/members/helava.html>>>. Citado 1 vez na página 21.
- BOLLES, Robert C; BAKER, H Harlyn; MARIMONT, David H. Epipolar-plane image analysis: An approach to determining structure from motion. **International journal of computer vision**, Springer, v. 1, n. 1, p. 7–55, 1987.
- BROWN, Matthew; LOWE, David G. Invariant features from interest point groups. In: British Machine Vision Conference, v. 4, 2002.
- CARRIVICK, Jonathan L.; SMITH, Mark W. Fluvial and aquatic applications of Structure from Motion photogrammetry and unmanned aerial vehicle/drone technology. **Wiley Interdisciplinary Reviews: Water**, Wiley Online Library, v. 6, n. 1, e1328, 2019.
- CARRIVICK, Jonathan L.; SMITH, Mark W.; QUINCEY, Duncan J. **Structure from Motion in the Geosciences**. [S.l.]: John Wiley & Sons, 2016. Citado 2 vezes nas páginas 15, 54.
- COLOMINA, Ismael; MOLINA, Pere. Unmanned aerial systems for photogrammetry and remote sensing: A review. **ISPRS Journal of photogrammetry and remote sensing**, Elsevier, v. 92, p. 79–97, 2014. Citado 1 vez na página 15.
- DELAZARI, L. S.; FILHO, L. E.; PEIXOTO, E. B. A. Avaliação da Precisão e Exatidão Posicional de Dados Fotogramétricos obtidos com a Tecnologia VANT do Projeto Campusmap. In: VII SIMPÓSIO BRASILEIRO DE CIÊNCIAS GEODÉSICAS E TECNOLOGIAS DA GEOINFORMAÇÃO. UFPE. [S.l.: s.n.], 2018. v. 1, p. 164–171. Citado 1 vez na página 48.
- DERENYI, Eugene E. **Photogrammetry: the concepts**. [S.l.]: Department of Geodesy e Geomatics Engineering, University of New Brunswick, 1996. Citado 1 vez na página 28.
- DJI. **Phantom 4 Pro: Especificações**. [S.l.: s.n.]. Disponível em: <<<https://www.dji.com/br/phantom-4-pro/info>>>. Citado 1 vez na página 52.
- FISCHLER, Martin A; BOLLES, Robert C. Random sample consensus: a paradigm for model fitting with applications to image analysis and automated cartography. **Communications of the ACM**, ACM, v. 24, n. 6, p. 381–395, 1981.
- FÖRSTNER, Wolfgang; WROBEL, Bernhard P. **Photogrammetric computer vision**. [S.l.]: Springer, 2016. Citado 1 vez na página 24.

GALLO, Giovanni; STANCO, F; BATTIATO, S. **Digital imaging for cultural heritage preservation: analysis, restoration and reconstruction of ancient artworks**. [S.l.]: Taylor e Francis, 2011.

GEMAEL, Camil; MACHADO, Alvaro M. L.; WANDRESSEN, Romualdo. **Introdução ao ajustamento de observações: aplicações geodésicas**. [S.l.]: Editora UFPR, 2015.

GOLUB, Gene H; VAN LOAN, Charles F. **Matrix Computations** Johns Hopkins University Press. **Baltimore and London**, 1996. Citado 1 vez na página 28.

GRUEN, Armin; HUANG, Thomas S. **Calibration and orientation of cameras in computer vision**. [S.l.]: Springer Science & Business Media, 2013. v. 34. Citado 1 vez na página 28.

GRUSSENMEYER, Pierre; KHALIL, Omar Al. Solutions for exterior orientation in photogrammetry: a review. **The photogrammetric record**, Wiley Online Library, v. 17, n. 100, p. 615–634, 2002.

HARDIN, Perry J; JENSEN, Ryan R. Small-scale unmanned aerial vehicles in environmental remote sensing: Challenges and opportunities. **GIScience & Remote Sensing**, Taylor & Francis, v. 48, n. 1, p. 99–111, 2011. Citado 1 vez na página 14.

HARTLEY, Richard; ZISSERMAN, Andrew. **Multiple view geometry in computer vision**. [S.l.]: Cambridge university press, 2003.

HARWIN, Steve; LUCIEER, Arko; OSBORN, Jon. The impact of the calibration method on the accuracy of point clouds derived using unmanned aerial vehicle multi-view stereopsis. **Remote Sensing**, Multidisciplinary Digital Publishing Institute, v. 7, n. 9, p. 11933–11953, 2015.

HEEL, Joachim. **Direct estimation of structure and motion from multiple frames**. [S.l.], 1990.

JAMES, Mike R et al. Optimising UAV topographic surveys processed with structure-from-motion: Ground control quality, quantity and bundle adjustment. **Geomorphology**, Elsevier, v. 280, p. 51–66, 2017.

JAVERNICK, L; BRASINGTON, J; CARUSO, B. Modeling the topography of shallow braided rivers using Structure-from-Motion photogrammetry. **Geomorphology**, Elsevier, v. 213, p. 166–182, 2014. Citado 1 vez na página 14.

KRAUS, Karl. **Photogrammetry-Fundamentals and Standard Process**. **Dummler/Bonn**, v. 1, p. 397, 1993. Citado 1 vez na página 20.

\_\_\_\_\_. **Photogrammetry: geometry from images and laser scans**. [S.l.]: Walter de Gruyter, 2011.

LEMMENS, Mathias. **Geo-information: technologies, applications and the environment**. [S.l.]: Springer Science & Business Media, 2011. v. 5.

LONGUET-HIGGINS, H Christopher. A computer algorithm for reconstructing a scene from two projections. **Nature**, Nature Publishing Group, v. 293, n. 5828, p. 133, 1981.

LOWE, David G. Distinctive image features from scale-invariant keypoints. **International journal of computer vision**, Springer, v. 60, n. 2, p. 91–110, 2004.

MEINEN, Benjamin U; ROBINSON, Derek T. Streambank topography: an accuracy assessment of UAV-based and traditional 3D reconstructions. **International Journal of Remote Sensing**, Taylor & Francis, v. 41, n. 1, p. 1–18, 2020.

MOONS, Theo; VERGAUWEN, Maarten; VAN GOOL, Luc. 3D reconstruction from multiple images. **Foundations and Trends® in Computer Graphics and Vision**, Now Publishers, Inc., v. 4, n. 4, p. 287–404, 2008. Citado 1 vez na página 54.

NESBIT, Paul Ryan; HUGENHOLTZ, Christopher H. Enhancing UAV–SfM 3D Model Accuracy in High-Relief Landscapes by Incorporating Oblique Images. **Remote Sensing**, Multidisciplinary Digital Publishing Institute, v. 11, n. 3, p. 239, 2019.

OKAMOTO, Atsushi. Orientation and construction of models. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, v. 48, n. 11, p. 1615–1626, 1981.

REHAK, Martin; SKALOUD, Jan. FIXED-WING MICRO AERIAL VEHICLE FOR ACCURATE CORRIDOR MAPPING. **ISPRS Annals of Photogrammetry, Remote Sensing & Spatial Information Sciences**, v. 2, 2015.

REINOSO, JF et al. Cartography for civil engineering projects: photogrammetry supported by unmanned aerial vehicles. **Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Civil Engineering**, Springer, v. 42, n. 1, p. 91–96, 2018.

SKARLATOS, Dimitrios et al. Accuracy assessment of minimum control points for UAV photography and georeferencing. In: INTERNATIONAL SOCIETY FOR OPTICS e PHOTONICS. FIRST international conference on remote sensing and geoinformation of the environment (RSCy2013). [S.l.: s.n.], 2013. v. 8795, p. 879514.

SOPCHAKI, Carlos Henrique et al. VERIFICAÇÃO DA QUALIDADE DE ORTOMOSAICOS PRODUZIDOS A PARTIR DE IMAGENS OBTIDAS COM AERONAVE REMOTAMENTE PILOTADA SEM O USO DE PONTOS DE APOIO. **Raega-O Espaço Geográfico em Análise**, v. 43, p. 200–214, 2018.

STRANG, Gilbert; BORRE, Kai. **Linear algebra, geodesy, and GPS**. [S.l.]: Siam, 1997. Citado 1 vez na página 28.

SZELISKI, Richard. **Computer vision: algorithms and applications**. [S.l.]: Springer Science & Business Media, 2010. Citado 2 vezes nas páginas 14, 28.

TOMMASELLI, Antonio MG. Fotogrametria básica. **Presidente Prudente: UNESP. Disponível em**, p. 5–18, 2009. Citado 2 vezes nas páginas 20, 21.

ULLMAN, Shimon. The interpretation of structure from motion. **Proceedings of the Royal Society of London. Series B. Biological Sciences**, The Royal Society London, v. 203, n. 1153, p. 405–426, 1979.

WALLACH, Hans; O'CONNELL, DN. The kinetic depth effect. **Journal of experimental psychology**, American Psychological Association, v. 45, n. 4, p. 205, 1953.

WANG, Guanghui; WU, QM Jonathan. **Guide to three dimensional structure and motion factorization**. [S.l.]: Springer, 2011.

WESTOBY, Matthew J et al. 'Structure-from-Motion' photogrammetry: A low-cost, effective tool for geoscience applications. **Geomorphology**, Elsevier, v. 179, p. 300–314, 2012. Citado 2 vezes nas páginas 14, 54.

ZHOU, Y et al. GNSS-assisted accurate corridor mapping with small UAV. HAAL, 2018.