



**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS**  
**Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo**

**LUÍS ANTONIO DE LIMA**

**AVALIAÇÃO DA EXATIDÃO PLANIALTIMÉTRICA DE PRODUTOS  
CARTOGRÁFICOS UTILIZANDO SENSORES ORBITAIS E  
AEROTRANSPORTADOS.**

**CAMPINAS**

**2024**

**LUÍS ANTONIO DE LIMA**

**AVALIAÇÃO DA EXATIDÃO PLANIALTIMÉTRICA DE PRODUTOS  
CARTOGRÁFICOS UTILIZANDO SENSORES ORBITAIS E  
AEROTRANSPORTADOS.**

Tese apresentada à Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo da Universidade Estadual de Campinas, para obtenção do título de Doutor em Engenharia Civil, na área de Transportes.

**Orientador: Prof. Dr. Henrique Candido de Oliveira**

**Coorientador: Prof. Dr. Diogenes Cortijo Costa**

ESTE EXEMPLAR CORRESPONDE À VERSÃO FINAL DA TESE  
DEFENDIDA PELO ALUNO LUÍS ANTONIO DE LIMA E  
ORIENTADO PELO PROF. DR. HENRIQUE CANDIDO DE  
OLIVEIRA.

**CAMPINAS**

**2024**

Ficha catalográfica  
Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP)  
Biblioteca da Área de Engenharia e Arquitetura  
Rose Meire da Silva - CRB 8/5974

L628a Lima, Luís Antonio de, 1965-  
Avaliação da exatidão planialtimétrica de produtos cartográficos utilizando sensores orbitais e aerotransportados. / Luís Antonio de Lima. – Campinas, SP : [s.n.], 2024.

Orientador: Henrique Candido de Oliveira.  
Coorientador: Diogenes Cortijo Costa.  
Tese (doutorado) – Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP),  
Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo.

1. Cartografia. 2. Aerofotogrametria. 3. Classificação de imagem. 4. Levantamento fotográficos. 5. Análise de imagem. I. Oliveira, Henrique Candido de, 1988-. II. Costa, Diogenes Cortijo, 1951-. III. Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP). Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo. IV. Título.

Informações Complementares

**Título em outro idioma:** Evaluation of planialtimetric accuracy of cartographic products using orbital and airborne sensors.

**Palavras-chave em inglês:**

Cartography

Aerial photogrammetry

Image classification

Photographic surveys

Image analysis

**Área de concentração:** Transportes

**Titulação:** Doutor em Engenharia Civil

**Banca examinadora:**

Henrique Candido de Oliveira [Orientador]

Jorge Luiz Alves Trabanco

Edvaldo Simões da Fonseca Junior

Rodrigo Bezerra de Araujo Gallis

Antônio Juliano Fazan

**Data de defesa:** 30-07-2024

**Programa de Pós-Graduação:** Engenharia Civil

**Identificação e informações acadêmicas do(a) aluno(a)**

- ORCID do autor: <https://orcid.org/0000-0002-5303-5026>

- Currículo Lattes do autor: <http://lattes.cnpq.br/7579298613910647>

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS  
FACULDADE DE ENGENHARIA CIVIL, ARQUITETURA E  
URBANISMO**

**AVALIAÇÃO DA EXATIDÃO PLANIALTIMÉTRICA DE  
PRODUTOS CARTOGRÁFICOS UTILIZANDO SENSORES  
ORBITAIS E AEROTRANSPORTADOS.**

**Luís Antonio de Lima**

**Tese de Doutorado aprovada pela Banca Examinadora, constituída por:**

Prof. Dr. Henrique Candido de Oliveira.  
**Presidente e Orientador / FECFAU/Unicamp.**

Prof. Dr. Jorge Luiz Alves Trabanco.  
**FECFAU/Unicamp.**

Prof. Dr. Rodrigo Bezerra de Araujo Gallis.  
**Universidade Federal de Uberlândia.**

Prof. Dr. Dr. Edvaldo Simões da Fonseca Junior.  
**USP - Universidade de São Paulo.**

Prof. Dr. Antônio Juliano Fazan.  
**Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes.**

A Ata da defesa com as respectivas assinaturas dos membros encontra-se no SIGA/Sistema de Fluxo de Dissertação/Tese e na Secretaria do Programa da Unidade.

Campinas, 30 de julho de 2024.

Dedico este trabalho aos meus pais Luiz Carlos de Arruda Lima e Antônia Talacci de Lima, (In memoriam), por todos os exemplos de vida repassados durante nosso convívio, à minha esposa e filhas pelos momentos de alegria que elas me proporcionam.

## **AGRADECIMENTOS**

Ao Professor Dr. Henrique Candido de Oliveira, pela orientação e confiança no meu trabalho.

Ao Professor Dr. Diogenes Cortijo Costa, pelo acompanhamento durante meu desenvolvimento acadêmico.

À minha esposa Eliane de Christo e minhas filhas Antônia, Clara e Sofia pelo incentivo durante o desenvolvimento deste trabalho.

À Empresa Fototerra Atividades de Aerolevantamentos Ltda, por disponibilizar o material necessário para a realização dos trabalhos.

Aos companheiros Wagner Pizani Guidi e Anderson Silvestre da Luz, pelo auxílio na captura dos dados em campo.

E a todos aqueles que direta e indiretamente colaboraram para o engrandecimento deste trabalho.

## RESUMO

Diversas fontes são utilizadas na produção de mapas cartográficos. Estas são diferentes em tecnologia, em capacidade de área de cobertura, em exatidão posicional, em resolução espacial, em resolução espectral entre outras. Este trabalho tem como objetivo central avaliar a exatidão planialtimétrica de três produtos cartográficos, gerados por meio de três fontes distintas: imagens orbitais de alta resolução; fotos aéreas digitais obtidas com aeronave tripulada e; fotos aéreas digitais obtidas com aeronave não tripulada. Metodologicamente, três produtos cartográficos foram gerados sobre a mesma área: o primeiro produto utilizou imagem de satélite de alta resolução, executando o processo de ortorretificação através de modelo de terreno pré-existente, proveniente de voo fotogramétrico executado com sistema LiDAR e também com dados RPC (*Rational Polynomial Coefficients*); o segundo utilizou ortofotos e modelos digitais de terreno gerados mediante técnicas convencionais de cartografia, com imagens obtidas por aeronave tripulada, equipada com câmera aérea de grande formato e; o terceiro utilizou também ortofotos e modelos digitais de terreno, gerados mediante técnicas convencionais de cartografia em que as imagens foram obtidas com aeronave não tripulada, equipada com câmera aérea de pequeno formato. A partir destes experimentos, o estudo propôs protocolo para a elaboração de produtos cartográficos gerados pelas fontes mencionadas anteriormente, o objetivo foi estabelecer processo produtivo que assegure a geração de produtos de alta qualidade, sendo uma das contribuições principais da pesquisa. Para o processo de avaliação da qualidade foram utilizadas normas nacionais e internacionais, aliadas à grande quantidade de pontos de controle distribuídos na área de estudo e obtidos com sistema GNSS, utilizando-se o método relativo estático. Os melhores resultados obtidos para o caso das imagens orbitais foram compatíveis com produtos na escala de 1:5000, e para os produtos gerados através de sistemas aerotransportados, foi possível atingir escalas 1:500 e 1:1000, todos em relação ao padrão de exatidão cartográfica nacional para produtos digitais. Este estudo representa uma contribuição original para o campo da Engenharia de Transportes.

**Palavras-Chave:** Cartografia, Aerolevantamento, Exatidão, Resolução Espacial.

## ABSTRACT

Several sources are used in the production of cartographic maps. These sources differ in technology, area coverage capacity, accuracy, spatial resolution, spectral resolution, among other factors. This study's central objective is to assess the planimetric and altimetric accuracy of three cartographic products generated through three distinct sources: high-resolution orbital images; digital aerial photographs obtained from a manned aircraft; and digital aerial photographs obtained from an unmanned aircraft. Methodologically, three cartographic products were generated for the same area: the first product used high-resolution satellite imagery, with ortho-rectification performed through a pre-existing terrain model obtained from photogrammetric flight using LiDAR system and also RPC (Rational Polynomial Coefficients) data; the second used orthophotos and digital terrain models generated using conventional cartographic techniques, with images obtained from a manned aircraft equipped with a large-format aerial camera; and the third also used orthophotos and digital terrain models, generated using conventional cartographic techniques, but with images obtained from an unmanned aircraft equipped with a small-format aerial camera. Based on these experiments, the study proposed a protocol for the creation of cartographic products from the mentioned sources. The goal was to establish a production process that ensures the generation of high-quality products, which is one of the main contributions of the research. For the quality assessment process, national and international standards were used, combined with a large number of control points distributed across the study area and obtained with a GNSS system using the static relative method. The best results obtained for orbital images were compatible with products at a scale of 1:5000, while for products generated through airborne systems, scales of 1:500 and 1:1000 were achievable, all in relation to the national cartographic accuracy standard for digital products. This study represents an original contribution to the field of Transportation Engineering.

Keywords: Cartography, Aerial Survey, Accuracy, Spatial Resolution.



## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1	Diferença entre Acurácia/Exatidão e Precisão .....	37	
Figura 2	Etapas do processo fotogramétrico para geração de mapas cartográficos.....	39	
Figura 3	Conceito de geração de imagem sintética pelo método sincronizado .....	44	
Figura 4	Conceito de geração de imagem sintética pelo método sintópico.....	44	
Figura 5	Disposição das lentes em câmera digital de grande formato – DMC I .....	46	
Figura 6	Conceito de Sensor com CCD Linear .....	50	
Figura 7	Esquema LiDAR padrão de funcionamento .....	53	
Figura 8	Padrões de Escaneamento LiDAR .....	55	
Figura 9	LiDAR Topográfico e Batimétrico com câmeras digitais .....	57	
Figura 10	Etapas do processo fotogramétrico digital .....	67	
Figura 11	Definição altura de voo e altitude de voo .....	69	
Figura 12	Exemplo de plano de voo gráfico.....	71	
Figura 13	Exemplo de variação na sobreposição lateral .....	72	
Figura 14	Exemplo de sobreposição longitudinal .....	73	
Figura 15	Exemplo ângulo de deriva.....	74	
Figura 16	Exemplo de guinada aérea .....	75	
Figura 17	Exemplo efeito de Tilt, Inclinação do eixo ótico da câmera .....	75	
Figura 18	Definição de movimento de compensação angular .....	76	
Figura 19	Exemplo de sistema aerofotogramétrico digital instalado em uma aeronave .....	79	
Figura 20	Exemplo de gimbal para utilização em aeronaves não tripuladas .....	80	
Figura 21	Gráfico RMS Processamento de dados Inerciais utilizando base GNSS .....	86	
Figura 22	Gráfico RMS Processamento de dados Inerciais utilizando sistema PPP.....	86	
Figura 23	Gráfico RMS Processamento de dados Inerciais utilizando sistema RTX Centerpoint .....	87	
Figura 24	Parâmetros de atitude de um sensor colocado em plataforma aérea .....	89	
Figura 25	Elementos necessários para desenvolvimento das equações de colinearidade ....	91	
Figura 26	Comparação modelo digital de superfície com modelo digital de terreno ou elevação.....	99	
Figura 27	Exemplo perspectiva cônica .....	100	
Figura 28	Exemplo projeção ortogonal .....	101	
Figura 29(a)	Visada em perspectiva central	29(b) Visada Ortogonal .....	102
Figura 30	Sistema LiDAR modelo ORION H300.....		
Figura 31	Aeronave Cessna 206 utilizada na captura dos dados LiDAR.....	120	

Figura 32	Câmera aerofotogramétrica digital DMC I.....	122
Figura 33	Aeronave Piper Sêneca II utilizada na captura das imagens.....	123
Figura 34	Aeronave não tripulada modelo Phantom 4 PRO .....	124
Figura 35	Área de estudo e distribuição de pontos de controle.....	138
Figura 36	Exemplo de local inadequado para obtenção de ponto de controle .....	148
Figura 37	Distribuição dos Pontos de Controle para processamento da imagem orbital .....	149
Figura 38	Distribuição dos Pontos de Controle para processamento das imagens obtidas por aeronave tripulada.....	151
Figura 39	Áreas selecionadas para a realização do voo com aeronave não tripulada.....	153
Figura 40	Exemplo de ponto previamente sinalizado.....	154
Figura 41	Distribuição dos pontos para avaliação da ortofoto voo com aeronave não tripulada área 01 .....	172
Figura 42	Distribuição dos pontos para avaliação da ortofoto voo com aeronave não tripulada área 02.....	173
Figura 43	Resultado da diferença DSM aeronave não tripulada – DSM LiDAR área 01 .....	178
Figura 44	Histograma das diferenças DSM aeronave não tripulada – DSM LiDAR área 01.....	179
Figura 45	Resultado da diferença DSM aeronave não tripulada – DSM LiDAR área 02 .....	179
Figura 46	Histograma das diferenças DSM aeronave não tripulada – DSM LiDAR área 02.....	180
Figura 47	Análise das diferenças altimétricas em relação a ortofoto área 01 .....	181
Figura 48	Análise das diferenças altimétricas em relação a ortofoto área 02.....	181

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 RMS e desvio padrão resolução espacial de 20 cm (distribuição densa de PC) ...	23
Tabela 2 RMS e desvio padrão resolução espacial de 8 cm (distribuição densa de PC) .....	23
Tabela 3 RMS e desvio padrão resolução espacial de 20 cm (distribuição padrão de PC) ..	24
Tabela 4 RMS e desvio padrão resolução espacial de 8 cm (distribuição padrão de PC) .....	24
Tabela 5 Desvio padrão para vários sensores orbitais.....	31
Tabela 6 Características dos padrões de varredura.....	55
Tabela 7 Movimento angular em uma câmera com distância focal de 153 mm, em diferentes tempos de exposição, devido à rotação simultânea em $\omega$ e $\phi$ , não compensada com uma velocidade angular de $3^\circ / s$ .....	77
Tabela 8 Movimento angular, diferente tempo de exposição, devido à rotação em $\kappa$ , não compensada com uma velocidade angular de $3^\circ / s$ .....	77
Tabela 9 Resumo padrão de exatidão cartográfica.....	106
Tabela 10 Resumo padrão de exatidão cartográfica digital.....	107
Tabela 11 Resumo padrão de exatidão para grandes escalas segundo ASPRS .....	110
Tabela 12 Sugestão de padrão RMSE.....	111
Tabela 13 RMSE horizontal sugerido para dados LiDAR baseados na altura de voo .....	113
Tabela 14 Padrão de exatidão vertical para dados digitais de elevação .....	114
Tabela 15 Pontos de Controle obtidos por sistema GNSS.....	142
Tabela 16 Verificação dos dados LiDAR.....	146
Tabela 17 Resíduos dos pontos utilizados na imagem orbital, processo sem ortorretificação .....	150
Tabela 18 Resíduos dos pontos utilizados na imagem orbital, processo com ortorretificação .....	150
Tabela 19 Resumo dos cálculos levantamento topográfico área 01.....	156
Tabela 20 Resumo dos cálculos levantamento topográfico área 02.....	157
Tabela 21 Avaliação da imagem orbital georreferenciada através das efemérides do satélite .....	158
Tabela 22 Avaliação da imagem orbital georreferenciada através de pontos de controle e dados RPC do satélite .....	161
Tabela 23 Avaliação da imagem orbital georreferenciada através de pontos de controle e dados RPC do satélite e ortorretificação com dados LiDAR.....	163
Tabela 24 Avaliação da ortoimagem processo de ortorretificação com dados provenientes do voo fotogramétrico .....	167
Tabela 25 Avaliação da ortoimagem processo de ortorretificação com dados provenientes do voo LiDAR .....	169

Tabela 26 Avaliação dos dados voo aeronave não tripulada área 01 .....	175
Tabela 27 Avaliação dos dados voo aeronave não tripulada área 02 .....	176
Tabela 28 Resumo comparativo entre tecnologias utilizadas.....	185

## LISTA DE ABREVEATURAS E SIGLAS

ASPRS	<i>American Society for Photogrammetry and Remote Sensing</i>
CCD	<i>Charge Coupled Device</i>
CMOS	<i>Complementary Metal Oxide Semiconductor</i>
DGPF	<i>Deutsches Gesellschaft für Personalführung</i>
DIN	<i>Deutsches Institut für Normung</i>
DLR	<i>Deutsches Zentrum für Luft und Raumfahrt</i>
DNER	Departamento de Estrada de Rodagem
DNIT	Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes
DSG	Diretoria de Serviço Geográfico
EuroSDR	<i>European Organization of Spatial Data</i>
FBM	<i>Feature Based on Matching</i>
FMC	<i>Forward Motion Compensation</i>
FOV	<i>Field of View</i>
GIS	<i>Geographic Information System</i>
GNSS	<i>Global Navigation Satellite System</i>
GSD	<i>Ground Sample Distance</i>
HRSC	<i>High Resolution Stereo Camera</i>
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
ICAO	<i>International Civil Aviation Organization</i>
IMU	<i>Inertial Movement Unit</i>
MDT	Modelo Digital de Terreno
MDS	Modelo Digital de Superfície
MDE	Modelo Digital de Elevação
NASA	<i>National Aeronautics and Space Administration</i>
NOAA	<i>National Oceanic and Atmospheric Administration</i>
NSSDA	<i>National Standard for Spatial Data Accuracy</i>
PEC	Padrão de Exatidão Cartográfica
PEC-PCD	Padrão de Exatidão Cartográfica – Produtos Cartográficos Digitais
PPP	Posicionamento por Ponto Preciso
RFC	<i>Rational Function Coefficients</i>
RFM	<i>Rational Function Model</i>

RMSE	<i>Root Mean Square Error</i>
RPA	<i>Remotely Piloted Aircraft</i>
RPAS	<i>Remotely Piloted Aerial System</i>
RPC	<i>Rational Polynomial Coefficients</i>
SIG	<i>Sistema de Informações Geográficas</i>
SRTM	<i>Shuttle Radar Topography Mission</i>
UAS	<i>Unmanned Aerial Systems</i>
UAV	<i>Unmanned Aerial Vehicle</i>
USGS	<i>U. S. Geological Survey</i>
UTM	<i>Universal Transversa Mercator</i>
VHROS	<i>Very High Resolutions Optical Satellites</i>

## SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO .....	18
1.1	Estado da arte.....	21
1.1.1	Câmeras Aéreas Digitais de Grande Formato.....	21
1.1.2	Sistemas aéreos não tripulados.....	26
1.1.3	Imagens de satélite de alta resolução.....	29
1.2	Justificativa e Hipótese .....	32
1.3	Contribuição da Proposta.....	34
1.4	Objetivos .....	34
1.5	Estrutura da Tese .....	35
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....	36
2.1	Acurácia / Exatidão e Precisão .....	36
2.2	Sistemas de captura de dados .....	38
2.2.1	Sensores Passivos .....	39
2.2.2	Sensores Ativos .....	52
2.3	Imagens de Satélite.....	57
2.4	Processo Fotogramétrico .....	62
2.5	Etapas do processo aerofotogramétrico através de câmeras digitais. ....	64
2.6	Aquisição dos dados .....	67
2.6.1	Planejamento de voo .....	68
2.6.2	Execução do voo .....	74
2.6.3	Controle de Qualidade das fotos aéreas digitais.....	80
2.7	Processamento dos dados provenientes do voo fotogramétrico.....	83
2.7.1	Processamento dos dados do Sistema Inercial. ....	83
2.7.2	Processamento das Imagens brutas .....	87
2.7.3	Orientação Interior.....	88
2.7.4	Orientação Exterior .....	89
2.7.5	Equações de colinearidade.....	91
2.7.6	Correlação de Imagens Digitais .....	95
2.7.7	Aerotriangulação.....	96
2.8	Geração de Produtos Fotogramétricos .....	98
2.8.1	Modelo Digital de Elevação, de Terreno e de Superfície.....	98

2.8.2	Ortorretificação de Imagens.....	99
2.8.3	Geração de Mosaico ou Ortomosaicos.....	103
3	CONTROLE DE QUALIDADE DE PRODUTOS CARTOGRÁFICOS.....	104
3.1	Controle de Qualidade no Brasil.....	105
3.2	Controle de qualidade nos Estados Unidos.....	107
3.2.1	Classificação segundo a Sociedade Americana de Fotogrametria e Sensoriamento Remoto ( <i>American Society for Photogrammetry and Remote Sensing – ASPRS</i> ). 110	
4	MATERIAIS E MÉTODO.....	116
4.1	Materiais.....	116
4.1.1	<i>Software</i> .....	116
4.1.2	Sistema de Varredura Aerotransportado.....	119
4.1.3	Imageamento Orbital.....	121
4.1.4	Imageamento aéreo através de aeronave tripulada.....	122
4.1.5	Imageamento aéreo através de aeronave não tripulada.....	124
4.2	Método.....	125
5	EXPERIMENTOS E RESULTADOS.....	137
5.1	Área de Estudo.....	137
5.2	Avaliação dos pontos de controle e dados LiDAR.....	139
5.2.1	Avaliação dos pontos de controle.....	139
5.2.2	Avaliação dos dados LiDAR.....	146
5.3	Execução dos processos.....	148
5.3.1	Processamento de Imagem Orbital.....	148
5.3.2	Processamento de dados obtidos com aeronave tripulada.....	151
5.3.3	Processamento dados obtidos com aeronave não tripulada.....	152
5.4	Avaliação dos produtos gerados.....	157
5.4.1	Avaliação planimétrica da Imagem Orbital.....	158
5.4.2	Avaliação planialtimétrica da Ortofoto do voo executado com aeronave tripulada. 165	
5.4.3	Avaliação planialtimétrica da Ortofoto voo executado com aeronave não tripulada. 172	
6	DISCUSSÕES: PROTOCOLO DE PROCESSAMENTO, MELHORES RESULTADOS, COMPARAÇÃO DOS PRODUTOS E NORMAS VOLTADAS PARA TRANSPORTES.....	182
6.1	Normas relacionadas a área de Transportes.....	186



7	CONCLUSÕES.....	190
8	BIBLIOGRAFIA BÁSICA .....	194
9	ANEXOS .....	205

## 1 INTRODUÇÃO

A Cartografia Básica sempre foi considerada instrumento fundamental para a realização de planejamento urbano, rural, demarcação de territórios, implantação de infraestrutura, planejamento e projetos de estradas, controle e gestão ambiental (desmatamento / reflorestamento), instrumento de defesa nacional, entre outros.

Grande parte das informações de que necessitamos é de natureza geográfica (posição). Os mapas e as cartas são os meios de comunicação deste tipo de informação. Portanto, é fundamental o conhecimento das suas limitações quanto à aplicação, entendendo a relação entre suas fontes de origem e sua qualidade posicional.

Numerosas razões levam usuários a desistirem do uso das informações cartográficas, sendo que a principal delas é a limitação quanto à sua produção, principalmente devido aos custos envolvidos e a carência de normas atualizadas para sua avaliação. A rapidez no mapeamento digital automatizado faz com que as atividades de Planejamento Urbano apresentem vantagens, tais como a roteirização de linhas de transporte público (Leite *et al.*, 2012), o controle eficaz da manutenção da pavimentação urbana (Hansen, 2008), o auxílio no planejamento do adensamento urbano (Gregoletto; Zampieri, 2018), um maior controle nas questões fiscais (Leite; Rodrigues; Borges, 2018), auxílio no monitoramento de áreas de risco (Barbosa; Oliveira; Alves, 2011), entre outros. Os planejadores estão percebendo, enfim, que um mapa ou uma carta é o meio gráfico de fácil assimilação na representação e análise de informações espaciais. As técnicas de automatização possibilitam diagnosticar e simular situações, antes que elas fiquem ultrapassadas e desatualizadas (Costa, 2001).

Nas últimas duas décadas, a implantação de novas tecnologias e novos equipamentos utilizados para a geração de produtos cartográficos, resultou em um grande avanço na produção de informações georreferenciadas. Entre eles, a utilização de câmeras aéreas digitais, sistemas LiDAR e imagens de satélite de alta resolução causaram um impacto positivo nos processos cartográficos e de sensoriamento remoto, eliminando etapas do processo produtivo anteriormente

realizadas com câmeras analógicas. Estas câmeras digitais podem ser transportadas por aeronaves tripuladas ou não tripuladas. Estes equipamentos são utilizados por ciências como a Fotogrametria, a qual tem como objetivo principal obter informações sobre objetos físicos e o ambiente, a partir de fotografias e outras imagens obtidas através de sensores óticos ou sistemas LiDAR.

Como muitas outras disciplinas, a Fotogrametria sofre grande influência da ciência computacional e eletrônica, as quais nos últimos anos estiveram em constante processo de mudança. Isto se torna especialmente evidente na passagem dos métodos analógicos para analítico e digital (Schenk, 2005).

Atualmente, a maioria dos produtos cartográficos, gerados em território nacional, são produzidos através de sistemas digitais, tornando assim, as câmeras analógicas equipamentos obsoletos, apesar da importância que tiveram num passado recente.

Comum a outras áreas que estão em constante mudança, a passagem do processo analógico para o processo digital não veio acompanhada de mudanças nas normas técnicas. Os critérios utilizados, tanto para a especificação da qualidade, quanto para sua verificação, ainda seguem critérios estabelecidos para os produtos analógicos.

Destaca-se também a utilização de imagens orbitais de alta resolução como uma fonte de grande importância na geração e atualização de bases cartográficas, a qual passa também pela carência de definições claras quanto as suas possibilidades de uso e limitações.

Uma das grandes mudanças entre o processo totalmente digital e o processo analógico é o conceito de escala. No caso de produtos gerados a partir de dados capturados por câmeras analógicas, a definição da escala de voo estabelece basicamente a relação entre a escala do produto gerado, a sua exatidão posicional e, conseqüentemente, a utilização dos produtos gerados através destas imagens aéreas.

Na utilização das câmeras aéreas digitais, o conceito de escala de voo não é mais aplicado, pois as características do produto final gerado tem relação direta com a resolução espacial da imagem capturada, isto é, com o GSD (*Ground Sample*

*Distance*) aproximado da imagem, o qual está relacionado aos parâmetros do sensor e a altura de voo (Kasser, 2002).

Como citado anteriormente, não se tem ainda uma definição que relacione o GSD da imagem capturada, com a qualidade posicional do produto. Em muitos casos, as especificações técnicas utilizadas para contratação de produtos cartográficos estabelecem critérios aleatórios, os quais podem acarretar aumento de custo ou ainda produtos de qualidade inferior. Desse modo, os produtos cartográficos são gerados independentemente da carência de normas ou protocolos que definam de maneira clara as suas limitações, as vantagens e desvantagens das fontes utilizadas, como é o caso das imagens orbitais.

As imagens orbitais comumente são utilizadas como fonte para a atualização de bases cartográficas em pequenas e grandes escalas. A aerofotogrametria digital realizada através de aeronave tripulada passa, atualmente, a concorrer com a utilização de aeronaves não tripuladas. Estudos que retratam as vantagens e desvantagem econômicas e técnicas não abordam estes temas de maneira clara. Nesses casos, por mais que cada produto tenha finalidade e custo-benefício distintos, todos devem ser geometricamente confiáveis. Portanto, a criação de novos protocolos se faz necessária a fim de que se estabeleçam as limitações e critérios técnicos para utilização das diversas fontes na geração dos produtos cartográficos digitais, principalmente em áreas específicas da Engenharia, como é o caso da Engenharia Civil com ênfase em projetos de infraestrutura.

Atualmente, existe um estudo feito pela Diretoria de Serviço Geográfico do Exército (DSG) a respeito da criação de norma para a especificação técnica de aquisição de dados geoespaciais vetoriais de defesa da força terrestre. Porém, apesar desse trabalho executado pelo Exército, tratar de dados digitais, ele não contempla o tema aqui abordado, trazendo somente um complemento ao Decreto nº 89.817, de 20 de junho de 1984 desenvolvido para produtos analógicos.

Desta forma, nesta pesquisa, foram abordadas as técnicas de geração de produtos cartográficos, utilizando-se de imagens orbitais e imagens aéreas digitais, com resoluções geométricas distintas, obtidas por meio de sensores, acoplados a aeronaves tripulada e não tripulada, e ainda a sugestão de um protocolo que

estabeleça os procedimentos técnicos a serem realizados tanto na produção quanto na avaliação dos produtos.

## **1.1 Estado da arte**

A grande variedade de sensores disponíveis no mercado promove dificuldades na definição de normas e protocolos que estabeleçam critérios claros quanto a sua utilização. Com o advento de novas tecnologias, passamos a ter acesso à diversidade de insumos utilizados na criação e atualização de mapas cartográficos, tais como: imagens de satélite com resoluções espaciais diversas, podendo variar de 0,30 metros até 30 metros; sensores aerotransportados com capacidades de coberturas distintas, como é o caso das câmeras aéreas de pequeno e grande formato; e ainda, a possibilidade de utilização de sistemas aéreos não tripulados, equipados com sensores ativos ou passivos de pequeno porte, criados especificamente para a utilização em mapeamento, os quais passaram a ser utilizados de maneira sistemática na geração de mapas cartográficos.

Esse avanço tem motivado estudos voltados à definição de métodos, processos e regras para o controle da qualidade dos produtos gerados através destas novas tecnologias. Nesta seção, serão apresentados trabalhos relacionados à pesquisa em questão, que envolvem a avaliação de imagens aéreas obtidas por câmeras digitais transportadas por aeronaves tripuladas, por aeronaves não tripuladas e sobre imagens orbitais.

### **1.1.1 Câmeras Aéreas Digitais de Grande Formato.**

O processo de transição na geração de cartografia com a utilização de câmeras aéreas analógicas para câmeras aéreas digitais foi motivo para que a Sociedade Alemã de Fotogrametria, Sensoriamento Remoto e Geoinformação (DGPF), no ano de 2008, iniciasse estudo de avaliação de forma abrangente das câmeras aéreas digitais.

Esse estudo envolveu a análise de oito câmeras, sendo três câmeras digitais de grande formato, que utilizam a tecnologia de frame (DMC I, Ultracam X e Quattro DigiCAM), duas câmeras digitais de grande formato, que utilizam a tecnologia de varredura linear - *pushbroom* (ADS40 e JAS150), duas câmeras digitais de médio

formato (AIC-x1 e DLR 3k) e uma câmera de grande formato analógica (RMK Top), utilizada para comparações entre o material digital e o analógico. Também foram utilizados dois sensores hiper espectrais (AISA Specim e ROSIS) e um sistema LiDAR (*Light Detection And Ranging*) (ALS 50) para a obtenção de modelos tridimensionais.

O intuito desse trabalho foi avaliar a qualidade geométrica e radiométrica da tecnologia digital, bem como a capacidade de geração de modelos tridimensionais de superfície e os pares estereoscópicos das imagens obtidas através dos sensores digitais. A pesquisa em questão não teve como foco a comparação da qualidade dos equipamentos produzidos pelos diferentes fabricantes (Cramer, 2009a).

Os voos avaliados no estudo, foram realizados considerando duas resoluções geométricas nominais, 20 centímetros e 8 centímetros. Uma malha densa de pontos de controle (PC) e verificação (ChP) foi distribuída ao longo da área para utilização na avaliação dos produtos. A área teste, situada na cidade alemã de Vaihingen, próxima a Stuttgart, foi composta por aproximadamente 200 pontos de controle sinalizados e distribuídos em uma região de 7,5 km por 4,8 km, tendo uma área central com uma maior concentração de pontos de controle com aproximadamente 5,1 km x 2,8 km. Esta área central foi utilizada para avaliação dos materiais com resoluções nominais de 8 centímetros (Cramer, 2009a).

Os resultados obtidos são apresentados nas Tabelas 1, 2, 3 e 4. Destaca-se que nas Tabelas 1 e 2 o número elevado de pontos de controle utilizados na geração dos produtos não reflete a realidade de projetos comerciais, mas que possibilitam a análise mais detalhada da qualidade geométrica, possível de se atingir com os equipamentos e *software* utilizados. Já as Tabelas 3 e 4 apresentam os resultados obtidos utilizando um número de pontos de controle adequado à realidade dos projetos comerciais.

Tabela 1 RMS e desvio padrão resolução espacial de 20 cm (distribuição densa de PC)

Bloco de Imagens	# PC / ChP	RMS (m)			Desvio Padrão (m)		
		$\Delta X$	$\Delta Y$	$\Delta Z$	$\sigma X$	$\sigma Y$	$\sigma Z$
RMK - 47 fotos	70 / 116	0,03	0,04	0,05	0,03	0,04	0,07
RMK - 47 fotos + GPS	82 / 66	0,04	0,04	0,10	0,03	0,03	0,05
DMC - 60 fotos	70 / 114	0,03	0,04	0,08	0,02	0,02	0,06
Ultracam-X - 52 fotos	70 / 112	0,03	0,03	0,07	0,02	0,02	0,06
DigiCam 188 fotos	70 / 116	0,04	0,05	0,09	0,02	0,03	0,09
DigiCam 188 fotos + GPS/IMU	109 / 73	0,05	0,05	0,08	0,03	0,03	0,07

Fonte: Adaptado de Cramer (2009a)

Tabela 2 RMS e desvio padrão resolução espacial de 8 cm (distribuição densa de PC)

Bloco de Imagens	# PC / ChP	RMS (m)			Desvio Padrão (m)		
		$\Delta X$	$\Delta Y$	$\Delta Z$	$\sigma X$	$\sigma Y$	$\sigma Z$
RMK - 74 fotos	60 / 48	0,02	0,02	0,03	0,01	0,02	0,03
RMK - 74 fotos + GPS	60 / 48	0,02	0,02	0,03	0,01	0,02	0,03
DMC - 136 fotos	60 / 47	0,02	0,02	0,04	0,01	0,01	0,02
Ultracam-X - 215 fotos	60 / 50	0,01	0,02	0,04	0,01	0,01	0,02
DigiCam 784 fotos	60 / 50	0,02	0,02	0,03	0,01	0,01	0,02

Fonte: Adaptado de Cramer (2009a)

Tabela 3 RMS e desvio padrão resolução espacial de 20 cm (distribuição padrão de PC)

Bloco de Imagens	# PC / ChP	RMS (m)			Desvio Padrão (m)		
		$\Delta X$	$\Delta Y$	$\Delta Z$	$\sigma X$	$\sigma Y$	$\sigma Z$
RMK - 47 fotos	14 / 82	0,12	0,13	0,08	n.a.	n.a.	n.a.
DMC - 60 fotos	09 / 95	0,04	0,06	0,06	n.a.	n.a.	n.a.
DMC - 42 fotos + GPS/IMU	04 / 180	0,04	0,07	0,11	0,03	0,04	0,10
Ultracam-X - 52 fotos	09 / 99	0,08	0,08	0,08	n.a.	n.a.	n.a.
Ultracam-X - 36 fotos + GPS/IMU	04 / 180	0,06	0,06	0,15	0,02	0,03	0,09
DigiCam 132 fotos + GPS/IMU	04 / 161	0,07	0,10	0,27	0,03	0,04	0,10

Fonte: Adaptado de Cramer (2009a)

Tabela 4 RMS e desvio padrão resolução espacial de 8 cm (distribuição padrão de PC)

Bloco de Imagens	# PC / ChP	RMS (m)			Desvio Padrão (m)		
		$\Delta X$	$\Delta Y$	$\Delta Z$	$\sigma X$	$\sigma Y$	$\sigma Z$
RMK - 47 fotos	14 / 40	0,02	0,04	0,05	n.a.	n.a.	n.a.
DMC - 60 fotos	09 / 45	0,03	0,03	0,04	n.a.	n.a.	n.a.
DMC - 42 fotos + GPS/IMU	04 / 113	0,03	0,04	0,05	0,01	0,02	0,03
Ultracam-X - 52 fotos	09 / 99	0,04	0,07	0,04	n.a.	n.a.	n.a.
Ultracam-X - 36 fotos + GPS/IMU	04 / 111	0,06	0,03	0,04	0,01	0,01	0,03
DigiCam 132 fotos + GPS/IMU	04 / 114	0,04	0,07	0,08	0,01	0,01	0,03

Fonte: Adaptado de Cramer (2009a)

Nas linhas em que aparece a sigla “n.a.”, significa que os resultados não foram apresentados pelos responsáveis do processamento. Para o caso dos testes realizados com um número elevado de pontos de controle, tabelas 1 e 2, pode-se concluir que o resultado obtido com todos os sensores é muito similar, o RMS para a



componente planimétrica é de aproximadamente  $\frac{1}{4}$  do tamanho do *pixel*, colunas  $\Delta X$  e  $\Delta Y$  tanto para o voo de 20 centímetros quanto para o voo de 8 centímetros de resolução espacial, sendo que para a componente vertical, coluna  $\Delta Z$ , pode-se verificar um RMS próximo a  $\frac{1}{2}$  *pixel* (Cramer, 2009a).

Nos resultados obtidos com uma distribuição de pontos próxima a realidade de projetos comerciais, tabelas 3 e 4, nota-se que para a componente planimétrica a avaliação do RMS foi de cerca  $\frac{1}{2}$  do tamanho do *pixel*, colunas  $\Delta X$  e  $\Delta Y$ , enquanto que para a componente vertical, coluna  $\Delta Z$ , os resultados ficaram em torno de 1 *pixel*, para os dados com resolução espacial nominal de 8 centímetros, tabela 4, e em  $\frac{1}{2}$  do tamanho do *pixel*, coluna  $\Delta Z$ , para os dados com resolução espacial de 20 centímetros, tabela 3, exceção feita aos testes realizados com a câmera Ultracam-X, utilizando os dados de GPS/IMU e com a câmera DigiCam para 132 fotos, também utilizando-se os dados GPS/IMU.

Na tabela 3, a precisão horizontal (RMS), colunas  $\Delta X$  e  $\Delta Y$ , das imagens utilizando a câmera RMK (analógica), linha RMK – 47 fotos, para a resolução espacial de 20 centímetros, é pior em comparação com outros testes realizados com os sensores digitais. Isso pode ser influenciado pela identificação e medição com menor qualidade do ponto de imagem nas imagens analógicas digitalizadas, devido à menor resolução radiométrica (imagens digitalizadas) (Cramer, 2009a).

Assim, pode-se concluir que as câmeras aéreas digitais analisadas, quando comparadas a câmeras aéreas analógicas, possuem qualidade geométrica igual ou superior para a utilização em processos fotogramétricos, apresentando vantagens quanto ao processo de produção de materiais cartográficos.

Outro estudo para avaliar a qualidade das câmeras digitais, foi realizado pela Agência Europeia de Pesquisa de Dados Espaciais (EuroSDR). Verificou-se os processos e qualidade da calibração dessas câmeras, obtendo-se resultados de alta qualidade quando comparados aos processos que utilizam câmeras analógicas (Cramer, 2009b).

Porém, independentemente destes estudos, nota-se que a grande maioria das técnicas e padrões existentes utilizados para a geração de produtos cartográficos

ainda remonta aos processos analógicos, necessitando assim, um maior aprofundamento na aplicação e utilização das câmeras digitais.

Como exemplo, podemos citar as instruções de serviços IS-204 e IS-205 elaboradas pelo DNIT e pertencentes ao documento normativo DNIT/IPR-726-2006, que fazem menção a produtos gerados através de tecnologia analógica e referência a geração dos produtos baseada nas escalas de voo (Brasil, 2006)

Outro aspecto relevante é que o DNIT, através da Coordenação-Geral de Desenvolvimento e Projetos (CGDESP), órgão subordinado à Diretoria de Planejamento e Pesquisa (DPP), lançou em janeiro de 2018 o Guia de Análise de Projetos de Rodovias, pelo qual as instruções de serviços IS-204 e IS-205 não sofreram atualização, e, desta forma, apresentam as mesmas deficiências apontadas anteriormente (Brasil, 2018).

Como relatado, apesar de atualmente a totalidade dos projetos de mapeamento aéreo e orbital, serem desenvolvidos através de técnicas totalmente digitais, continuamos a nos deparar com menções a produtos analógicos e suas normas.

### **1.1.2 Sistemas aéreos não tripulados.**

Outra grande evolução, a qual o processo de geração de produtos cartográficos vem atravessando, é a utilização de sistemas aéreos não tripulados. A Fotogrametria moderna e o Sensoriamento Remoto identificaram o potencial das imagens originadas por veículos aéreos não tripulados há mais de trinta anos.

Nos últimos cinco anos, no Brasil, essas duas disciplinas irmãs desenvolveram tecnologia e métodos que desafiaram a atual estrutura regulatória aeronáutica e seus próprios métodos tradicionais de aquisição e processamento. Neste sentido, várias iniciativas foram tomadas junto ao Ministério da Defesa, órgão responsável por regulamentar e fiscalizar as atividades de aerolevanteamento no Brasil. Este estabeleceu critério e regulamentou uma lista, contendo as plataformas aéreas não tripuladas e sensores aprovados para a utilização em projetos de aerolevanteamentos (Brasil, 2020).

Já o controle das áreas de voo, altitude e regulamentação dos operadores são definidas pela Agencia Nacional de Aviação Civil (ANAC) através do regulamento RBAC-E número 94 (ANAC, 2017).

Os sistemas aéreos não tripulados são conhecidos por diferentes nomes ou acrônimos, tais como: Drone, *Unmanned Aerial Vehicle* (UAV), *Unmanned Aerial Systems* (UAS) adotado pelo Departamento de Defesa dos Estados Unidos e pela Autoridade de Aviação Civil do Reino Unido, *Remotely-Piloted Aerial System* (RPAS), nomenclatura introduzida pela Organização Internacional de Aviação Civil (ICAO) através da circular 328 (International Civil Aviation Organization, 2011), sendo este termo adotado pelo fato de que somente RPAS (*Remotely Piloted Aircraft System*) seria capaz de integrar o sistema internacional de aviação civil (Colomina; Molina, 2014).

A Agência Nacional de Aviação Civil (ANAC) passou a adotar o termo Aeronave Remotamente Pilotada (*Remotely Piloted Aircraft* – RPA) para a aeronave não tripulada pilotada a partir de uma estação de pilotagem remota, com finalidade diversa a de recreação, e passou a utilizar também a sigla RPAS para o conjunto composto entre a aeronave, o sistema de controle, o link de rádio, ou qualquer outro componente integrante ao conjunto (ANAC, 2017). Neste trabalho será adotado o termo “sistemas aéreos não tripulados”.

Os sistemas aéreos não tripulados utilizados para Fotogrametria podem ser descritos como plataformas aéreas operadas de maneira remota, semiautônoma ou totalmente autônoma, logicamente sem um piloto no veículo. A plataforma deve ser equipada com um sistema fotogramétrico, podendo este ser uma câmera RGB, sensor infravermelho, sensor termal, sistema LiDAR ou ainda uma câmera hiperespectral, por exemplo (Henri, 2009).

Estes sistemas aéreos não tripulados envolvem um conjunto de outros sistemas tais como: o veículo não tripulado, sua estação de controle, o link de comunicação, sensores de navegação, sensores de imagem e servos mecânicos, sejam eles veículos de asas fixas ou de asas rotativas (Colomina; Molina, 2014).

A ANAC classifica os veículos de acordo com seu peso máximo de decolagem, dividindo em 3 classes distintas: Classe 1, para veículos com peso

máximo de decolagem acima de 150 kg; Classe 2, para veículos com peso máximo de decolagem entre 25 kg e menor ou igual a 150 kg e; Classe 3, para veículos com peso de decolagem menor ou igual a 25 kg.

Atualmente, os sistemas aéreos não tripulados são utilizados para diversas finalidades, além da produção de insumos cartográficos, como inspeções de estruturas diversas (Shibasakim, 2019), monitoramento ambiental (Gálvez *et al.*, 2014), monitoramento agrícola (Beté; Conti, 2018), auxílio ao sistema de segurança (Andrejevic, 2015) entre outros. Porém, quando utilizado para fins fotogramétricos, uma atenção especial deve ser dada ao sensor aéreo utilizado, ou seja, a componente que irá capturar os dados ou imagens é de fundamental importância.

Além do sensor, outro componente fundamental é o sistema de movimentação inercial, este deve ser composto por uma unidade de medida inercial acoplada ao Sistema Global de Navegação por Satélite (GNSS – *Global Navigation Satellite System*) e *software* de controle, haja visto que, caso não esteja presente, devido ao grande volume de dados obtidos, o processamento fotogramétrico ficará prejudicado, necessitando a extração de um grande número de pontos de controle em campo.

Conforme o exposto, vários estudos demonstram a possibilidade de utilização de aeronaves não tripuladas para a geração de insumos cartográficos. Na sua maioria envolvem aeronaves comerciais de baixo custo, quando comparadas a aeronaves tripuladas. É importante destacar que esta pesquisa não tem o objetivo de comparar aeronaves não tripuladas de grande porte, como é o caso do sistema Volodrone desenvolvido pela empresa Volocopter, que tem em sua especificação técnica a capacidade de carga de até 200 kg. Sendo que estas aeronaves ainda não estão homologas para usos comerciais.

Estudo realizado por Colomina e Molina (2014) percorrem todas as componentes dos sistemas aéreos não tripulados na geração de cartografia: sistemas de navegação, sistemas de orientação (GNSS/IMU), sensores ativos, sensores passivos e processamento de dados, sendo este trabalho revisado e atualizado em 2019 (Yao; Qin; Chen, 2019).

Outros estudos compararam imagens obtidas através de sistemas aéreos não tripulados com imagens de satélite de alta resolução para a geração de mapas temáticos (Iizuka *et al.*, 2018), neste caso foram criados mapas de uso e cobertura do solo através de imagens provenientes do satélite ALOS 2 e comparadas a imagens obtidas por aeronaves não tripuladas, onde o nível de acerto na classificação foi de 78,1% e 92,3% respectivamente.

Estudos envolvendo a geração de modelos digitais de terreno e de superfície através de sistema LiDAR, transportado em aeronave não tripulada, foram desenvolvidos por Pilarska *et al.* (2016), destacando a importância do sistema inercial quando da utilização deste tipo de aeronaves.

Já em Rhee e Kim (2015), são apresentados os resultados da geração automática de modelos digitais de superfície e ortoimagens obtidas através de veículos aéreos não tripulados, chegando a atingir produtos com RMS de 1,5 metros.

No entanto, ao analisar os trabalhos, nota-se que projetos cartográficos envolvendo áreas com dimensões elevadas, a utilização de aeronave não tripuladas de pequeno porte deixam dúvidas quanto à qualidade e à viabilidade de sua aplicação. Dessa forma, são necessários estudos para verificação de qualidade, assim como níveis de precisão relacionados à diferentes etapas de projetos de Engenharia.

### **1.1.3 Imagens de satélite de alta resolução.**

A resolução espacial do imageamento óptico oriundo de satélites artificiais, atualmente, sobrepõe-se à resolução de imagens aéreas obtidas através de câmeras aéreas digitais. A qualidade radiométrica e geométrica das imagens de satélite podem ser comparada às imagens aéreas digitais, e, em vários casos, levando-se em consideração o aspecto radiométrico, estas apresentam vantagem quando comparadas as fotos analógicas (Jacobsen, 2011).

As imagens de satélite são utilizadas tanto na geração quanto na atualização de mapas cartográficos, tornando-se assim um insumo importante no processo de produção cartográfica. Alguns autores passaram a utilizar o termo em inglês “*very high resolution optical satellites*” (VHROS) para definirem imagens de

satélite com resolução espacial melhor que 1 metro. Neste trabalho, consideramos o termo “alta resolução” como definição para estas imagens.

Normalmente, utiliza-se a relação de 0,1 mm da escala do mapa final para a definição da resolução espacial da fonte (imagem) a ser utilizada na geração do produto final (mapa) (Jacobsen; Buyuksalih; Baz, 2008). Isto quer dizer que, para obtermos um mapa que tenha a exatidão compatível com produtos na escala 1:10.000, é necessário que a fonte a ser utilizada tenha ao menos a resolução de 1 metro. Já no caso de mapas na escala 1:5.000, a resolução espacial deverá ser de ao menos 0,50 metros (Jacobsen; Buyuksalih; Baz, 2008), não sendo este o único fator a ser considerado quando se deseja atingir determinados parâmetros de exatidão.

Vários estudos, utilizando-se de diferentes métodos foram realizados para definição das exatidões dos mapas gerados através de imagens de satélite. Diversas pesquisas ao redor do mundo foram executadas com a intenção de melhoria na precisão das imagens de satélite baseadas no ajuste de blocos sem a utilização de pontos de controle, em que vários métodos foram propostos (Cao *et al.*, 2019).

Processos com a utilização de pontos de controle, aliados aos modelos de terreno existentes, podem atingir produtos compatíveis com os mapas em escalas entre 1:5.000 e 1:10.000 (Jacobsen; Buyuksalih; Baz, 2008). Ou ainda, quando da utilização de imagens *QuickBird*, chegam a atingir produtos com exatidão compatível a escala 1:3.000 para o PEC classe A (Amorim; Camargo; Miyashita, 2010).

Estudos envolvendo a criação de modelos de terreno, através da utilização de pares estéreos de imagens WorldView-2 e GeoEye-1, geraram resultados com desvio padrão entre 6 e 8 metros, utilizando modelos LiDAR como fonte de comparação (Agugiaro; Poli; Remondino, 2012). Estudos utilizando as imagens Plêiades (satélites de alta resolução) para a geração de modelos de terreno e ortomagens também foram desenvolvidos, chegando a atingir RMS próximos a 1 metro (Maillet; Flamanc, 2004). Outro estudo, propondo um modelo rigoroso de ortoretificação em imagens, atingiu valores de RMS abaixo de um metro (Deltsidis; Ioannidis, 2011).

Os estudos baseados na orientação de imagens, utilizando somente os parâmetros RPC (*Rational Polynomial Coefficients*), sem a utilização de pontos de

controle ou modelo de terreno e apresentado por Jacobsen (2011), obtiveram os resultados descritos na tabela 5, a seguir:

Tabela 5 Desvio padrão para vários sensores orbitais

<b>Sensor</b>	<b>Desvio Padrão (X, Y)</b>
IKONOS	4,0 metros
QuickBird	9,0 metros
Orbview-3	3,0 metros
WorldView-1	2,0 metros
WorldView-2	3,0 metros
GeoEye-1	2,0 metros

Fonte: Adaptado de Jacobsen (2011)

Processos com a utilização de modelos de terreno pré-existent e, ainda, a retificação através dos parâmetros de RPC (*Rational Polynomial Coefficients*), no intuito de geração de mapas cartográficos, utilizando-se imagens orbitais, podem ser avaliados em Widyaningrum; Fajari; Octariady (2016), Agrafiotis e Georgopoulos (2015), D'Angelo e Reinartz (2012), Kim; Kim; Seo (2012), Kornus *et al.* (2015), e Dubey; Kartikeyan; Subbiah (2019).

A atualização de mapas existentes, em escalas variando de 1:2.500 até 1:10.000, também são fontes de estudo e são apresentadas em Alrajhi; Jacobsen; Heipke (2013) e Alrajhi *et al.* (2016).

Apesar de todos estes estudos, devido à grande diversidade nas características técnicas dos diversos satélites disponíveis comercialmente, não existem normas técnicas ou procedimentos padronizados que relacionem as características das imagens de satélite ao produto cartográfico final. Há também uma carência de estudos relacionados à área de Engenharia e Transportes – foco dessa tese.

## 1.2 Justificativa e Hipótese

Com o advento das tecnologias digitais, poucas foram as iniciativas de definição de padronização de processos e estabelecimento de normas para o controle de qualidade dos produtos gerados. Muitas vezes, isso se deve à grande variedade de sensores disponíveis, sejam eles transportados através de satélites orbitais, aeronaves tripuladas ou não.

Tecnologias recentes, como o uso de aeronaves não tripuladas, carecem de padronização, e mesmo tecnologias consagradas, como a utilização de aeronaves tripuladas, valem-se de padrões e normas desenvolvidos para imagens obtidas através de câmeras analógicas. No caso das imagens orbitais, ressalta-se que ainda não há uma referência que relacione a resolução espacial com a exatidão que se pode alcançar, nem tão pouco quais são os limites técnicos de sua utilização quando da geração de mapas cartográficos.

Entende-se que imagens orbitais, imagens obtidas por sensores aerotransportados e imagens obtidas por veículos aéreos não tripulados, são tecnologias complementares e podem cada qual assumir uma etapa de projetos de Engenharia. Por exemplo, imagens orbitais podem ser utilizadas na geração de cartografia para estudos básicos, imagens obtidas por sensores aerotransportados são utilizadas para a confecção de produtos utilizados em projetos executivos, e ainda, veículos aéreos não tripulados podem ser aplicados em pontos específicos do projeto, em que a necessidade de um maior detalhamento se faz presente (ou de mapeamento sistemático), e que o custo de levantamentos topográficos convencionais ou ainda a utilização de aeronave tripulada não se justificam.

Verifica-se claramente uma carência nas normas e especificações técnicas utilizadas para demandar projetos, quando se trata da área de transportes, tanto em nível federal quanto estadual, no caso específico do DNIT (Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes) e do DER/SP (Departamento de Estradas de Rodagem), respectivamente.

Algumas instituições internacionais publicaram normas e diretrizes, numa tentativa de padronização, como a DIN (*Deutsches Institut für Normung*), que em 2017, publicou a norma DIN 18716 que estabeleceu os termos e definições utilizados



em Fotogrametria e Sensoriamento Remoto e, as normas 18740-3, no ano de 2015, voltada para a avaliação de ortofotos digitais, e a norma 18740-4, no ano de 2007, que trata da avaliação de câmeras aéreas digitais.

A USGS (*United States Geological Survey*) lançou, em 2006, um plano de certificação para fabricantes e usuários de sensores aerofotogramétricos digitais, e a EuroSDR (*European Organization of Spatial Data*) trabalha para gerar uma certificação europeia (EuroDAC2), criando comissões específicas para a aquisição de dados, de modelagem e processamento, de atualização e integração, entre outras.

Neste momento não existem estudos que definam o uso específico ou limitação dessas três fontes, sendo que, recentemente a ASPRS lançou o Padrão de Acurácia Posicional para Dados Digitais Geoespaciais em sua segunda edição (ASPRS, 2023). Nela pode-se encontrar apenas recomendação que associe o RMS ao GSD da fonte digital utilizada, com o objetivo de orientar os usuários na transição dos padrões anteriores para os padrões modernos:

As associações recomendadas de RMSE horizontal e GSD apresentadas nesta norma têm como objetivo orientar os usuários na transição de padrões anteriores para padrões modernos. Essas associações podem mudar no futuro à medida que as tecnologias de mapeamento continuam a avançar e a evoluir. Esta norma não endossa o uso de GSD, escala de mapa ou intervalo de contorno para expressar a precisão do produto. (ASPRS, 2023).

O Padrão de Acurácia Posicional para Dados Digitais Geoespaciais também alerta para a falta de critério na definição da quantidade e forma de distribuição de pontos de verificação, para controle de qualidade dos produtos gerados:

Não existe atualmente uma metodologia quantitativa para caracterização e especificação da distribuição espacial dos pontos de controle, tendo em conta o tipo de cobertura do solo e a forma do projeto. Até que tal metodologia seja desenvolvida e aceita, a densidade e distribuição dos pontos de controle devem basear-se em resultados empíricos e em métodos simplificados baseados em áreas. (ASPRS, 2023).

Desta maneira, em relação aos trabalhos analisados anteriormente, avaliando suas características e limitações, a pesquisa em questão apresenta a seguinte hipótese:

*“É possível estabelecer procedimentos, limites, vantagens e desvantagens técnicas utilizando três fontes diferentes de imagens digitais: orbital, aérea tripulada e aérea não tripulada, através de técnicas convencionais de Fotogrametria, na geração de mapas cartográficos em grandes escalas 1:500 até 1:10.000, para a utilização em projetos de Engenharia na área de Transportes.”*

### **1.3 Contribuição da Proposta**

A presente proposta visa apresentar uma padronização de etapas para a criação de produtos cartográficos, executados de maneira totalmente digital, através da avaliação de ortofotos, geradas com dados coletados através de câmera aérea digital, transportada por aeronave tripulada, aeronave não tripulada e também através de ortoimagens obtidas com a utilização de imagem orbital (satélite) de alta resolução. O objetivo é estabelecer limites entre a resolução espacial dos insumos básicos (imagens) e a qualidade planialtimétrica dos produtos. Considerando que essas tecnologias são complementares, será possível avaliar e discutir as áreas de sobreposição e a viabilidade técnica na utilização de cada processo, determinando até onde a utilização de um insumo se sobrepõe tecnicamente em relação ao outro.

### **1.4 Objetivos**

Este trabalho tem como objetivo a avaliação da exatidão planimétrica e altimétrica de três produtos cartográficos, gerados por meio de três fontes distintas: imagens orbitais de alta resolução, fotos aéreas obtidas com aeronave tripulada e fotos aéreas obtidas através de aeronave não tripulada.

Por meio dos materiais obtidos, foram avaliadas as influências de diferentes parâmetros na obtenção das imagens e na geração de produtos cartográficos. Uma rotina de tarefas e cuidados para que usuários possam replicar o protocolo desenvolvido e ainda as aplicações passíveis de serem executadas com cada produto gerado (orbital, aéreo tripulado e aéreo não tripulado) foram propostas.

Para isso, conforme citado, foram avaliados três produtos cartográficos gerados sobre a mesma área de estudo. O primeiro, utilizando imagem de satélite de alta resolução, executando o processo de ortorretificação, através de modelo de terreno pré-existente, proveniente de voo fotogramétrico equipado com sistema LiDAR, e dos dados de RPC (*Rational Polynomial Coefficients*).

O segundo e o terceiro produtos foram ortofotos e modelos digitais de terrenos, utilizando-se técnicas convencionais de cartografia, com a diferenciação de que, as imagens para o segundo produto foram obtidas através de aeronave tripulada equipada com câmera aérea de grande formato, e para o terceiro produto as imagens foram obtidas através de aeronave não tripulada, equipada com câmera aérea de pequeno formato.

A pesquisa através desses experimentos, propôs um protocolo de elaboração dos produtos cartográficos, gerados através das fontes descritas acima, procurou estabelecer processos que assegurem a geração de produtos de alta qualidade, avaliando as etapas de geração desses produtos e as aplicações passíveis de serem executadas com cada produto gerado (orbital, aéreo tripulado e aéreo não tripulado).

Todos os produtos gerados utilizaram da técnica de georreferenciamento direto e indireto, utilizando pontos de controle obtidos em campo, com o posicionamento via GNSS, através do método relativo estático. A qualidade dos produtos foi avaliada utilizando-se das normas brasileiras PEC-PCD (Padrão de Exatidão Cartográfica para Produtos Digitais) e a norma americana FGDC-STD-007, de 1998, em conjunto com o Padrão de Acurácia Posicional para Dados Digitais Geoespaciais, lançado em 2014 pela ASPRS (*American Society for Photogrammetry and Remote Sensing*) (ASPRS, 2014) e atualizado em fevereiro de 2023 através da sua segunda edição (ASPRS, 2023).

## **1.5 Estrutura da Tese**

Esta tese está dividida em seis capítulos. No Capítulo 1, são abordados os estudos e técnicas utilizados na atualidade para a geração de cartográfica com a utilização das fontes citadas.

O Capítulo 2 traz a fundamentação teórica para definição dos processos utilizados, desde os cuidados no planejamento, os problemas que devem ser evitados durante a captura dos dados e as técnicas de processamento. Ainda, uma breve descrição do termo acurácia, utilizado em larga escala no meio da Engenharia Cartográfica, é apresentada.

Já o Capítulo 3 trata das normas nacionais e internacionais (americanas) utilizadas para a verificação do controle de qualidade.

No Capítulo 4 são apresentados os materiais e métodos utilizados na realização dos experimentos, com destaque para os equipamentos, as imagens e os *software* utilizados.

O Capítulo 5 trata da área de estudo, os experimentos e resultados obtidos, bem como a sua avaliação de qualidade posicional.

O Capítulo 6 apresenta uma proposta de protocolo para a realização dos produtos discutidos neste trabalho. Nas conclusões finais são retomadas a hipótese do trabalho, apontando sua validação ou não nesta tese.

## **2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

Nesta seção são apresentados conceitos básicos da Fotogrametria e Sensoriamento Remoto, bem como a definição do termo acurácia, utilizado principalmente na ciência Cartográfica.

### **2.1 Acurácia / Exatidão e Precisão**

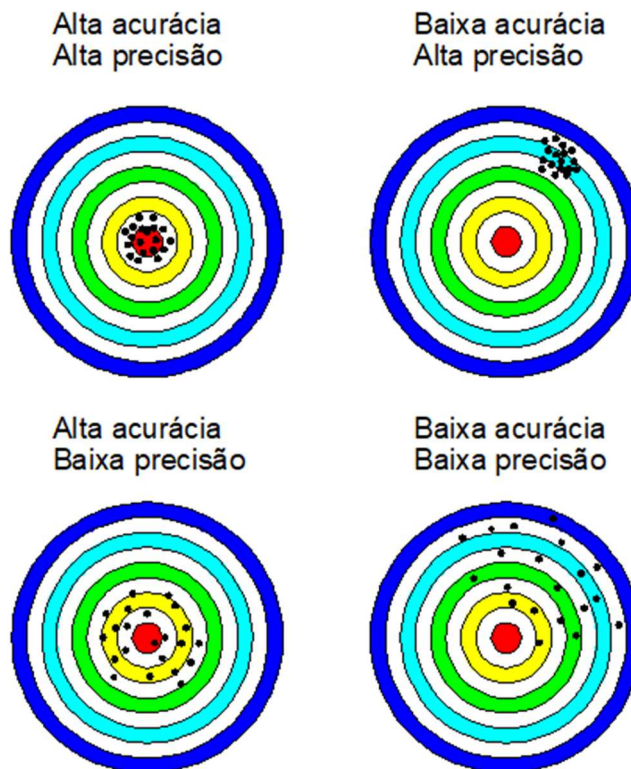
O termo acurácia foi cunhado pelas Ciências Geodésicas e Cartográficas, e é utilizado para indicar a qualidade de uma grandeza observada ou parâmetro estimado (Monico *et al.*, 2009). Precisão pode ser considerada como a proximidade entre valores obtidos através do processo de medição (associada à erros aleatórios), enquanto acurácia/exatidão é definida como a ausência de erro em uma medida (associada à erros aleatórios e sistemáticos).

Existem algumas definições encontradas na literatura, normalmente, são apresentados como exemplo para explicar as diferenças entre acurácia e precisão, a analogia com um atirador e suas tentativas em acertar o centro do alvo, conforme apresentado na Figura 1, a qual apresenta quatro alvos, sendo o primeiro acurado e preciso, o segundo, preciso, porém com baixa acurácia, o terceiro com alta acurácia, mas com baixa precisão e, o último, com baixa acurácia e baixa precisão.

Segundo Langendolff e Pellegrini (2008),

Precisão é o grau de refinamento da execução de uma operação, ou o grau de perfeição dos instrumentos e métodos utilizados para obter os resultados. Uma indicação da uniformidade ou reprodutibilidade dos resultados. Precisão está relacionada com a qualidade de uma operação na qual um resultado é obtido, diferindo da acurácia, que por sua vez, está relacionada com a qualidade do resultado. (Langendolff; Pellegrini, 2008, p.)

Figura 1 Diferença entre Acurácia/Exatidão e Precisão



Fonte: O Autor

Porém, segundo Mônico *et al.* (2009), o termo acurácia envolve tanto erros sistemáticos como aleatórios, enquanto precisão está vinculada com erros aleatórios,

considerando esta definição de que a acurácia envolve ambos os efeitos (sistemático e aleatório) e precisão somente os aleatórios, é correto afirmarmos que não é possível ser acurado sem ser preciso e não faz sentido afirmar que um valor é acurado e preciso, pois, a precisão faz parte da definição de acurácia, desta forma será adotado o termo exatidão para descrever a qualidade posicional dos elementos analisados.

No caso de dados espaciais, os elementos de qualidade são componentes que descrevem aspectos de qualidade dos dados geoespaciais (IBGE, 2017). A Norma ISO 19157:2013 aborda seis elementos de qualidade de dados espaciais: completude; exatidão posicional; exatidão temática; exatidão temporal; consistência lógica; usabilidade; e seus respectivos subelementos, sem tentar definir níveis mínimos aceitáveis de qualidade para dados geográficos.

É importante lembrar que qualquer medida está sujeita a variados tipos de erros, seja de natureza grosseira, sistemática ou aleatória (randômicos). Os erros grosseiros devem ser eliminados quando detectados (Monico *et al.*, 2009).

Como consequência dos erros sistemáticos e aleatórios, temos que o valor verdadeiro de uma grandeza a rigor nunca é conhecido, muito embora se possa comparar a qualidade desta medida. Sendo assim, pode-se dizer teoricamente que o valor verdadeiro de uma grandeza é um conceito abstrato (Monico *et al.*, 2009).

Nesta pesquisa será avaliada a exatidão posicional dos produtos gerados, conforme descrito anteriormente. Vale destacar que o conceito de exatidão será utilizado na avaliação dos dados finais, sendo fundamental para a caracterização dos experimentos a serem realizados.

## **2.2 Sistemas de captura de dados**

Diversos métodos e sistemas são utilizados para a obtenção de dados utilizados em cartografia e sensoriamento remoto. Como exemplo, têm-se as câmeras aéreas digitais de formatos diversos, os sensores LiDAR, os radares interferométricos e as imagens orbitais. Nesta seção, serão descritos os mais utilizados, passando pelos sensores ativos e passivos. Será dado especial destaque para as câmeras digitais aéreas e orbitais.

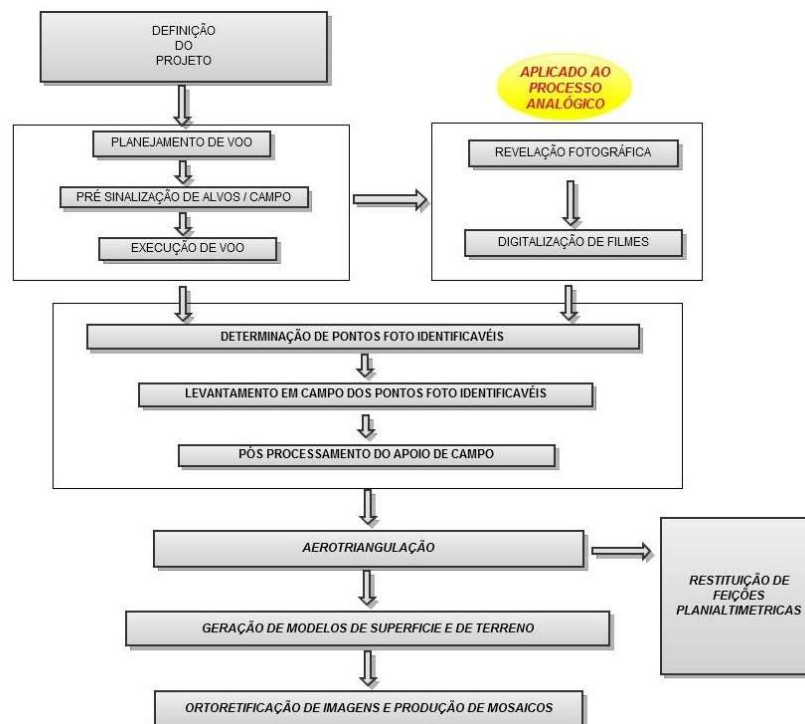
### 2.2.1 Sensores Passivos

O processo de aquisição de imagens é baseado no princípio da fotografia. A fotografia é um método passivo, em que a energia refletida de um objeto é registrada por fotossensibilidade dos materiais ou elementos sensores. Até três décadas atrás, esse processo era realizado utilizando exclusivamente filmes. No entanto, tal tarefa foi substituída por sensores eletrônicos.

Semelhante às fotografias convencionais, sistemas baseados em filmes foram rapidamente eliminados em ambientes fotogramétricos operacionais e sensores digitais substituíram em grande parte seus predecessores analógicos (Cramer *et al.*, 2012).

O processo de geração de produtos cartográficos com a utilização de câmeras aéreas digitais (câmeras de frame), assemelha-se muito ao processo que utiliza câmeras analógicas, com o diferencial de que as etapas de revelação fotográfica e digitalização de filme não são mais necessárias, como é destacado na Figura 2:

Figura 2 Etapas do processo fotogramétrico para geração de mapas cartográficos



Fonte: O Autor

A fotografia, em seu caso mais simples, é baseada no modelo de câmera *pinhole*<sup>1</sup>. A teoria geométrica dos sistemas ópticos pressupõe raios de luz retos que, refletidos a partir de um objeto iluminado por qualquer fonte de luz, entram na câmera pelo orifício, formando uma imagem invertida no plano oposto ao orifício. É aqui que o material fotossensível é colocado. Anteriormente, utilizava-se filme analógico que fora substituído por elementos eletrônicos sensíveis à luz, como dispositivos CCD (*charge coupled device*) e CMOS (*complementary metal oxide semiconductor*).

No modelo de câmera *pinhole*, cada ponto de imagem é gerado por um único raio de luz passando pelo orifício. A imagem bidimensional (2-D) é uma projeção ideal dos objetos tridimensionais (3-D), uma vez que o modelo simples de orifício negligencia, por exemplo, quaisquer distorções ou efeitos causados pela falta de foco. Supõe-se que o orifício, o ponto do objeto e o ponto da imagem definam uma linha reta (perspectiva central). O orifício tem a desvantagem de que, idealmente, apenas um único raio do feixe, originários da fonte do ponto do objeto, forme o ponto da imagem correspondente. Assim, sistemas de lente única ou mais complexos são utilizados para aumentar o tamanho da abertura da câmera enquanto mantém uma imagem focada. O eixo óptico de tal sistema de lentes é definido como a linha entre os pontos nodais incidentes e emergentes, que são definidos de modo a que os raios principais ou centrais passem através da lente (sistema) sem desvio, formando o mesmo ângulo com o eixo óptico em ambos os pontos nodais (Cramer *et al.*, 2012).

Os pontos nodais definem os centros de perspectiva incidente objeto-espaco e o centro de perspectiva-imagem emergente. Os raios de luz que entram na lente paralelamente ao eixo óptico passam a focalizar no ponto focal. O plano perpendicular ao eixo óptico, incluindo o ponto focal, define o plano de foco infinito, ou simplesmente o plano focal. Quaisquer raios paralelos que entram no sistema passam a se concentrar neste plano. A distância focal do sistema é a distância entre o ponto nodal emergente e o plano focal.

O ponto principal é definido onde o eixo óptico atinge o plano focal. O ponto principal e a distância focal são os parâmetros elementares que definem a geometria

---

<sup>1</sup> O termo em inglês “Pinhole” ou “Pin-Hole” pode ser traduzido como buraco de agulha, e trata de câmeras fotográficas que não possuem lentes nem diafragma, apenas um pequeno furo fixo em substituição a lente objetiva (Goveia, 2005).



de uma câmera. Isso é chamado de orientação interior (interna) da câmera. Se essa orientação interior da câmera e sua imagem correspondente forem conhecidas, um feixe de raios de imagem pode ser reconstruído a partir das medidas de coordenadas da imagem observadas. É a principal tarefa da Fotogrametria (clássica) obter objetos 3D através de observações em imagens 2D. A reconstrução é baseada nas equações de colinearidade (Cramer *et al.*, 2012).

Do ponto de vista operacional, uma câmera aerofotogramétrica deve ser eficiente em termos de operação aérea, ou seja, o número de faixas de voo deve ser minimizado, sem que se comprometa a qualidade geométrica das imagens obtidas. Dessa forma, uma câmera aerofotogramétrica digital deve oferecer características semelhantes as câmeras analógicas, isto é, com as dimensões do quadro focal de 23 cm x 23 cm, pois isso favorece o aproveitamento dos processos aerofotogramétricos já estabelecidos para a tecnológica analógica (Jubanski; Alixandrini; Bahr, 2009).

Neste sentido, foram desenvolvidas duas tecnologias aplicadas as câmeras digitais utilizadas para o imageamento: uma através de sensores de CCD em área (câmeras de frame) e; outra baseada em sensores lineares (*pushbroom*). Dentro das câmeras de frame desenvolvidas, devido ao tamanho limitado dos CCDs disponíveis, as câmeras aéreas de grande formato passaram a utilizar um conjunto de CCDs no intuito de ampliar a área de captura das imagens. Já as câmeras de pequeno e médio formato utilizam um único CCD, limitando assim a sua área de cobertura.

Com o avanço da tecnologia, câmeras digitais de médio formato agora possuem área de cobertura compatível com as primeiras câmeras aéreas de grande formato, que foram lançadas no início dos anos 2000. É o caso do modelo atual da câmera iXM-RS150F, desenvolvida pela empresa PhaseOne em 2019. Esta câmera possui quadro focal de 14204 *pixels* x 10652 *pixels*, aproximadamente 150 MP.

Uma das primeiras câmeras digitais de grande formato DMC 1, desenvolvida no ano 2000 pela empresa Intergraph/ZI, atualmente Leica Geosystems, utiliza um total de oito CCDs para formar um quadro focal de 13824 *pixels* x 7680 *pixels*, resultando em aproximadamente 106 MP.

Esta mudança na capacidade de cobertura se deve ao fato de que a tecnologia de CMOS passou a ser utilizada não somente nas câmeras de pequeno e

médio formato, mas também os fabricantes das câmeras de grande formato passaram a adotar a mesma tecnologia, como é o caso da câmera modelo DMC 4H, fabricada também pela empresa Leica Geosystems, a qual utiliza a tecnologia de CMOS, gerando um quadro focal de 31.520 *pixels* x 13.760 *pixels*. Outro relevante fabricante de câmeras aéreas digitais, a Vexcel Imaging, também alterou seus modelos, passando a utilizar a mesma tecnologia em seus equipamentos.

Neste trabalho não foram analisadas as vantagens e desvantagens entre as duas tecnologias (CCD e CMOS), devido à falta de estudos comparativos na aplicação em processos de mapeamento. Contudo, é importante destacar que ambos os sistemas são dispositivos de carga acopladas a suas respectivas funções básicas de captar as imagens e transformá-las em elétrons e em bits e bytes por um microprocessador em um processo analógico digital gerando a imagem.

### **2.2.1.1 Sensores de quadro ou frame**

A maneira mais simples de projetar uma câmera de mapeamento digital, seria apenas substituir o antigo filme analógico por um elemento de sensor eletrônico 2D ou matriz de sensor.

Essa foi a abordagem adotada nas câmeras convencionais de uso doméstico. No entanto, devido a limitação das dimensões dos quadros CCD, o que influencia diretamente a extensão das imagens capturadas em solo e contribuem de maneira negativa no desempenho dos projetos fotogramétricos, contribuiu para que essa analogia não fosse aplicada para as câmeras aerofotogramétricas.

Os sistemas de câmeras aéreas digitais que utilizam a tecnologia de sensor de quadro, em sua maioria, são baseados em conceitos de múltiplas câmeras para a obtenção de uma maior área de cobertura do solo por imagem, em contraste com as câmeras de mapeamento analógico, que utilizam apenas uma lente para gravar a cena.

Neste caso, várias lentes de câmera individuais, cada uma equipada com um ou mais sensores de quadro CCD ou CMOS, estão firmemente conectadas a uma plataforma aérea. As lentes separadas geram várias imagens em formato menor com certas sobreposições. Isso permite a geração de um plano sintético de imagem de

grande formato, que é obtida na re-amostragem das imagens individuais de formato menor para um formato maior virtual em um plano focal.

Em outras palavras, a imagem sintética de grande formato pode ser utilizada em produção posterior da mesma maneira que qualquer outra imagem de quadro. A única diferença é a derivação de uma câmera virtual (com geometria de câmera livremente escolhida, mas conhecida) em vez de uma câmera fisicamente existente. Assim, os sensores digitais baseados nessa estrutura tentam transferir o conceito clássico de processamento de dados de imagem em 2D do mundo analógico para o mundo digital (Cramer *et al.*, 2012).

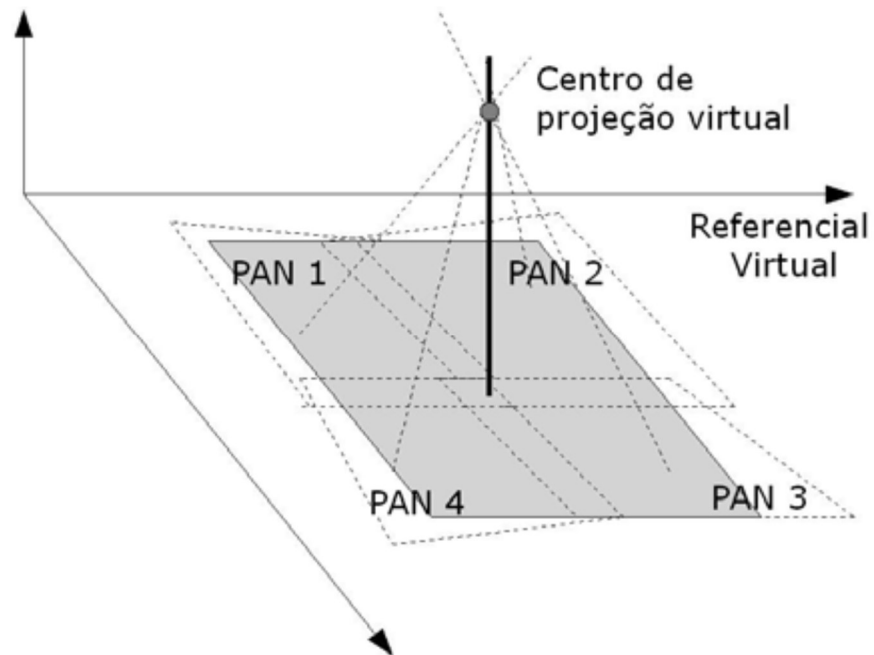
Não existe um padrão definido de instalação das múltiplas lentes utilizadas nas câmeras digitais, podendo ser organizadas com direções de visualização ligeiramente oblíquas ou ainda lentes dispostas somente na posição nadir. No entanto, em ambos os casos, é necessária uma área de sobreposição entre as imagens capturadas pelas diversas lentes, para possibilitar a transferência de pontos de amarração entre as imagens, obtendo assim a imagem virtual de grande formato.

Essas duas formas de capturas são conhecidas como método sincronizado e método sintópico (Jubanski; Alixandrini; Bahr, 2009). No método sincronizado, as imagens produzidas para a geração da imagem sintética são tomadas simultaneamente, como é o caso da câmera aérea DMC I. Esta câmera utiliza quatro imagens pancromáticas com resolução de 7168x4096 *pixel* cada, que são combinadas, formando uma imagem sintética de 13824x7680 *pixel*.

Já no método sintópico, as imagens são capturadas de forma não simultânea, mas alinhando-se os sensores pancromáticos no sentido do voo e atrasando as tomadas fotográficas de forma que todas sejam feitas a partir do mesmo centro perspectivo, como é o caso da câmera Vexcel modelo D (Jubanski; Alixandrini; Bahr, 2009).

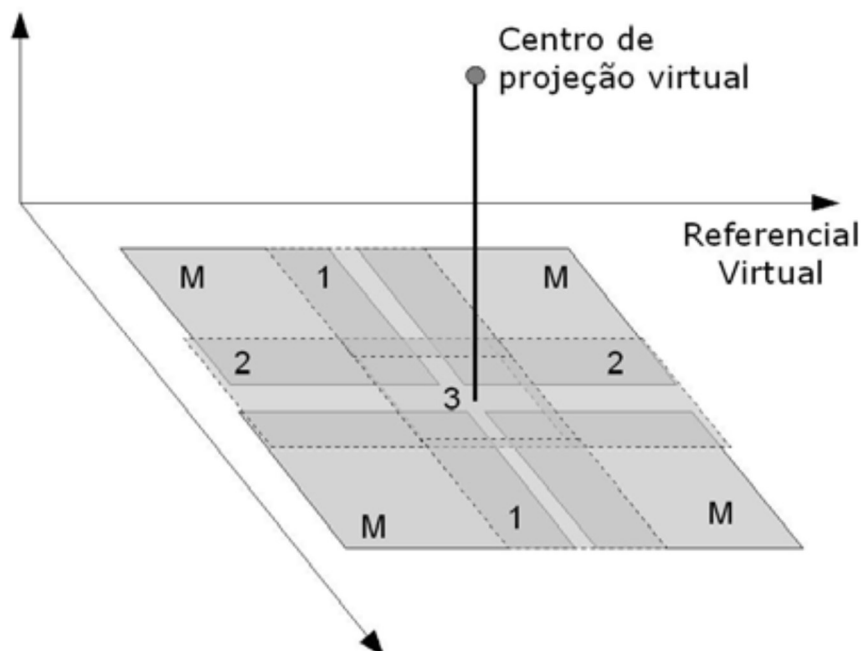
As Figuras 3 e 4, apresentam o conceito dos métodos sincronizado e sintópico, respectivamente.

Figura 3 Conceito de geração de imagem sintética pelo método sincronizado



Fonte: Jubansky ; Alixandrini ; Bahr, 2009

Figura 4 Conceito de geração de imagem sintética pelo método sintópico



Fonte: Jubanski ; Alixandrini ; Bahr, 2009.

O conceito de múltiplas lentes permite a geração de uma imagem sintética de maior formato. Para obtenção de formatos maiores, várias imagens individuais são

re-amostradas para um plano focal virtual definido anteriormente. Essa ação se baseia na orientação interna individual de cada lente da câmera e em suas orientações. A orientação interior de todas as lentes da câmera contribuinte é necessária para reconstruir exatamente os raios de imagem em 3D, originados em cada *pixel* da lente da câmera. A orientação individual entre as diferentes lentes da câmera é necessária para determinar a orientação relativa da câmera em relação ao plano focal virtual. Isso define a posição correta em que o raio da imagem cruza o plano virtual de grande formato (Cramer *et al.*, 2012).

Outro aspecto importante a destacar nas câmeras com múltiplas lentes é a resolução espacial. Na maioria dos casos, imagens com alta resolução espacial e maior formato são derivadas de múltiplos canais pancromáticos. Os canais multiespectrais, por outro lado, são capturados com menor resolução espacial em comparação com a imagem sintética. A partir dessa imagem pancromática, imagens coloridas de alta resolução são obtidas pelo pós-processamento, onde os canais de cores de baixa resolução são combinados com as imagens pancromáticas de alta resolução. Esse processo é chamado “*pan-sharpening*”, muito utilizado em imagens orbitais (Cramer *et al.*, 2012).

É interessante notar que o conceito de múltiplas lentes não é novo. Já na década de 1930, quatro câmeras analógicas de mapeamento estavam dispostas em uma plataforma para obter uma área útil de mapeamento maior, utilizando o mesmo conceito que agora está adaptado aos sistemas de sensores de quadro com várias lentes (Cramer *et al.*, 2012).

A título de ilustração, a Figura 5 apresenta a disposição das lentes da câmera DMC I. Nesta câmera, estão dispostas 4 lentes nas extremidades, responsáveis por capturar as imagens R, G, B e IR, enquanto 4 lentes centrais formam a imagem sintética pancromática, conforme mencionado anteriormente.

Figura 5 Disposição das lentes em câmera digital de grande formato – DMC I



Fonte: O Autor

O conceito atual de múltiplas lentes, usadas na gravação de imagens digitais com base em sensores de quadro, foi impulsionado principalmente pela necessidade de ampliação da área de cobertura, sendo a limitação do tamanho físico dos CCDs e CMOSs o grande motivador. Analisando o desenvolvimento do *design* do sensor de quadro que utiliza a tecnologia de CCD ou CMOS na última década, quando os sensores aéreos digitais se tornaram disponíveis, houve um aumento significativo do número de *pixels*. Esse dado pode ser facilmente ilustrado pela comparação das diferentes gerações de câmeras, e ainda, pela introdução da tecnologia CMOS.

As câmeras desenvolvidas por dois grandes fabricantes: Vexcel Imaging e Leica Geosystems, evoluíram no tamanho final dos quadros focais ao longo do tempo. No caso da empresa Vexcel, seu primeiro modelo denominado Ultracam-D, disponibilizado no mercado em 2003, trabalha com um conjunto de sensores capazes de gerar imagens com 11.500 *pixels* perpendiculares a linha de voo e 7500 *pixels* paralelos a linha de voo. Já, um dos seus modelos atuais, a Ultracam-Eagle, possui quadro focal de 20.010 *pixels* por 13.080 *pixels* respectivamente.

A primeira câmera digital de grande formato DMC I, da empresa Leica Geosystems, lançada no ano de 2003, possui quadro focal de 13.824 *pixels* por 7.680

*pixels*. Um de seus modelos lançados atualmente, a câmera DMC 4H, passou a adotar a tecnologia de CMOS e possui um quadro focal de 31.520 *pixels* por 13.760 *pixels*. Esse movimento foi adotado por todos os fabricantes de câmeras, sempre com o intuito de aumentar a performance da captura das imagens durante a execução dos voos, ou seja, executar um menor número de horas de voo para efetuar o recobrimento da mesma área.

Outra grande inovação presente nas câmeras aéreas digitais é a utilização de câmeras aéreas oblíquas. Essas câmeras possuem um conjunto de lentes posicionadas de maneira oblíquas, como o próprio nome sugere, sendo sua maior função a geração de modelos tridimensionais sobre áreas urbanas, fornecendo imagens tanto do nadir quanto das fachadas de edificações, podendo este equipamento ainda ser dotado ou não de um sistema laser topográfico, como é o caso do equipamento CityMapper 2, desenvolvido pela empresa Leica Geosystems<sup>2</sup>.

Para sensores digitais, considerados de pequeno formato utilizados em sistemas aéreos não tripulados, como é o caso da câmera marca Sony modelo Alpha 7RIII, é utilizada exclusivamente a tecnologia de CMOS. Esta câmera está equipada com um sensor de 42.4 MP, e pode ser utilizada com 3 diferentes lentes 21 mm, 28 mm e 58 mm, cada qual proporcionando uma área de cobertura distinta.

### **2.2.1.2 Sensores Lineares**

Outro conceito desenvolvido nas câmeras digitais, é baseado em arranjos de linha CCD únicos ou múltiplos, conceito já implementado na gravação de imagens de satélite ou até em equipamentos de digitalização. As linhas CCD são dispostas perpendicularmente à direção principal do movimento do sensor. A cobertura total da imagem em 2-D é obtida indiretamente devido movimentação do sensor. Esse conceito de scanner de linha também é chamado de “*pushbroom*” (Petrie, 2005).

É importante notar que essa aquisição linear de imagens em linhas contínuas não é uma nova abordagem, mas também teve seus antecessores em imagens analógicas. No caso de aquisição de imagem analógica em linha, as câmeras

---

<sup>2</sup>Maiores detalhes a respeito da utilização de sensores oblíquos podem ser encontrados em Rupnik *et al.* (2015); Xie *et al.* (2016) e; Sun *et al.*(2016).

sem obturador foram projetadas usando uma fenda aberta ao invés de um obturador, orientada perpendicularmente ao movimento da câmera. O filme fotográfico então se movimenta continuamente através desta fenda. Esse movimento estava relacionado à velocidade do sistema que transporta a câmera, normalmente uma aeronave. Assim, se executava a gravação de faixas de imagem quase infinitas (Cramer *et al.*, 2012).

Sensores lineares digitais passaram a ser utilizados na década de 1.970 e estavam montados em aeronaves de reconhecimento militar. O conceito mais avançado de utilização de um sensor contendo 3 linhas de CCD, sendo uma linha apontada para frente, outra para o nadir e outra para traz, a fim de permitir a aquisição de imagens estéreas, técnica proposta nos projetos Mapsat (USGS) e Stereosat (JPL) no final dos anos 70, os quais permaneceram apenas como proposta ao longo dos anos (Petrie, 2005).

Esse conceito de scanners digitais, já utilizado nas imagens de satélite, também foi introduzido na aquisição de imagens aéreas. O princípio se baseia em uma linha CCD disposta no plano focal, perpendicular à direção do voo. Enquanto a aeronave se desloca, os dados de imagem bidimensionais são capturados, com a linha do CCD gravando quase continuamente. Geralmente, a imagem 2D é composta por várias imagens as quais contém uma única linha. Sendo assim, se uma única linha CCD for usada, a imagem da linha terá uma extensão de apenas um *pixel* na direção do voo. A largura da imagem é igual ao número de *pixels* por linha, isto é, o comprimento da linha do CCD (Cramer *et al.*, 2012).

As linhas gravadas consecutivamente formam a faixa de imagem. Cada linha de imagem individual possui seus próprios elementos de orientação externa (posição e atitude). O que é relevante para o processo de orientação posterior dos dados da imagem.

O tamanho do *pixel* obtido no solo depende do tempo de amostragem do sistema e da velocidade da plataforma que transporta o sensor. Como os tamanhos do *pixel* no solo ao longo e transversais à linha de voo são independentes, os *pixels* quadrados no solo são obtidos apenas se a chamada condição de *pushbroom* for atendida (Cramer *et al.*, 2012).



O cálculo do GSD (*Ground Sample Distance*) pode ser obtido através das seguintes equações:

$$GSDx = v\Delta t$$

Onde:

$GSDx$  = tamanho do *pixel* no solo e na direção do voo;

$v$  = é a velocidade da plataforma que transporta o sensor e

$\Delta t$  é o tempo de amostragem, e:

$$GSDy = \Delta y mb = \Delta y \frac{hg}{f}$$

Onde:

$GSDy$  = tamanho do *pixel* no solo perpendicular à direção do voo;

$\Delta y$  = tamanho físico no *pixel* (CCD) perpendicular à linha de voo;

$mb$  = escala da imagem;

$hg$  = altura de voo e

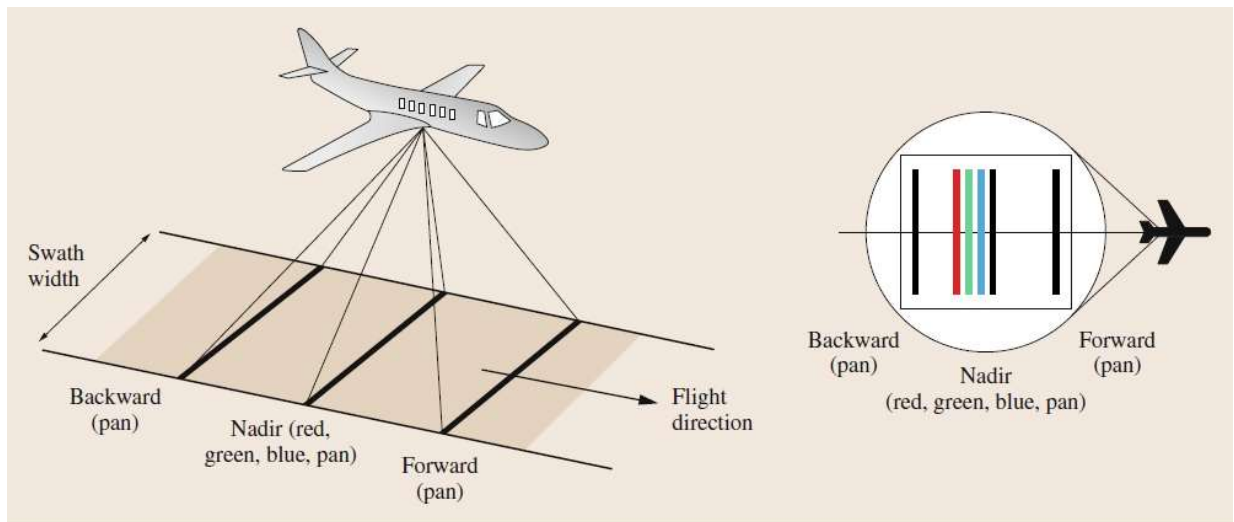
$f$  = distância focal da câmera.

Para possibilitar a obtenção de imagens estéreo e de imagens coloridas, é necessário que a câmera possua linhas independentes de CCDs. Ao contrário dos sensores de frame, não são necessárias câmeras focais adicionais para imagens coloridas ou multiespectrais. Linhas adicionais são colocadas no mesmo plano focal que já é usado para os canais pancromáticos. Normalmente, são utilizados pelo menos três canais pancromáticos e quatro canais multiespectrais. Todas as linhas de CCD fornecem o mesmo número de *pixels*. Assim, imagens pancromáticas e multiespectrais são obtidas com a mesma resolução espacial, sem a utilização da técnica de *pan-sharpening* (Cramer *et al.*, 2012).

Considerando que a localização física de cada uma das linhas de CCD é diferente no plano focal, cada linha CCD fornece uma direção de visualização diferente, o que permite múltiplos ângulos estéreo dentro da linha de voo. A Figura 6 traz o exemplo da distribuição dos CCDs em uma câmera linear. Nela, pode-se observar 3 linhas pancromáticas, a saber: uma central no nadir; outra à ré ou anterior e; outra avante ou posterior, possibilitando assim obter imagens estéreo. A figura

ainda demonstra a presença de mais 3 linhas de CCDs: R, G e B. Para obtenção das cores, destaca-se ainda a possibilidade de introduzir outra linha de CCD para obtenção de imagens no infravermelho próximo.

Figura 6 Conceito de Sensor com CCD Linear



Fonte: Cramer *et al.* (2012).

Tanto os sensores de frame quanto as câmeras baseadas em tecnologia linear, buscam obter o maior desempenho na captura das imagens. Nesse caso, a limitação também está na largura do CCD. Uma câmera com 12.000 *pixels*, ao capturar uma imagem com GSD (*Ground Sample Distance*) aproximado de 10 cm, recobrirá uma largura de aproximadamente 1.200 metros no solo.

Uma largura de faixa maior, melhora a eficiência da captura de dados, pois isso influencia o número de faixas a serem transportadas para a imagem de uma determinada área do projeto. Como alternativa para superar esta limitação as câmeras mais recentes passaram a utilizar a técnica de escalonamento de *pixel* (Cramer *et al.*, 2012).

A técnica de escalonamento significa que duas linhas CCD, chamadas linhas A e B, são fixadas quase na mesma posição no plano focal, mas deslocadas em meio *pixel* na direção do voo, com a finalidade de dobrar a resolução do *pixel*, ou ainda, a área de cobertura em solo, conceito também utilizado nas imagens de satélite.

Embora as linhas A e B sejam montadas o mais próximo possível, o pequeno deslocamento de alguns *pixels* na direção do voo no plano focal resultará em uma pequena diferença de tempo entre quando as duas linhas capturam o mesmo objeto no chão. Como mencionado anteriormente, cada imagem de linha tem sua própria orientação externa, e, portanto, qualquer alteração na orientação do sensor que possa ocorrer durante esse curto intervalo de tempo influenciará diretamente o padrão de amostragem no solo.

Se o padrão de amostragem desejado não for totalmente alcançado em todas as condições operacionais, isso também influencia a melhoria da resolução. Em ambientes aéreos mais dinâmicos, especialmente, são necessários plataformas giro-estabilizadoras para evitar ao máximo mudanças de orientação. Isso difere dos sensores de satélite, cuja trajetória é muito mais suave em comparação aos sensores aéreos (Cramer *et al.*, 2012).

Pode-se afirmar que o primeiro sensor digital a utilizar a tecnologia de scanner linear, voltado para a aerofotogrametria, foi desenvolvido pelo Centro Aeroespacial Alemão (*DLR-Deutsches Zentrum für Luft-und Raumfahrt*). Essa câmera foi batizada de HRSC-A (*High Resolution Stereo Camera*). Ela foi utilizada na missão realizada pela Agência Espacial Europeia, e obteve imagens do planeta Marte.

As câmeras digitais multiespectrais comerciais (RGB e IR) baseadas em sensores lineares estão limitadas a poucos fabricantes. Como exemplo, temos o a câmera ADS100, fabricada pela Empresa Leica Geosystems. Essa câmera está equipada com 13 linhas de CCD com 20.000 *pixels* cada.

Além das câmeras digitais multiespectrais (RGB e IR), sensores hiperespectrais utilizam a tecnologia de linhas de CCD para a captura de imagens, como é o caso das câmeras AisaFenix, desenvolvida pela empresa finlandesa Specim<sup>3</sup>.

As câmeras hiperespectrais foram desenvolvidas não somente para a captura de dados no visível e infravermelho próximo, mas também com a capacidade de captura de informações no infravermelho de ondas curtas, trabalhando sempre com um número elevado de bandas espectrais. No caso do sensor AisaFenix, é

---

<sup>3</sup> Cf. [www.specim.fi](http://www.specim.fi)

possível a obtenção de 604 bandas espectrais, sendo 348 bandas espectrais entre o visível e o infravermelho próximo (380 – 970 nm) e 256 bandas espectrais no infravermelho de ondas curtas (970 – 2.500 nm). Este tipo de sensor é muito utilizado para a classificação de vegetação, estudos de áreas agrícolas, desmatamento, exploração mineral entre outros.

### **2.2.2 Sensores Ativos**

Diferentemente dos sensores passivos, os sensores ativos carregam seu próprio emissor de radiação que ilumina os objetos a serem detectados, ocasionado reflexões que são recebidas pelo receptor do sensor. Essa tecnologia permite a operação independente da radiação natural, principalmente reflexos da luz solar, por exemplo, podendo ser operado à noite.

Os dois tipos de sensores ativos aerotransportados mais utilizados na geração de produtos cartográficos são os sistemas LiDAR (*Light Detection And Ranging*) e os Radares aerotransportados (*Radio Detection and Ranging*). O primeiro será utilizado nesta pesquisa e apresentado a seguir.

#### **2.2.2.1 Sistemas LiDAR**

Nos últimos anos, devido a sua capacidade de produzir um grande volume de dados com alta precisão, o sistema LiDAR tornou-se uma importante tecnologia na aquisição de dados tridimensionais. Com o avanço da tecnologia, esses sistemas passaram a ser utilizados não somente na geração de modelos digitais de terreno, mas também como ferramenta fundamental para a quantificação de biomassa em florestas plantadas, sendo o setor de papel e celulose um dos grandes consumidores dessa tecnologia (Melin; Shapiro; Glover-Kapfer, 2017) e (Rex *et al.*, 2018).

Neste trabalho será adotada a terminologia LiDAR para designar o conjunto composto pela unidade LASER, o componente óptico mecânico, o sistema de medida de movimentação inercial (IMU), o sistema de posicionamento GNSS, os equipamentos e *software* necessários para a integração do conjunto

A palavra LASER, que defini uma das componentes do sistema LiDAR é um acrônimo para Amplificação da Luz por Emissão Estimulada de Radiação (*Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation*). Essencialmente, um LASER é um

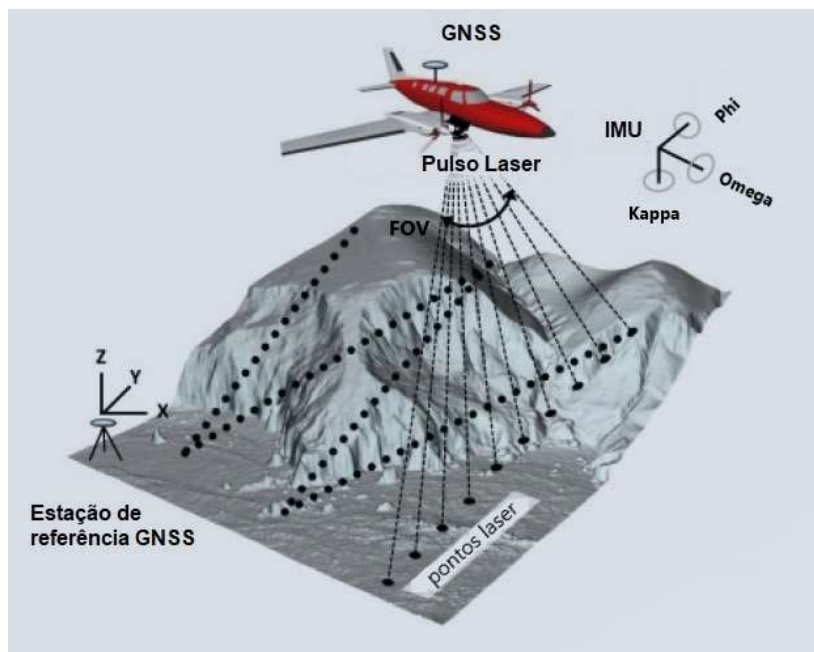
dispositivo óptico que, quando ativado por uma fonte de energia externa, produz e emite um feixe ou pulso de radiação monocromática em que todas as ondas são coerentes e em fase. A radiação emitida é controlada e direcional, no sentido de que é emitida como um feixe ou pulso estreito em uma direção específica (Petrie, Toth, 2018a).

O princípio básico do funcionamento do sistema LiDAR está relacionado a capacidade de medir o tempo total de viagem entre a emissão do pulso LASER até o alvo/objeto e o seu retorno até o receptor do sistema, ou ainda pela diferença de fase.

O sistema de varredura utiliza conjunto óptico mecânico, tanto para a transmissão quanto para a recepção dos pulsos gerados. Ele pode ser dividido ao menos em cinco grandes componentes: a unidade de medida, o sistema de varredura, as unidades de controle, o monitoramento e a gravação, devendo ainda ser incorporados os sistemas de posicionamento GNSS e o sistema de medida inercial (IMU) como complementos ao sistema LiDAR (Wehr; Lohr, 1999).

A Figura 7 é apresentando a estrutura de funcionamento de um sistema LiDAR aerotransportado, podendo ainda ser incorporado uma estação de referência GNSS no solo ou não.

Figura 7 Esquema LiDAR padrão de funcionamento



Fonte: O Autor

De acordo com a figura, na unidade de varredura são gerados os pulsos *LASER*, utilizando-se componentes eletrônicos e fotodiodos. Os pulsos gerados são direcionados para um sistema de espelhos rotativos que os enviam para a superfície a ser mapeada. A rotação do espelho é responsável pelo direcionamento dos pulsos, apresenta movimento limitado e é estabelecido conforme o ângulo de abertura, conhecido como FOV (*Field Of View*) (Wehr, 2008).

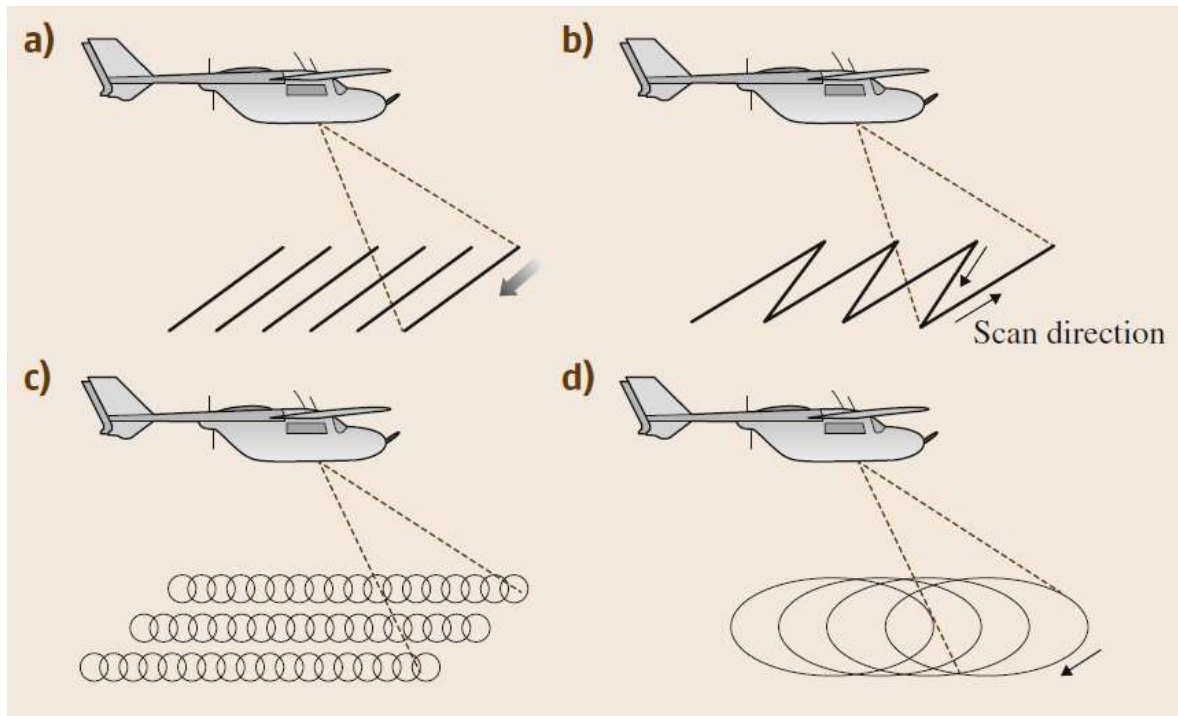
Após o desenvolvimento de toda a trajetória, o pulso laser emitido e refletido na superfície perfilada é capturado novamente por esta unidade, sendo também encaminhado para a unidade de medida através de um conjunto de espelhos. Esta unidade de medida irá registrar o instante no qual o pulso laser retornou ao sensor. O movimento da plataforma permite a digitalização ao longo da faixa, enquanto a deflexão do espelho fornece a varredura transversal. Desse modo, é fundamental que durante a execução do voo de perfilamento sejam registrados além dos pulsos laser do perfilamento, informações de atitude e posicionamento da aeronave (Wehr, 2008).

Os sistemas LiDAR possuem diferentes padrões de escaneamento no solo, definidos de acordo com a maneira de movimentação do conjunto de espelhos. Esses padrões são: escaneamento linear, espelho oscilador, espelho de natação<sup>4</sup> e espelho elíptico. A Figura 8 apresenta os quatro padrões de escaneamento (Cramer *et al.*, 2012).

---

<sup>4</sup> Movimento periódico superposto ao movimento de precessão do eixo de rotação de um corpo rígido girante, como, p.ex., um pião.

Figura 8 Padrões de Escaneamento LiDAR



Fonte: Adaptado de Cramer *et al.*, 2012.

Cada um destes padrões apresenta vantagens e desvantagens técnicas em relação ao outro. Seus principais aspectos são apresentados na Tabela 6.

Tabela 6 Características dos padrões de varredura

Padrão	Aspecto	Características
Linear	Positivo	A rotação constante evita distorções no espelho devido à força adicional
	Positivo	Oferece distribuição de pontos homogênea ao longo e através da faixa de voo
	Negativo	Observações podem ser feitas apenas em uma pequena porção de cada face do espelho
	Negativo	O ângulo de abertura (FOV) é fixo e não pode ser adaptado
	Negativo	Os sistemas são limitados a alturas de voo mais baixas (<1000 m)
Oscilador	Positivo	Possível aquisição contínua de dados, pois o espelho sempre aponta para o solo
	Positivo	Possibilidade de compensar a rotação da aeronave em torno do eixo
	Positivo	O ângulo de abertura (FOV) pode ser ajustado
	Negativo	O acelerador de espelho causa distorções sistemáticas devido a torção
	Negativo	Amostragem irregular com menor densidade no nadir

Padrão	Aspecto	Características
Nutação	Positivo	Possibilita alta taxa de escaneamento devido número menor de peças móveis
	Positivo	Taxa de digitalização alta devido a sobreposição ao longo da trilha
	Positivo	Amostragem regular do solo
	Negativo	O ângulo de abertura (FOV) é limitado
	Negativo	Espaçamento perpendicular à linha de voo é fixo
Elíptico	Positivo	A digitalização é realizada duas vezes, sempre de um ângulo ligeiramente diferente
	Positivo	Taxa de digitalização alta para fornecer sobreposição ao longo da faixa
	Negativo	Maior dificuldade em calibrar devido a presença de dois espelhos
	Negativo	O ângulo de abertura (FOV) é limitado
	Negativo	O espaçamento entre faixas é fixo

Fonte: Adaptado de Cramer *et al.*, 2012.

Assim como os sensores passivos, os sistemas LiDAR evoluíram no intuito de aumentar a performance, tanto no sentido de obter uma maior área de cobertura durante a execução do voo, quanto no aumento da densidade de pontos capturados no solo. Essa evolução pode ser notada ao compararmos os primeiros sensores LiDAR lançados no mercado, como é o caso dos sensores Riegl, LMS-Q140, utilizado em baixas alturas e o LMS-Q240, utilizado em alturas de até 450 metros. Fabricados pela empresa Austríaca Riegl em 2006, estes possuíam frequência de digitalização de 30 kHz (Petrie; Toth, 2018b).

Atualmente, essa mesma empresa disponibiliza ao mercado sensores com capacidade de captura de dados a alturas de até 5.500 metros e com frequência de digitalização de até 2.000 kHz, proporcionando não apenas um aumento na área de captura de dados, mas também uma maior densidade de pontos por metro quadrado.

Seguindo a evolução dos sistemas, algumas empresas passaram a oferecer conjuntos nos quais, além do sistema LiDAR propriamente dito, pode-se acoplar outros sensores, tais como câmeras digitais de pequeno e médio formato, utilizadas para a captura de dados no RGB, no infravermelho ou na faixa do termal e, ainda, conjunto contendo dois sistemas de digitalização LASER, sendo um deles para fins topográficos, trabalhando no infravermelho próximo com comprimento de onda de 1064 nm e outro com a finalidade de execução de processos batimétricos, conhecido



também como Green LiDAR, com comprimento de onda de 532 nm na faixa do verde, como é o caso do sistema Riegl VQ-1560i apresentado na Figura 9.

Figura 9 LiDAR Topográfico e Batimétrico com câmeras digitais



Fonte: adaptado de [www.riegl.com](http://www.riegl.com)

## 2.3 Imagens de Satélite

Atualmente, a resolução espectral (número de bandas espectrais) das imagens obtidas pelos sensores imageadores já ultrapassa centenas de bandas e a resolução espacial (tamanho da célula ou tamanho do *pixel* da imagem) de muitas imagens já é maior que 1 metro, o que possibilita suas aplicações nas áreas de levantamentos de recursos naturais e mapeamentos temáticos, monitoramento ambiental, detecção de desastres naturais, desmatamentos florestais, previsões de safras, cartografia, defesa e vigilância, entre outras (Meneses *et al.*, 2012), maiores detalhes a respeito de resolução espectral e espacial, são apresentados no subtópico 2.6.3.1.

O grande avanço obtido em poucas décadas pelo Sensoriamento Remoto deve-se ao acelerado desenvolvimento nos meios de se observar a Terra em escala global e periódica, e na rapidez do monitoramento dos fenômenos dinâmicos, e das mudanças das feições terrestres.

Em relação aos mecanismos de aquisição entre as imagens de satélite e as fotos aéreas, nota-se que são produtos que possuem semelhanças, pelo fato de terem a mesma finalidade, a de retratar os objetos ou fenômenos da superfície terrestre.

As vantagens de um sobre o outro são várias, mas apenas para justificar o que impulsionou o uso dos sensores imageadores por satélites, pode-se citar a sua capacidade de captar em curto espaço de tempo toda a superfície do planeta, e de uma maneira sistemática (alta resolução temporal), dado que um satélite fica continuamente orbitando à Terra. Essa forma de cobertura repetitiva, obtendo imagens periódicas de qualquer área do planeta, propicia detectar e monitorar mudanças que acontecem na superfície terrestre (Meneses *et al.*, 2012).

Em contrapartida, apesar do elevado número de satélites disponíveis para a utilização na geração de mapas cartográficos, a resolução espacial e exatidão de posicionamento ainda se apresentam de maneira inferior, quando comparadas as imagens capturadas por câmeras aéreas digitais em plataformas tripuladas ou não-tripuladas.

Nesse sentido, modelos de função racional RFM (*Rational Function Model*) têm sido amplamente utilizados para transformar coordenadas espaço-imagem em espaço-objeto. O modelo encontra imensas aplicações na modelagem dos parâmetros de orientação exterior, recuperação do modelo do sensor, ajuste de bloco e ortorretificação das imagens de satélite. O modelo de função racional é usado como um substituto para o modelo de sensor físico e estabelece uma relação genérica entre as coordenadas do espaço-imagem e as coordenadas do espaço-objeto por meio de um polinômio racional de grau três (Dubey; Kartikeyan; Subbiah, 2019).

Os coeficientes desses polinômios racionais são chamados de coeficientes polinomiais racionais ou coeficientes de posicionamento rápido RPC (*Rational Polynomial Coefficients*). Para muitas aplicações, o procedimento de correção geométrica é indispensável para produtos de alta precisão. Normalmente, as correções geométricas requerem conhecimento total dos parâmetros físicos do sensor, a geometria da imagem, informações de altura por meio de algum modelo digital de terreno apropriado, órbita precisa e parâmetros de atitude.

Por esse motivo, vários fornecedores de imagens espaciais preferem produzir alguns parâmetros de correção geométrica não paramétrica, por exemplo, os parâmetros RPC. O modelo RPC permite que o usuário final corrija as imagens de satélite sem o conhecimento explícito dos parâmetros físicos do sensor (Dubey; Kartikeyan; Subbiah, 2019).

Provedores de imagens de satélite de alta resolução passaram a fornecer as imagens em conjunto com os parâmetros RPC, como por exemplo as imagens provenientes dos satélites IKONOS, QuickBird, GeoEye-1, WorldView 1/2/3, Kompsat-2/3, Cartosat-2, e Pleiades-1/2.

O modelo RPC relaciona as coordenadas do espaço objeto ( $\phi, \lambda, h$ ), com as coordenadas no espaço imagem (linha ( $l$ ) e colunas ( $s$ )) ou vice-versa, através da função racional, que são basicamente razões polinomiais. Para a transformação do espaço imagem para o espaço objeto em um sistema de coordenadas geográficas, é empregada a razão dos polinômios de terceira ordem, que relaciona coordenadas normalizadas ( $ln$  e  $sn$ ) com as coordenadas cartesianas normalizadas ( $Xn, Yn, Zn$ ) (Fraser; Dial; Grodecki, 2006).

Segundo Amorim; Camargo; Miyashita (2010), a formulação matemática para os modelos RPC é a seguinte:

$$ln = \frac{p_1(Xn, Yn, Zn)}{p_2(Xn, Yn, Zn)}$$

$$sn = \frac{p_3(Xn, Yn, Zn)}{p_4(Xn, Yn, Zn)}$$

$$l = ln \cdot ls + l_0$$

$$S = Sn \cdot Ss + S_0$$

$$Xn = \frac{\phi - \phi_0}{\phi_s}; Yn = \frac{\lambda - \lambda_0}{\lambda_s}; Zn = \frac{h - h_0}{h_s}$$

Onde:

$ln, Sn$  são coordenadas normalizadas das linhas e colunas dos *pixels* no espaço imagem;

$Xn, Yn$  e  $Zn$  são coordenadas normalizadas dos pontos no espaço objeto ou de terreno;

$p_i$  ( $i = 1,4$ ) são polinômios;

$l, S$  são coordenadas linha e coluna dos *pixels* no espaço imagem;

$ls, Ss$  e  $l_0, S_0$  são termos de escala e *offset*;

$\Phi, \lambda, h$  são latitude e longitude geodésica e altura elipsoidal respectivamente;

$\Phi_s, \lambda_s, h_s$  e  $\Phi_0, \lambda_0, h_0$  são termos de escala e *offset*.

No modelo RPC de terceira ordem, o numerador e o denominador são formados de 20 termos polinomiais. Dessa forma reescrevendo cada polinômio das equações anteriores, em função de seus coeficientes tem-se que:

$$p1(Xn, Yn, Zn) = a_1 + a_2 Yn + a_3 Xn + a_4 Zn + a_5 YnXn + a_6 YnZn + a_7 XnZn + a_8 Y^2n + a_9 X^2n + a_{10} Z^2n + a_{11} XnYnZn + a_{12} Y^3n + a_{13} YnX^2n + a_{14} YnZ^2n + a_{15} Y^2nXn + a_{16} X^3n + a_{17} XnZ^2n + a_{18} Y^2nZn + a_{19} X^2nZn + a_{20} Z^3n = a^T u$$

$$p2(Xn, Yn, Zn) = b_1 + b_2 Yn + b_3 Xn + b_4 Zn + b_5 YnXn + b_6 YnZn + b_7 XnZn + b_8 Y^2n + b_9 X^2n + b_{10} Z^2n + b_{11} XnYnZn + b_{12} Y^3n + b_{13} YnX^2n + b_{14} YnZ^2n + b_{15} Y^2nXn + b_{16} X^3n + b_{17} XnZ^2n + b_{18} Y^2nZn + b_{19} X^2nZn + b_{20} Z^3n = b^T u$$

$$p3(Xn, Yn, Zn) = c_1 + c_2 Yn + c_3 Xn + c_4 Zn + c_5 YnXn + c_6 YnZn + c_7 XnZn + c_8 Y^2n + c_9 X^2n + c_{10} Z^2n + c_{11} XnYnZn + c_{12} Y^3n + c_{13} YnX^2n + c_{14} YnZ^2n + c_{15} Y^2nXn + c_{16} X^3n + c_{17} XnZ^2n + c_{18} Y^2nZn + c_{19} X^2nZn + c_{20} Z^3n = c^T u$$

$$p4(Xn, Yn, Zn) = d_1 + d_2 Yn + d_3 Xn + d_4 Zn + d_5 YnXn + d_6 YnZn + d_7 XnZn + d_8 Y^2n + d_9 X^2n + d_{10} Z^2n + d_{11} XnYnZn + d_{12} Y^3n + d_{13} YnX^2n + d_{14} YnZ^2n + d_{15} Y^2nXn +$$

$$d_{16}X^3n + d_{17}XnZ^2n + d_{18}Y^2nZn + d_{19}X^2nZn + d_{20}Z^3n = d^T u$$

Com:

$$a^T = [a_1 a_2 a_3 a_4 a_5 \dots a_{20}]$$

$$b^T = [b_1 b_2 b_3 b_4 b_5 \dots b_{20}]$$

$$c^T = [c_1 c_2 c_3 c_4 c_5 \dots c_{20}]$$

$$d^T = [d_1 d_2 d_3 d_4 d_5 \dots d_{20}]$$

$$u^T = [1 Y_n X_n Z_n Y_n X_n Y_n Z_n X_n Z_n Y^2_n X^2_n Z^2_n X_n Y_n Z_n Y^3_n \\ Y_n X^2_n Y_n Z^2_n Y^2_n X_n X^3_n X_n Z^2_n Y^2_n Z_n X^2_n Z_n Z^3_n]$$

Os coeficientes polinomiais ( $a_i$   $b_i$   $c_i$  e  $d_i$  para  $i = 1, \dots, 20$ ), em um total de 80, são conhecidos como coeficientes RPC (*Rational Polynomial Coefficients*) ou coeficientes RFC (*Rational Function Coefficients*) (Amorim; Camargo; Miyashita, 2010).

Para a utilização dos coeficientes RPC, podem ser adotados dois cenários distintos: o primeiro, utilizando-se de uma solução independente do terreno (*terrain-independent*), por meio da utilização de um modelo físico do sensor. E um segundo, método através de uma solução dependente do terreno, baseado em pontos de controle. Nesse caso, as características físicas do sensor não estão disponíveis (Tao; Hu, 2001).

Ambos os processos apresentam soluções precisas, para o modelo independente do terreno, como apresentando anteriormente, faz-se necessário o conhecimento das características físicas do sensor, informação que nem sempre são disponibilizadas pelos provedores de imagens de satélite.

O modelo dependente do terreno apresenta uma relação direta da qualidade de sua exatidão em função da distribuição, quantidade de pontos e qualidade do modelo de terreno utilizado (Tao; Hu, 2001).

## 2.4 Processo Fotogramétrico

Ao longo dos anos, o termo “Fotogrametria” sofreu alterações em função da novas tecnologias, sendo a definição abaixo proposta pela ASPRS, em 1979:

Fotogrametria é a ciência para obter informações confiáveis sobre as propriedades de superfícies e objetos, sem contato físico, e ainda ser capaz de medir e interpretar essas informações. (Schenk, 2005, p. )

O termo Fotogrametria deriva do grego: *photons*, que significa luz, *grama*, que quer dizer algo desenhado ou escrito, e *metron*, que significa medir. Em resumo, significa medir graficamente usando luz (Alspaugh, 2004). Ele pode ser definido também, como a aplicação da fotografia ou estereofotografia nos levantamentos topográficos. A Fotogrametria é a ciência de extrair através de fotografias, a forma, as dimensões e a posição dos objetos contidos nestas fotos (Wolf; Dewitt, 2000).

A Fotogrametria pode ser classificada como Fotogrametria analógica, Fotogrametria analítica e Fotogrametria digital. No entanto, com o avanço computacional, as técnicas analógicas e analíticas tornaram-se obsoletas, sendo atualmente utilizada basicamente a Fotogrametria digital.

A Fotogrametria Digital é a parte da fotogrametria que trata dos aspectos geométricos do uso de fotografias aéreas, com a finalidade de obter valores precisos de comprimentos, alturas e formas, baseadas em imagens digitais armazenadas em meio magnético na forma de *pixels*, no princípio da estereoscopia e na orientação analítico-digital das fotos.

A Aerofotogrametria ou Fotogrametria aérea é uma subdivisão da Fotogrametria, na qual as fotografias do terreno são tomadas por uma câmera acopladas a uma aeronave (Tommaselli, 2009).

O processo aerofotogramétrico pode ser dividido, atualmente, em várias etapas, independentemente do tipo de sensor a ser utilizado quando da obtenção das imagens/informações, podendo este sensor ser passivo, como as câmeras aéreas, ou ativos, como os sistemas LiDAR.

No caso dos sensores passivos, comumente utilizados, podemos dividir os sensores/câmeras em analógicas ou digitais, sendo que as digitais ainda possuem uma subdivisão entre câmeras de pequeno, médio e grande formato, que podem utilizar a tecnologia de varredura linear ou a estrutura de frame, como apresentado no subtópico 1.1.1.

As câmeras aéreas analógicas possuem como característica um sistema de lente estável, com alta qualidade geométrica (Tommaselli, 2009). As informações obtidas são gravadas através dos negativos fotográficos, que depois são digitalizados por meio de scanner apropriado, ou gerados os diapositivos e fotos-contatos, que posteriormente serão utilizados nas etapas subsequentes do processo de geração cartográfica.

A maioria dos produtos cartográficos, produzidos até o início da última década do século XX foi originada através do processo óptico-mecânico-manual, aplicado sobre base celulósicas (cronaflex, poliéster, filmes e películas fotossensíveis para plástico-gravura, papéis para impressão de cartas e mapas), o que ocasionam diferentes componentes de erro posicional no processo de produção de um documento cartográfico.

As câmeras digitais são semelhantes às analógicas, salvo a diferença do dispositivo de registro da imagem. Neste caso, a luz refletida do espaço objeto sensibiliza os fotodetectores, armazenando as informações em discos rígidos ou sistemas de memória sólida, eliminando assim algumas fontes de erros citadas anteriormente (Tommaselli, 2009).

Ao utilizar câmeras aéreas digitais, define-se a altura de voo em relação à exatidão do produto, sendo que a exatidão é vinculada diretamente a resolução espacial ou resolução de imagem, e que, muitas vezes, utiliza-se o termo em inglês GSD (*Ground Sample Distance*).

A resolução espacial está diretamente relacionada à capacidade de “enxergar” objetos tão pequenos quanto o filme (no caso das câmeras analógicas) ou CCD (no caso de câmeras digitais) permita. Uma resolução de um metro significa que os menores objetos passíveis de serem distinguidos terão dimensão próxima a um metro. Isto é, geralmente objetos com dimensões menores que um metro, terão sua

identificação dificultada em imagens com resolução espacial (GSD) de um metro ou maior que este valor (Brito; Coelho, 2002).

Na imagem digital, a resolução está relacionada diretamente com o tamanho do *pixel*, termo em inglês “*picture element*”, sendo que dentro de um *pixel* existe uma única coloração. Pode-se dizer que equivale a uma composição da tonalidade dos diferentes objetos existentes naquela área (Brito; Coelho, 2002). Assim, quanto menor for o *pixel*, maior será a capacidade de se distinguir objetos na superfície imageada.

Existem, basicamente, dois tipos de arquivos digitais: vetoriais e matriciais. Os vetoriais são caracterizados pela delimitação de objetos pelos pontos que os determinam (Brito; Coelho, 2002). No caso das imagens matriciais, estas são compostas por uma matriz de células quadradas (*pixels*). Sendo que a altura de voo está ligada diretamente ao tamanho do *pixel* ou célula a ser capturada no terreno. Células de tamanho menor possibilitarão uma melhor qualidade de posicionamento e um melhor detalhamento da informação registrada.

Nesse caso, o tamanho do *pixel* ou a resolução espacial (GSD) deverá ser determinada em função do tamanho e da natureza dos objetos a serem estudados. A exatidão de apontar um objeto é realizada em geral para melhor que 0,3 *pixels* e, para identificar um objeto facilmente, é desejável que não seja menor que  $3 \times 3$  *pixels* (Kasser, 2002).

Portanto, é importante a determinação do GSD aproximado das imagens, a fim de que se defina quais serão as informações ou feições passíveis de serem identificadas através deste material primário (fotos aéreas), e assim realizar a primeira etapa de planejamento do voo.

## **2.5 Etapas do processo aerofotogramétrico através de câmeras digitais.**

Nesta etapa, serão abordados os tópicos relativos à utilização de câmeras aéreas digitais para a elaboração de produtos cartográficos, excluindo-se temas referentes aos processos analógicos ou analíticos.

O início do processo aerofotogramétrico deve passar, primeiramente, pela definição da utilização do produto, isto é, qual será a finalidade dos dados capturados



e transformados em informação digital, sendo esse um ponto chave na determinação das técnicas a serem empregadas e suas respectivas qualidades (tema principal desta tese).

Mapeamentos com precisões centimétricas tendem a ter seus custos mais elevados, quando comparados a mapeamentos com precisões mais simplificadas, e ainda possuem um prazo de produção mais prolongado quando da utilização de técnicas semelhantes. Isso ocorre, principalmente, devido à resolução espacial das imagens capturadas. Imagens com resolução espacial maiores requerem voos em altitudes ou alturas mais baixas, diminuindo assim a área de cobertura e produtividade em relação a voos com resolução espacial mais baixas.

Para projetos que envolvam imagens com resoluções geométricas maiores, a quantidade de dados a serem capturados e a quantidade de horas de voo a serem executadas são maiores em relação a imagens com resoluções menores, elevando assim o custo desta etapa de projeto.

Essa comparação considera a utilização do mesmo sensor ou sensores com capacidade equivalentes. Portanto, é fundamental que seja muito bem fundamentada a utilização dos produtos, isto é, uma base cartográfica quando desenvolvida para uma determinada finalidade terá seu custo e prazo de execução vinculado a esta utilização.

Projetos de engenharia, como obras de estradas, implantação de linhas de transmissão, construção de hidroelétricas, implantação de malha de gasodutos, projetos de mineração, entre outros, utilizam normalmente dois produtos cartográficos. O primeiro é uma base com exatidão/acurácia menor<sup>5</sup> para a elaboração de pré-projetos ou projetos básicos; uma segunda base cartográfica, já com a definição mais exata da área de implantação do empreendimento ou obra, com exatidão/acurácia maior para a elaboração de projetos executivos.

No caso de projetos de rodovias o Departamento de Estradas e Rodagem do Estado de São Paulo DER/SP, lançou no ano de 2005, a instrução de projeto IP-DE-A00/005, que tem como objetivo indicar as atividades que devem ser desenvolvidas nos projetos para implantação de rodovias, especificamente em terreno

---

<sup>5</sup> Neste caso, a palavra menor refere-se a uma exatidão/acurácia de qualidade inferior.

virgem ou em trechos de estradas não pavimentadas, válida tanto para a implantação de rodovias quanto para a implantação de variantes. Nela, os projetos estão divididos em três fases distintas: estudos preliminares, projeto básico e projeto executivo (São Paulo, 2005).

Para os projetos preliminares, a instrução do DER/SP determina que esses estudos devam ser desenvolvidos sobre plantas existentes na escala 1:10.000. Considerando as características de imagens orbitais de alta resolução, entende-se que estas imagens atenderão à finalidade proposta. No caso dos projetos básicos, a instrução aconselha que os estudos sejam desenvolvidos com base em restituição aerofotogramétrica na escala 1:2.000, sem determinar a fonte a ser utilizada para atingir tal escala. Por fim, o projeto executivo deve ser desenvolvido e apresentado sobre plantas na escala 1:1.000, podendo ainda projetos específicos, como interseções, retornos e acessos, serem desenvolvidos na escala 1:500. Nesses casos, a princípio, a utilização de aeronaves tripuladas ou não tripuladas pode atender a esta demanda.

Nota-se que toda a instrução do DER/SP (2005) faz menção a escala do produto a ser utilizando, não havendo referencias quanto ao GSD no caso de imagens digitais, à quantidade de pontos/m<sup>2</sup> para os levantamentos executados com sistema LiDAR, e ainda, à exatidão posicional dos produtos, principalmente em relação ao controle de qualidade ou norma técnica que possa ser utilizada.

Projetos e obras envolvendo questões ambientais utilizam frequentemente imagens obtidas através de sensores orbitais. Essas imagens, como toda tecnologia, possuem aspectos positivos e negativos, quando comparados as imagens obtidas através de sensores aerotransportados (câmeras aéreas), sendo primordial, quando da definição do projeto de engenharia, pleno conhecimento da melhor técnica a ser empregada.

Para trabalhos envolvendo Fotogrametria obtida por sensor digital, após a definição da utilização do produto e, por consequência, das precisões/acurácia que este material deverá apresentar e as feições geográficas a serem identificadas, é possível passar para as demais etapas do processo fotogramétrico digital, conforme apresentado na Figura 10.

Figura 10 Etapas do processo fotogramétrico digital

<b>Aquisição dos Dados</b>	<b>Processamento Fotogramétrico</b>	<b>Geração de Produtos</b>
Planejamento de voo	Processamento dados sistema Inercial	Modelo Digital de Superfície Modelo Digital de Terreno
Execução do voo	Processamento fotos brutas	Ortorretificação de Imagens
Controle de Qualidade	Correlação de Imagens  Aerotriangulação	Geração de Mosaicos  Extração de Feições

Fonte: O Autor

A EB80-N-72.003, também conhecida como PEC-PCD, (Brasil, 2016), traz em seu contexto, critérios gerais para aquisição das feições geográficas em função da escala do produto. Para produtos digitais, ela sugere a atribuição de um valor de escala em relação a sua exatidão planimétrica, sendo convencionalmente utilizado o valor de 0,1 mm da escala (Egels; Kasser, 2002).

Por exemplo, um produto digital que tenha exatidão/acurácia equivalente a 10 centímetros, pode ser comparado ou classificado como um produto em escala 1:1000 ( $1.000 \times 0,01 = 10 \text{ cm}$ ). No entanto, este não é um critério fundamentado em estudos, mas uma sugestão que deve ser mais bem avaliada.

## 2.6 Aquisição dos dados

Os próximos tópicos irão tratar os aspectos relativos ao planejamento, execução e controle de qualidade da etapa de aquisição dos dados. Esta etapa é de fundamental importância no processo de produção dos produtos cartográficos, pois o planejamento inadequado influencia a execução do voo, o que resultará na baixa qualidade dos produtos gerados através do material primário. Este planejamento é válido tanto para a aquisição de imagens com aeronave tripuladas como com aeronaves não tripuladas.

### 2.6.1 Planejamento de voo

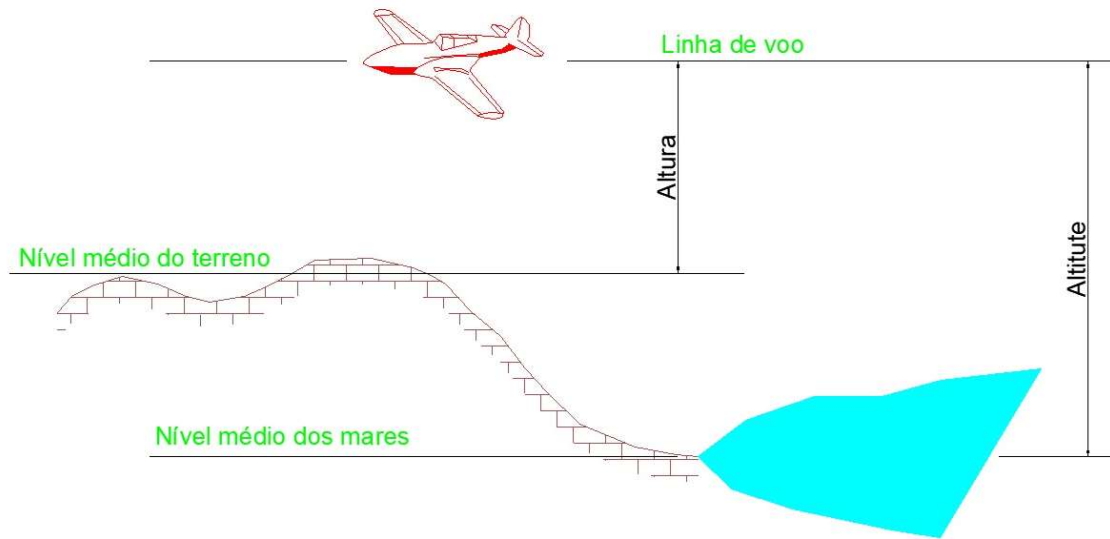
Tendo em vista que a utilização do produto foi definida na etapa de planejamento, anterior a esta, deve-se passar a elaboração do planejamento de voo. Nessa fase, são definidos os seguintes parâmetros: altura ou altitude de voo, sobreposição lateral e longitudinal, coordenadas de início e fim de cada faixa a ser voada e velocidade de voo.

Para isso, é necessário que tenhamos as características técnicas da câmera que será utilizada, sendo elas: distância focal, tamanho/resolução do *pixel* para o CCD ou CMOS, tamanho do quadro focal (quando a utilização de câmeras por frame) e velocidade de obturação da câmera.

A altura de voo, em função da câmera aérea utilizada, define a resolução espacial aproximada do produto (GSD) a ser capturado, ou vice-versa. Em função da resolução espacial desejada, pode-se definir a altura ou altitude de voo. Os cuidados adotados nesta etapa são válidos tanto para as aeronaves tripuladas como para as aeronaves não tripuladas.

É importante destacar a diferença de conceito entre altura de voo e altitude de voo, pois todos os cálculos utilizados no planejamento de voo se baseiam na altura de voo, que é a distância entre a cota média do terreno a ser retratado e a linha de voo a ser executada. A altitude de voo, por sua vez, leva em consideração o nível médio dos mares, conforme pode ser analisado na Figura 11.

Figura 11 Definição altura de voo e altitude de voo



Fonte: O Autor

Áreas que apresentem grande variação altimétrica no seu relevo deverão ter diferentes alturas de voos para cada faixa; assim, é importante que se tenha um conhecimento prévio do relevo da área a ser estudada. Em muitos casos, para a execução do planejamento de voo, onde não exista a disponibilidade de modelos de terreno mais precisos, pode-se lançar mão de modelos pré-existentes, como aqueles disponibilizados sem custo pela NASA, executados através da missão SRTM (*Shuttle Radar Topography Mission*)<sup>6</sup>.

Diversos modelos de câmeras aerofotogramétricas são comercializados, sendo alguns modelos fabricados exclusivamente para o uso em trabalhos de aerolevantamento. Câmeras utilizadas por fotógrafos profissionais, que são adaptadas para o uso em sistemas aerofotogramétricos não são tema deste estudo para comparação entre modelos, nem tão pouco para discussão da qualidade dos produtos apresentados por estes equipamentos.

<sup>6</sup> Esses modelos podem ser acessados pelo sítio de internet <https://www2.jpl.nasa.gov/srtm/>

Atualmente, destacam-se 3 (três) fabricantes<sup>7</sup> de câmeras aerofotogramétricas que atingem tanto o mercado nacional de aerofotogrametria quanto o internacional. São eles: Hexagon, detentora da marca Leica, Vexcel Imaging e Industrial Phase One.

Na utilização de uma câmera aérea digital modelo Leica DMC III, com as seguintes especificações: tamanho do *pixel* 3,9 µm, tamanho do quadro focal 25.728 *pixels* transversal a linha de voo e 14.592 *pixels* no sentido da linha de voo e distância focal de 92mm, podemos calcular a altura de voo, tendo como base o interesse em obtenção de um GSD aproximado de 10 centímetros, através da fórmula a seguir.

$$\frac{\text{Tamanho do Pixel } (P)}{\text{Distância Focal } (F)} = \frac{\text{GSD no terreno } (d)}{\text{Altura de Voo } (H)}$$

Aplicando o critério acima, teremos então que:

$$\frac{0,00039}{9,2} = \frac{10,0}{\text{Altura de Voo } (H)}$$

A altura média de voo para obtenção de um GSD de aproximadamente 10 cm no solo será de 2.358,97 metros. Já a área de cobertura de cada fotografia pode ser calculada considerando o tamanho do seu quadro focal de 25.728 *pixels* multiplicados por 10 centímetros (tamanho do GSD aproximado). Como resultado, tem-se um total de 2.582 metros transversais a linha de voo, e, se considerado 14.592 *pixels* multiplicados por 10 centímetros (tamanho do GSD aproximado), tem-se 1.459 metros ao longo da linha de voo. Desta forma, sem levar em consideração as sobreposições laterais e longitudinais, a fotografia terá uma área aproximada de 3,77 km<sup>2</sup>.

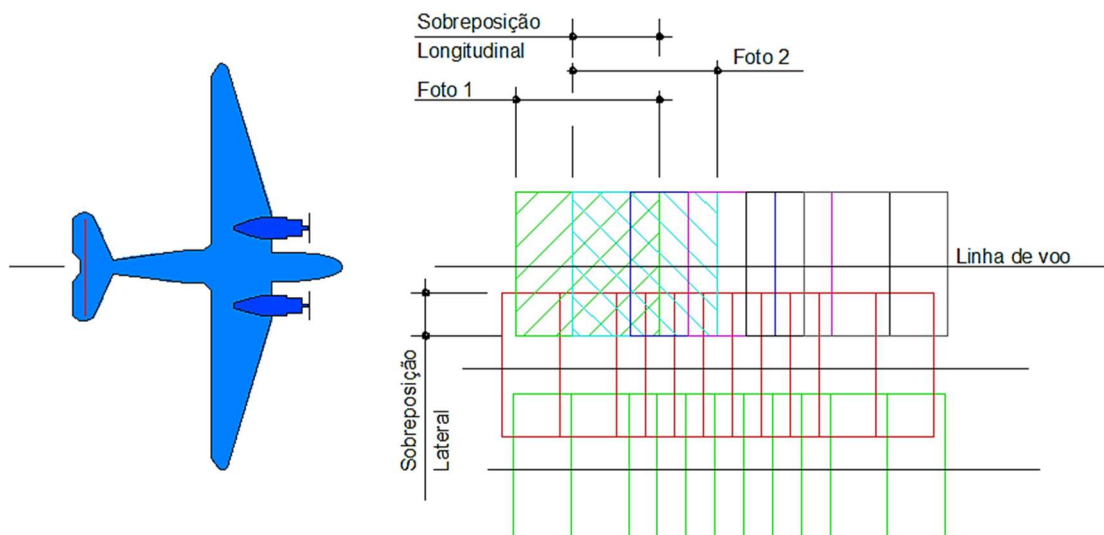
---

<sup>7</sup> Maiores informações podem ser obtidas nos sites desses fabricantes: Leica: <https://leica-geosystems.com/products/airborne-systems/imaging-sensors>; Vexcel Imaging: <https://www.vexcel-imaging.com/>; Phase One: <https://industrial.phaseone.com/>.

### 2.6.1.1 Sobreposição Lateral e Longitudinal

Um projeto aerofotogramétrico, geralmente, é composto por uma série de linhas de voo, contendo fotos obtidas na direção de voo com determinada sobreposição (câmeras de quadro/frame), tanto no sentido de voo (sobreposição longitudinal) quando entre faixas de voo (sobreposição lateral), conforme mostra a Figura 12, em que são representadas três linhas de voo no sentido Leste-Oeste, com recobrimento lateral de 30% e longitudinal de 60%. Essas linhas ou faixas de voo devem ser projetadas de maneira a recobrir toda a área de interesse, onde o sentido das linhas de voo pode ser Norte-Sul, Leste-Oeste ou Azimutal.

Figura 12 Exemplo de plano de voo gráfico



Fonte: O Autor

A sobreposição lateral ou sobreposição entre linhas/faixas é necessária para evitar a existência de "buracos" ocasionados por fatores adversos durante a realização do voo, como por exemplo, turbulências, ventos fortes que desloquem a aeronave, variações na altura de voo, ou ainda, devido a grandes variações altimétricas no terreno, auxiliando também na etapa de aerotriangulação.

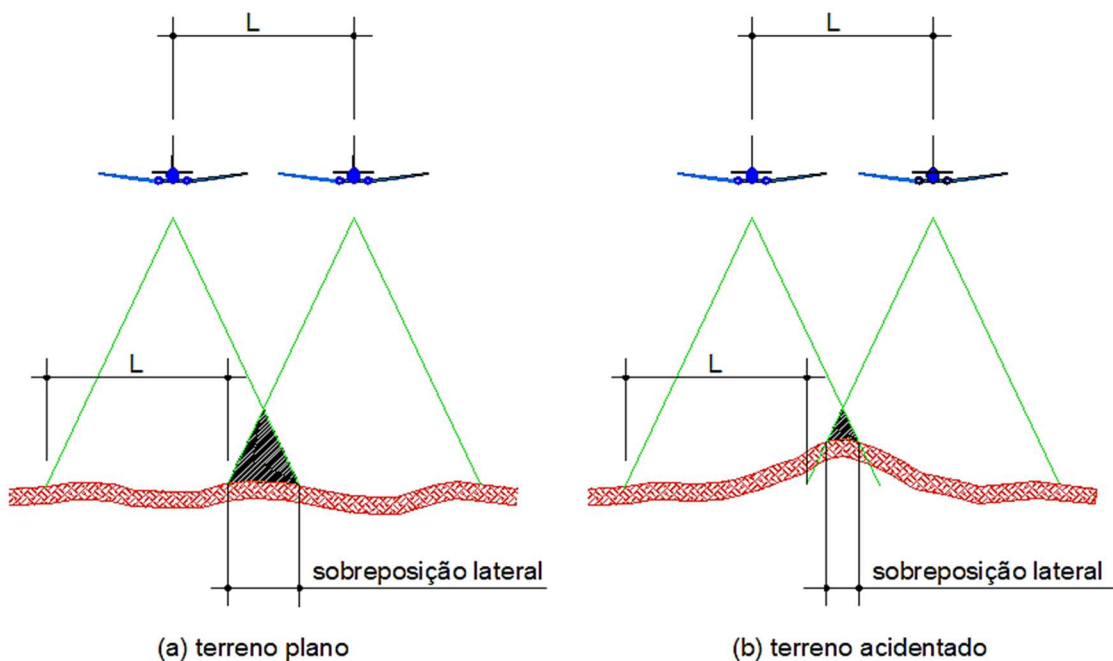
Normalmente, adota-se uma sobreposição lateral de 30%, podendo este valor variar conforme o tipo de relevo a ser mapeado, o tipo de produto a ser gerado e o controle que temos no instante da execução do voo. Sistemas que permitam um

melhor controle e um maior conhecimento do relevo do terreno possibilitam a utilização de uma menor sobreposição lateral, o que resulta em uma maior produtividade na etapa de captura da informação.

Outro motivador para a utilização da sobreposição lateral de 30% é que, desta maneira, pode-se trabalhar com a área útil da fotografia de melhor qualidade, podendo eliminar as bordas, que em geral apresentam pior qualidade geométrica, devido à influência da distorção radial da lente e pela característica de perspectiva da fotografia (câmera de quadro) – além de serem porções da imagem com presença de áreas de oclusão.

A Figura 13 demonstra a variação na sobreposição lateral, ocorrida devido a diferenças no relevo do terreno. Nota-se a diminuição da área de sobreposição lateral na Figura 13.b quando se comparam os dois exemplos. Uma análise cuidadosa na variação do terreno deve ser efetuada durante o planejamento de voo, podendo ser determinadas alturas de voo diferentes para cada faixa.

Figura 13 Exemplo de variação na sobreposição lateral



Fonte: O Autor

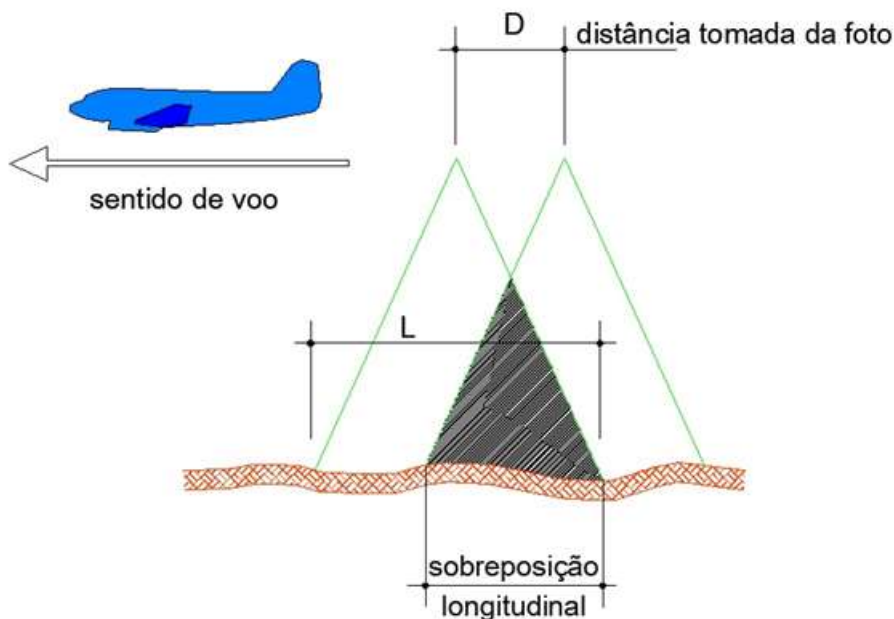


A sobreposição longitudinal é fator fundamental para a geração de modelos estéreos, devendo ser de no mínimo 50%, para que assegure a visualização tridimensional, ou seja, deve-se garantir que toda porção do terreno seja fotografada em pelo menos duas posições diferentes da câmera. Desta forma, utiliza-se uma sobreposição mínima de 60% a fim de evitar falhas que possam ocorrer durante a execução do voo ou devido às variações no terreno, podendo ainda, em áreas com relevo muito acidentado, áreas urbanas com a existência de prédios com alturas elevadas, ou ainda, quando da geração de ortofotos verdadeiras ou “*true orthophotos*”, utilizar-se fatores de sobreposição com valores maiores, podendo-se chegar até a 90%. Ortofotos verdadeiras são fundamentais na representação dos objetos acima do solo (edifícios, pontes, etc.) em sua verdadeira localização – projeção ortogonal (Oliveira *et al.*, 2018).

A Figura 14 representa o modelo de sobreposição longitudinal quando da utilização de uma câmera de quadro (frame). Geralmente, o fator de sobreposição é expresso em percentual e pode ser definido pela seguinte equação (Wolf; Dewitt, 2000).

$$\% \text{ Sobreposição Longitudinal} = \frac{L - D}{L} \times 100$$

Figura 14 Exemplo de sobreposição longitudinal

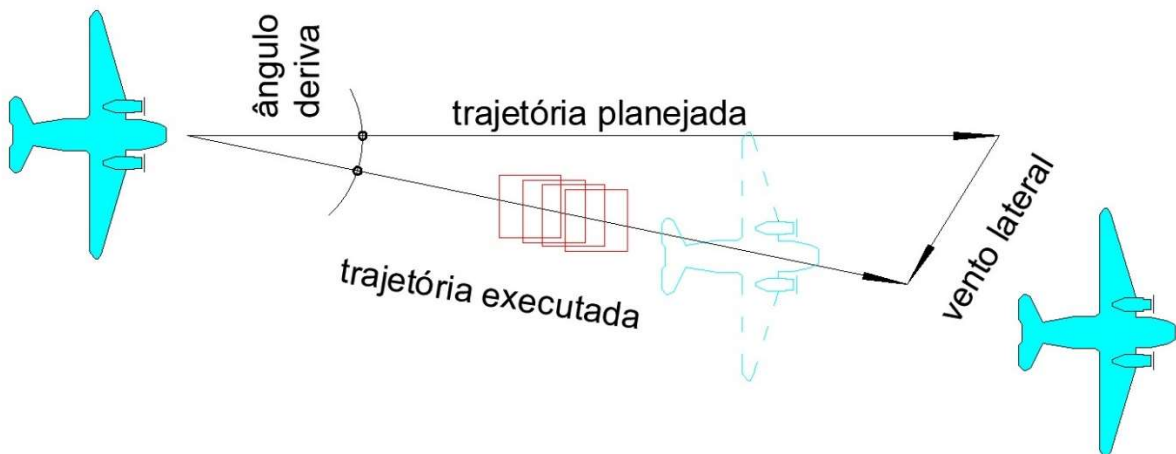


### 2.6.2 Execução do voo

Após o planejamento e definição dos produtos a serem obtidos, passa-se para a etapa de execução do voo propriamente dito. A execução correta do voo irá garantir a possibilidade de geração dos produtos cartográficos dentro das especificações. Não é possível se obter um bom produto cartográfico caso o insumo inicial (imagens) esteja comprometido. Durante a execução do voo, além dos parâmetros de sobreposição longitudinal, lateral e altura de voo, deve-se ter atenção especial aos seguintes aspectos que podem influenciar o resultado, sendo eles:

- 1) A Deriva (*Drift*): ocasionada devido ao vento no sentido transversal ou lateral à aeronave, fazendo com que esta descreva uma trajetória diferente daquela planejada no plano de voo, conforme demonstrado na Figura 15.

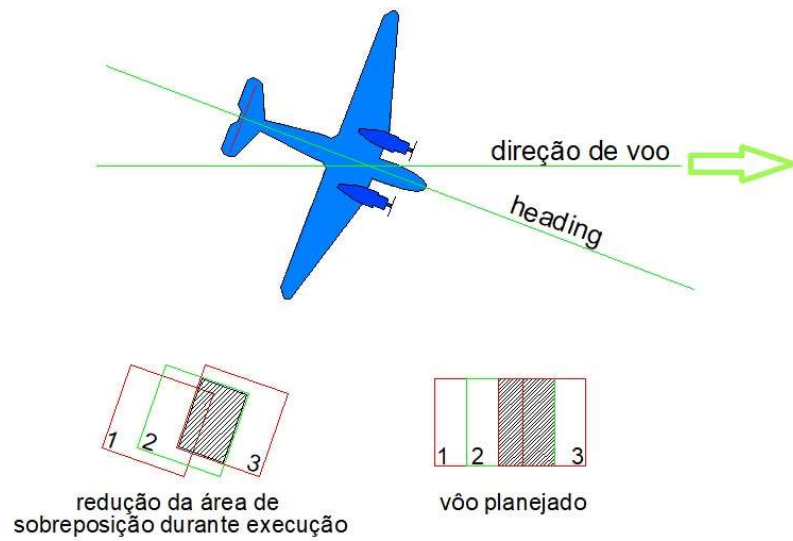
Figura 15 Exemplo ângulo de deriva



Fonte: O Autor

- 2) Guinada: é a consequência do movimento de rotação horizontal da aeronave em torno do seu eixo principal (vertical) e resulta na redução da cobertura estéreo entre as fotos, conforme a Figura 16.

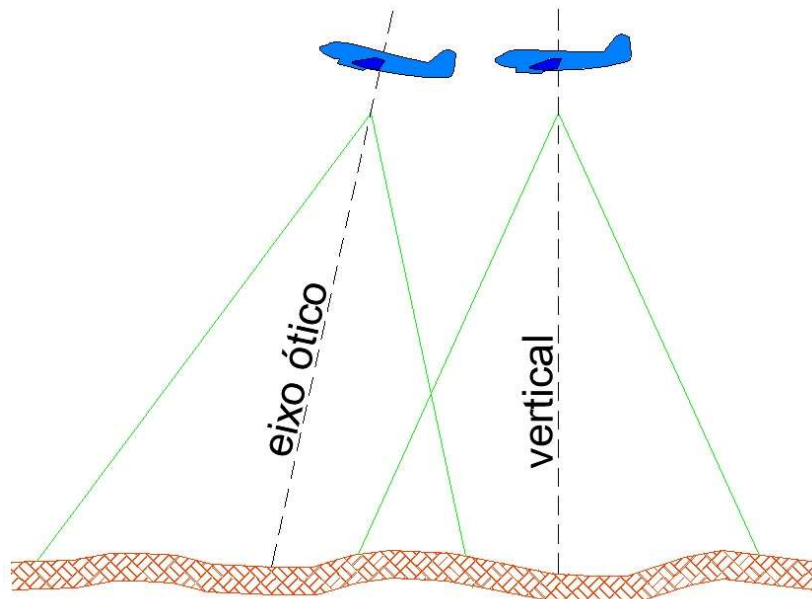
Figura 16 Exemplo de guinada aérea



Fonte: O Autor

- 3) Arfagem (*Tilt*): representa a inclinação do eixo vertical da câmera, causando também diminuição da área de cobertura estéreo, Figura 17.

Figura 17 Exemplo efeito de Tilt, Inclinação do e eixo ótico da câmera

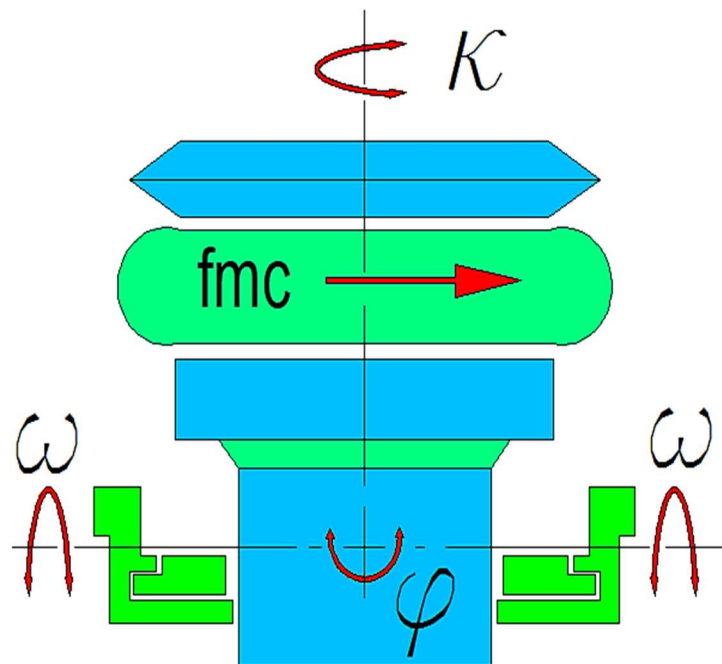


Fonte: O Autor

Com a finalidade de eliminar ou minimizar os problemas causados pela movimentação da aeronave durante a obtenção dos dados, foram desenvolvidos equipamentos eletromecânicos capazes de minimizar essas variações. Esses equipamentos são denominados plataformas giro-estabilizadas. Essas plataformas são instaladas em substituição aos antigos berços mecânicos, que eram utilizados para efetuar a correção manual de deriva.

As plataformas possuem a função de garantir a estabilização da câmera, além de absorver as vibrações da aeronave, não permitindo que essas vibrações sejam transmitidas para a câmera, evitando ou minimizando movimentações durante o processo de obturação das imagens, uma vez que este é fundamental para garantir a qualidade das imagens, principalmente no quesito qualidade geométrica (*Collins et al.*, 2004).

Figura 18 Definição de movimento de compensação angular



Fonte: O Autor

Outra característica importante das plataformas giro-estabilizadas é a capacidade de executar a compensação de movimento angular. A Figura 18 retrata

os movimentos angulares de  $\omega$  (ômega),  $\varphi$  (phi) e  $\kappa$  (kappa) relativos à movimentação angular.

Esta movimentação angular, geralmente, causa o efeito de borrão na imagem. Ele pode ser estimado em função do tempo de exposição, distância radial e distância focal. O efeito de borrão nas imagens planas, resultantes da rotação em  $\omega$  e  $\varphi$ , crescem em função da distância radial, distância focal e tempo de exposição, como pode ser avaliado na Tabela 7.

Tabela 7 Movimento angular em uma câmera com distância focal de 153 mm, em diferentes tempos de exposição, devido à rotação simultânea em  $\omega$  e  $\varphi$ , não compensada com uma velocidade angular de  $3^\circ / s$ .

$3^\circ / s$	$c = 153 \text{ mm}$	tempo de exposição (1 / s)		
posição	distância radial	1/100	1/200	1/500
centro	0 mm	81 $\mu\text{m}$	41 $\mu\text{m}$	16 $\mu\text{m}$
lado	110 mm	123 $\mu\text{m}$	61 $\mu\text{m}$	20 $\mu\text{m}$
extremidade	150 mm	160 $\mu\text{m}$	79 $\mu\text{m}$	32 $\mu\text{m}$

Fonte: Adaptado de Abdullah, 2004

O efeito no ângulo  $\kappa$  independe da distância focal é normalmente zero no centro da imagem, conforme demonstrado na Tabela 8:

Tabela 8 Movimento angular, diferente tempo de exposição, devido à rotação em  $\kappa$ , não compensada com uma velocidade angular de  $3^\circ / s$ .

$3^\circ / s$	$c = 153 \text{ mm}$	tempo de exposição (1 / s)		
posição	distância radial	1/100	1/200	1/500
centro	0 mm	0 $\mu\text{m}$	0 $\mu\text{m}$	0 $\mu\text{m}$
lado	110 mm	58 $\mu\text{m}$	29 $\mu\text{m}$	12 $\mu\text{m}$
extremidade	150 mm	79 $\mu\text{m}$	40 $\mu\text{m}$	16 $\mu\text{m}$

Fonte: Adaptado de Abdullah, 2004

As plataformas giro-estabilizadas aumentam a qualidade das imagens, ativando a compensação destes ângulos no momento da tomada das fotos (Collins *et al.*, 2004).

A maior função das plataformas giro-estabilizadas, é manter o eixo ótico da câmera em uma constante atitude, tanto para  $\omega$  (ômega) quanto para  $\phi$  (phi) e evitar rotações no eixo  $\kappa$  (kappa). Normalmente, as plataformas giro-estabilizadas possuem a capacidade de correção de aproximadamente  $\pm 5$  graus nos três eixos. Testes demonstram que a performance das plataformas giro-estabilizadas mantêm o alinhamento vertical da câmera com um desvio padrão de  $\pm 0,5^\circ$  em relação ao nadir, o que aumenta significativamente o controle das sobreposições laterais e longitudinais (Collins *et al.*, 2004).

Para aplicações na área de Fotogrametria, a plataforma giro-estabilizada é somente um dos componentes de todo o sistema aerofotogramétrico. Para a utilização dos seus benefícios e performance, de maneira ideal, a plataforma giro-estabilizada deve estar integrada a um conjunto composto também por um sistema GNSS e uma unidade de movimentação inercial. Este conjunto possibilita a determinação dos parâmetros de orientação exterior técnica conhecida como georreferenciamento direto.

Outro elemento introduzido tanto para as câmeras analógicas como nos sistemas digitais, é o sistema de compensação de arrasto FMC, (*Forward Motion Compensation*), em câmeras analógicas ele foi criado ao final dos anos 90, e se concentrou na compensação de movimento para frente, sentido de voo, para melhorar a qualidade da imagem devido a velocidade do voo e a escala da imagem produzirem um desfoque na imagem, mesmo em curtos tempos de exposição (Dohr *et al.*, 2022).

Com o advento das câmeras aéreas digitais, a compensação de movimento de arrasto foi implementada como um recurso eletrônico dos sensores CCD, ou seja, não se utilizava mais o sistema mecânico. Atualmente nos sensores digitais a tecnologia CCD foi substituída pela tecnologia CMOS, com esta mudança devido a impossibilidade de introduzir uma componente eletrônica nos sistemas CMOS, capaz de realizar a compensação de arrasto, houve a necessidade de implementar o mecanismo FMC por outra solução, baseada em um dispositivo mecânico capaz de

mover o sensor ao longo da trajetória de voo da aeronave, como era a abordagem para câmeras analógicas (Dohr *et al.*, 2022).

A Figura 19 apresenta um conjunto aerofotogramétrico digital, composto por uma câmera aérea, por plataforma giro-estabilizada, por sistema de movimentação inercial e por seus computadores de controle. Nesta figura não são apresentadas: a antena do sistema GNSS, que fica externa a aeronave e as telas de controle do sistema, disponibilizadas para o piloto controlar o plano de voo e para o operador do equipamento acompanhar e operar o conjunto completo.

Figura 19 Exemplo de sistema aerofotogramétrico digital instalado em uma aeronave



Fonte: O Autor

Quando da utilização de aeronaves não tripuladas, a necessidade de manutenção do eixo ótico da câmera em uma constante atitude também se faz necessária. Para tanto, os sistemas aéreos não tripulados estão equipados com um equipamento denominado “*gimbal*”, responsável por exercer função semelhante às plataformas giro-estabilizadas, sendo que um motor é colocado em cada eixo ao redor do sensor. Quando os sensores de movimentação detectam um movimento de atitude, em qualquer um dos eixos, os motores exercem um movimento contrário em tempo

real para neutralizá-lo. A Figura 20 apresenta um exemplo de aeronave não tripulada equipada com um *gimbal* com capacidade de movimentação de até 180 graus.

Figura 20 Exemplo de *gimbal* para utilização em aeronaves não tripuladas



Fonte: [www.harveynorman.com.au](http://www.harveynorman.com.au)

### 2.6.3 Controle de Qualidade das fotos aéreas digitais

Um dos objetivos principais da Fotogrametria é o de obter ótimas tomadas de voo. Nesse sentido, os pontos fundamentais para serem avaliados nas fotografias aéreas estão ligados a qualidade geométrica e radiométrica (Sato, 2002).

Considerando que, na etapa de voo, toda a execução foi realizada conforme o planejamento, e ainda as fotografias aéreas foram obtidas dentro de condições climáticas adequadas e com a câmera aérea devidamente calibrada, passamos a avaliar a cobertura aérea através da geração de um foto-índice.

Com a utilização de câmeras aéreas digitais equipadas com unidade de movimentação inercial, a geração de foto-índice passa a ser uma etapa relativamente rápida e fácil, tendo em vista que o sistema já fornece as coordenadas centrais de cada fotografia, bem como os ângulos de atitude no momento da obturação de cada evento. Por meio de um foto-índice, é possível avaliar se toda a área do projeto está sendo recoberta, e ainda se as sobreposições laterais e longitudinais estão de acordo com o planejamento, evitando, assim, que exista vazios entre as tomadas fotográficas.



### 2.6.3.1 Resolução espacial, espectral, radiométrica e temporal.

As características fundamentais de uma imagem digital ou fotografia aérea digital podem ser divididas em quatro diferentes e independentes parâmetros: resolução espacial ou geométrica (GSD), resolução espectral, resolução radiométrica e resolução temporal (Crósta, 2002).

A resolução espacial é definida pelo tamanho da célula da imagem ou pelo tamanho do *pixel*, sendo usual a utilização na engenharia cartográfica a sigla GSD. Quanto menor o objeto possível de ser visto, maior a resolução espacial, isto é, uma imagem com resolução espacial de 0,10 metros possui uma resolução maior quando comparada a uma imagem com resolução espacial de 0,50 metros.

Como o terreno e as imagens obtidas dificilmente estão paralelas, e ainda, o terreno normalmente apresenta ondulações e rugosidades, a resolução espacial não se apresenta constante, sofrendo pequenas variações ao longo da imagem, havendo também variações decorrentes dos movimentos de atitude da aeronave ou sensor, os quais são corrigidos durante o processo de ortorretificação (Garcia; Hernández; Lerma, 2012).

Na prática, o sistema óptico de uma câmera digital define o limite para a resolução espacial, é inútil tentar melhorar essa resolução amostrando a imagem ou através de métodos baseados em rotinas de *software* projetadas para melhorar precisão e, em seguida, espere que esses procedimentos também revelem detalhes no terreno supostamente "ocultos" além do limite de resolução (Thomson, 2010).

A resolução espectral é um conceito inerente às imagens multiespectrais; ela é definida pelo número de bandas espectrais de um sensor e pela largura do intervalo de comprimento de onda coberto por cada banda. Quanto maior o número de bandas, e menor a largura do intervalo de comprimento de onda, maior é a resolução espectral de um sensor.

As câmeras aéreas consideradas de grande formato, normalmente possuem a capacidade de obter as imagens em quatro bandas espectrais, vermelho, verde, azul e uma banda infravermelho.

A resolução radiométrica é dada pelo número de níveis digitais, representando níveis de cinza, usados para expressar os dados coletados pelo sensor/câmera. Quanto maior o número de níveis, maior é a resolução radiométrica.

Para entender melhor esse conceito, pensemos numa imagem com apenas 2 níveis (branco e preto) em comparação com uma imagem com 32 níveis de cinza entre o branco e o preto. Obviamente, a quantidade de detalhes perceptíveis na segunda será maior do que na primeira e, portanto, a segunda imagem terá uma melhor resolução radiométrica.

O número de níveis é comumente expresso em função do número de dígitos binários ("bits") necessários para armazenar em forma digital o valor do nível máximo. O valor em bits é sempre uma potência do número 2. Desse modo, "6 bits" quer dizer  $2^6 = 64$  níveis (Crósta, 2002). Atualmente tanto as câmeras digitais quanto as imagens orbitais podem apresentar a capacidade de se obter imagens a 14 bits, isto é  $2^{14} = 16.384$  níveis, como é o caso da câmera modelo Merlim, fabricada pela empresa VEXCEL e das imagens orbitais obtidas pelo satélite World View 3.

A maioria dos produtos de imagem são utilizados para medições ou coleta de informações, extração de atributos através de processo manual ou através da utilização de algoritmos. Nesse sentido, a qualidade radiométrica pode ser crucial e os objetos devem aparecer de maneira consistente e familiar para facilitar a extração dos atributos (Miller, 2004), sendo que a informação de interesse é caracterizada em função das propriedades dos objetos ou padrões que compõem a imagem.

Portanto, extrair informação de imagens, envolve o reconhecimento de objetos ou padrões requer grande capacidade de cognição por parte do intérprete, devido à complexidade dos processos envolvidos e à falta de algoritmos computacionais precisos o bastante para realizá-lo de forma automática (Crósta, 2002).

A resolução temporal se refere à frequência ou periodicidade que a imagem ou o sensor registra ou revisita uma área e obtém imagens periódicas ao longo de determinado tempo. No caso dos sensores orbitais, isso só é possível porque os satélites de sensoriamento remoto executam uma órbita heliosíncrona, que é um caso particular de uma órbita semipolar.

O plano de órbita é sempre fixo e ortogonal ao sentido de rotação da Terra. Assim, o satélite passa sobre o mesmo ponto da superfície da Terra na mesma hora. Dessa forma, a resolução temporal é fundamental para acompanhar ou detectar a evolução ou mudanças que ocorrem na Terra, principalmente para alvos mais dinâmicos, como o ciclo fenológico de culturas, desmatamentos e desastres ambientais, tendo forte impacto na monitoração ambiental (Meneses *et al.*, 2012).

## **2.7 Processamento dos dados provenientes do voo fotogramétrico.**

Neste item serão tratadas as etapas subsequentes a realização do voo, levando-se sempre em consideração que os tópicos aqui tratados consideram a utilização de processo totalmente digital, não sendo tema dessa pesquisa a utilização de câmeras analógicas, conforme mencionado anteriormente. Ressalta-se que estes processos são válidos para imagens obtidas tanto com aeronaves tripuladas quanto para aeronaves não tripuladas.

### **2.7.1 Processamento dos dados do Sistema Inercial.**

Descreve-se, a seguir, algumas características do sistema inercial, considerando que, tanto as câmeras aéreas digitais de grande formato ou pequeno formato, quanto outros sistemas utilizados em projetos de aerolevanteamento, tais como, equipamentos LiDAR, câmeras hiperspectrais, radares interferométricos, são dotados de sistemas inerciais.

O sistema inercial, segundo Mostafa e Hutton (2001) é composto de quatro grandes elementos: uma unidade de movimento inercial (*IMU inertial measurement unit*), um sistema GNSS de dupla frequência, um computador de bordo e um *softwares* de navegação inercial e de pós-processamento, onde o elemento principal do sistema passa a ser o *software* de navegação inercial integrada, que é utilizado em tempo real no computador de bordo e na fase de pós-processamento.

Neste *software*, as medições do sistema GNSS são usadas para auxiliar a solução de navegação inercial produzida pela integração dos dados advindos da unidade de movimentação inercial, produzindo uma solução combinada de posição e orientação que mantém a precisão dinâmica da solução de navegação inercial, mas possui a precisão absoluta do sistema GNSS.

Os dados capturados durante o voo, tanto da unidade de movimento inercial quanto do sistema GNSS, são pós-processados com a finalidade da melhoria da exatidão, através da eliminação ou diminuição da influência dos efeitos atmosféricos e orbitais, e ainda a correção dos erros oriundos do relógio do satélite. Esses dados, para que se possa obter um resultado satisfatório, devem ser capturados no mínimo com uma frequência de 1 Hz.

Para a execução deste processo de pós-processamento, usualmente utilizamos três estratégias mais comuns, sendo elas:

- 1) Voo apoiado por sistema GNSS: baseia-se em ter um sistema GNSS posicionado em uma coordenada conhecida, com exatidão suficiente para o projeto, capturando dados na mesma frequência e ao mesmo tempo da execução do voo. Esses dados são utilizados no pós-processamento para a execução da correção diferencial. Essa técnica tem a limitação da linha de base<sup>8</sup> que não deve ser superior a distância entre 50 km e 70 km, a fim de eliminar os erros referentes ao relógio do sistema e reduzir os erros orbitais e atmosféricos inerentes ao sistema GNSS.
  
- 2) Correção diferencial através de Posicionamento por Ponto Preciso (PPP): essa técnica requer, fundamentalmente, o uso de efemérides e correções dos relógios dos satélites. Em consequência, esses parâmetros devem ser disponibilizados ao usuário por alguma fonte independente. Atualmente, esses parâmetros de correção são fornecidos de maneira gratuita por entidades nacionais e internacionais, como o próprio IBGE<sup>9</sup>, que possui uma parceria com o *Geodetic Survey Division of Natural Resources of Canada* para fornecimento deste serviço; ou ainda através do serviço Americano oferecido pelo órgão *National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA)*<sup>10</sup>. Este método possui a vantagem da disponibilidade gratuita. Porém quando

---

<sup>8</sup> Linha de base é a distância do sistema GNSS instalado em solo e a área de voo do projeto executado.

<sup>9</sup> Cf. <https://www.ibge.gov.br/geociencias/informacoes-sobre-posicionamento-geodesico/servicos-para-posicionamento-geodesico.html>

<sup>10</sup> Cf. <https://www.ngs.noaa.gov/OPUS/>

comparado ao processamento anterior, apresenta um resultado inferior quanto a exatidão posicional.

- 3) Modelo de correção diferencial baseada na correção dos dados de satélite fornecido por empresas privadas. Cada empresa possui sua característica técnica, e estes serviços são disponibilizados mediante a um contrato de assinatura. São soluções baseadas em estações de monitoramento constantes, conectadas através da internet e utilizadas para determinar os dados precisos dos satélites. Dentre estas empresas podemos citar a empresa OmniSTAR, a qual possui uma série de serviços para correção DGPS e a empresa Applanix, com o sistema RTX Centerpoint.

O resultado do pós-processamento dos dados oriundos do sistema inercial, utilizando qualquer uma das técnicas, fornece como produto a trajetória da aeronave, contendo as coordenadas geográficas do centro de perspectiva de cada fotografia, com os seus ângulos de Euler ( $\omega$ ,  $\phi$  e  $\kappa$ ), isto é, a orientação exterior. Caso a exatidão apresentada pelo sistema inercial atinja os pré-requisitos do projeto, a etapa de aerotriangulação pode ser descartada, utilizando-se assim a técnica de georreferenciamento direto (Forstener *et al.*, 2004).

Não é função desta pesquisa demonstrar as vantagens de uma estratégia em relação a outra, porém as Figuras 21, 22 e 23 apresentam a distribuição do RMS de um mesmo dado<sup>11</sup>, capturado através de um sistema inercial durante a execução de um voo fotogramétrico. Este material foi processado nos três modelos citados anteriormente através do *software* POSPAC MMS versão 8.4, desenvolvido pela empresa Applanix.

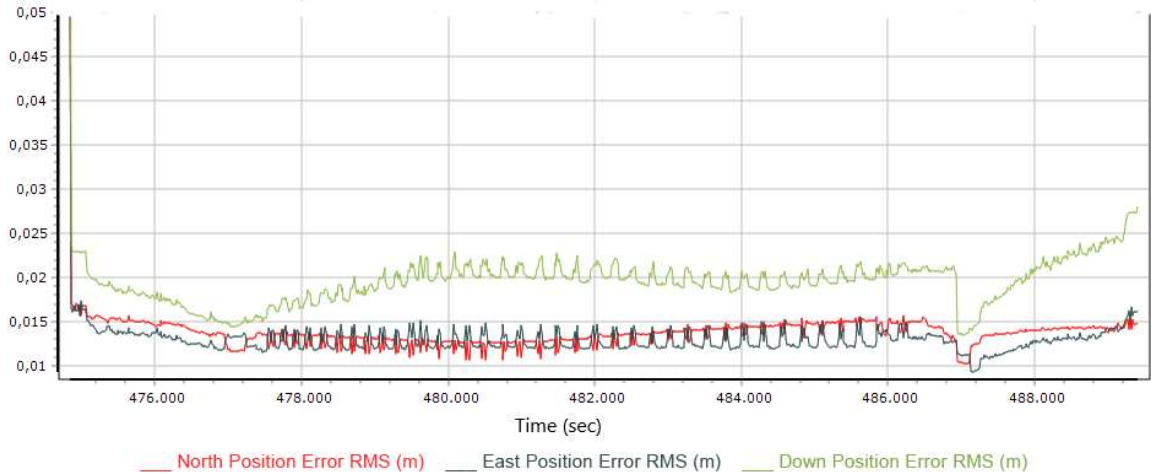
O primeiro processamento utilizou os dados oriundos de um sistema GNSS estacionado em coordenadas conhecidas (Figura 21); o segundo processamento foi executado utilizando as informações obtidas através do sistema

---

<sup>11</sup> Os dados para esta pesquisa foram disponibilizados pela empresa Fototerra Atividades de Aerolevantamentos Ltda.

PPP (Figura 22) e; ainda, o terceiro e último processamento foi realizado utilizando as informações do sistema RTX Centerpoint da empresa Applanix (Figura 23).

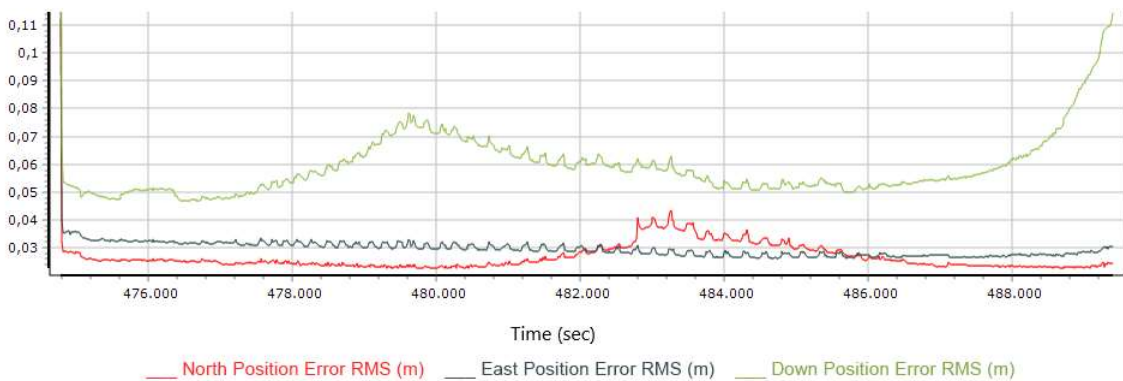
Figura 21 Gráfico RMS Processamento de dados Inerciais utilizando base GNSS



Fonte: O Autor

Segundo o gráfico da Figura 21, levando-se em consideração o período entre o segundo 476.000 e 488.000 (3 horas e 20 minutos), nota-se que com utilização dos dados oriundos da base GNSS, o RMS para a componente X e Y foi de aproximadamente 1,5 centímetros, enquanto a componente Z ficou na ordem de 2,0 centímetros.

Figura 22 Gráfico RMS Processamento de dados Inerciais utilizando sistema PPP

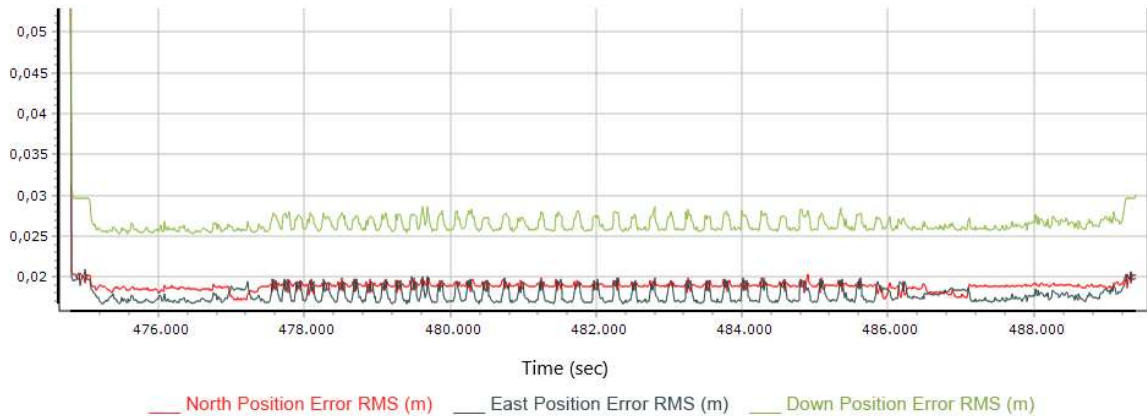


Fonte: O Autor

Avaliando o gráfico da Figura 22, considerando o mesmo período de 3 horas e 20 minutos, nota-se que, com utilização dos dados oriundos do sistema PPP,

o RMS para a componente X e Y foi de aproximadamente 3,0 centímetros, enquanto a componente Z ficou na casa de 6,0 centímetros.

Figura 23 Gráfico RMS Processamento de dados Inerciais utilizando sistema RTX Centerpoint.



Fonte: O Autor

No gráfico da Figura 23, no qual o pós-processamento foi efetuado utilizando o sistema RTX Centerpoint, tem-se que o RMS para a componente X e Y esteve na casa de 2,0 centímetros, enquanto a componente Z apresentou o valor de 2,5 centímetros.

### 2.7.2 Processamento das Imagens brutas

O pré-processamento das fotos brutas provenientes do voo fotogramétrico tem como finalidade a melhoria da qualidade espectral e espacial. Esse processo consiste na aplicação de operações matemáticas dos dados, resultando em imagens mais apropriadas para uma determinada aplicação (Meneses *et al.*, 2012).

Dois processos são de fundamental importância na realização do processamento das fotos brutas, a saber, a realização da equalização radiométrica das imagens e a homogeneização da geometria das imagens.

No caso da equalização radiométrica, os problemas resultantes de diferenças apresentadas entre imagens, normalmente, são causados por questões atmosféricas, ou ainda por voos realizados em datas ou horários diferentes, haja visto que, não necessariamente, um voo fotogramétrico tem seu início e fim no mesmo dia, ou ainda com a mesma inclinação solar, causando assim diferenciação entre o contraste de fotos.

No caso da resolução espacial (GSD), fatores como a ondulação do relevo mapeado e a variação na altura da aeronave durante a execução do voo, interferem diretamente na qualidade da resolução espacial, sendo necessário a utilização de processos de ortorretificação para tornar homogêneo a resolução espacial das fotografias aéreas ou das imagens de satélite.

### 2.7.3 Orientação Interior

Entende-se por orientação interior a reconstrução do feixe perspectivo, ou seja, o referenciamento da imagem em relação à câmera. Uma vez que as imagens obtidas se encontram isoladas umas das outras e salvas meramente como arquivos digitais, sem nenhuma informação métrica, isto é, utilizando apenas o sistema de coordenadas em *pixels*, próprio das imagens digitais, faz-se necessário reconstituir o sistema interno câmera-imagem correspondente ao momento em que as fotografias foram obtidas. Somente assim poderão ser efetuadas medidas com precisão sobre as imagens fotográficas (Coelho; Brito, 2007).

Os parâmetros da orientação interior, são obtidos através do processo de calibração das câmeras, conforme relatado. Estes parâmetros definem as características internas da câmera e permitem reconstruir analiticamente o feixe de raios formador da imagem, sendo eles: distância focal, coordenadas do ponto principal, coeficientes de distorção radial simétrica, distorção descentra e afinidade (Campos *et al.*, 2015).

Os primeiros fabricantes de câmeras digitais, inicialmente, passaram a adotar o mesmo processo de calibração utilizado para as câmeras analógicas, isto é, processo desenvolvido exclusivamente em laboratório; exceção feita a empresa Vexcel Imaging, que passou a utilizar o conceito de múltiplas imagens obtidas em um campo de teste, utilizando a técnica conhecida como “*self-calibration*” (Cramer, 2011).

Atualmente, foram implementadas rotinas nos *software* comerciais que possibilitam o cálculo destes parâmetros, como é o caso do *software* Inpho (modulo Match-AT), desenvolvido pela empresa Trimble, através de um bloco imagens, obtidas de maneira específica e com a utilização de pontos de controle é possível a obtenção dos parâmetros de orientação interior. Maiores detalhes a respeito do processo de calibração de câmeras aéreas digitais podem ser encontrados em Cramer (2009b).



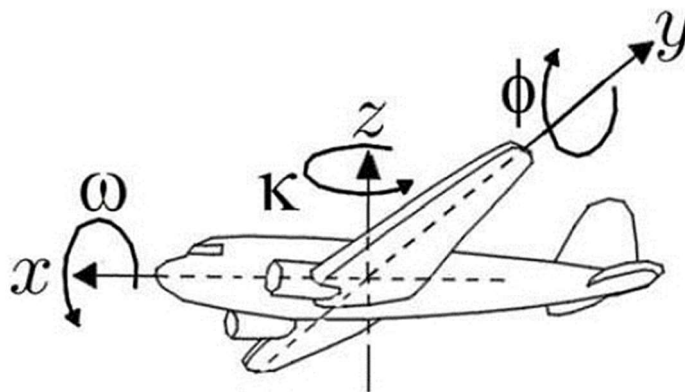
### 2.7.4 Orientação Exterior

O principal objetivo do processo de orientação exterior é a obtenção da posição e atitude do sensor no instante da captura da imagem em relação ao referencial do espaço-objeto. Para que uma imagem esteja orientada externamente, é necessário que sejam conhecidos os seus seis parâmetros de orientação, as coordenadas no espaço-objeto para o centro de perspectiva e os ângulos de rotação ou atitude do sensor ( $\omega$ ,  $\phi$  e  $\kappa$ ) (Mugnier *et al.*, 2004).

Segundo Coelho e Brito (2007), o detalhamento dos seis parâmetros é destacado a seguir:  $X_0$ ,  $Y_0$  e  $Z_0$  representam a posição do centro de perspectiva nos eixos  $X$ ,  $Y$  e  $Z$  (respectivamente) do sistema de coordenadas do espaço-objeto. Já os ângulos de Euler ( $\omega$ ,  $\phi$  e  $\kappa$ ) significam rotações sofridas pelo sistema local de coordenadas  $x$ ,  $y$  e  $z$  em relação ao referencial do terreno ( $X$ ,  $Y$  e  $Z$ ). Dessa forma, rotacionando-se  $x$ ,  $y$  e  $z$  de  $-\omega$ ,  $-\phi$  e  $-\kappa$ , pode-se torná-lo paralelo a  $X$ ,  $Y$  e  $Z$ .

Os ângulos de Euler representam as seguintes rotações:  $\omega$  representa a rotação do eixo  $x$  em relação a  $X$ , enquanto  $\phi$  representa a rotação do eixo  $y$  em relação a  $Y$ , sendo que, para a Fotogrametria vertical, estes ângulos devem ser pequenos, não devendo ultrapassar o valor de  $5^\circ$  (cinco graus) em valor absoluto. O ângulo  $\kappa$  representa a rotação do eixo  $z$  em relação a  $Z$ . A Figura 24 representa os parâmetros de atitude do sensor que são contados no sentido anti-horário.

Figura 24 Parâmetros de atitude de um sensor colocado em plataforma aérea



Fonte: Coelho e Brito, 2007

A matriz de rotação equivalente a cada ângulo, expressa a transformação necessária para a rotação de um sistema em relação a outro de tal ângulo. Multiplicando-se todas, é possível obter a matriz de rotação  $R$ , equivalente aos três movimentos simultâneos.

$$R\varphi = \begin{bmatrix} \cos\varphi & 0 & -\operatorname{sen}\varphi \\ 0 & 1 & 0 \\ \operatorname{sen}\varphi & 0 & \cos\varphi \end{bmatrix} \quad (2.1)$$

$$R\omega = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\omega & \operatorname{sen}\omega \\ 0 & -\operatorname{sen}\omega & \cos\omega \end{bmatrix} \quad (2.2)$$

$$R\kappa = \begin{bmatrix} \cos\kappa & \operatorname{sen}\kappa & 0 \\ -\operatorname{sen}\kappa & \cos\kappa & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.3)$$

Assim  $R\omega \times R\varphi \times R\kappa = R$  é igual a:

$$R = \begin{bmatrix} \cos\varphi \cos\kappa & -\cos\varphi \operatorname{sen}\kappa & \operatorname{sen}\varphi \\ \cos\omega \operatorname{sen}\kappa + \operatorname{sen}\omega \operatorname{sen}\varphi \cos\kappa & \cos\omega \cos\kappa - \operatorname{sen}\omega \operatorname{sen}\varphi \operatorname{sen}\kappa & -\operatorname{sen}\omega \cos\varphi \\ \operatorname{sen}\omega \operatorname{sen}\kappa - \cos\omega \operatorname{sen}\varphi \cos\kappa & \operatorname{sen}\omega \cos\kappa + \cos\omega \operatorname{sen}\varphi \operatorname{sen}\kappa & \cos\omega \cos\varphi \end{bmatrix} \quad (2.4)$$

Para simplificar, temos que:

$$R = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{bmatrix}$$

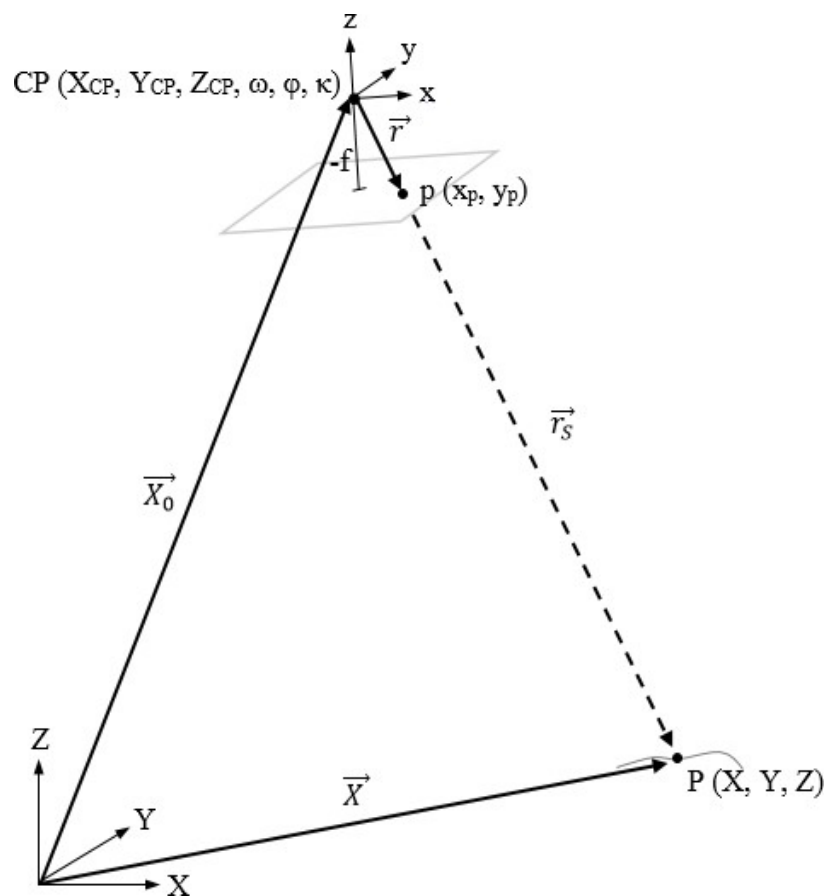
Dessa forma,  $R$  rotaciona um termo de coordenadas do espaço-imagem para o espaço-objeto. Já  $M$ , que é igual a  $R^{-1}$  ou  $R^T$ , rotaciona um termo de coordenadas do espaço-objeto para o espaço-imagem. A igualdade  $R^{-1} = R^T$  é válida se, e somente se, a matriz  $R$  for ortogonal, o que é o caso. Sendo  $R$  o produto de três matrizes ortogonais ( $R\varphi$ ,  $R\omega$  e  $R\kappa$ ), logo  $R$  é ortogonal e, portanto, vale tal igualdade (Coelho; Brito, 2007).

### 2.7.5 Equações de colinearidade

As equações de colinearidade podem ser consideradas a base da Fotogrametria digital, uma vez que relacionam os parâmetros da orientação exterior, as coordenadas fotográficas de um ponto e as coordenadas tridimensionais do mesmo ponto no sistema referencial do terreno ou do espaço-objeto. Sua formulação decorre da condição de colinearidade, que pode ser enunciada da seguinte forma: “No momento da tomada da imagem, o ponto objeto P, o centro perspectivo O e o ponto imagem p formam uma linha reta (Coelho; Brito, 2007).

A Figura 25 apresenta a condição de colinearidade para um determinado ponto P e sua projeção na imagem (p), e ainda os elementos necessários para seu desenvolvimento algébrico, para obtenção das equações de colinearidade, tanto direta quanto inversa, adaptado de Mikhail; McGlone; Bethel, 2001.

Figura 25 Elementos necessários para desenvolvimento das equações de colinearidade



Fonte: Oliveira (2016)

Oliveira (2016) destaca em seu trabalho que segundo Mikhail, MCGlone e Bethel (2001), os seis parâmetros de orientação exterior da imagem ( $X_{CP}$ ,  $Y_{CP}$ ,  $Z_{CP}$ ,  $\omega$ ,  $\varphi$ ,  $\kappa$ ), as coordenadas de um ponto no terreno  $P$  ( $X$ ,  $Y$ ,  $Z$ ) e seu correspondente na imagem  $p$  ( $x_p$ ,  $y_p$ ), já considerando o deslocamento do ponto principal e a correção dos erros sistemáticos, podem ser relacionados pela condição de colinearidade. Essa condição pode ser representada por vetores no sistema de coordenadas do espaço imagem ou do espaço objeto. Porém, a um desses sistemas deve-se aplicar uma translação, uma rotação e um fator de escala. Inicialmente, têm-se:

$$\vec{r} = \begin{bmatrix} x_p \\ y_p \\ -f \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$\vec{r}_s = \Lambda^{-1} * M^T * \vec{r} \quad (2)$$

$$\vec{X} = \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$\vec{X}_0 = \begin{bmatrix} X_{cp} \\ Y_{cp} \\ Z_{cp} \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$M = \begin{bmatrix} \cos \varphi \cos \kappa & \cos \omega \sin \kappa + \sin \omega \sin \varphi \cos \kappa & \sin \omega \sin \kappa - \cos \omega \sin \varphi \cos \kappa \\ -\cos \varphi \sin \kappa & \cos \omega \cos \kappa - \sin \omega \sin \varphi \sin \kappa & \sin \omega \cos \kappa + \cos \omega \sin \varphi \sin \kappa \\ \sin \varphi & -\sin \omega \cos \omega & \cos \omega \sin \varphi \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$M = \begin{bmatrix} m_{11} & m_{12} & m_{13} \\ m_{21} & m_{22} & m_{23} \\ m_{31} & m_{32} & m_{33} \end{bmatrix} \quad (6)$$

Em que:

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

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

- $\overline{X}_0$  é o vetor posicional do ponto CP no espaço objeto;
- $\vec{X}$  é o vetor posicional do ponto  $P$  no espaço objeto;
- $M$  é a matriz de rotação em função da atitude do CP  $(\omega, \varphi, \kappa)$ ;
- $\lambda$  é o fator de escala entre o espaço imagem e objeto.

Considerando-se, algebricamente, que  $\vec{X} = \overline{X}_0 + \vec{r}_s$ . Para se determinar as coordenadas no espaço imagem ( $\vec{r}$ ) em função do CP ( $\overline{X}_0$ ) e do ponto espaço objeto ( $\vec{X}$ ), colinearidade direta, aplica-se uma rotação e escala sobre o sistema do espaço imagem, tendo a seguinte formulação (Oliveira, 2016):

$$\vec{r}_s = \vec{X} - \overline{X}_0 \quad (7)$$

$$\lambda^{-1} * M^T * \vec{r} = \vec{X} - \overline{X}_0 \quad (8)$$

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

Substituindo [1], [3], [4] e [6] em [9], tem-se:

$$\begin{bmatrix} x_p \\ y_p \\ -f \end{bmatrix} = \lambda * \begin{bmatrix} m_{11} & m_{12} & m_{13} \\ m_{21} & m_{22} & m_{23} \\ m_{31} & m_{32} & m_{33} \end{bmatrix} * \left( \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} X_{cp} \\ Y_{cp} \\ Z_{cp} \end{bmatrix} \right) \quad (10)$$

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

$$y_p = \lambda * [m_{21} * (X - X_{cp}) + m_{22} * (Y - Y_{cp}) + m_{23} * (Z - Z_{cp})] \quad (12)$$

$$-f = \lambda * [m_{31} * (X - X_{cp}) + m_{32} * (Y - Y_{cp}) + m_{33} * (Z - Z_{cp})] \quad (13)$$

Isolando o valor de  $\lambda$  pela Equação 13, têm-se:

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

Substituindo [14] em [11] e [12], têm-se as equações de colinearidade direta:

$$x_p = -f * \frac{m_{11} * (X - X_{cp}) + m_{12} * (Y - Y_{cp}) + m_{13} * (Z - Z_{cp})}{m_{31} * (X - X_{cp}) + m_{32} * (Y - Y_{cp}) + m_{33} * (Z - Z_{cp})} \quad (15)$$

$$y_p = -f * \frac{m_{21} * (X - X_{cp}) + m_{22} * (Y - Y_{cp}) + m_{23} * (Z - Z_{cp})}{m_{31} * (X - X_{cp}) + m_{32} * (Y - Y_{cp}) + m_{33} * (Z - Z_{cp})} \quad (16)$$

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

$$\vec{X} = \vec{X}_0 + \vec{r}_s \quad (17)$$

$$\vec{X} = \vec{X}_0 + \Lambda^{-1} * M^T * \vec{r} \quad (18)$$

Substituindo [1], [4] e [6] em [18], tem-se:

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_{cp} \\ Y_{cp} \\ Z_{cp} \end{bmatrix} + \Lambda^{-1} * \begin{bmatrix} m_{11} & m_{21} & m_{31} \\ m_{12} & m_{22} & m_{32} \\ m_{13} & m_{32} & m_{33} \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} x_p \\ y_p \\ -f \end{bmatrix} \quad (19)$$

$$X = X_{cp} + \Lambda^{-1} * [m_{11} * x_p + m_{21} * y_p + m_{31} * -f] \quad (20)$$

$$Y = Y_{cp} + \Lambda^{-1} * [m_{12} * x_p + m_{22} * y_p + m_{32} * -f] \quad (21)$$

$$Z = Z_{cp} + \Lambda^{-1} * [m_{13} * x_p + m_{23} * y_p + m_{33} * -f] \quad (22)$$

Isolando o valor de  $\Lambda^{-1}$  a partir da Equação 22, tem-se:

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

Substituindo [23] em [20] e [21], têm-se as equações de colinearidade inversa:

$$X = X_{cp} + (Z - Z_{cp}) * \frac{m_{11} * x_p + m_{21} * y_p + m_{31} * -f}{m_{13} * x_p + m_{23} * y_p + m_{33} * -f} \quad (24)$$

$$Y = Y_{cp} + (Z - Z_{cp}) * \frac{m_{12} * x_p + m_{22} * y_p + m_{32} * -f}{m_{13} * x_p + m_{23} * y_p + m_{33} * -f} \quad (25)$$

### 2.7.6 Correlação de Imagens Digitais

A correlação de imagens digitais ou determinação de pontos homólogos entre imagens aéreas, na maioria dos *software* comerciais atuais, utilizam-se de algoritmos que exploram a informação de intensidade (tons de cinza). A técnica de correlação de imagens digitais tem como finalidade a detecção de pontos homólogos através de medidas de similaridade entre as potenciais áreas homólogas em duas imagens.

Essa técnica consiste em definir uma janela de pesquisa para cada uma das combinações possíveis, avaliando o grau de similaridade desta posição, detectando assim o ponto que apresenta maior grau de similaridade, rotulando este ponto como o ponto correspondente ou homólogo (Da Silva *et al.*, 2007).

Com o aumento da disponibilidade de câmeras aéreas digitais, e por consequência, a possibilidade de utilização de maiores valores de sobreposição, principalmente entre faixas de voo, e ainda em função do tamanho do quadro focal, a quantidade de imagens geradas em um voo fotogramétrico utilizando câmera digital é relativamente maior quando comparado aos voos anteriormente executados com câmeras analógicas. Este aumento no número de imagens fez com que vários fabricantes de *software*, voltados para o processo de aerotriangulação, desenvolvessem ferramentas para a detecção automática de pontos de amarração (Jung; Fuchs; Boldo, 2002).

Dentro destas técnicas podemos citar SIFT (*Scale-Invariant Feature Transform*), capaz de extrair características distintivas de imagens, independentemente de variações como escala, rotação e iluminação, ou o modelo SGM (*Semi-Global Matching*) o qual proporciona bons resultados quando da utilização na geração de modelos digitais de superfície

Destaca-se ainda que, com a utilização de aeronaves não tripuladas, em função dos sensores utilizados, o aumento na quantidade de imagens é ainda maior. Por outro lado, com o advento das câmeras digitais, obtivemos a possibilidade de capturar imagens com elevada qualidade radiométrica e geométrica, as quais resultam em ótimos resultados quando aplicadas as técnicas de correlação de imagens digitais.

Detalhes como áreas de oclusão, grande variação no relevo, voos realizados em datas diferentes, variação na altura de voo, rotação das imagens, áreas de sombras, e ainda, variação no aspecto dos objetos devido ao diferentes ângulos de visão, são componentes que podem degradar a qualidade do processo (Jung; Fuchs; Boldo, 2002).

### **2.7.7 Aerotriangulação**

A aerotriangulação ou foto-triangulação é o método utilizado para determinação de pontos fotogramétricos, visando estabelecer controle horizontal e vertical através das relações geométricas entre fotografias adjacentes, a partir de uma quantidade reduzida de pontos determinados pelo apoio de campo. Esse método tem a finalidade de densificar o apoio necessário aos trabalhos de ajustamento. Ou ainda, através de imagens fotográficas, a aerotriangulação é o processo que determina as coordenadas de terreno (ou do espaço-objeto) dos pontos fotogramétricos selecionados sobre as imagens fotográficas (espaço-imagem). Isso permite a economia de tempo e custos na produção de dados cartográficos digitais, especialmente nas fases de levantamento geodésico e topográfico (Forstener *et al.*, 2004).

A aerotriangulação permite georreferenciar simultaneamente todas as imagens de um projeto, utilizando ao máximo as sobreposições entre imagens, com um número mínimo de pontos de referência (pontos de controle). Esta operação



começa com uma fase de medida das coordenadas da imagem de um certo número de pontos vistos no maior número possível de imagens. Desse modo, um cálculo em bloco permite determinar o conjunto de parâmetros fotogramétricos do trabalho, isto é, a sua orientação exterior. Os módulos de cálculo de aerotriangulação disponíveis em sistemas de Fotogrametria digital usam as mesmas fórmulas que a aerotriangulação analítica e são na maioria das vezes idênticos (Heno; Egels, 2002).

Uma vez que os sistemas digitais estão acoplados a unidades de medidas inercias e a receptores/antenas GNSS, é possível obter os parâmetros de orientação exterior para cada imagem no instante de sua tomada. Isso quer dizer que os sistemas inerciais acoplados aos sistemas de captura das imagens irão fornecer os parâmetros de orientação exterior, anteriormente discutidos, ou pelo menos dados iniciais para os parâmetros no processo de ajustamento, já que tais valores são necessários quando se aplica o método dos mínimos quadrados em modelos não lineares, como é o caso das equações de colinearidade. De posse dos parâmetros de orientação interior, provenientes do sensor (distância focal e coeficientes de distorção das lentes), pode-se aplicar a aerotriangulação através do método de feixes perspectivos.

A aerotriangulação por feixes perspectivos, também conhecida pelo termo em inglês "*bundle adjustment*", pode ser entendida como a execução de uma ressecção espacial simultaneamente à execução da interseção espacial para um conjunto de imagens digitais adquiridas sobre determinado trecho do terreno. Dessa forma, com um só ajustamento, obtêm-se os parâmetros da orientação exterior para todas as imagens do voo, associados às coordenadas no espaço-objeto (sistema de terreno) de uma série de pontos previamente medidos sobre as imagens e de poucos pontos medidos em campo. Trata-se, portanto, de um método de densificação de pontos de campo (Coelho; Brito, 2007).

Considerando a aerotriangulação, a exatidão do mapeamento não pode mais ser associada apenas à geometria da câmera e à altitude de voo. Muitos outros fatores agora influenciam a precisão dos produtos de mapeamento (ASPRS, 2023), tais como a inclusão da qualidade do sistema inercial; os parâmetros de calibração da câmera; qualidade e tamanho do (CCD) usado na matriz da câmera digital; a qualidade e a densidade dos pontos de controle capturados em campo, a qualidade

da solução de aerotriangulação, a calibração da câmera e o modelo digital do terreno usado para a produção de ortomagem. Esses fatores são avaliados neste trabalho.

## **2.8 Geração de Produtos Fotogramétricos**

Nesta etapa serão apresentados os conceitos básicos para a geração dos produtos cartográficos: os modelos digitais de superfície e terreno, o processo de ortorretificação de imagens e a geração de ortofotomosaicos. Não serão abordados os aspectos ligados a extração de feições, tanto pelo processo de restituição quanto pelo processo de digitalização, já que tais produtos não são utilizados nessa pesquisa, para tal recomenda-se Preosck, Mitishita e Antunes (2008) como referência.

### **2.8.1 Modelo Digital de Elevação, de Terreno e de Superfície**

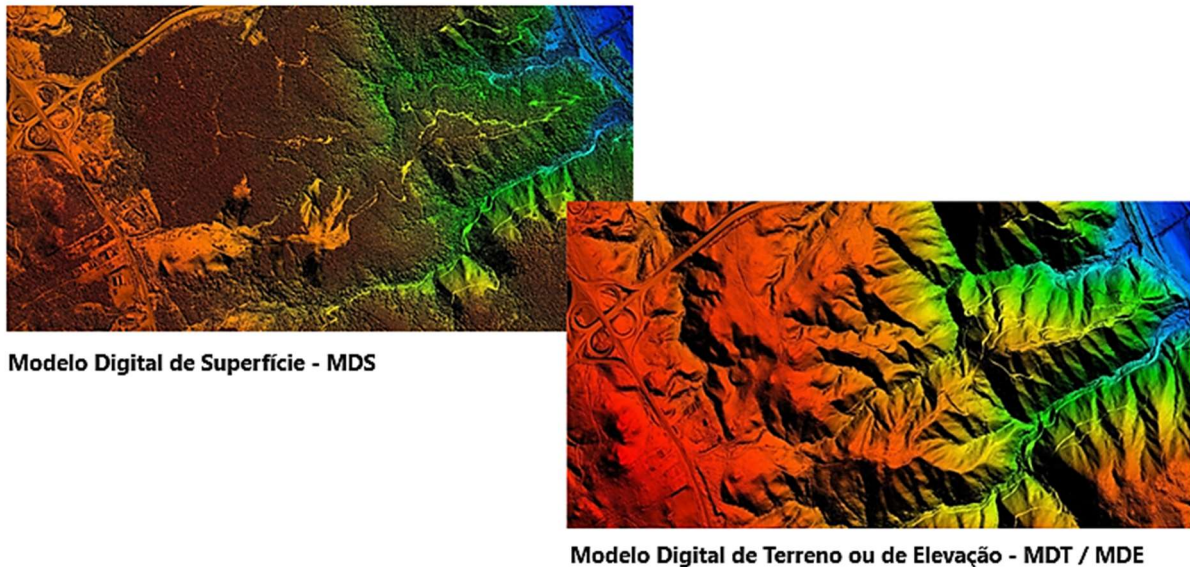
Muitos países tratam a definição de Modelo Digital de Elevação (MDE) e modelo digital de Terreno (MDT) como produtos similares. Quando não são tratados assim, como é o caso dos Estados Unidos, define-se o modelo digital de terreno (MDT) como uma representação tridimensional de uma superfície de terreno (sem feições antrópicas e vegetação), apresentada em coordenadas planimétricas X, Y, e a altimétrica Z, armazenadas em formato digital. Ele inclui não apenas alturas e elevações, mas outros elementos geográficos e características naturais, como rios, cordilheiras etc. Um MDT é efetivamente um MDE que foi aumentado por elementos como linhas de quebra (*break lines*) e observações além dos dados originais para corrigir artefatos produzidos, como estradas e pontes (Maune, 2007).

Os modelos digitais de superfície (MDS) são similares aos modelos digitais de elevação e de terreno, com a diferença destes representarem, além da modelagem tridimensional do terreno, também os elementos que estão sobre este, tais como: vegetação e feições antrópicas (torres de alta tensão, prédios ou qualquer outro tipo de construção inserido de maneira artificial ou não sobre o terreno).

Na Figura 26, representa-se do seu lado esquerdo um exemplo de um modelo digital de superfície (MDS), na qual é possível verificar a presença de vegetação e outros elementos sobre o terreno, quando comparado com a mesma área, representada no lado direito da figura pelo modelo digital de terreno ou de elevação (MDT/MDE).

Para o caso deste trabalho é adotada a nomenclatura MDT, Modelo Digital de Terreno.

Figura 26 Comparação modelo digital de superfície com modelo digital de terreno ou elevação



Fonte: O Autor

É importante ressaltar que, tanto os modelos digitais de superfície quanto os modelos digitais de elevação podem ser gerados por técnicas distintas, através de sensores passivos, como as câmeras aéreas digitais e imagens orbitais (ambos aliados a técnicas de correspondência de imagens) ou através de sensores ativos como é o caso do sistemas LiDAR ou Radars Interferométricos.

### 2.8.2 Ortorretificação de Imagens

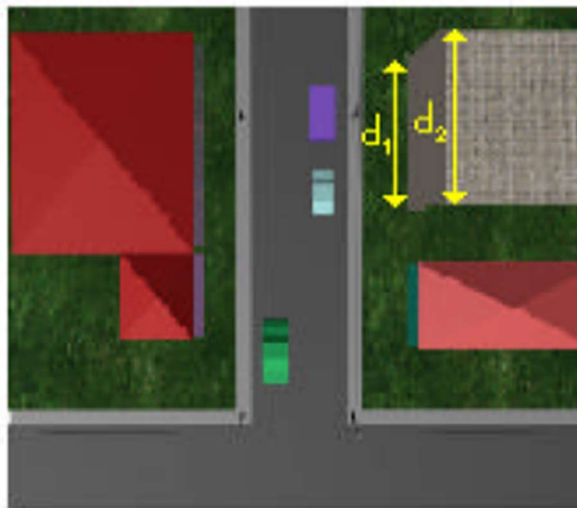
O conceito de ortoimagem pode ser definido como imagens em perspectiva ortogonal, sendo que as imagens adquiridas por câmeras estão em perspectiva central, com numerosos raios de luz advindos de diferentes pontos imageados, passando todos pelo centro de perspectiva, localizado no sistema óptico da câmera. Esse conjunto de raios é conhecido como feixe perspectivo (Coelho; Brito, 2007).

A ortorretificação convencional tem a finalidade de eliminar os efeitos causados pela atitude do sensor no instante da tomada da imagem aérea, pelos erros inerentes ao sensor (erros sistemáticos) e pelo deslocamento causado pela variação do relevo. O produto gerado com essas correções é a ortoimagem convencional. Em

outras palavras, é uma imagem de escala única ao nível do terreno, geometricamente equivalente a um mapa de linha (Oliveira, 2016).

Uma imagem em perspectiva central não pode ser utilizada para a extração de medidas, devido a erros ocasionados pela atitude do sensor e variação do relevo, inerentes a visão perspectiva, conforme pode-se observar na Figura 27, em que as distâncias  $d_1$  e  $d_2$ , as quais possuem o mesmo valor, são apresentadas de maneira distinta na imagem devido à perspectiva (Brito; Coelho, 2002).

Figura 27 Exemplo perspectiva cônica

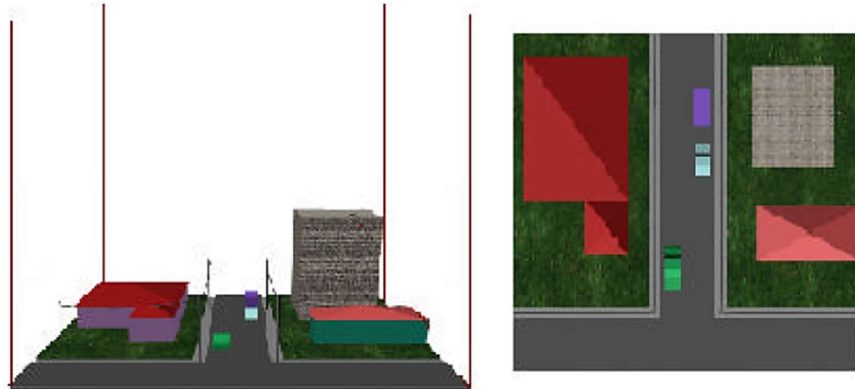


Fonte: Brito e Coelho, 2002

No caso da projeção ortogonal, raios ortogonais são projetados a partir da região imageada. Esses raios não se encontram e a imagem final não terá desvios, nem tão pouco distorções relativas ao relevo (Brito; Coelho, 2002).

As imagens que possuem todos os elementos em projeção ortogonal são também conhecidas como ortofotos verdadeiras. Elas podem ser utilizadas para a extração de medidas de forma direta – evitando, muitas vezes, o processo de restituição. A Figura 28 representa, assim, os objetos em projeção ortogonal.

Figura 28 Exemplo projeção ortogonal



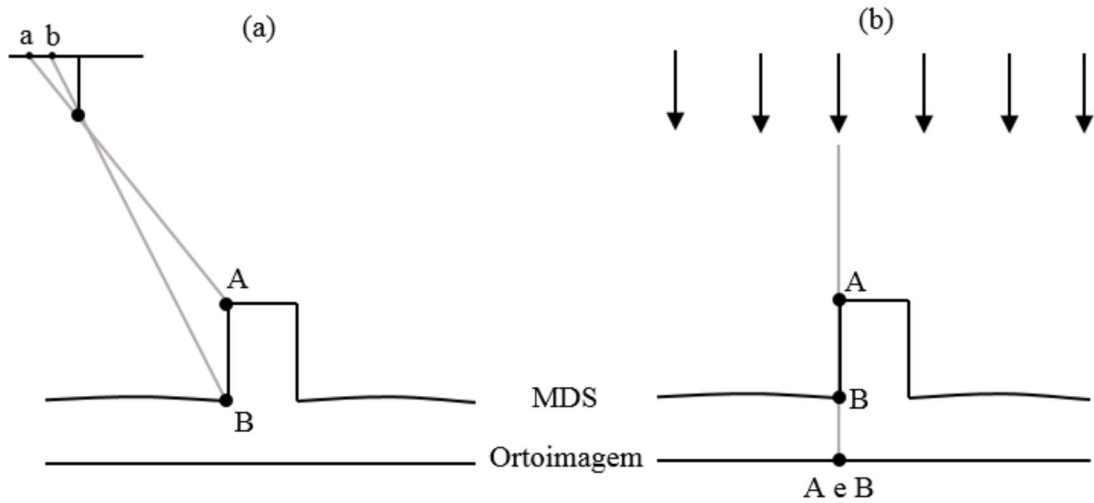
Fonte: Brito e Coelho, 2002

A perspectiva central ou perspectiva cônica, todavia, traz características básicas utilizadas na Fotogrametria, tais como luz e sombras, proximidade e distância de objetos, paralaxe e estereoscopia.

Pode-se notar que a perspectiva central está presente nos fenômenos ópticos que regem o mundo real, uma vez que o olho humano, bem como fontes de luz e câmeras, pode ser tomado como centros para diversos feixes que deles partem.

As Figuras 29a e 29b representam as diferenças na visada em perspectiva central e na visada ortogonal respectivamente. Por meio delas, pode-se notar que no caso da visada em perspectiva central, objetos situados em uma mesma posição planimétrica, porém com diferentes altitudes, são projetados em diferentes posições na imagem, o que traduz em não uniformidade na escala da imagem (Figura 29a); fato este que não ocorre na projeção ortogonal, onde a escala é mantida e todos os elementos estão representados em sua correta posição (Oliveira, 2016).

Figura 29(a) Visada em perspectiva central 29(b) Visada Ortogonal



Fonte: Oliveira, 2016

Essa mudança de projeção é executada com o uso de modelos digitais de superfície e com os parâmetros de orientação interior e exterior do sensor utilizado na aquisição das imagens. O modelo digital de superfície é utilizado para eliminar os deslocamentos causados pela variação da altura dos objetos acima do terreno, reprojetoando assim a nova imagem de maneira ortogonal, processo denominado ortorretificação de imagens (Oliveira, 2016).

Desta forma, podemos dizer que o processo de ortorretificação é responsável por eliminar as distorções relativas à rotação da câmera como também às distorções relativas ao relevo, através da transformação de perspectiva cônica em ortogonal.

Para os casos de ortorretificação visando geração de ortoimagem verdadeira é necessário a detecção e respectiva correção das áreas de oclusão, técnicas e métodos detalhando a metodologia podem ser encontrados em Oliveira, 2016.

As duas abordagens básicas para a geração de ortoimagem são o processo direto e o processo indireto. No processo direto, os *pixels* da imagem de origem são projetados no MDT para verificar suas coordenadas de espaço objeto (por meio de um processo iterativo), que são subsequentemente projetadas na ortoimagem. Já no processo indireto, as coordenadas do espaço objeto são

projetadas na imagem de origem para derivar a informação radiométrica para o *pixel* correspondente na ortoimagem.

Em ambos os casos, a re-amostragem da imagem é necessária para levar em conta a variação do terreno e os efeitos de perspectiva. A geração da ortofoto prossegue após uma retificação diferencial, usando as equações de colinearidade para descrever a relação geométrica entre os dois sistemas de coordenadas (Agouris; Doucette; Stefanidis, 2004).

### **2.8.3 Geração de Mosaico ou Ortomosaicos**

Os mosaicos são uma imagem digital artificial, completamente gerada por procedimento computacional; não se trata de uma fotografia, nem tão pouco de um mapa. Contudo, é nosso desejo que ela tenha a qualidade geométrica de uma fotografia e possua a exatidão de um mapa (Boldo, 2002).

Atualmente, os sistemas SIG, possuem a capacidade de leitura de ortomosaicos. Esse produto se tornou muito importante pela capacidade de extração de informações planimétricas, pela informação semântica, e, quando aliado a um modelo de terreno ou modelo de superfície, permite a extração de informações nas três dimensões.

O processo de geração de ortomosaicos procede da etapa de ortorretificação das imagens individualmente. Fatores como a aerotriangulação, a resolução espacial e a qualidade do modelo digital de terreno ou de superfície, utilizados nas etapas anteriores, influenciam diretamente a exatidão final dos ortomosaicos.

O produto mosaico, consistirá frequentemente de um balanço radiométrico entre imagens. O balanço radiométrico é utilizado para correção de diferentes contrastes entre imagens. Voos realizados em datas diferentes ou imagens provenientes de diferentes fontes tornam o processo de balanço radiométrico mais complexo. Neste quesito, as câmeras digitais levam vantagem em relação as câmeras analógicas, devido a melhor qualidade radiométrica, e ainda, à eliminação das etapas de processamento fotográfico e a digitalização dos filmes, as quais podem acarretar distorções e contrastes diversos nas imagens (Miller, 2004).

### 3 CONTROLE DE QUALIDADE DE PRODUTOS CARTOGRÁFICOS

Uma das etapas finais no processo de produção de cartas, consiste no controle de qualidade dos produtos gerados, sendo essa etapa poucas vezes realizada, pois normalmente não é exigida ou solicitada por parte dos usuários/contratantes (Galo, 1994).

O controle de qualidade em produtos cartográficos visa basicamente à verificação de três aspectos: geométrico, informativo e temporal. Este critério pode ser utilizado tanto para produtos em meio analógico como também para os produtos em meio digital.

O aspecto geométrico trata das questões de qualidade e acurácia (exatidão) posicional, como também da exatidão da geometria dos elementos constantes no produto cartográfico. O aspecto informativo trata da questão dos atributos constantes no produto cartográfico, como exemplo, pode-se citar a nomenclatura de ruas em uma base cartográfica; já o aspecto temporal trata da atualização do produto cartográfico em questão (IBGE, 2017). Nesta pesquisa todo o estudo está voltado para a análise da qualidade geométrica e para sua exatidão posicional.

Para a análise de produtos cartográficos no Brasil, tem-se costumeiramente a utilização do Padrão de Exatidão Cartográfica, conhecido como PEC, referenciado pelo Decreto Lei nº 89.817 de 20 de junho de 1.984, o qual estabelece as instruções reguladoras das normas técnicas da Cartografia Nacional.

O Ministério da Defesa, através do departamento de Ciência e Tecnologia, lançou, no ano de 2016, a Norma da Especificação Técnica para Controle de Qualidade de Dados Geoespaciais (ET-CQDG), com a finalidade de fornecer uma padronização para avaliação da qualidade dos produtos de conjuntos de dados geoespaciais integrantes do Sistema Cartográfico Nacional, a qual foi aprovada por meio da portaria número 009-DCT de 10 de fevereiro de 2016 (Brasil, 2016).

As Especificações Técnicas de Aquisição de Dados Geoespaciais Vetoriais (ET-ADGV) foram publicadas em 2010, a qual encontra-se na sua 3<sup>o</sup> edição. Nela está



estabelecido o critério para a aplicação do Decreto nº 89.817 para produtos cartográficos digitais, criando uma classe mais restritiva (CONCAR, 2017).

Destaca-se que o Padrão de Exatidão Cartográfica Nacional utiliza critérios semelhantes aos estabelecidos em outros países, os quais também foram desenvolvidos como base em produtos analógicos. Nesta pesquisa, além do Padrão de Exatidão Cartográfica Nacional, também é utilizada a norma americana desenvolvida pelo órgão NSSDA “*National Standard for Spatial Data Accuracy*” em conjunto com o Padrão de Acurácia Posicional para Dados Geoespaciais, desenvolvido pela ASPRS, pois ambas especificam um tamanho mínimo para a amostra a ser utilizada na análise dos produtos, uma vez que no decreto lei Nacional não existe menção a respeito deste assunto.

### **3.1 Controle de Qualidade no Brasil**

O PEC do Brasil (Brasil, 1984) estabelece a classificação dos produtos cartográficos em três classes distintas, conforme o grau de exatidão posicional, considerando a comparação de pontos planialtimétricos, extraídos dos produtos a serem analisados, com os valores obtidos de trabalhos em campo, não citando a possibilidade de utilização de outra fonte que apresente melhor exatidão.

Vale ressaltar que tanto esta norma, quanto outras normas de países Europeus analisadas, não fazem menção a quantidade mínima de pontos a serem verificados, ou seja, não especificam o tamanho da amostra nem tampouco como deve ser efetuada a distribuição desta amostra, exceção feita a norma americana lançada em 2023, Padrão de Acurácia Posicional para Dados Geoespaciais, desenvolvido pela ASPRS (ASPRS, 2023).

Em seu artigo 8º, o Decreto Lei estabelece que 90% dos pontos bem definidos numa carta, quando testados no terreno, não deverão apresentar erro superior ao PEC – Planimétrico estabelecido, como também para a altimetria; 90% dos pontos isolados de altitude, obtidos por interpolação de curvas de nível, quando testados no terreno não deverão apresentar erro superior ao PEC Altimétrico estabelecido.

O PEC é um indicador estatístico de dispersão, relativo a 90% de probabilidade que corresponde a 1,6449 vezes o Erro Padrão, ( $PEC = 1,6449 EP$ ). O erro padrão é uma medida da precisão da média amostral calculada. O erro padrão obtém-se dividindo o desvio padrão pela raiz quadrada do tamanho da amostra.

O decreto-lei, em seu artigo 9º, estabelece os critérios de classificação dos produtos cartográficos, baseados na sua exatidão posicional, conforme apresentado na tabela 09.

Tabela 9 Resumo padrão de exatidão cartográfica

CLASSE	PLANIMÉTRICO		ALTIMÉTRICO	
	ERRO MÁXIMO	ERRO PADRÃO	ERRO MÁXIMO	ERRO PADRÃO
A	0,5 mm da escala da carta	0,3 mm da escala da carta	1/2 equidistância entre curvas de nível	1/3 equidistância entre curvas de nível
B	0,8 mm da escala da carta	0,5 mm da escala da carta	3/5 equidistâncias entre curvas de nível	2/5 equidistâncias entre curvas de nível
C	1,0 mm da escala da carta	0,6 mm da escala da carta	3/4 equidistâncias entre curvas de nível	1/2 equidistância entre curvas de nível

Fonte: Adaptado do Decreto Lei nº 89.817 de 20 de junho de 1984

Para o caso do Padrão de Exatidão Cartográfica voltados a atender os Produtos Cartográficos Digitais (PEC-PCD), conforme a especificação técnica para aquisição de dados geoespaciais vetoriais de defesa da força terrestre (Brasil, 2010), o critério de cálculo estabelecido é o mesmo utilizado para o PEC (analógico), em que o diferencial entre ambos é a criação de uma classe mais restritiva no caso de produtos digitais, como pode ser avaliado através da Tabela 10.

Tabela 10 Resumo padrão de exatidão cartográfica digital

CLASSE	PLANIMÉTRICO		ALTIMÉTRICO	
	ERRO MÁXIMO	ERRO PADRÃO	ERRO MÁXIMO	ERRO PADRÃO
A	0,28 mm da escala da carta	0,17mm da escala da carta	1/2 equidistância entre curvas de nível	1/3 equidistância entre curvas de nível
B	0,5 mm da escala da carta	0,3 mm da escala da carta	3/5 equidistâncias entre curvas de nível	2/5 equidistâncias entre curvas de nível
C	0,8 mm da escala da carta	0,5 mm da escala da carta	3/4 equidistâncias entre curvas de nível	1/2 equidistância entre curvas de nível
D	1,0 mm da escala da carta	0,6 mm da escala da carta	1 equidistância entre curvas de nível	3/5 equidistâncias entre curvas de nível

Fonte: Adaptado de Brasil, 2010

### 3.2 Controle de qualidade nos Estados Unidos

Com o intuito de implementar uma metodologia estatística, a fim de verificar a qualidade posicional de mapas e dados geográficos, o órgão NSSDA “*National Standard for Spatial Data Accuracy*” desenvolveu os critérios utilizados para avaliação e qualificação dos materiais cartográficos desenvolvidos nos Estados Unidos.

Esta norma foi desenvolvida pelo *Federal Geographic Data Committee* FGDC, com a finalidade de atualizar a norma desenvolvida pelo *U.S. Bureau of the Budget* em 1947, denominada *National Map Accuracy Standards* NMAS, e a norma desenvolvida pela *American Society for Photogrammetry and Remote Sensing* ASPRS, ficando estabelecido o serviço geológico americano *U.S. Geological Survey* USGS como órgão responsável pela manutenção desta.

Em fevereiro de 2023, a ASPRS lança a segunda edição do seu padrão adotado em 2014, denominado Padrão de Acurácia Posicional para Dados Geoespaciais Digitais, edição 2, versão 1.0.0 (ASPRS, 2023).

O objetivo deste padrão foi substituir os Padrões lançados anteriormente, devido a criação de novas tecnologias. Este padrão incluiu critérios de precisão posicional para ortomagens digitais, dados planimétricos digitais e dados digitais de

elevação. As classes de precisão, baseadas em valores RMSE foram revisadas e atualizadas a partir dos padrões anteriores, para abordar precisões mais altas e maior resolução espacial, alcançáveis com tecnologias mais recentes. O padrão também introduz medidas de precisão adicionais, como critérios para análise da aerotriangulação, análise da qualidade dos pontos de controle em solo, precisão relativa de dados LiDAR e densidade de pulso nominal mínima recomendada, precisão horizontal de dados de elevação, sugestão de distribuição espacial de pontos de controle e número mínimo de pontos de controle com base na área do projeto (ASPRS, 2023).

Esta norma, como as anteriores, utiliza o erro médio quadrático (*root-mean-square error*) RMSE para estimar a exatidão posicional. O RMSE é a raiz quadrada da média do conjunto das diferenças ao quadrado entre as diferenças dos pontos obtidos no produto analisado, e os pontos obtidos em campo ou de outra fonte que apresente melhor exatidão, expressa em medidas de distância.

Diferentemente do decreto-lei brasileiro, o padrão americano sugere a utilização de um mínimo de 30 pontos para a amostra a ser utilizada no controle de qualidade. Todavia este padrão aponta a falta de metodologia para a espacialização e distribuição dos pontos de controle ao longo da área de estudo, sendo aceito métodos empíricos até que novos estudos possam determinar uma melhor forma de distribuição.

Determinação da Acurácia Horizontal:

$$RMSE_x = \sqrt{\sum (X data_i - X verific_i)^2 / n}$$

$$RMSE_y = \sqrt{\sum (Y data_i - Y verific_i)^2 / n}$$

Onde:

$X data_i$  e  $Y data_i$  são as coordenadas do ponto “i” obtidos nos dados a serem verificados;

$X_{verif\_i}$  e  $Y_{verif\_i}$  são as coordenadas do ponto “i” obtidos em campo ou em fonte de melhor exatidão;

$n$  é a quantidade de pontos de verificação;

Sendo o erro horizontal de um ponto definido por:

$$RMSE_h = \sqrt{(X_{data\_i} - X_{verif\_i})^2 + (Y_{data\_i} - Y_{verif\_i})^2}$$

Ou o erro horizontal da amostra:

$$RMSE = \sqrt{\sum ((X_{data\_i} - X_{verif\_i})^2 + (Y_{data\_i} - Y_{verif\_i})^2) / n}$$

$$RMSE = \sqrt{RMSE_x^2 + RMSE_y^2}$$

Considerando que o  $RMSE_x = RMSE_y$ , teremos então:

$$RMSE = \sqrt{2 \times RMSE_x^2} = \sqrt{2 \times RMSE_y^2}$$

$$= 1,4142 \times RMSE_x = 1,4142 \times RMSE_y$$

Acurácia Vertical:

$$RMSE_z = \sqrt{\sum (Z_{data\_i} - Z_{verif\_i})^2 / n}$$

Onde:

$Z_{data\_i}$  é o valor da elevação do ponto “i” obtido nos dados a serem verificados;

$Z_{verif\_i}$  é o valor do ponto “i” obtido em campo ou em fonte de melhor exatidão;

$n$  é a quantidade de pontos de verificação;

Ao considerar que erros sistemáticos foram eliminados, podemos aplicar o fator de 1,9600 para calcular o erro altimétrico vertical, com um grau de 95% de confiança (Greenwalt; Schultz, 1962). Desta forma, a exatidão horizontal, conforme a NSSDA, pode ser calculada pela seguinte equação:

$$Acurácia_z = 1,96 \times RMSE_z$$

### 3.2.1 Classificação segundo a Sociedade Americana de Fotogrametria e Sensoriamento Remoto (*American Society for Photogrammetry and Remote Sensing – ASPRS*).

Segundo os padrões estabelecidos pela ASPRS em 2014, os produtos em grandes escalas como 1:20.000 ou maiores, devem ser classificados em três classes distintas: classe 1, classe 2 e classe 3.

Para o caso da avaliação planimétrica, efetua-se a verificação das diferenças no eixo “x” e no eixo “y” de maneira individual, estabelecendo os limites em relação à escala dos produtos cartográficos conforme a Tabela 11.

Tabela 11 Resumo padrão de exatidão para grandes escalas segundo ASPRS

ESCALA	RMSE máximo (metros)
1 : 50	0,0125
1 : 100	0,0250
1 : 200	0,0500
1 : 500	0,1250
1 : 1.000	0,2500
1 : 2.000	0,5000
1 : 4.000	1,0000
1 : 5.000	1,2500
1 : 10.000	2,5000
1 : 20.000	5,0000

Fonte: Padrão FGDC (1998)

Os valores limites da Tabela 11 são utilizados para a classificação do produto quanto a classe 1. Os limites para a classe 2 são considerados duas vezes aos limites da classe 1 e para a classe 3, três vezes os limites estabelecidos para classe 1, respectivamente.

Para o caso da avaliação vertical, o padrão ASPRS estabelece como limite o valor de 1 / 3 da equidistância das curvas de nível, sendo o limite para os pontos cotados de 1 / 6 ou melhor.

Em fevereiro de 2023 a ASPRS lança a primeira versão do padrão para a avaliação da exatidão posicional de dados geoespaciais digitais (ASPRS, 2023). Este padrão, assim como o anterior, tem como base a definição da exatidão posicional relacionada ao RMSE, sendo aplicado para ortoimagens, dados vetoriais planimétricos e modelos digitais de elevação. No caso de ortoimagens, este traz uma sugestão de associação entre a resolução espacial e o  $RMSE_x$  e  $RMSE_y$ , baseada nas melhores práticas e tecnologias de mapeamento, voltado para imagens capturadas por câmeras métricas, não sendo tratado o caso de imagens orbitais. Esta sugestão de padrão é apresentada na Tabela 12.

Tabela 12 Sugestão de padrão RMSE utilizado em ortoimagens para câmeras métricas de grande e médio formato

Resolução espacial (cm)	RMSE planimétrico (cm)	RMSE planimétrico (pixel)	Aplicação Recomendada
1,25	≥ 1,30	≤ 1	Projeto de alta exatidão
	2,50	2	Projeto convencional de mapeamento e SIG
	≥ 3,80	≥3	Visualização e projeto de baixa exatidão
2,50	≥ 2,50	≤ 1	Projeto de alta exatidão
	5,00	2	Projeto convencional de mapeamento e SIG
	≥ 7,50	≥3	Visualização e projeto de baixa exatidão
5,00	≤ 5,0	≤ 1	Projeto de alta exatidão
	10,00	2	Projeto convencional de mapeamento e SIG
	≥ 15,0	≥3	Visualização e projeto de baixa exatidão
7,50	≤ 7,50	≤ 1	Projeto de alta exatidão
	15,00	2	Projeto convencional de mapeamento e SIG
	≥ 22,50	≥3	Visualização e projeto de baixa exatidão
15,00	≤ 15,0	≤ 1	Projeto de alta exatidão
	30,00	2	Projeto convencional de mapeamento e SIG
	≥ 45,00	≥3	Visualização e projeto de baixa exatidão

Resolução espacial (cm)	RMSE planimétrico (cm)	RMSE planimétrico ( <i>pixel</i> )	Aplicação Recomendada
30,00	≤ 30,00	≤ 1	Projeto de alta exatidão
	60,00	2	Projeto convencional de mapeamento e SIG
	≥ 90,00	≥3	Visualização e projeto de baixa exatidão
60,00	≤ 60,00	≤ 1	Projeto de alta exatidão
	120,00	2	Projeto convencional de mapeamento e SIG
	≥ 180,00	≥3	Visualização e projeto de baixa exatidão
100,00	≤ 100,00	≤ 1	Projeto de alta exatidão
	200,00	2	Projeto convencional de mapeamento e SIG
	≥ 300,00	≥3	Visualização e projeto de baixa exatidão
200,00	≤ 200,00	≤ 1	Projeto de alta exatidão
	400,00	2	Projeto convencional de mapeamento e SIG
	≥ 600,00	≥3	Visualização e projeto de baixa exatidão
500,00	≤ 500,00	≤ 1	Projeto de alta exatidão
	1000,00	2	Projeto convencional de mapeamento e SIG
	≥ 1500,00	≥3	Visualização e projeto de baixa exatidão

Fonte: Adaptado de ASPRS 2023

Para a exatidão horizontal de modelos de elevação, esta norma apresenta dois padrões distintos: o primeiro, para modelos digitais de elevação baseados em processos fotogramétricos, utilizando-se imagens digitais e; o segundo, para modelos digitais de elevação baseados na tecnologia LiDAR.

No primeiro caso, para dados de elevação derivados do processo fotogramétrico, a precisão horizontal equivale à precisão horizontal que se aplicaria aos dados planimétricos ou ortoimagem digital produzidas a partir da mesma fonte de imagens, usando a mesma aerotriangulação.

Já no segundo caso, quando da utilização da tecnologia LiDAR, os erros são calculados em função dos sistemas GNSS e sistema inercial utilizados, e ainda da altura de voo. Levando-se em consideração que a especificação da precisão do sistema GNSS e do sistema inercial são conhecidas, além da altura de voo, sugere-se a utilização da seguinte equação:

$$\text{Erro Horizontal} = \sqrt{(GNSS \text{ precisão})^2 + \left( \frac{\tan(IMU \text{ precisão})}{0,55894170} \times \text{altura de voo} \right)^2}$$



Nesse caso, a altura de voo é utilizada em metros, a precisão do sistema GNSS em centímetros e a precisão do sistema inercial em graus decimais. Outros fatores, como erros de variação e tempo (estimados em 25% dos erros de orientação) são considerados na equação acima.

Os valores para a precisão posicional GNSS e a precisão do sistema inercial podem ser derivados das especificações publicadas pelos fabricantes do receptor GNSS e do sistema inercial.

Para a análise de dados provenientes do sistema LiDAR, em que a precisão horizontal já está definida previamente, pode-se utilizar a equação a seguir para a definição da altura de voo.

$$Altura\ de\ voo = \frac{0,55894170}{\tan(\text{precisão}\ IMU)} \times \sqrt{(\text{Erro}\ Horizontal)^2 - (\text{GNSS}\ \text{precisão})^2}$$

A Tabela 13 apresenta uma sugestão de erros horizontais para modelos de elevação provenientes do sistema LiDAR, que podem ser admitidos baseados em várias alturas de voo, em que a estimativa de exatidão de dados é proveniente do sistema GNSS e Inercial.

Tabela 13 RMSE horizontal sugerido para dados LiDAR baseados na altura de voo

Altura de voo (m)	RMSE (cm)		Altura de voo (m)	RMSE (cm)
500	13,1		3000	41,6
1000	17,5		3500	48
1500	23		4000	54,5
2000	29		4500	61,1
2500	35,2		5000	67,6

Fonte: Adaptado de ASPRS 2023

Para a classificação ou nomenclatura, a norma não faz distinção quanto à tecnologia utilizada para obtenção dos dados (processo fotogramétrico ou LiDAR).

A convenção de nomenclatura para cada classe de precisão vertical está diretamente associada ao RMSE esperado do produto. A Tabela 14 fornece a convenção de nomenclatura das classes de precisão vertical para quaisquer dados digitais de elevação. Os requisitos de exatidão horizontal para dados de elevação são especificados e relatados independentemente dos requisitos de exatidão vertical.

Tabela 14 Padrão de exatidão vertical para dados digitais de elevação

Classe de Exatidão Vertical	Exatidão Absoluta		
	RMSEz - área sem vegetação	Área sem vegetação nível de confiança de 95%	Área com vegetação, percentil de 95%
X-cm	$\leq X$	$\leq 1.96 * X$	$\leq 3.00 * X$

Fonte: Adaptado de ASPRS 2014

Diferentemente das normas anteriores, esta edição introduziu também um critério para avaliação do processo de aerotriangulação e verificação da qualidade dos pontos de controle obtidos em campo.

No caso da aerotriangulação, ou quando da utilização da técnica de georreferenciamento direto, a avaliação desta etapa desempenha um papel fundamental na determinação da exatidão dos produtos gerados. Dessa forma, esse processo deve ter exatidão superior àquela desejada para os produtos.

Quando da utilização da técnica de georreferenciamento direto, a qualidade deve ser avaliada através da comparação dos valores de pontos de controle obtidos em campo, ou em uma fonte de melhor qualidade do que aquela que está sendo avaliada, em relação aos valores extraídos nas imagens orientadas.

Para os casos em que os produtos gerados consideram somente as componentes planimétricas, os erros na componente vertical proveniente da aerotriangulação causam pouco impacto na exatidão horizontal, como por exemplo a geração de ortoimagens. Por esta razão, foram estabelecidos dois critérios distintos para a avaliação do processo de aerotriangulação.

A exatidão da aerotriangulação para produtos digitais planimétricos deve seguir o seguinte critério:

$$RMSE_{X(AT)} \text{ ou } RMSE_{Y(AT)} = \frac{1}{2} \times RMSE_{X(MAPA)} \text{ ou } \frac{1}{2} \times RMSE_{Y(MAPA)}$$

$$RMSE_{Z(AT)} = RMSE_{X(MAPA)} \text{ ou } RMSE_{Y(MAPA)} \text{ ou ortorectificação}$$

A contribuição exata dos erros na aerotriangulação em “Z” para o erro horizontal dependem da localização do ponto de controle na imagem e de outros fatores. A relação declarada aqui para um  $RMSE_{Z(AT)}$  de duas vezes o RMSE permitido em x ou y, é uma estimativa conservadora, que acomoda a geometria da maioria das câmeras comuns e fornece tolerância para muitos outros fatores que afetam o erro horizontal.

Quando da geração de produtos altimétricos, a exatidão da aerotriangulação deve seguir o seguinte padrão:

$$RMSE_{X(AT)}, RMSE_{Y(AT)} \text{ ou } RMSE_{Z(AT)} = \frac{1}{2} \times RMSE_{X(MAPA)}, RMSE_{Y(MAPA)} \text{ ou } RMSE_{Z(MDE)}$$

Para os pontos de controle utilizados no processo de aerotriangulação, estes deverão ter uma exatidão melhor em relação a exatidão do produto gerado, e poderão ser divididos em duas categorias, sendo que para produtos que levam em consideração somente a componente planimétrica, o critério será o seguinte:

$$RMSE_X \text{ ou } RMSE_Y = \frac{1}{4} \times RMSE_{X(MAPA)} \text{ ou } RMSE_{Y(MAPA)}$$

$$RMSE_Z = \frac{1}{2} \times RMSE_{X(MAPA)} \text{ ou } RMSE_{Y(MAPA)}$$

No caso em que o produto gerado também terá a componente altimétrica, os pontos de controle utilizados para a aerotriangulação, deverão seguir o critério abaixo:

$$RMSE_X, RMSE_Y \text{ ou } RMSE_Z = \frac{1}{4} \times RMSE_{X(MAPA)}, RMSE_{Y(MAPA)} \text{ ou } RMSE_{Z(MDE)}$$

Com a atualização da norma em fevereiro de 2023, a associação da precisão do produto ao GSD da imagem de origem, ao tamanho do *pixel* da

ortoimagem ou à escala do mapa para mapas em escala, foi descartada. A relação entre a classe de precisão RMSEX e RMSEY recomendada e o tamanho do *pixel* da ortoimagem varia dependendo das características do sensor de imagem e dos processos de mapeamento específicos usados. A classe de precisão horizontal apropriada deve ser negociada e acordada entre o usuário final e o fornecedor de dados, com base nas necessidades específicas e nos critérios de projeto (ASPRS, 2023).

## 4 MATERIAIS E MÉTODO

Neste capítulo serão apresentados todos os insumos utilizados para a confecção dos produtos avaliados, bem como a metodologia adota, passando desde o planejamento das atividades bem como o passo a passo da sua execução.

### 4.1 Materiais

A seguir são apresentados os *software* e insumos utilizados na realização dos experimentos.

#### 4.1.1 *Software*

Procede-se, abaixo, à descrição de todos os *software* utilizados, e uma breve descrição de suas funções:

**Leica MissionPro:** *Software* utilizado para elaboração e gestão dos planos de voo da aeronave tripulada. Para a elaboração dos planos de voo, é necessário possuir os polígonos das áreas de interesse e, assim, definir as configurações de voo (GSD, sobreposições laterais e longitudinais e sentido das faixas). Também é possível realizar um estudo referente à incidência solar a fim de verificar quais os melhores horários de voo para uma menor incidência de sombras. Este *software* foi desenvolvido pela empresa Leica Geosystems.

**POSAV 5.0:** *Software* utilizado no sistema da aeronave tripulada para estabelecer a configuração e o controle de dados entre a unidade de movimentação inercial, o sistema GNSS e a câmera. Este estabelece o sincronismo do momento da

captura das imagens com a posição e a atitude da aeronave no exato momento da tomada dos eventos. Este *software* foi desenvolvido pela empresa Applanix.

**Z/I INFLIGHT:** *Software* utilizado no gerenciamento e controle de qualidade do voo, desenvolvido pela empresa Leica Geosystems.

**Z/I Copy:** *Software* utilizado para realizar a transferência das imagens capturadas entre o sistema de armazenamento da câmera e a unidade de processamento dos dados. *Software* desenvolvido pela empresa Leica Geosystems.

**Z/I PPS:** *Software* utilizado para realizar a conversão dos dados em formato proprietário do sensor para RGBI (8 Bits ou 12 Bits) em formato .tif. Este *software* foi desenvolvido pela empresa Leica Geosystems.

**Z/I DIA:** *Software* utilizado para realizar a equalização das imagens de voo, permitindo ajuste dos histogramas de todos os canais ou separados, compondo ao final o LUT (*Lookup Table*). *Software* desenvolvido pela empresa Leica Geosystems.

**Z/I MISSION:** *Software* utilizado para avaliação e controle de qualidade dos voos gerados, sendo avaliados os recobrimentos e as variações em comparação às configurações definidas inicialmente na etapa de planejamento. *Software* desenvolvido pela empresa Leica Geosystems.

**POSPAC:** *Software* utilizado para processamento dos dados do GNSS e INS da aeronave. O resultado deste processamento gera uma listagem de coordenadas tridimensionais (E, N e h), bem como os ângulos de orientações (Omega, Phi e Kappa) para cada imagem tomada durante o voo. *Software* desenvolvido pela empresa Applanix.

**Applications Master:** *Software* desenvolvido pela empresa Trimble, utilizado para realização dos tratamentos geométricos das imagens por meio da geração de *Tie Points* e Aerotriangulação (Orientação Exterior, *Bundle Adjustment*). Este *software* é composto por alguns módulos também utilizados nos processos aerofotogramétricos, sendo:

**Match-T DSM:** *software* utilizado para gerar o MDE (DSM ou DTM) a partir da correlação dos pares estéreos orientados pela Aerotriangulação. Neste *software*

podem ser utilizados dois algoritmos para correlação de pontos: GM (*Global Matching*) ou FBM (*Feature Based on Matching*)

**DTMaster:** Módulo utilizado para a realização de edições sobre o MDT gerado, podendo ser removidos alguns objetos que não foram filtrados pelo Match-T durante a geração do MDT. Este MDT será utilizado para ortorretificação dos modelos fotogramétricos.

**OrthoMaster:** Módulo utilizado para ortorretificar os pares estéreos de cada modelo. Neste módulo é de fundamental importância possuir um MDT (proveniente da Fotogrametria ou do LiDAR).

**OrthoVista:** Módulo utilizado para geração de mosaicos, utilizando-se das ortoimagens geradas pelo OrthoMaster, constituindo uma única área ou recortando em Tiles com tamanhos pré-estabelecidos. Também neste módulo existem ferramentas de edição radiométrica, melhorando a equalização das imagens e/ou minimizando diferenças nas ligações entre as ortoimagens (deslocamentos) por meio da edição das linhas de cortes.

**Airborne Mission Manager:** *software* utilizado na elaboração dos planos de voo do sensor LiDAR ORION H300, desenvolvido pela empresa Optech.

**Optech LMS:** *Software* utilizado para o ajuste planialtimétrico das faixas do perfilamento LiDAR, executado através do sensor LiDAR ORION H300, desenvolvido pela empresa Optech.

**LAStools:** *Software* utilizado para o processamento, análise da qualidade e classificação da nuvem de pontos proveniente do sistema LiDAR, para retirada de ruídos (outliers) e para a geração dos modelos digitais de superfície e de terreno. Software desenvolvido pela empresa Rapidlasso.

**Agisoft Metashape Professional:** *Software* desenvolvido pela empresa Agisoft, utilizado no processamento dos dados obtidos com a aeronave não tripulada.

**Global Mapper v 18.2:** *Software* de sistema de informações geográficas, utilizado para a visualização e verificação dos produtos gerados, desenvolvido pela empresa Blue Marble Geographics.

#### 4.1.2 Sistema de Varredura Aerotransportado

Para esta etapa, o levantamento foi executado através de voo tripulado com aeronave modelo Cessna 206, na qual estava instalado o sistema LiDAR marca Teledyne Optech modelo ORION H 300. O levantamento foi realizado com uma média de oito pontos por metro quadrado.

O sistema LiDAR ORION H300 é um sistema de perfilamento que possui integração entre o equipamento LASER e os sensores GNSS-Inercial, o que possibilita a realização do georreferenciamento direto da Nuvem de Pontos. Suas características técnicas estão descritas a seguir:

Taxa de repetição do pulso (PRF) programável entre 35 kHz e 300 kHz;

Altura de operação entre 150 metros e 4000 metros;

Frequência de scanner programável entre 1 e 90 Hz;

FOV programável entre 1° e 50°;

Divergência do feixe  $\leq 0.25$  mrad;

Intensidade do sinal registrada em 12 bits;

Acurácia vertical  $< 3-15\text{cm}$ ,  $1 \sigma$ ;

Acurácia horizontal  $1/5.500 \times$  altitude,  $1 \sigma$ ;

Divisão do pulso em até 4 retornos.

A Figura 30 apresenta o sensor LiDAR ORION H300, utilizado na aeronave modelo Cessna 206 de prefixo PR-FOT.

Figura 30 Sistema LiDAR modelo ORION H300



Fonte: O Autor

Este sistema foi utilizado em conjunto com o sistema POS AV 510 Applanix, que consiste em uma solução GNSS-Inercial para realização do georreferenciamento direto, utilizado em conjunto com sistemas de imageamento e de perfilamento LiDAR. Ele é capaz de medir a posição e a orientação do sensor aerotransportado, registrando todos os movimentos desenvolvidos pela aeronave em torno de seus três eixos (X, Y, Z) durante a aquisição da informação.

Os dados GNSS-Inercial adquiridos com este sensor são processados utilizando dados de uma ou mais estações GNSS presentes em solo, cujo rastreamento GNSS deve ocorrer simultaneamente com a execução do voo, ou ainda podendo ser pós-processado por meio de soluções advindas de estações remotas.

A execução do voo foi realizada pela empresa Fototerra Atividades de Aerolevantamento Ltda, em 31 de agosto de 2020, para execução da etapa de aerolevantamento foi fornecida a autorização de voo pelo Ministério da Defesa número 177/2020 e AVOMD 1170/20. A aeronave utilizada na operação é apresentada na Figura 31.

Figura 31 Aeronave Cessna 206 utilizada na captura dos dados LiDAR



Fonte: O Autor



### 4.1.3 Imageamento Orbital

Foram utilizadas imagens provenientes do satélite WorldView-3, com data de 05 de março de 2020, resolução espacial de 0,31 metros na banda pancromática e 1,24 metros nas bandas multiespectrais.

As características do satélite WordView 3 estão listadas abaixo:

- Órbita Circular heliossíncrona, descendente, 45° de inclinação, período de 97 minutos e altitude de 617 km.
- Bandas do Sensor: Pancromático P&B, 8 bandas multiespectrais (coastal, azul, verde, amarelo, vermelho, red edge, NIR-1 and NIR-2, 8 bandas no Infravermelho de ondas curtas (SWIR), 12 bandas no CAVIS (correção para nuvens, Aerossóis, Vapores, Gelo e Neve).
- Resolução Espacial: Pancromático P&B: 0,31 m; Multiespectral: 1,24 m. SWIR: 3,70m. CAVIS: 30m.
- Resolução Espectral: Pancromático de 450 a 800 nm, Multiespectral de 400 a 450 nm (coastal), 450 a 510 nm (azul), 510 a 580 nm (verde), 585 a 625 nm (amarelo), 630 a 690 nm (vermelho), 705 a 745 nm (red edge), 770 a 895 nm (infravermelho próximo 1), 860 a 1040 nm (Infravermelho próximo 2).
- Bandas SWIR: SWIR-1 de 1195 a 1225 nm, SWIR-2 de 1550 a 1590 nm, SWIR-3 de 1640 a 1680 nm, SWIR-4 de 1710 a 1750 nm, SWIR-5 de 2145 a 2185 nm, SWIR-6 de 2185 a 2225 nm, SWIR-7 de 2235 a 2285 nm, SWIR-8 de 2295 a 2365 nm.
- Bandas CAVIS : Desert clouds de 405 a 420 nm, Aerosol-1 de 459 a 509 nm, Verde de 525 a 585 nm, Aerosol-2 de 635 a 685 nm, Água-1 de 845 a 885 nm, Água-2 de 897 a 927 nm, Água-3 de 930 a 965 nm, NDVI-SWIR de 1220 a 1252 nm, Cirrus de 1365 a 1405 nm, Neve de 1620 a 1680 nm, Aerosol-3 de 2105 a 2245 nm, Aerosol-3 de 2105 a 2245 nm (as 2 bandas Aerosol-3 tem a mesma sensibilidade mais visadas opostas para estimar a altitude das nuvens).
- Resolução Radiométrica de 11 bits por *pixel* nos modos pancromático e multiespectral e 14 bits por *pixel* no modo SWIR.

- Tamanho de Cena Básica 13,1 km x 13,1 km.
- Capacidade de visada lateral e estereoscópica.

#### 4.1.4 Imageamento aéreo através de aeronave tripulada

Para a execução da cobertura aerofotogramétrica, foi utilizada a câmera fotogramétrica digital de grande formato, modelo DMC I, dotada de dispositivo de geocodificação dos centros perspectivos de cada tomada, sistema de rastreamento GNSS, sistema de compensação de arrastamento da imagem (FMC), plataforma giro-estabilizadora e sistema de movimentação inercial.

A figura 32 apresenta a câmera aerofotogramétrica digital, modelo DMC I, instalada na aeronave Piper Sêneca II – prefixo EPN, a qual é apresentada na Figura 33.

Figura 32 Câmera aerofotogramétrica digital DMC I



Fonte: O Autor

No que se refere às principais especificações técnicas da câmera DMC I têm-se:

- Imagem de saída final de 7680 x 13824 *pixels*;
- Campo de visão de 69,3° perpendicular a faixa de voo e 42° ao longo da faixa de voo;

- Sensibilidade espectral: azul = 400-580 nm, verde = 500-650 nm, vermelho = 590-675 nm e Infravermelho próximo = 675-850 nm;
- Sistema de armazenamento SSD removível com capacidade de 330 Gb (~1200 imagens);
- Taxa de quadros máxima: 2,1 seg/imagem;
- Resolução radiométrica de 12 bits.

Figura 33 Aeronave Piper Sêneca II utilizada na captura das imagens



Fonte: O Autor

Acoplado à câmara aerofotogramétrica DMC I, tem-se o sistema POS AV 510 Applanix, que compreende em uma solução comercial GNSS-inercial para realização do georreferenciamento direto utilizado em conjunto com sistemas de imageamento.

Esse sistema é capaz de gravar durante a execução dos voos os ângulos de giros residuais, isto é, os ângulos de Euler (que não foram compensados pela plataforma giro-estabilizadora ( $\omega, \varphi, \kappa$ )), por meio de um sistema triplo de giroscópios, a uma taxa de 250 Hz com uma precisão nominal de  $0,005^\circ$ . Ele possui um funcionamento integrado com um receptor GNSS de dupla frequência que grava os dados dos satélites da constelação GNSS a partir de dados coletados por uma antena localizada na fuselagem superior da aeronave. A gravação dos dados GNSS é realizada a uma taxa de 1 Hz.

A execução do voo foi realizada pela empresa Fototerra Atividades de Aerolevante Ltda. A autorização de voo número 177/2020 foi fornecida pelo Ministério da Defesa e o AVOMD número 1170/20, em 27 de agosto de 2020.

#### 4.1.5 Imageamento aéreo através de aeronave não tripulada

Para a realização do imageamento através de aeronave não tripulada, foi utilizado a plataforma Phantom 4 PRO, desenvolvida pela empresa DJI, conforme apresentado na Figura 34, com as seguintes características: diâmetro de 0,35 metros, peso de 1,388 quilogramas, com tempo máximo de voo de 30 minutos, sistema de posicionamento GPS/GLONAS e sistema inercial proprietário. Todo o levantamento aéreo foi executado em 22 de fevereiro de 2022.

Figura 34 Aeronave não tripulada modelo Phantom 4 PRO



Fonte: O Autor

A aeronave não tripulada foi equipada com câmera aérea digital de 20 megapixel tecnologia CMOS, com FOV 84° 8.8 mm/24 mm, com capacidade de capturar imagens na composição RGB.

## 4.2 Método

Neste tópico serão apresentados os métodos propostos para desenvolvimento dos experimentos, sendo divididos em seis processos diferentes, sendo eles:

Para a imagem orbital:

- ✓ Criação de mosaico digital, com o uso de imagem orbital, através do processo de ortorretificação independente do terreno. No produto gerado foi avaliado a sua exatidão planimétrica.
  
- ✓ Criação de mosaico digital com o uso de imagem orbital, através do processo de ortorretificação dependente do terreno. No produto gerado, foi avaliada a sua exatidão planimétrica.

Para os dados obtidos com aeronave tripulada:

- ✓ Criação de mosaico digital com o uso de imagens aéreas obtidas por aeronave tripulada, através do processo de aerotriangulação com a utilização de modelo digital de terreno obtido através de sistema LiDAR. No produto gerado, foi avaliada a sua exatidão planimétrica.
  
- ✓ Criação de mosaico digital com o uso de imagens aéreas obtidas por aeronave tripulada, através do processo de aerotriangulação e geração de modelo digital de terreno via procedimento fotogramétrico, para avaliação da qualidade planialtimétrica.

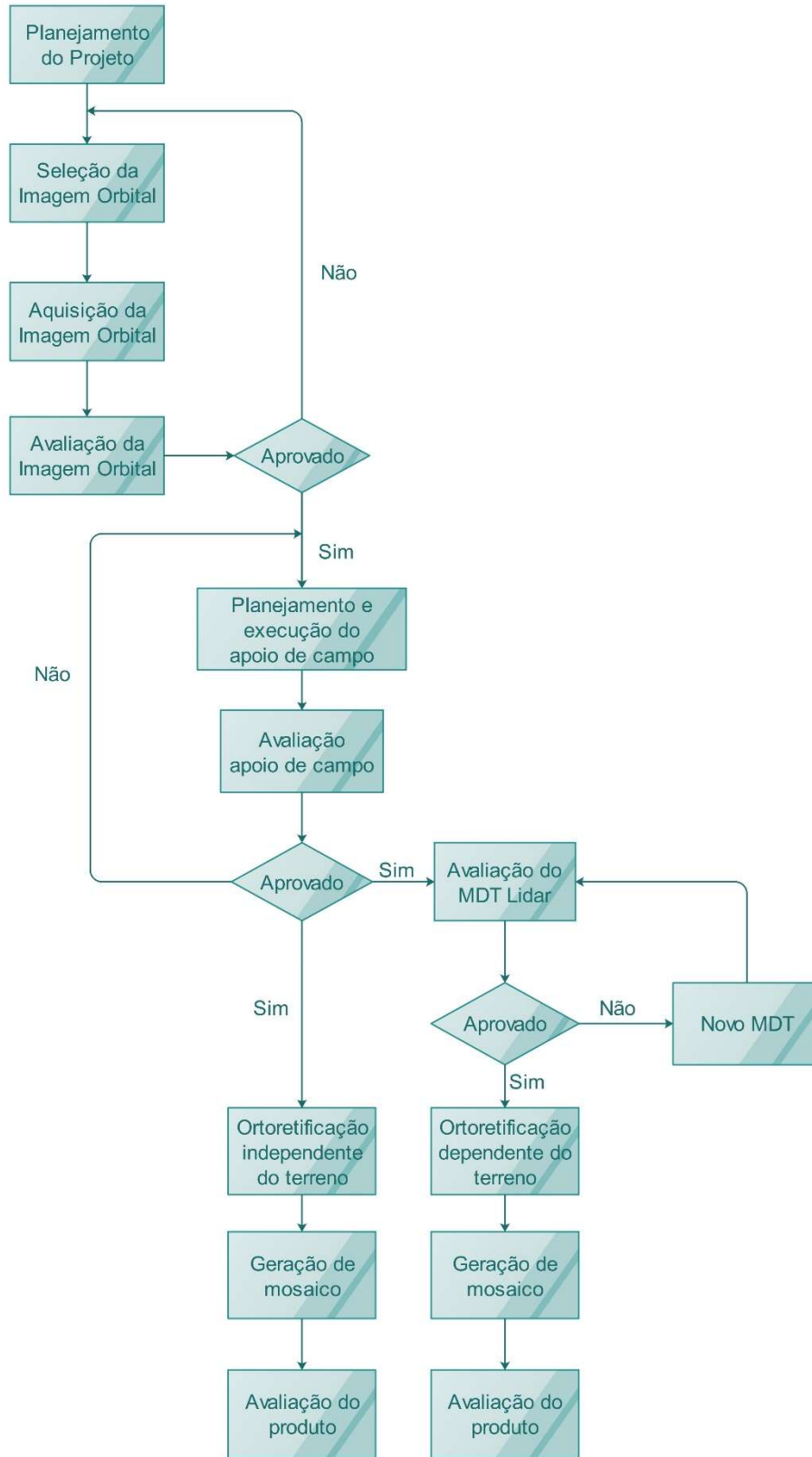
Para os dados obtidos com aeronave não tripulada:

- ✓ Criação de mosaico digital com o uso de imagens aéreas obtidas por aeronave não tripulada, através do processo de aerotriangulação com a utilização de modelo digital de terreno obtido através de sistema LiDAR. No produto gerado, foi avaliada a sua exatidão planimétrica.

- ✓ Criação de mosaico digital com o uso de imagens aéreas obtidas por aeronave não tripulada, através do processo de aerotriangulação e geração de modelo digital de terreno via procedimento fotogramétrico, para avaliação da qualidade planialtimétrica.

O fluxograma 01 apresenta as etapas que foram executadas para a geração dos produtos, utilizando-se imagens orbitais, tanto para o processo dependente do terreno quanto para o processo independente do terreno.

Fluxograma 1 Etapas para geração de mosaico com imagens orbitais



A descrição sucinta das etapas é apresentada a seguir:

*“Planejamento do projeto”*: Nesta etapa foi definida qual a aplicação do produto gerado, estipulando as exatidões mínimas necessárias para utilização. Trata-se de um projeto de pesquisa voltado para a definição dos limites máximos que podemos atingir com a utilização das técnicas propostas.

*“Seleção da imagem orbital”*: processo de definição das características técnicas da imagem orbital que será utilizada (data de aquisição, resolução espacial, resolução espectral, ângulo máximo de visada e cobertura máxima de nuvens aceitável).

*“Aquisição da imagem orbital”*: após a definição das características técnicas e de qual imagem orbital a ser utilizada, foi executada a busca junto aos fornecedores e posterior aquisição.

*“Avaliação da imagem orbital”*: processo executado para verificar se a imagem obtida está dentro dos parâmetros técnicos definidos anteriormente.

*“Planejamento e execução do apoio de campo”*: planejamento dos locais foto-identificáveis, em que foram obtidos os pontos planialtimétricos com a utilização de sistema GNSS, através do método relativo estático.

*“Avaliação do apoio de campo”*: a avaliação do apoio de campo foi efetuada através da análise dos resíduos e valores de RMS de cada ponto obtido em campo após processamento geodésico, levando-se em consideração os parâmetros estabelecidos na norma ASPRS de 2023.

*“Avaliação do MDT LiDAR”*: avaliação da qualidade planialtimétrica do modelo digital de terreno obtido através de aerolevantamento executado com tecnologia LiDAR. Esta avaliação foi executada com a comparação das coordenadas planialtimétricas obtidas na etapa de apoio de campo, em relação as coordenadas extraídas do modelo digital de terreno, levando-se em consideração os parâmetros estabelecidos na norma ASPRS de 2023.



*“Ortorretificação independente do terreno”*: este foi o primeiro caso, a realização do processo de ortorretificação utilizou os parâmetros RPC e uma quantidade mínima de pontos de controle obtidos na etapa de apoio de campo; porém, sem a utilização do modelo digital de terreno LiDAR.

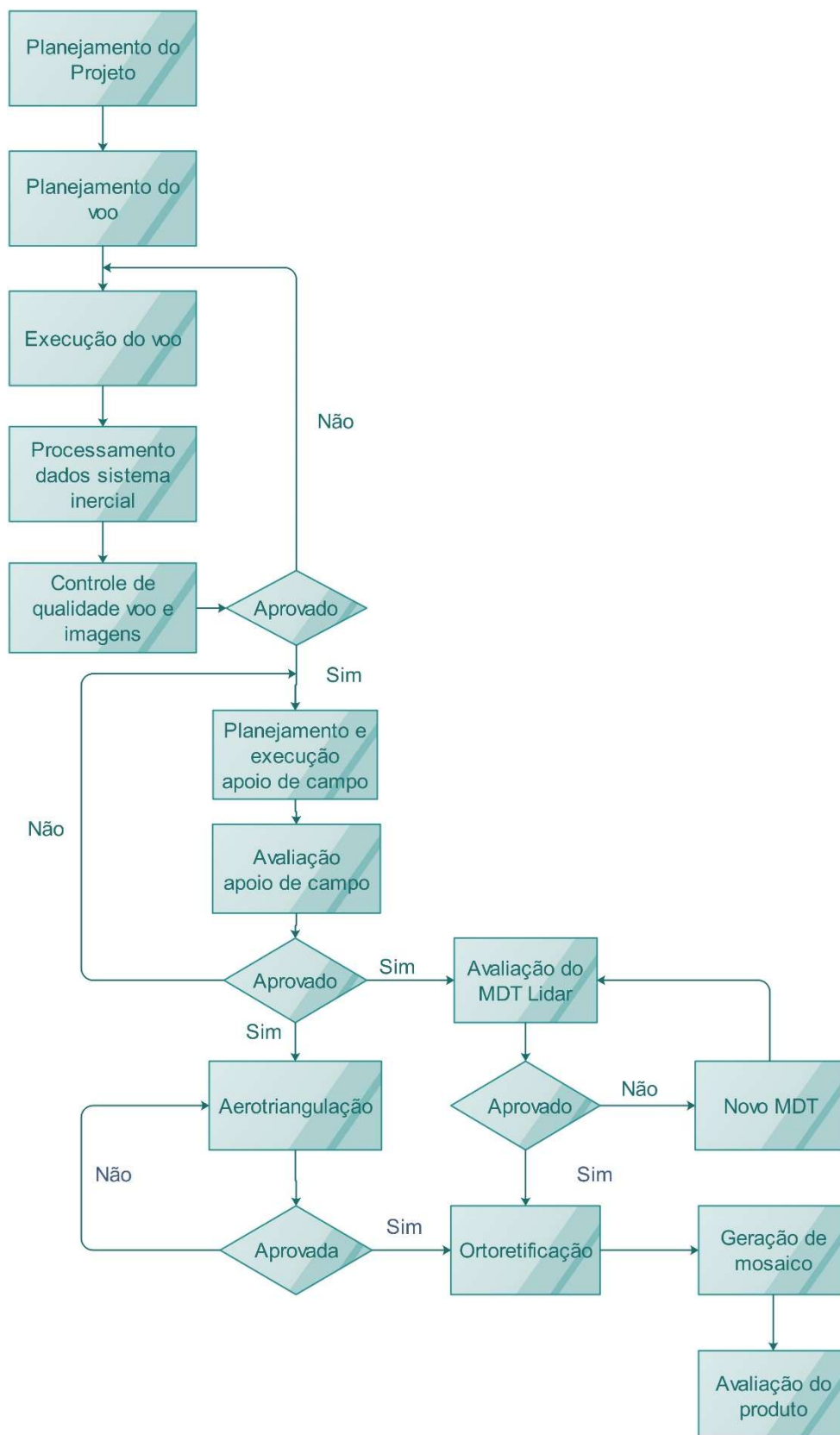
*“Ortorretificação dependente do terreno”*: este foi o segundo caso, em que a realização do processo de ortorretificação utilizou os parâmetros RPC, uma quantidade mínima de pontos de controle obtidos na etapa de apoio de campo e, ainda, o modelo digital de terreno obtido através do voo aerofotogramétrico executado com tecnologia LiDAR.

*“Geração de mosaico”*: geração de dois mosaicos distintos, utilizando as duas técnicas descritas anteriormente (independente do terreno e dependente do terreno).

*“Avaliação do produto”*: avaliação da exatidão planimétrica de ambos os mosaicos gerados na etapa anterior, foi executada através da comparação do maior número possível de pontos foto-identificáveis obtidos na etapa de apoio de campo, em comparação com as coordenadas obtidas no mosaico final. É importante destacar que, nesta etapa, foram utilizados pontos coletados em campo que não foram utilizados no processo anterior.

O fluxograma 02 apresenta as etapas que foram executadas para a geração dos produtos, fazendo uso de imagens obtidas através de aerolevanteamento, executada por meio de aeronave tripulada e aeronave não tripulada; e ainda com a utilização de modelo digital de terreno pré-existente, obtido através de aerolevanteamento executado com tecnologia LiDAR (o mesmo aplicado na ortorretificação do produto gerado no fluxograma anterior).

Fluxograma 2 Etapas para geração de mosaico com imagens obtidas através de aeronave tripulada e não tripulada, com a utilização de MDT gerado por tecnologia LiDAR



*“Planejamento do projeto”*, conforme fluxograma anterior.

*“Planejamento do voo”*, seguiu as etapas apresentadas no item 2.6.1 desta tese.

*“Execução do voo”*: nesta etapa, tanto para a aeronave tripulada quanto para a aeronave não tripulada, os voos foram realizados conforme o planejamento anterior, tomando todos os cuidados para a obtenção de imagens com a melhor qualidade geométrica e radiométrica possível.

*“Processamento dos dados do sistema inercial”*: nesta etapa foram processados os dados do sistema inercial, utilizando-se de três métodos distintos: a partir dos dados oriundos do voo apoiado, dos dados obtidos através do sistema PPP (Posicionamento por Ponto Preciso) e ainda, a partir dos dados obtidos através do sistema *RTX Centerpoint*, disponibilizado pela empresa Applanix, com a finalidade de avaliar e comparar o resultado dos três processamentos. Para a execução dos processos descritos no item 5.3, foram utilizados os dados oriundos do voo apoiado, pois este apresentou qualidade posicional superior aos outros dois métodos.

*“Controle de qualidade do voo e imagens”*: nesta etapa, foi avaliada a qualidade geométrica e radiométrica das imagens obtidas, bem como a qualidade do voo executado, através da análise dos ângulos de Euler ( $\omega$ ,  $\phi$  e  $\kappa$ ), obtidos com o sistema inercial. Também foi avaliada, por meio da geração de um mosaico, a cobertura de toda a área e as sobreposições laterais e longitudinais.

*“Planejamento e execução do apoio de campo”*: conforme fluxograma anterior.

*“Avaliação do apoio de campo”*: conforme fluxograma anterior.

*“Avaliação do MDT LiDAR”*: conforme fluxograma anterior.

*“Aerotriangulação”*: nesta etapa, foi realizado o processo de aerotriangulação, conforme exemplificado no item 2.2.7 desta tese. O controle de qualidade desta etapa foi executado avaliando os valores residuais apresentados no relatório de aerotriangulação, utilizando os critérios estabelecidos na norma ASPRS de 2023.

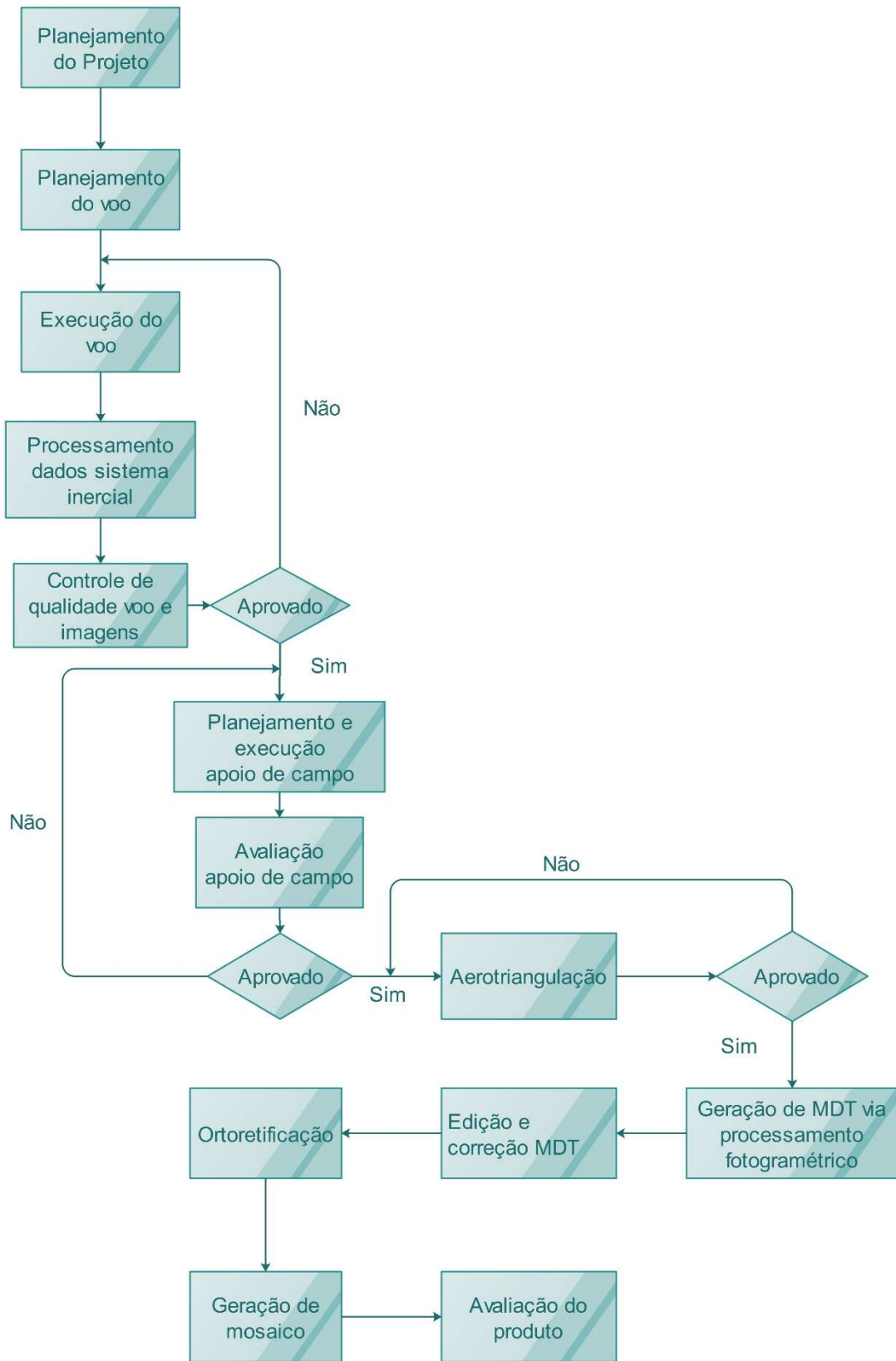
*“Ortorretificação”*: a ortorretificação foi efetuada conforme processo exemplificado no item 2.8.2 desta tese. Para tanto, foi utilizado o modelo digital de terreno, obtido através de aerolevanteamento utilizando a tecnologia LiDAR.

*“Geração de mosaico”*: os mosaicos foram gerados a partir de *software* específico (OrthoVista) e seguindo as técnicas apresentadas no item 2.8.3 desta tese.

*“Avaliação do produto”*: avaliação da exatidão planimétrica de ambos os mosaicos gerados (imagens obtidas com aeronave tripulada e não tripulada), foi realizada através da comparação do maior número de pontos foto-identificáveis, obtidos na etapa de apoio de campo, em comparação com os mesmos pontos obtidos nos mosaicos finais. Ressalta-se que, nesta etapa, foram utilizados na avaliação somente os pontos foto-identificáveis que não foram utilizados na etapa de geração dos produtos.

Para finalizar, o fluxograma 03 apresenta as etapas que foram executadas para a geração dos produtos, utilizando as mesmas imagens obtidas anteriormente, isto é, através de aerolevanteamento executado com aeronave tripulada e aeronave não tripulada, porém com a utilização de modelo digital de terreno gerado através do processo descrito no item 2.8.1 desta tese.

Fluxograma 3 Etapas para geração de mosaico com imagens obtidas através de aeronave tripulada e não tripulada, com a utilização de MDT gerado via processo fotogramétrico



*“Planejamento do projeto”*: idem ao fluxograma anterior.

*“Planejamento do voo”*: idem ao fluxograma anterior

*“Execução do voo”*: idem ao fluxograma anterior.

*“Processamento dos dados do sistema inercial”*: conforme fluxograma anterior.

*“Controle de qualidade do voo e imagens”*: conforme fluxograma anterior.

*“Planejamento e execução do apoio de campo”*: idem ao fluxograma anterior.

*“Avaliação do apoio de campo”*: idem ao fluxograma anterior.

*“Aerotriangulação”*: nesta etapa, foi realizado o processo de aerotriangulação, conforme exemplificado no item 2.2.7 desta tese. O controle de qualidade desta etapa foi executado, avaliando os valores residuais apresentados no relatório de aerotriangulação.

*“Geração de modelo digital de superfície”*: foi criado modelo digital de terreno com a utilização de *software* específico, conforme descrito no item 2.8.1 desta tese.

*“Edição e correção de modelo digital de terreno”*: nesta etapa, através de *software* específico, foram corrigidos eventuais erros inerentes ao processo de geração automática de modelo digital de terreno.

*“Ortorretificação”*: a ortorretificação foi efetuada conforme processo exemplificado no item 2.8.2 desta tese. Para tanto, foi utilizado o modelo digital de terreno obtido na etapa anterior, tendo como base as imagens aéreas adquiridas nos voos realizados com aeronave tripulada e não tripulada.

*“Geração de mosaico”*: conforme o fluxograma anterior.

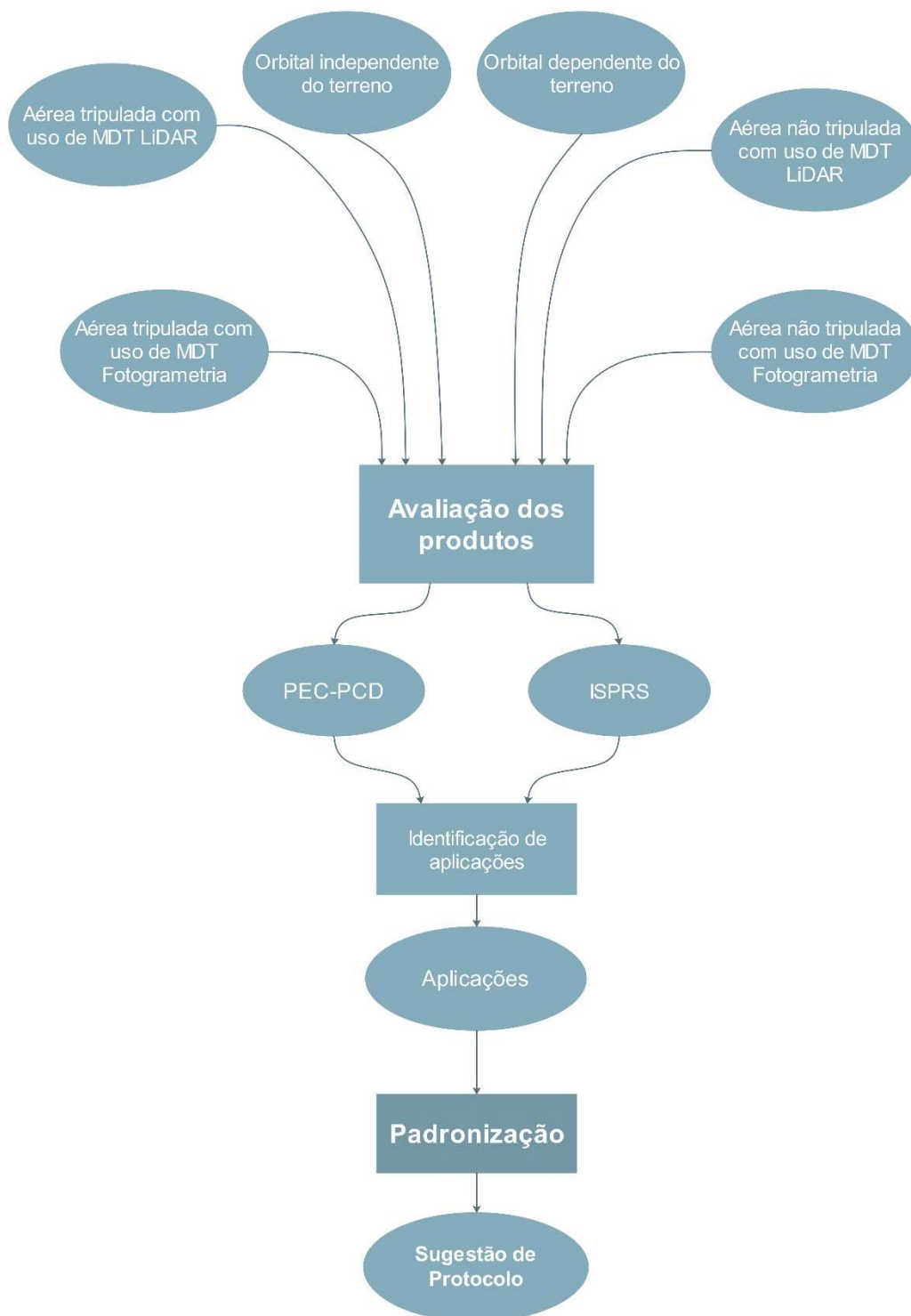
*“Avaliação do produto”*: avaliação da exatidão planialtimétrica de ambos os mosaicos gerados (imagens obtidas com aeronave tripulada e não tripulada). Esta avaliação foi executada através da comparação das coordenadas, de pontos foto-identificáveis obtidos na etapa de apoio de campo em comparação aos mesmos pontos obtidos nos mosaicos finais e modelos digitais de terreno gerados,

considerando que somente foram utilizados pontos foto-identificados que não foram utilizados na etapa de geração dos produtos.

Para a avaliação da qualidade posicional dos produtos, foram aplicadas duas normas, o Padrão de Exatidão Cartográfica Nacional voltados a atender os Produtos Cartográficos Digitais (PEC-PCD) e o padrão desenvolvido pela ISPRS para a avaliação da exatidão posicional de dados geoespaciais digitais, o qual também é utilizado para a avaliação da etapa de coleta de pontos de controle e aerotriangulação.

De posse dessa análise, foi propósito deste trabalho verificar quais as fontes de dados (imagens orbitais, fotos obtidas por aeronave tripulada e não tripulada) que melhor atendem as etapas de um projeto de Transportes, desde seu planejamento até a realização do projeto executivo.

Fluxograma 4 Etapas da pesquisa





## 5 EXPERIMENTOS E RESULTADOS

### 5.1 Área de Estudo

A área de estudo está localizada na cidade de Campinas, estado de São Paulo, compreende um retângulo com área aproximada de 6,75 km<sup>2</sup>, contendo 2,5 km de extensão no sentido Leste-Oeste e 2,7 km de extensão no sentido Norte-Sul.

Na porção central da área está o Campus da Universidade Estadual de Campinas – Unicamp. Sua faixa lateral esquerda (porção oeste) contém o bairro residencial de Barão Geraldo, com uma malha viária bem definida. Já as porções à direita e na parte inferior da área, possuem características rurais, sem a presença de grandes construções, exceção feita ao pequeno trecho de aproximadamente 0,16 km<sup>2</sup> no canto inferior direito, no qual está inserido o bairro Parque dos Jacarandás.

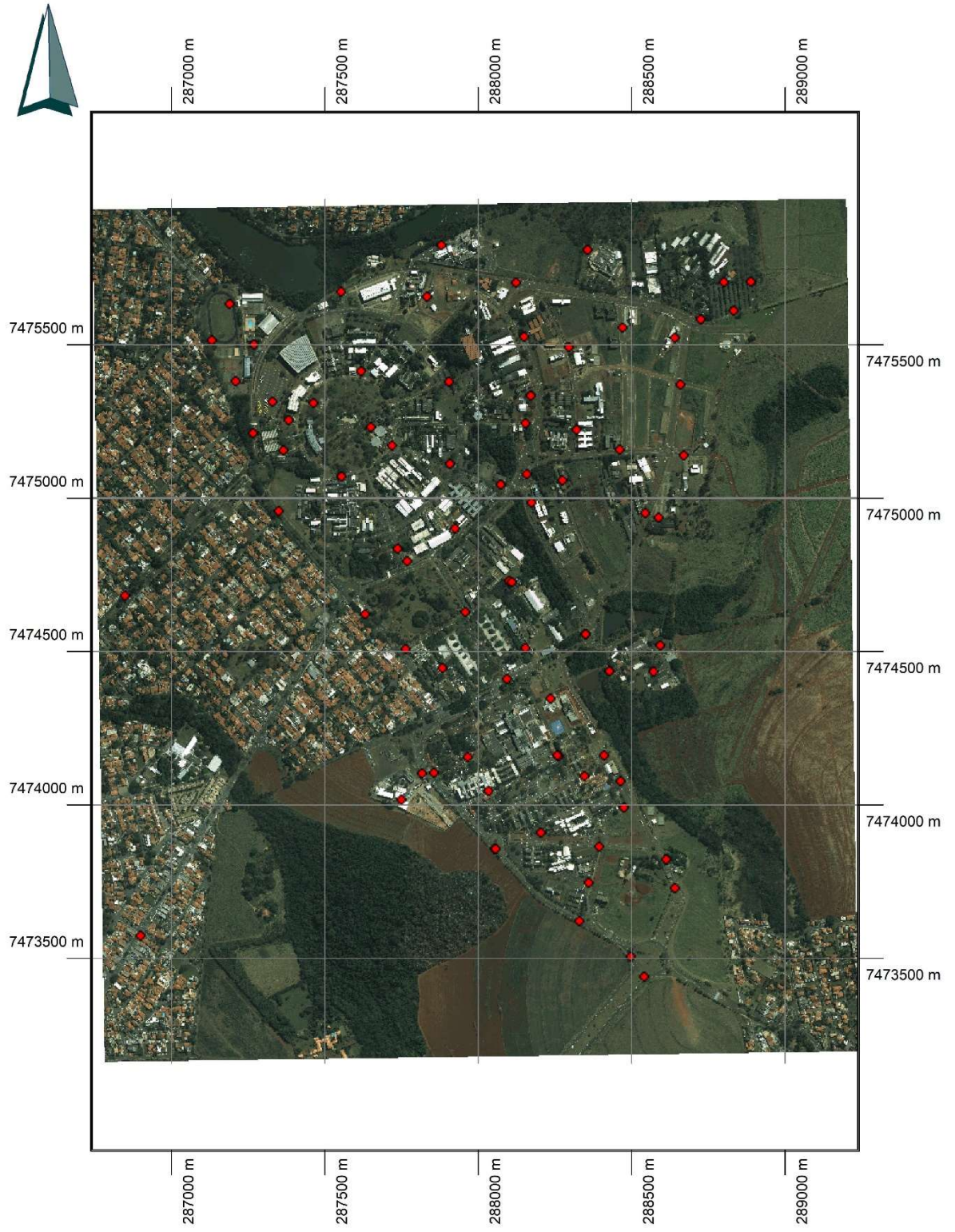
O relevo apresenta variação moderada, sendo sua menor altitude aproximadamente 585 metros próximo a porção superior da área, e sua maior altitude aproximadamente 687 metros, já na parte inferior direita da área.

Nesta área de estudo, foram utilizados 88 (oitenta e oito) pontos de controle. Parte destes pontos foram utilizados para a geração dos produtos e outra parte, utilizado no controle de qualidade e avaliação final.

A Figura 35 apresenta a área de estudo delimitada pelo retângulo de linha vermelha e a distribuição dos pontos ao longo da área. No caso dos produtos provenientes das imagens orbitais e fotos aéreas obtidas por aeronave tripulada, os estudos englobaram a área total descrita.

Já para o caso das análises executadas sobre aeronave não tripulada, os estudos foram restritos a duas áreas centrais, devido à dificuldade de mapear a área como um todo utilizando esta tecnologia, em função da autonomia de voo do equipamento utilizado e das autorizações necessárias junto ao DECEA.

Figura 35 Área de estudo e distribuição de pontos de controle



pontos de controle

Fonte: O Autor

As coordenadas geográficas do retângulo que contempla a área são as seguintes: canto superior esquerdo: latitude 22° 48' 38,39" S, longitude 047° 04' 39,85" W, canto inferior direito: latitude 22° 50' 08,82" S e longitude 47° 04' 39,85" W.

Alguns fatores influenciaram a escolha da área de estudo, primeiramente devido ao trabalho ser desenvolvido dentro do Campus da Universidade de Campinas, estando o material primário e o resultante disponível para outras pesquisas, facilidade em realização da etapa de apoio de campo, tendo em vista o apoio recebido dos técnicos do Laboratório de Topografia e Geodésia, proximidade com a cidade de Bragança Paulista, base da empresa que realizou a etapa de voo tripulado e ainda a área apresentar um sistema viário compatível com uma cidade de pequeno porte.

## **5.2 Avaliação dos pontos de controle e dados LiDAR.**

### **5.2.1 Avaliação dos pontos de controle.**

Segundo a norma americana *Positional Accuracy Standards for Digital Geospatial Data*, lançada pela ASPRS em 2014 e atualizada em 2023, a fonte ou o processo para obtenção dos pontos de controle, devem ser ao menos duas vezes mais precisa do que a exatidão necessária dos dados espaciais que serão avaliados. Os pontos de controle horizontais devem ser estabelecidos em locais bem definidos. Um ponto bem definido representa um recurso para o qual a posição horizontal pode ser medida com um grande grau de precisão em relação ao datum geodésico. Para fins de teste de precisão, pontos bem definidos devem ser facilmente visíveis ou identificáveis no solo, na fonte independente de maior precisão e no próprio produto avaliado, e ainda, para avaliação de ortomagem, pontos bem definidos não devem ser selecionados em objetos elevados em relação ao modelo de terreno utilizado para retificar as imagens.

Ao contrário dos pontos de controle horizontais, os pontos de controle verticais não precisam necessariamente ser claramente definidos, porém devem ser estabelecidos em locais que minimizam os erros de interpolação ao comparar as elevações interpoladas do conjunto de dados, com as elevações dos pontos de

verificação. Os pontos de verificação verticais devem ser obtidos em terreno aberto, plano ou com declive uniforme ou de até 10%, e devem evitar artefatos verticais ou mudanças abruptas na elevação (ASPRS, 2014).

No caso em questão, o levantamento dos pontos de controle foi executado com a utilização de sistema GNSS de dupla frequência, utilizando do método relativo estático, tempo de coleta mínimo de 20 minutos para cada ponto e máscara de elevação de 15 graus. Para o processo de correção diferencial foram utilizados dados provenientes da estação RBMC SPCA Campinas – SAT 99520, localizada no prédio da UNICAMP - Universidade Estadual de Campinas - Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo, cujo descritivo detalhado é apresentado no anexo 01 deste trabalho.

Ao todo foram levantados 88 (oitenta e oito) pontos, o processamento do conjunto foi executado por meio do software GNSS *Solutions* versão 3.80.8 desenvolvido pela empresa *Trimble Navigation Limited*. Para a transformação das altitudes geométricas (em relação ao elipsoide) para ortométricas (em relação ao geóide) foi aplicado o modelo de ondulação geoidal MAPGEO 2015, desenvolvido pelo IBGE, as coordenadas planimétricas estão referenciadas ao DATUM SIRGAS 2000 e as altitudes ao Marégrafo de Imbituba, as coordenadas e os resultados obtidos são apresentados na Tabela 15.

Apesar do lançamento feito pelo IBGE em agosto de 2021, de um novo modelo voltado para a melhoria no cálculo do posicionamento vertical, utilizando dados observados e interpolados da gravidade nas RRNN, denominado hgeoHNOR2020 (IBGE, 2019), os cálculos para a definição dos valores verticais levaram em consideração o sistema anterior, MAPGEO 2015, tendo em vista que os resultados e conclusões não são afetados por esta alteração.

Pode-se verificar através da Tabela 15, que todos os pontos apresentam para a componente planimétrica, precisão abaixo de 2 (dois) centímetros ( $\sigma_E$  e  $\sigma_N$ ) e para componente altimétrica, precisão abaixo de 3 (três) centímetros ( $\sigma_h$ ).

Levando-se em consideração os valores apresentados na Tabela 12, na qual são recomendados, segundo a ASPRS, os valores de RMSE para a componente planimétrica, pode-se afirmar que a qualidade dos pontos de controle quanto utilizados

em imagens com resolução espacial de até 2,50 centímetros, são suficientes em projetos de alta exatidão, haja visto que estes atendem as regras estabelecidas pela norma ASPRS de 2014.

Além destes pontos, foram executados dois levantamentos através de topografia convencional nas áreas onde o levantamento com aeronave não tripulada foi realizado. No total foram levantados cerca de 320 pontos utilizando processo de poligonação e irradiação com o uso de estação total e equipamentos auxiliares, detalhes do levantamento topográfico convencional podem ser encontrados em Tuler e Saraiva (2014).

Tabela 15 Pontos de Controle obtidos por sistema GNSS

Ponto	Latitude	Longitude	h	n	E	$\sigma_E$	N	$\sigma_N$	H MG2015	$\sigma_h$
PC_001	22°48'42,75645"S	47°03'59,89966"W	590,042	-4,46	287.882,950	0,003	7.475.821,565	0,003	585,582	0,005
PC_002	22°48'43,46801"S	47°03'43,19658"W	612,281	-4,46	288.359,617	0,006	7.475.806,333	0,006	607,821	0,014
PC_003	22°48'51,75056"S	47°03'39,32699"W	626,333	-4,45	288.473,531	0,002	7.475.553,075	0,002	621,883	0,003
PC_004	22°48'53,75110"S	47°03'45,49648"W	617,150	-4,45	288.298,443	0,003	7.475.489,076	0,003	612,700	0,006
PC_005	22°48'57,23165"S	47°03'59,25560"W	586,482	-4,45	287.907,548	0,008	7.475.376,518	0,008	582,032	0,022
PC_006	22°48'55,98852"S	47°04'09,27971"W	590,787	-4,46	287.621,138	0,002	7.475.410,758	0,002	586,327	0,004
PC_007	22°48'57,86028"S	47°03'32,79775"W	646,147	-4,44	288.662,357	0,004	7.475.367,718	0,004	641,707	0,006
PC_008	22°48'56,85704"S	47°04'23,61545"W	591,693	-4,46	287.212,676	0,001	7.475.378,306	0,001	587,233	0,003
PC_009	22°49'02,37988"S	47°04'21,72702"W	595,267	-4,46	287.268,916	0,005	7.475.209,161	0,005	590,807	0,009
PC_010	22°49'54,55045"S	47°03'45,21498"W	650,047	-4,40	288.332,600	0,015	7.473.618,801	0,015	645,647	0,027
PC_011	22°48'59,28251"S	47°04'14,78616"W	595,913	-4,46	287.465,522	0,005	7.475.307,223	0,005	591,453	0,005
PC_012	22°49'03,91661"S	47°04'05,85739"W	597,260	-4,45	287.722,154	0,002	7.475.168,231	0,002	592,810	0,004
PC_013	22°49'07,13736"S	47°03'50,50949"W	596,872	-4,44	288.161,233	0,002	7.475.075,274	0,002	592,432	0,005
PC_014	22°49'04,66828"S	47°03'39,85032"W	629,430	-4,44	288.464,151	0,007	7.475.155,476	0,007	624,990	0,014
PC_015	22°49'05,38075"S	47°03'32,52339"W	646,255	-4,43	288.673,407	0,006	7.475.136,473	0,006	641,825	0,014
PC_016	22°49'11,42219"S	47°03'37,02950"W	630,240	-4,43	288.547,495	0,006	7.474.948,827	0,006	625,810	0,013
PC_017	22°49'18,43287"S	47°03'52,71636"W	600,764	-4,43	288.103,157	0,003	7.474.726,907	0,003	596,334	0,008
PC_018	22°49'16,17512"S	47°04'04,32414"W	603,732	-4,44	287.771,160	0,007	7.474.791,730	0,007	599,292	0,011
PC_019	22°49'10,67198"S	47°04'18,92658"W	598,223	-4,45	287.352,359	0,003	7.474.955,188	0,003	593,773	0,006
PC_020	22°49'25,50011"S	47°04'04,64520"W	610,572	-4,43	287.766,022	0,002	7.474.504,734	0,002	606,142	0,005
PC_021	22°49'28,80081"S	47°03'53,09958"W	614,985	-4,42	288.096,688	0,019	7.474.407,802	0,021	610,565	0,043
PC_022	22°49'51,21651"S	47°03'34,24302"W	656,831	-4,39	288.644,036	0,003	7.473.725,733	0,003	652,441	0,006
PC_023	22°49'38,69479"S	47°04'02,96420"W	618,359	-4,42	287.819,644	0,006	7.474.099,494	0,006	613,939	0,009
PC_024	22°49'37,03681"S	47°03'42,13000"W	618,211	-4,41	288.413,043	0,001	7.474.158,807	0,001	613,801	0,002

Ponto	Latitude	Longitude	h	n	E	$\sigma_E$	N	$\sigma_N$	H MG2015	$\sigma_h$
PC_025	22°49'46,70223"S	47°03'42,83361"W	639,958	-4,40	288.397,132	0,001	7.473.861,187	0,001	635,558	0,002
PC_026	22°48'48,65483"S	47°04'24,19760"W	584,668	-4,47	287.192,532	0,001	7.475.630,400	0,001	580,198	0,002
PC_027	22°48'47,53058"S	47°04'11,43391"W	580,769	-4,47	287.556,057	0,004	7.475.670,091	0,004	576,299	0,007
PC_028	22°48'46,82128"S	47°03'51,42514"W	602,742	-4,46	288.126,386	0,003	7.475.699,898	0,003	598,282	0,004
PC_029	22°48'59,08626"S	47°04'19,46355"W	593,082	-4,46	287.332,045	0,007	7.475.311,389	0,007	588,622	0,007
PC_030	22°49'05,92675"S	47°03'59,27653"W	590,800	-4,45	287.910,694	0,004	7.475.109,019	0,004	586,350	0,012
PC_031	22°48'50,10345"S	47°03'26,59932"W	653,105	-4,44	288.835,803	0,003	7.475.608,806	0,003	648,665	0,004
PC_032	22°49'21,64758"S	47°03'57,75345"W	610,512	-4,43	287.960,896	0,002	7.474.626,002	0,002	606,082	0,004
PC_033	22°49'21,73960"S	47°04'09,20965"W	606,323	-4,44	287.634,236	0,003	7.474.618,597	0,003	601,883	0,021
PC_034	22°49'24,17440"S	47°03'44,04848"W	602,269	-4,42	288.352,808	0,008	7.474.553,733	0,008	597,849	0,020
PC_035	22°48'47,09022"S	47°03'27,66957"W	645,206	-4,45	288.803,989	0,006	7.475.701,077	0,006	640,756	0,009
PC_036	22°49'41,43024"S	47°04'05,37181"W	617,390	-4,42	287.752,167	0,004	7.474.014,380	0,004	612,970	0,010
PC_037	22°49'46,78354"S	47°03'54,66280"W	627,535	-4,41	288.059,850	0,004	7.473.853,970	0,004	623,125	0,008
PC_038	22°49'37,07064"S	47°03'47,33015"W	622,372	-4,41	288.264,769	0,004	7.474.155,695	0,004	617,962	0,006
PC_039	22°49'58,40969"S	47°03'39,40381"W	666,971	-4,39	288.499,964	0,004	7.473.502,393	0,004	662,581	0,007
PC_040	22°49'04,24854"S	47°04'18,27921"W	597,118	-4,46	287.368,049	0,003	7.475.153,054	0,003	592,658	0,005
PC_041	22°49'01,90751"S	47°04'08,25349"W	598,708	-4,45	287.652,955	0,019	7.475.229,080	0,019	594,258	0,062
PC_042	22°49'12,77187"S	47°03'58,78830"W	599,673	-4,44	287.927,564	0,013	7.474.898,636	0,013	595,233	0,026
PC_043	22°49'07,83550"S	47°03'46,45247"W	611,269	-4,44	288.277,231	0,014	7.475.055,413	0,014	606,829	0,021
PC_044	22°49'08,19146"S	47°03'53,50983"W	592,345	-4,44	288.076,123	0,008	7.475.041,650	0,008	587,905	0,015
PC_045	22°49'07,10964"S	47°04'11,69411"W	600,727	-4,45	287.557,078	0,008	7.475.067,670	0,008	596,277	0,010
PC_046	22°49'14,82160"S	47°04'05,44390"W	601,996	-4,44	287.738,644	0,002	7.474.832,922	0,003	597,556	0,011
PC_047	22°49'01,74831"S	47°03'50,57839"W	600,815	-4,44	288.156,951	0,007	7.475.241,031	0,007	596,375	0,017
PC_048	22°49'27,52870"S	47°04'00,50690"W	613,702	-4,43	287.884,908	0,003	7.474.443,981	0,005	609,272	0,009
PC_049	22°49'28,12595"S	47°03'41,37068"W	611,239	-4,42	288.430,869	0,010	7.474.433,237	0,010	606,819	0,015
PC_050	22°49'25,46622"S	47°03'35,54709"W	619,335	-4,42	288.595,797	0,005	7.474.517,377	0,005	614,915	0,006

Ponto	Latitude	Longitude	h	n	E	$\sigma_E$	N	$\sigma_N$	H MG2015	$\sigma_h$
PC_051	22°49'36,98100"S	47°03'57,73830"W	620,112	-4,42	287.967,929	0,003	7.474.154,302	0,003	615,692	0,011
PC_052	22°49'38,61760"S	47°04'01,64560"W	619,073	-4,42	287.857,212	0,004	7.474.102,395	0,005	614,653	0,006
PC_053	22°49'39,78310"S	47°03'40,33550"W	624,382	-4,41	288.465,395	0,004	7.474.075,037	0,005	619,972	0,008
PC_054	22°49'42,58090"S	47°03'39,97240"W	630,795	-4,40	288.476,951	0,003	7.473.989,112	0,005	626,395	0,008
PC_055	22°49'45,11540"S	47°03'49,51290"W	632,721	-4,41	288.205,985	0,003	7.473.907,342	0,005	628,311	0,008
PC_056	22°49'50,49600"S	47°03'44,13100"W	619,425	-4,40	288.361,767	0,004	7.473.743,962	0,005	615,025	0,007
PC_057	22°48'52,90007"S	47°03'33,38136"W	641,214	-4,44	288.643,586	0,005	7.475.520,077	0,005	636,774	0,006
PC_058	22°48'58,83856"S	47°03'49,92591"W	603,487	-4,45	288.174,308	0,002	7.475.330,804	0,002	599,037	0,004
PC_059	22°49'02,48470"S	47°03'44,77550"W	621,460	-4,44	288.322,756	0,002	7.475.220,689	0,004	617,020	0,011
PC_060	22°49'01,06228"S	47°04'17,63008"W	596,754	-4,46	287.385,186	0,004	7.475.251,334	0,004	592,294	0,007
PC_061	22°50' 37.52227"S	47°04' 45.42378"W	636,327	-4,40	286.634,354	0,004	7.472.272,746	0,006	631,927	0,008
PC_062	22°50' 00.55828"S	47°03' 37.89433"W	672,081	-4,39	288.543,930	0,004	7.473.436,896	0,005	667,691	0,007
PC_063	22°50' 37.92379"S	47°02' 23.50154"W	641,473	-4,32	290.681,111	0,004	7.472.316,889	0,007	637,153	0,008
PC_064	22°49' 13.86696"S	47°02' 14.80748"W	592,819	-4,39	290.893,304	0,003	7.474.906,151	0,006	588,429	0,007
PC_065	22°49' 09.94954"S	47°04' 41.93167"W	589,849	-4,46	286.695,989	0,003	7.474.968,194	0,003	585,389	0,008
PC_066	22°48' 50.98445"S	47°03' 30.38002"W	645,466	-4,44	288.728,359	0,003	7.475.580,201	0,002	641,026	0,007
PC_067	22°48' 18.80135"S	47°02' 14.33201"W	588,026	-4,43	290.883,499	0,006	7.476.600,315	0,004	583,596	0,007
PC_068	22°48' 00.33085"S	47°04' 44.54754"W	587,878	-4,51	286.591,248	0,003	7.477.108,854	0,004	583,368	0,009
PC_069	22°48' 17.32246"S	47°04' 37.68928"W	570,300	-4,50	286.794,207	0,003	7.476.588,885	0,004	565,800	0,008
PC_070	22°48' 22.39012"S	47°03' 51.59800"W	603,711	-4,48	288.110,953	0,004	7.476.451,410	0,005	599,231	0,006
PC_071	22°48' 08.38516"S	47°03' 09.87223"W	604,923	-4,47	289.295,009	0,004	7.476.898,826	0,005	600,453	0,007
PC_072	22°48' 09.04071"S	47°02' 48.84570"W	579,282	-4,46	289.894,991	0,003	7.476.886,978	0,004	574,822	0,009
PC_073	22°49' 00.94617"S	47°02' 42.08047"W	635,532	-4,41	290.110,047	0,004	7.475.292,882	0,005	631,122	0,007
PC_074	22°48' 47.07220"S	47°03' 24.60356"W	650,649	-4,44	288.891,421	0,003	7.475.702,849	0,004	646,209	0,007
PC_075	22°48' 52.56305"S	47°03' 50.60518"W	602,833	-4,45	288.152,239	0,002	7.475.523,589	0,003	598,383	0,007
PC_076	22°48' 52.47354"S	47°04' 26.29206"W	584,514	-4,47	287.134,449	0,004	7.475.512,085	0,004	580,044	0,007



Ponto	Latitude	Longitude	h	n	E	$\sigma_E$	N	$\sigma_N$	H MG2015	$\sigma_h$
PC_077	22°49' 19.41589"S	47°04' 36.61282"W	604,435	-4,45	286.851,768	0,003	7.474.679,110	0,005	599,985	0,008
PC_078	22°49' 24.18514"S	47°03' 44.04034"W	602,287	-4,42	288.353,045	0,002	7.474.553,406	0,003	597,867	0,008
PC_079	22°49' 11.42851"S	47°02' 57.38540"W	659,451	-4,41	289.678,053	0,004	7.474.964,364	0,004	655,041	0,008
PC_080	22°49' 14.51101"S	47°02' 40.42159"W	608,350	-4,40	290.163,133	0,004	7.474.876,242	0,005	603,950	0,007
PC_081	22°49' 53.77440"S	47°02' 46.98974"W	642,587	-4,36	289.992,569	0,005	7.473.665,786	0,006	638,227	0,007
PC_082	22°50' 03.96972"S	47°03' 11.50163"W	692,925	-4,37	289.297,973	0,004	7.473.342,439	0,006	688,555	0,007
PC_083	22°49' 46.77160"S	47°03' 54.76293"W	627,474	-4,41	288.056,989	0,004	7.473.854,298	0,005	623,064	0,006
PC_084	22°49' 55.47791"S	47°04' 35.37608"W	617,217	-4,43	286.902,641	0,004	7.473.570,213	0,005	612,787	0,009
PC_085	22°50' 38.21458"S	47°04' 18.61600"W	643,544	-4,38	287.399,020	0,004	7.472.262,203	0,004	639,164	0,011
PC_086	22°50' 15.54408"S	47°03' 47.62586"W	648,826	-4,38	288.272,882	0,004	7.472.972,007	0,005	644,446	0,009
PC_087	22°50' 19.54140"S	47°03' 08.61675"W	678,837	-4,35	289.386,897	0,003	7.472.864,548	0,004	674,487	0,009
PC_088	22°50' 11.41463"S	47°02' 49.04162"W	685,959	-4,35	289.941,586	0,004	7.473.122,306	0,004	681,609	0,009

Fonte: O Autor

## 5.2.2 Avaliação dos dados LiDAR

A avaliação dos dados LiDAR foi executada através da comparação das altitudes geométricas obtidas pelo sistema GNSS (tabela 15), em relação ao modelo digital de terreno. A extração dos valores de altimetria no modelo digital de terreno foi realizada de maneira manual, através do software *Global Mapper* versão 18.2.0. O resultado desta comparação é apresentado na Tabela 16, onde a coluna “h GNSS” representa os valores de altitude geométricas obtidos por meio do sistema GNSS, a coluna “h MDT” representa os valores de altitude geométricas extraídas do modelo digital de terreno, via interpolação, e os valores de “ $\Delta h$ ” a diferença entre ambos os valores.

Tabela 16 Verificação dos dados LiDAR

Ponto	h GNSS	h MDT	$\Delta h$ (m)
PC_001	590,042	590,027	0,015
PC_002	612,281	612,390	-0,109
PC_003	626,333	626,318	0,015
PC_004	617,150	617,133	0,017
PC_005	586,482	586,458	0,024
PC_006	590,787	590,772	0,015
PC_007	646,147	646,108	0,039
PC_008	591,693	591,669	0,024
PC_009	595,267	595,227	0,040
PC_010	650,047	650,060	-0,013
PC_011	595,913	595,908	0,005
PC_012	597,260	597,264	-0,004
PC_013	596,872	596,857	0,015
PC_014	629,430	629,394	0,036
PC_015	646,255	646,207	0,048
PC_016	630,240	630,227	0,013
PC_017	600,764	600,774	-0,010
PC_018	603,732	603,739	-0,007
PC_019	598,223	598,295	-0,072
PC_020	610,572	610,581	-0,009
PC_021	614,985	615,070	-0,085
PC_022	656,831	656,829	0,002
PC_023	618,359	618,300	0,059
PC_024	618,211	618,226	-0,015
PC_025	639,958	639,924	0,034
PC_026	584,668	584,654	0,014
PC_036	617,390	617,330	0,060
PC_037	627,535	627,483	0,052
PC_038	622,372	622,347	0,025
PC_039	666,971	666,985	-0,014
PC_040	597,118	597,023	0,095
PC_041	598,708	598,466	0,242
PC_042	599,673	599,591	0,082
PC_043	611,269	611,246	0,023
PC_044	592,345	592,166	0,179
PC_045	600,727	600,550	0,177
PC_047	600,815	600,748	0,067
PC_048	613,702	613,845	-0,143
PC_049	611,239	610,993	0,246
PC_050	619,335	619,274	0,061
PC_051	620,112	620,178	-0,066
PC_052	619,073	619,032	0,041
PC_053	624,382	624,424	-0,042
PC_054	630,795	630,918	-0,123
PC_055	632,721	632,597	0,124
PC_057	641,214	641,034	0,180
PC_058	603,487	603,309	0,178
PC_060	596,754	596,795	-0,041
PC_062	672,081	672,063	0,018
PC_065	589,849	589,910	-0,061
PC_066	645,466	645,473	-0,007
PC_074	650,649	650,634	0,015

Ponto	h GNSS	h MDT	$\Delta h$ (m)
PC_027	580,769	580,817	-0,048
PC_028	602,742	602,757	-0,015
PC_029	593,082	593,076	0,006
PC_030	590,800	590,804	-0,004
PC_031	653,105	653,113	-0,008
PC_032	610,512	610,547	-0,035
PC_033	606,323	606,168	0,155
PC_034	602,269	602,284	-0,015
PC_035	645,206	645,061	0,145

Ponto	h GNSS	h MDT	$\Delta h$ (m)
PC_075	602,833	602,888	-0,055
PC_076	584,514	584,605	-0,091
PC_077	604,435	604,473	-0,038
PC_078	602,287	602,281	0,006
PC_082	692,925	692,775	0,150
PC_083	627,474	627,409	0,065
PC_084	617,217	617,156	0,061
PC_086	648,826	648,800	0,026
PC_087	678,837	678,747	0,090

Total de pontos utilizados para verificação	70
Maior Diferença altimétrica (m)	0,246
Menor Diferença altimétrica (m)	0,002
Média das diferenças altimétricas (m)	0,026
Desvio Padrão da média das diferenças altimétricas (m)	0,079
Erro Padrão (m)	0,009

Fonte: O Autor

Do total de 88 (oitenta e oito) pontos de controle extraídos em campo, 70 (setenta) estavam inseridos na área de estudo, já deste total, obtivemos os seguintes resultados, 56 (cinquenta e seis) pontos apresentaram resultados entre 0,2 centímetros e 9 centímetros, 8 (oito) pontos estão entre o intervalo de 10 centímetros e 19 centímetros e 6 (seis) pontos apresentaram resultados entre 20 centímetros e 25 centímetros.

Vale ressaltar que, a totalidade dos 6 (seis) pontos que apresentaram valores de  $\Delta h$  acima de 20 centímetros, foram extraídos em locais considerados inadequados, abaixo de coberturas ou beirais de edificações, dificultando a obtenção do correto valor de altitude, um exemplo de local inadequado é apresentado na Figura 36, na qual é apresentada a localização do PC\_041.

Figura 36 Exemplo de local inadequado para obtenção de ponto de controle



Fonte: O Autor

### 5.3 Execução dos processos

Nesta etapa serão descritos todos os processos realizados, com a imagem orbital, imagens resultantes do voo tripulado e do voo não tripulado.

#### 5.3.1 Processamento de Imagem Orbital.

Tendo em vista as diferenças de resolução geométrica entre a banda pancromática e as bandas do visível (R, G e B), foi realizado o processo de *pan-sharpening*, método de *Gram-Schmidt*, através do software ENVI versão 5.6, detalhes deste método podem ser encontrados em Maurer, (2013).

Após a etapa de *pan-sharpening* o resultado obtido foi uma imagem em 3 bandas (R, G e B) com resolução espacial de 0,30 metros, sendo este material utilizado nos dois próximos experimentos realizado utilizando o software INPHO, versão 11.0.4.

O primeiro experimento, consistiu na orientação exterior da imagem orbital utilizando 10 (dez) pontos de controle somados os dados RPC's, constantes da imagem. A distribuição dos pontos de controle utilizados é apresentada na Figura 37.

Figura 37 Distribuição dos Pontos de Controle para processamento da imagem orbital



Fonte: O Autor

Os resíduos dos pontos coletados na imagem são apresentados na Tabela 17, onde temos o número correspondente ao ponto, o respectivo resíduo em E, N e h, sendo que os valores residuais foram extraídos do *software* utilizado para o registro da imagem.

Tabela 17 Resíduos dos pontos utilizados na imagem orbital, processo sem ortorretificação

Ponto	E (m)	N (m)	h (m)
PC_001	-0,085	-0,062	31,700
PC_016	0,129	0,612	187,600
PC_018	0,014	0,039	12,500
PC_023	-0,097	0,026	30,000
PC_031	0,204	0,208	87,400
PC_065	0,151	-0,146	63,100
PC_076	-0,099	-0,215	71,100
PC_082	-0,050	-0,232	71,200
PC_084	-0,006	0,100	30,000
PC_086	-0,160	-0,330	110,100

Fonte: O Autor

O segundo processamento utilizando a imagem orbital, seguiu a mesma regra do primeiro, com a diferença da utilização do modelo digital de terreno, oriundo do levantamento executado com o sistema LiDAR, na etapa de ortorretificação da imagem, os resíduos obtidos neste processo são apresentados na Tabela 18.

Tabela 18 Resíduos dos pontos utilizados na imagem orbital, processo com ortorretificação

Ponto	E (m)	N (m)	h (m)
PC_001	0,007	-0,019	6,100
PC_016	0,026	0,046	15,800
PC_018	-0,011	0,040	12,500
PC_023	0,026	0,011	8,400
PC_031	0,017	0,039	12,800
PC_065	0,007	-0,030	9,300
PC_076	-0,004	-0,003	1,400
PC_082	-0,004	-0,058	17,500
PC_084	-0,036	0,008	11,200
PC_086	-0,027	-0,004	8,000

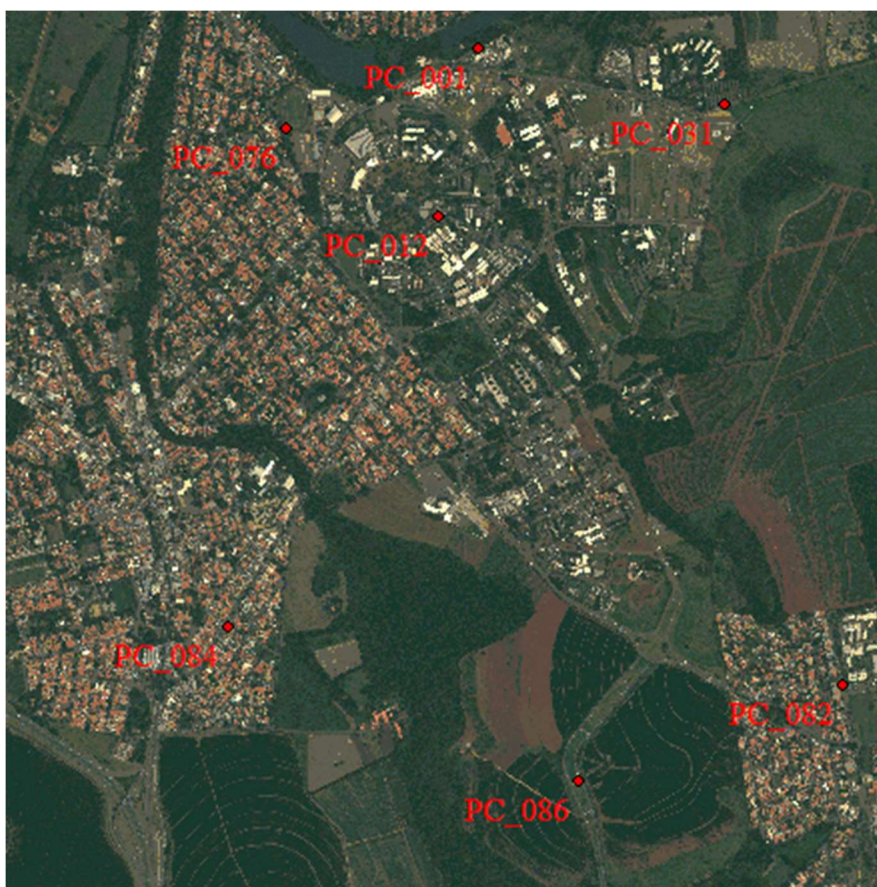
Fonte: O Autor

Neste segundo caso é possível notar a influência da utilização do modelo digital de terreno onde as três componentes E, N e h, apresentaram valores inferiores quando comparadas ao primeiro processo realizado sem a utilização do modelo digital de terreno.

### 5.3.2 Processamento de dados obtidos com aeronave tripulada.

Nesta etapa foram realizados dois processos utilizando as imagens oriundas do voo com resolução geométrica de 0,10 metros, executado com aeronave tripulada, tanto para o primeiro processo quanto para o segundo, foram utilizados 7 (sete) pontos de controle horizontais e verticais, distribuídos ao longo da área de estudo, conforme apresentado na Figura 38.

Figura 38 Distribuição dos Pontos de Controle para processamento das imagens obtidas por aeronave tripulada



Fonte: O Autor

O primeiro processo foi realizado através das técnicas convencionais de fotogrametria e seguiu as seguintes etapas: preparação do projeto no *software* INPHO versão 11.0.4, medição e ajustes dos pontos de controle horizontais e pontos de verificação (pontos de *check*), busca automática de pontos homólogos, realização

do processo de aerotriangulação com obtenção dos parâmetros de orientação exterior, geração do modelo digital de superfície e terreno, ortorretificação da imagens individualmente e geração de mosaico único de imagem.

Destaca-se que ao todo foram utilizados 35 (trinta e cinco) pontos de verificação durante o processo de aerotriangulação.

O resumo dos resultados obtidos no processo de aerotriangulação e seus parâmetros serão apresentados no tópico 5.4 de avaliação dos produtos gerados.

O segundo processo foi realizado também através das técnicas convencionais de fotogrametria, e seguiu as seguintes etapas: preparação do projeto no *software* INPHO versão 11.0.4, medição e ajustes dos pontos de controle horizontais e pontos de verificação (pontos de *check*), busca automática de pontos homólogos, realização do processo de aerotriangulação com obtenção dos parâmetros de orientação exterior, ortorretificação da imagens individualmente utilizando-se modelo digital de terreno obtido através do sistema LiDAR e geração de mosaico único de imagem.

A diferença entre os dois processos está na utilização do modelo digital de terreno proveniente do aerolevante realizado com o sistema LiDAR (segundo processo) ao invés da utilização do modelo digital de terreno obtido através do uso das imagens, com técnicas convencionais de fotogrametria, destaca-se que este modelo digital de terreno foi utilizado também para a fase de busca automática de pontos homólogos, apresentando uma melhora no resultado desta etapa.

O resumo dos resultados obtidos no processo de aerotriangulação também é apresentado e analisado no tópico de avaliação de dados.

### **5.3.3 Processamento dados obtidos com aeronave não tripulada.**

Para o processamento das imagens obtidas através da aeronave não tripulada, foi utilizado o *software* Agisoft Metashape versão 1.5.1. Tendo em vista a dificuldade de realização do voo em toda a extensão da área do Campus da Universidade, foram selecionadas duas rotatórias sendo elas: área 01 com



aproximadamente 0,13 km<sup>2</sup>, com variação altimétrica entre 594 metros até 611 metros, e área 02 com aproximadamente 0,06 km<sup>2</sup>, com variação altimétrica entre 599 metros até 609 metros, as quais estão destacadas na Figura 39.

Figura 39 Áreas selecionadas para a realização do voo com aeronave não tripulada



Fonte: O Autor

Para a área 01 foram obtidas um total de 377 imagens, e para a área 02 um total de 159 imagens, todas com GSD (*Ground Sample Distance*) médio de 2,0 centímetros. Foram levantados ainda em campo um total de 8 pontos de controle para a área 01 e 8 pontos de controle para a área 02, com o sistema GNSS, método relativo estático.

Devido à dificuldade de obtenção de feições em campo que pudessem ser verificadas junto às imagens, dentro dos pontos de controle levantados, um

conjunto de 10 pontos foram previamente sinalizados em campo, com a finalidade de facilitar o processo de retificação das imagens, a Figura 40 apresenta um exemplo de ponto previamente sinalizado.

Figura 40 Exemplo de ponto previamente sinalizado



Fonte: O Autor

Neste caso foi realizado um único processamento para cada área, em primeiro lugar as imagens foram importadas no *software* através dos dados de orientação provenientes do sistema interno da aeronave na tripulada, executada a calibração da câmera, o alinhamento das imagens e o ajustamento do bloco fotogramétrico utilizando-se os pontos obtidos em campo. Após esta etapa foi possível avaliar a qualidade do ajustamento através da análise dos resíduos, após esta avaliação, foi realizada a geração da nuvem de pontos, sua classificação e o processamento do modelo digital de superfície e de terreno, fonte para ortorretificação das imagens.

De posse do modelo digital de terreno, foi efetuada a ortorretificação das imagens e geração da ortofoto e respectivo ortomosaico.

A verificação da planimetria foi realizada através da comparação de pontos levantados em campo através do processo de poligonação e irradiação com o uso de estação total e equipamentos auxiliares. Os resultados da análise dos produtos são apresentados no próximo tópico. A qualidade do levantamento em campo executado através do processo de poligonação é apresentada nas Tabelas 19 e 20, para a área 01 e 02 respectivamente. Para a verificação dos dados altimétricos, além da comparação com os pontos obtidos por poligonação, também foi efetuada análise dos modelos de superfície obtidos no processamento das imagens em relação ao modelo de superfície obtido através da tecnologia LiDAR, sendo os resultados também apresentados no próximo tópico.

Tabela 19 Resumo dos cálculos levantamento topográfico área 01

<b>Resumo dos cálculos área 01:</b>			
Tipo de planilha:	Poligonal fechada em 2 pontos		
Nº de Vértices:	3		
Linhas:	177		
Precisão angular:	10		
Erro angular permitido:	±0°00'17"		
Erro angular obtido:	0°00'07"		
Compensação angular:	Proporcional ao número de vértices		
Partida UTM (Estação)		Chegada UTM (Ré)	
Coord. E(X):	287.616,89	Coord. E(X):	287.551,74
Coord. N(Y):	7.474.713,44	Coord. N(Y):	7.474.716,61
Cota Z:	596,994	Cota Z:	597,731
<b>Fechamento linear</b>			
Parcias X		Parcias Y	
Total (E+):	0	Total (N+):	0
Total (W-):	0	Total (S-):	0
Delta (X):	0	Delta (Y):	-0,002
<b>Erro Linear</b>			
Absoluto:	0,0020 m		
/Mil:	0,0147 m		
Relativo:	1 / 68.101,0000 m		
Compensação linear:	Proporcional as distâncias		
Erro Altimétrico:	-0,0030 m		
Compensação altimétrica: Proporcional as distâncias			
Somat. Distâncias:	204,5230 m		
Área da poligonal base: 2.005,368 m <sup>2</sup> ou 0,201 ha ou 0,083 Alqs.			

Fonte: O Autor

Tabela 20 Resumo dos cálculos levantamento topográfico área 02

<b>Resumo dos cálculos área 02:</b>			
Tipo de planilha:	Poligonal fechada em 2 pontos		
Nº de Vértices:	3		
Linhas:	181		
Precisão angular:	10		
Erro angular permitido:	±0°00'17"		
Erro angular obtido:	0°00'17.0"		
Compensação angular:	Proporcional ao número de vértices		
Partida UTM (Estação)		Chegada UTM (Ré)	
Coord. E(X):	288.165,26	Coord. E(X):	288.117,07
Coord. N(Y):	7.475.154,01	Coord. N(Y):	7.475.073,23
Cota Z:	594,322	Cota Z:	590,84
Fechamento linear			
Parcias X		Parcias Y	
Total (E+):	0	Total (N+):	0
Total (W-):	0	Total (S-):	0
Delta (X):	-0,001	Delta (Y):	-0,011
Erro Linear			
Absoluto:	0,0110 m		
/Mil:	0,0745 m		
Relativo:	1 / 13.423,1919 m		
Compensação linear:	Proporcional as distâncias		
Erro Altimétrico:	-0,0230 m		
Compensação altimétrica: Proporcional as distâncias			
Somat. Distâncias:	226,5340 m		
Área da poligonal base: 2.120,320 m <sup>2</sup> ou 0,212 ha ou 0,088 Alqs.			

Fonte: O Autor

#### 5.4 Avaliação dos produtos gerados.

Neste item são analisadas a qualidade planimétrica é altimétrica dos produtos gerados com base nas normas nacionais e internacionais.

#### 5.4.1 Avaliação planimétrica da Imagem Orbital.

No caso da imagem orbital, por não se tratar de um conjunto de imagem estéreo, as avaliações foram efetuadas somente nas componentes planimétricas. A avaliação foi executada sobre três resultados, no primeiro caso avaliou-se a qualidade posicional da imagem referenciada utilizando-se somente as efemérides do satélite, sem a utilização dos dados de RPC, isto é, fez-se o processo de *pan-sharpening* e georreferenciamento através dos dados diretos do satélite.

Para a avaliação foram distribuídos e analisados um total de 54 (cinquenta e quatro) pontos ao longo da área, as diferenças entre os valores obtidos pelo sistema GNSS e aqueles encontrados na feições da imagem são apresentados na Tabela 21, as coordenadas apresentadas nas colunas E IMG e N IMG referem-se aos valores obtidos manualmente sobre a imagem através do software *Global Mapper*, as colunas E GNSS e N GNSS referem-se aos dados obtidos pelo sistema GNSS, as colunas  $\Delta E$  e  $\Delta N$  representam as diferenças dos valores de coordenadas da imagem em relação aos valores de coordenadas do sistema GNSS, e a coluna  $\Delta TOTAL$ , a resultante das duas componentes  $\Delta E$  e  $\Delta N$ .

Ao final da tabela é apresentado o quadro resumo com a quantidade de pontos utilizados, as maiores e menores diferenças, além da média das diferenças encontradas, bem como o desvio padrão médio e o erro padrão.

Tabela 21 Avaliação da imagem orbital georreferenciada através das efemérides do satélite

PONTO	E IMG (m)	N IMG (m)	E GNSS (m)	N GNSS (m)	$\Delta E$ (m)	$\Delta N$ (m)	$\Delta TOTAL$ (m)
PC_001	287.878,714	7.475.844,301	287.882,950	7.475.821,565	-4,236	22,736	23,127
PC_002	288.358,486	7.475.810,433	288.359,617	7.475.806,333	-1,131	4,100	4,253
PC_003	288.474,936	7.475.553,176	288.473,531	7.475.553,075	1,405	0,101	1,409
PC_004	288.298,805	7.475.494,341	288.298,443	7.475.489,076	0,362	5,265	5,277
PC_005	287.903,698	7.475.402,027	287.907,548	7.475.376,518	-3,850	25,509	25,798
PC_006	287.618,817	7.475.432,430	287.621,138	7.475.410,758	-2,321	21,672	21,796
PC_007	288.666,999	7.475.355,777	288.662,357	7.475.367,718	4,642	-11,941	12,812
PC_009	287.267,906	7.475.229,158	287.268,916	7.475.209,161	-1,010	19,997	20,022
PC_010	288.338,095	7.473.603,666	288.332,600	7.473.618,801	5,495	-15,135	16,102
PC_012	287.720,301	7.475.185,569	287.722,154	7.475.168,231	-1,853	17,338	17,437
PC_013	288.158,462	7.475.092,971	288.161,233	7.475.075,274	-2,771	17,697	17,913
PC_014	288.466,122	7.475.153,491	288.464,151	7.475.155,476	1,971	-1,985	2,797
PC_015	288.678,057	7.475.124,357	288.673,407	7.475.136,473	4,650	-12,116	12,978

PONTO	E IMG (m)	N IMG (m)	E GNSS (m)	N GNSS (m)	Δ E (m)	Δ N (m)	Δ TOTAL (m)
PC_016	288.549,857	7.474.946,336	288.547,495	7.474.948,827	2,362	-2,491	3,433
PC_017	288.100,922	7.474.742,164	288.103,157	7.474.726,907	-2,235	15,257	15,420
PC_018	287.769,313	7.474.805,390	287.771,160	7.474.791,730	-1,847	13,660	13,784
PC_020	287.765,527	7.474.515,001	287.766,022	7.474.504,734	-0,495	10,267	10,279
PC_021	288.096,583	7.474.414,732	288.096,688	7.474.407,802	-0,105	6,930	6,931
PC_022	288.650,317	7.473.707,056	288.644,036	7.473.725,733	6,281	-18,677	19,705
PC_023	287.820,193	7.474.104,382	287.819,644	7.474.099,494	0,549	4,888	4,919
PC_024	288.413,042	7.474.162,920	288.413,043	7.474.158,807	-0,001	4,113	4,113
PC_025	288.400,648	7.473.852,588	288.397,132	7.473.861,187	3,516	-8,599	9,290
PC_026	287.187,245	7.475.655,978	287.192,532	7.475.630,400	-5,287	25,578	26,119
PC_027	287.550,863	7.475.697,466	287.556,057	7.475.670,091	-5,194	27,375	27,863
PC_028	288.125,402	7.475.713,510	288.126,386	7.475.699,898	-0,984	13,612	13,648
PC_029	287.328,785	7.475.331,277	287.332,045	7.475.311,389	-3,260	19,888	20,153
PC_030	287.907,567	7.475.128,894	287.910,694	7.475.109,019	-3,127	19,875	20,119
PC_031	288.840,064	7.475.592,357	288.835,803	7.475.608,806	4,261	-16,449	16,992
PC_033	287.633,166	7.474.630,795	287.634,236	7.474.618,597	-1,070	12,198	12,245
PC_034	288.350,993	7.474.568,352	288.352,808	7.474.553,733	-1,815	14,619	14,731
PC_035	288.808,702	7.475.686,458	288.803,989	7.475.701,077	4,713	-14,619	15,360
PC_036	287.752,499	7.474.020,084	287.752,167	7.474.014,380	0,332	5,704	5,714
PC_037	288.061,509	7.473.853,122	288.059,850	7.473.853,970	1,659	-0,848	1,863
PC_039	288.507,644	7.473.477,733	288.499,964	7.473.502,393	7,680	-24,660	25,828
PC_040	287.365,706	7.475.169,606	287.368,049	7.475.153,054	-2,343	16,552	16,717
PC_041	287.651,020	7.475.244,012	287.652,955	7.475.229,080	-1,935	14,932	15,057
PC_044	288.073,054	7.475.060,275	288.076,123	7.475.041,650	-3,069	18,625	18,876
PC_045	287.555,271	7.475.080,832	287.557,078	7.475.067,670	-1,807	13,162	13,285
PC_046	287.738,128	7.474.846,025	287.738,644	7.474.832,922	-0,516	13,103	13,113
PC_048	287.885,241	7.474.450,040	287.884,908	7.474.443,981	0,333	6,059	6,068
PC_054	288.477,206	7.473.985,614	288.476,951	7.473.989,112	0,255	-3,498	3,507
PC_055	288.208,960	7.473.901,490	288.205,985	7.473.907,342	2,975	-5,852	6,565
PC_057	288.648,828	7.475.497,653	288.643,586	7.475.520,077	5,242	-22,424	23,029
PC_059	288.324,345	7.475.225,437	288.322,756	7.475.220,689	1,589	4,748	5,007
PC_060	287.382,681	7.475.267,858	287.385,186	7.475.251,334	-2,505	16,524	16,713
PC_062	288.552,229	7.473.409,184	288.543,930	7.473.436,896	8,299	-27,712	28,928
PC_065	286.692,493	7.474.990,316	286.695,989	7.474.968,194	-3,496	22,122	22,397
PC_075	288.150,436	7.475.537,774	288.152,239	7.475.523,589	-1,803	14,185	14,299
PC_076	287.130,103	7.475.537,519	287.134,449	7.475.512,085	-4,346	25,434	25,803
PC_077	286.850,303	7.474.691,790	286.851,768	7.474.679,110	-1,465	12,680	12,764
PC_082	289.309,384	7.473.301,505	289.297,973	7.473.342,439	11,411	-40,934	42,495
PC_084	286.903,259	7.473.575,513	286.902,641	7.473.570,213	0,618	5,300	5,336
PC_086	288.277,748	7.472.958,080	288.272,882	7.472.972,007	4,866	-13,927	14,753
PC_087	289.396,577	7.472.832,778	289.386,897	7.472.864,548	9,680	-31,770	33,212

Total de Pontos de Controle utilizados para avaliação	54
Maior Diferença planimétrica (m)	42,495
Menor Diferença planimétrica (m)	1,409
Média das diferenças planimétricas (m)	14,966
Desvio Padrão da média das diferenças planimétricas (m)	8,772
Erro Padrão em planimetria (m)	1,194

Fonte: O Autor

Levando-se em consideração a norma nacional que determina o mínimo de 90% dos pontos bem definidos numa carta, quando testados no terreno não possam apresentar erro superior ao PEC-PCD planimétrico estabelecido, podemos considerar que 49 (quarenta e nove) pontos do total da amostra devem atender a este critério.

Analisando os resultados da Tabela 21, verificamos um total de 49 pontos com diferenças variando entre 1,409 metros até 25,828 metros, e os 5 pontos restantes com diferenças variando de 26,119 metros até 42,495 metros.

Desta forma, baseados no Padrão de Exatidão Cartográfica para produtos digitais PEC-PCD, tabela 10, pode-se estabelecer o valor de 28,0 metros como limite para a classificação do produto, sendo assim, podemos considerar que este produto quando avaliado a sua qualidade planimétrica, segundo a norma nacional para produtos digitais, está atendendo a escala 1:100.000, isto é, 90% dos pontos apresentariam erro máximo igual ou inferior a 0,28 mm da escala da carta, e o erro padrão da amostra deve estar abaixo de 0,17 mm da escala da carta, 28,0 e 17 metros respectivamente.

O segundo processo de análise da qualidade planimétrica da imagem foi executado sobre o resultado do processamento utilizando-se 10 (dez) pontos de controle distribuídos na área, conforme a Figura 39, e ainda, a realização da retificação da imagem através dos dados de RPC, os resultados da avaliação dos pontos de controle em relação a imagem resultante são apresentados na Tabela 22.

Nesta tabela a coluna TIPO representa os pontos que foram utilizados no processo de retificação das imagens (PC), e aqueles utilizados para a classificação e controle de qualidade do processo (PEC), vale ressaltar que o resumo com os resultados de maior diferença, menor diferença, média das diferenças planimétricas,



desvio padrão e erro padrão, não levou em consideração nos cálculos os pontos de controle utilizados para a retificação da imagem, isto é, pontos classificados com PC.

Tabela 22 Avaliação da imagem orbital georreferenciada através de pontos de controle e dados RPC do satélite

PONTO	TIPO	E IMG (m)	N IMG (m)	E GNSS (m)	N GNSS (m)	$\Delta E$ (m)	$\Delta N$ (m)	$\Delta TOTAL$ (m)
PC_001	PC	287.882,453	7.475.821,598	287.882,950	7.475.821,565	-0,497	0,033	0,498
PC_016	PC	288.546,819	7.474.951,827	288.547,495	7.474.948,827	-0,676	3,000	3,075
PC_018	PC	287.770,187	7.474.795,460	287.771,160	7.474.791,730	-0,973	3,730	3,855
PC_023	PC	287.818,225	7.474.102,210	287.819,644	7.474.099,494	-1,419	2,716	3,064
PC_031	PC	288.835,992	7.475.608,474	288.835,803	7.475.608,806	0,189	-0,332	0,382
PC_065	PC	286.695,705	7.474.970,809	286.695,989	7.474.968,194	-0,284	2,615	2,630
PC_076	PC	287.133,386	7.475.516,734	287.134,449	7.475.512,085	-1,063	4,649	4,769
PC_082	PC	289.297,832	7.473.342,520	289.297,973	7.473.342,439	-0,141	0,081	0,163
PC_084	PC	286.902,573	7.473.572,281	286.902,641	7.473.570,213	-0,068	2,068	2,069
PC_086	PC	288.272,822	7.472.972,367	288.272,882	7.472.972,007	-0,060	0,360	0,365
PC_002	PEC	288.359,333	7.475.806,013	288.359,617	7.475.806,333	-0,284	-0,320	0,428
PC_003	PEC	288.473,171	7.475.554,066	288.473,531	7.475.553,075	-0,360	0,991	1,054
PC_004	PEC	288.298,094	7.475.490,027	288.298,443	7.475.489,076	-0,349	0,951	1,013
PC_005	PEC	287.906,079	7.475.381,905	287.907,548	7.475.376,518	-1,469	5,387	5,584
PC_006	PEC	287.621,543	7.475.415,501	287.621,138	7.475.410,758	0,405	4,743	4,760
PC_007	PEC	288.662,359	7.475.367,819	288.662,357	7.475.367,718	0,002	0,101	0,101
PC_009	PEC	287.267,520	7.475.213,293	287.268,916	7.475.209,161	-1,396	4,132	4,361
PC_010	PEC	288.332,834	7.473.618,630	288.332,600	7.473.618,801	0,234	-0,171	0,290
PC_012	PEC	287.721,722	7.475.173,015	287.722,154	7.475.168,231	-0,432	4,784	4,803
PC_013	PEC	288.160,179	7.475.078,152	288.161,233	7.475.075,274	-1,054	2,878	3,065
PC_014	PEC	288.464,064	7.475.155,798	288.464,151	7.475.155,476	-0,087	0,322	0,334
PC_015	PEC	288.673,186	7.475.137,383	288.673,407	7.475.136,473	-0,221	0,910	0,936
PC_017	PEC	288.104,549	7.474.728,380	288.103,157	7.474.726,907	1,392	1,473	2,027
PC_020	PEC	287.765,644	7.474.508,058	287.766,022	7.474.504,734	-0,378	3,324	3,345
PC_021	PEC	288.096,445	7.474.411,045	288.096,688	7.474.407,802	-0,243	3,243	3,252
PC_022	PEC	288.644,338	7.473.726,066	288.644,036	7.473.725,733	0,302	0,333	0,450
PC_024	PEC	288.412,295	7.474.160,699	288.413,043	7.474.158,807	-0,748	1,892	2,034
PC_025	PEC	288.396,673	7.473.861,818	288.397,132	7.473.861,187	-0,459	0,631	0,780
PC_026	PEC	287.192,009	7.475.632,274	287.192,532	7.475.630,400	-0,523	1,874	1,946
PC_027	PEC	287.555,476	7.475.672,075	287.556,057	7.475.670,091	-0,581	1,984	2,067
PC_028	PEC	288.125,521	7.475.701,484	288.126,386	7.475.699,898	-0,865	1,586	1,807
PC_029	PEC	287.331,108	7.475.314,740	287.332,045	7.475.311,389	-0,937	3,351	3,480
PC_030	PEC	287.909,793	7.475.113,776	287.910,694	7.475.109,019	-0,901	4,757	4,842
PC_033	PEC	287.633,871	7.474.621,881	287.634,236	7.474.618,597	-0,365	3,284	3,304
PC_034	PEC	288.351,957	7.474.556,828	288.352,808	7.474.553,733	-0,851	3,095	3,210
PC_035	PEC	288.804,503	7.475.698,644	288.803,989	7.475.701,077	0,514	-2,433	2,487
PC_036	PEC	287.750,951	7.474.017,623	287.752,167	7.474.014,380	-1,216	3,243	3,463

PONTO	TIPO	E IMG (m)	N IMG (m)	E GNSS (m)	N GNSS (m)	$\Delta E$ (m)	$\Delta N$ (m)	$\Delta TOTAL$ (m)
PC_037	PEC	288.059,024	7.473.854,150	288.059,850	7.473.853,970	-0,826	0,180	0,845
PC_039	PEC	288.499,952	7.473.501,786	288.499,964	7.473.502,393	-0,012	-0,607	0,607
PC_040	PEC	287.368,860	7.475.156,676	287.368,049	7.475.153,054	0,811	3,622	3,712
PC_041	PEC	287.652,631	7.475.230,702	287.652,955	7.475.229,080	-0,324	1,622	1,654
PC_044	PEC	288.075,636	7.475.043,191	288.076,123	7.475.041,650	-0,487	1,541	1,616
PC_045	PEC	287.556,673	7.475.070,346	287.557,078	7.475.067,670	-0,405	2,676	2,706
PC_046	PEC	287.738,887	7.474.835,030	287.738,644	7.474.832,922	0,243	2,108	2,122
PC_048	PEC	287.884,989	7.474.446,495	287.884,908	7.474.443,981	0,081	2,514	2,515
PC_054	PEC	288.475,248	7.473.991,058	288.476,951	7.473.989,112	-1,703	1,946	2,586
PC_055	PEC	288.205,904	7.473.907,180	288.205,985	7.473.907,342	-0,081	-0,162	0,181
PC_057	PEC	288.643,941	7.475.515,901	288.643,586	7.475.520,077	0,355	-4,176	4,191
PC_059	PEC	288.322,594	7.475.218,419	288.322,756	7.475.220,689	-0,162	-2,270	2,276
PC_060	PEC	287.384,375	7.475.252,956	287.385,186	7.475.251,334	-0,811	1,622	1,813
PC_062	PEC	288.544,343	7.473.435,752	288.543,930	7.473.436,896	0,413	-1,144	1,216
PC_075	PEC	288.150,942	7.475.528,670	288.152,239	7.475.523,589	-1,297	5,081	5,244
PC_077	PEC	286.850,633	7.474.681,705	286.851,768	7.474.679,110	-1,135	2,595	2,832
PC_087	PEC	289.386,555	7.472.865,927	289.386,897	7.472.864,548	-0,342	1,379	1,421

Total de Pontos de Controle utilizados para avaliação	44
Maior Diferença planimétrica (m)	5,584
Menor Diferença planimétrica (m)	0,101
Média das diferenças planimétricas (m)	2,336
Desvio Padrão da média das diferenças planimétricas (m)	1,494
Erro Padrão em planimetria (m)	0,225

Fonte: O Autor

Seguindo o mesmo critério adotado para o processo anterior, temos que do total de 44 pontos de controle utilizados para a validação, 39 devem atender os critérios estabelecidos pela norma nacional, desta forma, temos que 39 pontos estão contidos no intervalo de 0,101 até 4,361 metros e 5 pontos estão contidos no intervalo de 4,760 até 5,584 metros.

Estabelecendo um erro máximo de 5,00 metros, e de acordo com a tabela 10, pode-se classificar o produto no padrão PEC-PCD classe A para uma escala aproximada de 1:17.800, isto é, o erro máximo permitido será de 4,98 metros e o erro padrão de 3,03 metros, isto é 0,28 mm para o erro planimétrico e 0,17 mm para o erro padrão.

A terceira e última análise realizada sobre a imagem orbital, foi executada sobre o resultado da retificação da imagem com a utilização dos mesmos pontos de controle da etapa anterior, dados de RPC e ortorretificação utilizando os dados provenientes do voo executado com o sistema LiDAR, a Tabela 23 apresenta o resultado da análise.

Tabela 23 Avaliação da imagem orbital georreferenciada através de pontos de controle e dados RPC do satélite e ortorretificação com dados LiDAR

PONTO	TIPO	E IMG (m)	N IMG (m)	E GNSS (m)	N GNSS (m)	$\Delta E$ (m)	$\Delta N$ (m)	$\Delta TOTAL$ (m)
PC_001	PC	287.882,909	7.475.821,990	287.882,950	7.475.821,565	-0,041	0,425	0,427
PC_016	PC	288.547,691	7.474.949,015	288.547,495	7.474.948,827	0,196	0,188	0,272
PC_018	PC	287.771,212	7.474.791,890	287.771,160	7.474.791,730	0,052	0,160	0,168
PC_023	PC	287.819,665	7.474.099,525	287.819,644	7.474.099,494	0,021	0,031	0,037
PC_031	PC	288.835,803	7.475.608,760	288.835,803	7.475.608,806	0,000	-0,046	0,046
PC_065	PC	286.696,097	7.474.968,086	286.695,989	7.474.968,194	0,108	-0,108	0,153
PC_076	PC	287.134,480	7.475.512,201	287.134,449	7.475.512,085	0,031	0,116	0,120
PC_082	PC	289.298,019	7.473.342,393	289.297,973	7.473.342,439	0,046	-0,046	0,065
PC_084	PC	286.902,801	7.473.570,182	286.902,641	7.473.570,213	0,160	-0,031	0,163
PC_086	PC	288.272,903	7.472.972,007	288.272,882	7.472.972,007	0,021	0,000	0,021
PC_002	PEC	288.359,687	7.475.806,428	288.359,617	7.475.806,333	0,070	0,095	0,118
PC_003	PEC	288.473,366	7.475.553,441	288.473,531	7.475.553,075	-0,165	0,366	0,401
PC_004	PEC	288.298,391	7.475.489,215	288.298,443	7.475.489,076	-0,052	0,139	0,148
PC_005	PEC	287.907,658	7.475.376,848	287.907,548	7.475.376,518	0,110	0,330	0,348
PC_006	PEC	287.621,200	7.475.411,170	287.621,138	7.475.410,758	0,062	0,412	0,417
PC_007	PEC	288.662,470	7.475.367,965	288.662,357	7.475.367,718	0,113	0,247	0,272
PC_009	PEC	287.268,568	7.475.209,718	287.268,916	7.475.209,161	-0,348	0,557	0,657
PC_010	PEC	288.332,621	7.473.618,853	288.332,600	7.473.618,801	0,021	0,052	0,056
PC_012	PEC	287.722,293	7.475.168,092	287.722,154	7.475.168,231	0,139	-0,139	0,197
PC_013	PEC	288.161,243	7.475.075,313	288.161,233	7.475.075,274	0,010	0,039	0,040
PC_014	PEC	288.464,130	7.475.155,531	288.464,151	7.475.155,476	-0,021	0,055	0,059
PC_015	PEC	288.673,471	7.475.136,624	288.673,407	7.475.136,473	0,064	0,151	0,164
PC_017	PEC	288.103,203	7.474.726,830	288.103,157	7.474.726,907	0,046	-0,077	0,090
PC_020	PEC	287.765,970	7.474.504,935	287.766,022	7.474.504,734	-0,052	0,201	0,208
PC_021	PEC	288.096,538	7.474.408,060	288.096,688	7.474.407,802	-0,150	0,258	0,298
PC_022	PEC	288.644,057	7.473.726,032	288.644,036	7.473.725,733	0,021	0,299	0,300
PC_024	PEC	288.413,064	7.474.158,755	288.413,043	7.474.158,807	0,021	-0,052	0,056
PC_025	PEC	288.397,302	7.473.861,280	288.397,132	7.473.861,187	0,170	0,093	0,194
PC_026	PEC	287.192,563	7.475.630,555	287.192,532	7.475.630,400	0,031	0,155	0,158
PC_027	PEC	287.555,871	7.475.670,400	287.556,057	7.475.670,091	-0,186	0,309	0,361
PC_028	PEC	288.126,108	7.475.700,238	288.126,386	7.475.699,898	-0,278	0,340	0,439
PC_029	PEC	287.332,107	7.475.311,358	287.332,045	7.475.311,389	0,062	-0,031	0,069
PC_030	PEC	287.910,771	7.475.108,988	287.910,694	7.475.109,019	0,077	-0,031	0,083

PONTO	TIPO	E IMG (m)	N IMG (m)	E GNSS (m)	N GNSS (m)	$\Delta E$ (m)	$\Delta N$ (m)	$\Delta TOTAL$ (m)
PC_033	PEC	287.634,320	7.474.618,528	287.634,236	7.474.618,597	0,084	-0,069	0,109
PC_034	PEC	288.352,794	7.474.553,727	288.352,808	7.474.553,733	-0,014	-0,006	0,015
PC_035	PEC	288.804,391	7.475.701,041	288.803,989	7.475.701,077	0,402	-0,036	0,404
PC_036	PEC	287.752,012	7.474.014,674	287.752,167	7.474.014,380	-0,155	0,294	0,332
PC_037	PEC	288.059,695	7.473.853,924	288.059,850	7.473.853,970	-0,155	-0,046	0,162
PC_039	PEC	288.499,907	7.473.502,584	288.499,964	7.473.502,393	-0,057	0,191	0,199
PC_040	PEC	287.368,193	7.475.153,064	287.368,049	7.475.153,054	0,144	0,010	0,144
PC_041	PEC	287.653,929	7.475.228,740	287.652,955	7.475.229,080	0,974	-0,340	1,032
PC_044	PEC	288.076,123	7.475.041,464	288.076,123	7.475.041,650	0,000	-0,186	0,186
PC_045	PEC	287.557,635	7.475.066,881	287.557,078	7.475.067,670	0,557	-0,789	0,966
PC_046	PEC	287.738,922	7.474.832,876	287.738,644	7.474.832,922	0,278	-0,046	0,282
PC_048	PEC	287.885,117	7.474.443,935	287.884,908	7.474.443,981	0,209	-0,046	0,214
PC_054	PEC	288.476,185	7.473.989,152	288.476,951	7.473.989,112	-0,766	0,040	0,767
PC_055	PEC	288.205,428	7.473.906,994	288.205,985	7.473.907,342	-0,557	-0,348	0,657
PC_057	PEC	288.643,864	7.475.519,868	288.643,586	7.475.520,077	0,278	-0,209	0,348
PC_059	PEC	288.322,617	7.475.219,923	288.322,756	7.475.220,689	-0,139	-0,766	0,779
PC_060	PEC	287.384,908	7.475.250,290	287.385,186	7.475.251,334	-0,278	-1,044	1,080
PC_062	PEC	288.543,969	7.473.437,035	288.543,930	7.473.436,896	0,039	0,139	0,144
PC_075	PEC	288.152,185	7.475.523,790	288.152,239	7.475.523,589	-0,054	0,201	0,208
PC_077	PEC	286.851,901	7.474.679,214	286.851,768	7.474.679,110	0,133	0,104	0,169
PC_087	PEC	289.386,870	7.472.864,575	289.386,897	7.472.864,548	-0,027	0,027	0,038

Total de Pontos de Controle utilizados para avaliação	44
Maior Diferença planimétrica (m)	1,080
Menor Diferença planimétrica (m)	0,015
Média das diferenças planimétricas (m)	0,304
Desvio Padrão da média das diferenças planimétricas (m)	0,272
Erro Padrão em planimetria (m)	0,041

Fonte: O Autor

Conforme a avaliação do processo anterior, temos que do total de 44 pontos de controle utilizados para a validação, 39 devem atender os critérios estabelecidos pela norma nacional para produtos digitais, desta forma, tem-se que 39 pontos estão contidos no intervalo de 0,015 até 0,657 metros e 5 pontos estão contidos no intervalo de 0,767 até 1,080 metros.

Estabelecendo um erro máximo de 0,70 metros, pode-se classificar o produto no padrão PEC-PCD classe A para uma escala aproximada de 1:2.500, isto é, o erro máximo permitido será de 0,70 metros e o erro padrão de 0,425 metros, conforme tabela 10.

#### **5.4.2 Avaliação planialtimétrica da Ortofoto do voo executado com aeronave tripulada.**

Para os estudos realizados com o voo proveniente da aeronave tripulada foram realizados dois processamentos, tendo como diferença única entre ambos, a fonte utilizada para a ortorretificação das imagens, no primeiro experimento utilizou-se o modelo digital de terreno gerado com o uso das fotos aéreas utilizando o método fotogramétrico convencional, já no segundo caso, foi utilizado o modelo de terreno proveniente do voo LiDAR.

A Tabela 24 apresenta o resultado do primeiro experimento e a Tabela 25 o resultado do segundo experimento executado com os dados LiDAR.

No caso do primeiro experimento, além da análise da qualidade planimétrica, também foi executada a análise dos dados altimétricos, a coluna denominada "TIPO" identifica os pontos utilizados no processo de aerotriangulação (PC) e os pontos utilizados no controle de qualidade (PEC), o complemento da tabela apresenta o resumo dos resultados obtidos.

Para a avaliação do primeiro caso, do total de 35 pontos utilizados para o controle de qualidade, 32 pontos possuem erro abaixo de 0,20 metros e 3 pontos estão no intervalo de 0,201 e 0,499 metros. Utilizando o Padrão de Exatidão Cartográfica para produtos digitais, no caso da planimetria, podemos classificar este produto como "PEC-PCD Classe A" para a escala 1:750, pois 90% dos pontos estão abaixo do máximo estabelecido para esta escala, ou seja, abaixo de 0,21 metros, sendo que o critério para o erro padrão, conforme tabela 10, também é atendido para esta escala, abaixo de 0,17 metros.

Para a análise dos dados altimétricos, avaliando os resultados da Tabela 24, temos que 32 pontos possuem diferenças entre o intervalo de 0,004 metros até 0,258 metros e 3 pontos estão contidos no intervalo de 0,259 metros até 0,416 metros, com um erro padrão na amostra de 0,024 metros, desta maneira para a análise dos dados altimétricos, levando-se em consideração a norma nacional para produtos digitais, e adotando uma equidistância entre curvas de nível de 1,0 metro, temos que a tolerância para o erro não deve ultrapassar o valor de 0,27 metros e o erro padrão deve ser menor que  $1/6$  da equidistância entre as curvas de nível, isto é 0,167 metros,

sendo assim, podemos classificar este produto como “PEC-PCD Classe A” para a escala 1:1.000.

Para o segundo experimento utilizando aeronave tripulada, considerando a utilização do modelo digital de terreno proveniente do voo LiDAR, a avaliação foi efetuada somente para a planimetria, do total de 35 pontos avaliados todos possuem desvio abaixo de 0,210 metros e o erro padrão é de 0,009 metros. Desta forma, segundo a norma nacional, podemos classificar este produto, no caso da planimetria como “Padrão Classe A” para a escala 1:750.

Tabela 24 Avaliação da ortomagem processo de ortorretificação com dados provenientes do voo fotogramétrico

PONTO	TIPO	E GNSS (m)	N GNSS (m)	H GNSS (m)	E ORTHO (m)	N ORTHO (m)	h FOTO (m)	$\Delta E$ (m)	$\Delta N$ (m)	$\Delta$ TOTAL (m)	$\Delta h$ (m)
PC_001	PC	287.882,950	7.475.821,565	590,042	287.882,988	7.475.821,571	590,002	-0,038	-0,006	0,038	0,040
PC_012	PC	287.722,154	7.475.168,231	597,260	287.722,122	7.475.168,210	597,237	0,032	0,021	0,038	0,023
PC_031	PC	288.835,803	7.475.608,806	653,105	288.835,835	7.475.608,838	653,253	-0,032	-0,032	0,045	-0,148
PC_076	PC	287.134,449	7.475.512,085	584,514	287.134,458	7.475.512,109	584,467	-0,009	-0,024	0,026	0,047
PC_082	PC	289.297,973	7.473.342,439	692,925	289.297,984	7.473.342,434	693,019	-0,011	0,005	0,012	-0,094
PC_084	PC	286.902,641	7.473.570,213	617,217	286.902,667	7.473.570,208	617,255	-0,026	0,005	0,026	-0,038
PC_086	PC	288.272,882	7.472.972,007	648,826	288.272,924	7.472.972,007	649,038	-0,042	0,000	0,042	-0,212
PC_003	PEC	288.473,531	7.475.553,075	626,333	288.473,547	7.475.553,075	626,427	-0,016	0,000	0,016	-0,094
PC_004	PEC	288.298,443	7.475.489,076	617,150	288.298,475	7.475.489,092	617,195	-0,032	-0,016	0,036	-0,045
PC_005	PEC	287.907,548	7.475.376,518	586,482	287.907,564	7.475.376,534	586,477	-0,016	-0,016	0,023	0,005
PC_007	PEC	288.662,357	7.475.367,718	646,147	288.662,357	7.475.367,750	646,245	0,000	-0,032	0,032	-0,098
PC_008	PEC	287.212,676	7.475.378,306	591,693	287.212,602	7.475.378,201	591,543	0,074	0,105	0,128	0,150
PC_010	PEC	288.332,600	7.473.618,801	650,047	288.332,611	7.473.618,780	650,288	-0,011	0,021	0,024	-0,241
PC_014	PEC	288.464,151	7.475.155,476	629,430	288.464,119	7.475.155,465	629,521	0,032	0,011	0,034	-0,091
PC_015	PEC	288.673,407	7.475.136,473	646,255	288.673,418	7.475.136,473	646,393	-0,011	0,000	0,011	-0,138
PC_016	PEC	288.547,495	7.474.948,827	630,240	288.547,495	7.474.948,806	630,309	0,000	0,021	0,021	-0,069
PC_018	PEC	287.771,160	7.474.791,730	603,732	287.771,234	7.474.791,698	603,765	-0,074	0,032	0,081	-0,033
PC_020	PEC	287.766,022	7.474.504,734	610,572	287.766,054	7.474.504,723	610,667	-0,032	0,011	0,034	-0,095
PC_021	PEC	288.096,688	7.474.407,802	614,985	288.096,572	7.474.407,886	615,014	0,116	-0,084	0,143	-0,029
PC_022	PEC	288.644,036	7.473.725,733	656,831	288.643,851	7.473.725,823	657,053	0,185	-0,090	0,206	-0,222
PC_023	PEC	287.819,644	7.474.099,494	618,359	287.819,644	7.474.099,541	618,395	0,000	-0,047	0,047	-0,036
PC_024	PEC	288.413,043	7.474.158,807	618,211	288.413,059	7.474.158,807	618,238	-0,016	0,000	0,016	-0,027
PC_025	PEC	288.397,132	7.473.861,187	639,958	288.397,148	7.473.861,171	640,100	-0,016	0,016	0,023	-0,142
PC_026	PEC	287.192,532	7.475.630,400	584,668	287.192,508	7.475.630,447	584,544	0,024	-0,047	0,053	0,124

PONTO	TIPO	E GNSS (m)	N GNSS (m)	H GNSS (m)	E ORTHO (m)	N ORTHO (m)	h FOTO (m)	$\Delta E$ (m)	$\Delta N$ (m)	$\Delta$ TOTAL (m)	$\Delta h$ (m)
PC_027	PEC	287.556,057	7.475.670,091	580,769	287.555,954	7.475.670,099	580,755	0,103	-0,008	0,103	0,014
PC_028	PEC	288.126,386	7.475.699,898	602,742	288.126,259	7.475.700,009	602,710	0,127	-0,111	0,169	0,032
PC_029	PEC	287.332,045	7.475.311,389	593,082	287.332,029	7.475.311,378	592,986	0,016	0,011	0,019	0,096
PC_030	PEC	287.910,694	7.475.109,019	590,800	287.910,705	7.475.108,998	590,789	-0,011	0,021	0,024	0,011
PC_033	PEC	287.634,236	7.474.618,597	606,323	287.634,236	7.474.618,618	606,142	0,000	-0,021	0,021	0,181
PC_034	PEC	288.352,808	7.474.553,733	602,269	288.352,789	7.474.553,759	602,265	0,019	-0,026	0,032	0,004
PC_036	PEC	287.752,167	7.474.014,380	617,390	287.752,031	7.474.014,453	617,348	0,136	-0,073	0,154	0,042
PC_037	PEC	288.059,850	7.473.853,970	627,535	288.059,897	7.473.853,986	627,543	-0,047	-0,016	0,050	-0,008
PC_039	PEC	288.499,964	7.473.502,393	666,971	288.499,980	7.473.502,440	667,281	-0,016	-0,047	0,050	-0,310
PC_048	PEC	287.884,908	7.474.443,981	614,702	287.884,726	7.474.443,862	615,118	0,182	0,119	0,217	-0,416
PC_055	PEC	288.205,985	7.473.907,342	632,721	288.206,009	7.473.907,295	632,672	-0,024	0,047	0,053	0,049
PC_060	PEC	287.385,186	7.475.251,334	596,754	287.384,688	7.475.251,368	596,609	0,498	-0,034	0,499	0,145
PC_062	PEC	288.543,930	7.473.436,896	672,081	288.543,896	7.473.436,968	672,339	0,034	-0,072	0,080	-0,258
PC_065	PEC	286.695,989	7.474.968,194	589,849	286.695,994	7.474.968,252	590,213	-0,005	-0,058	0,058	-0,364
PC_075	PEC	288.152,239	7.475.523,589	602,833	288.152,239	7.475.523,573	602,869	0,000	0,016	0,016	-0,036
PC_077	PEC	286.851,768	7.474.679,110	604,435	286.851,855	7.474.679,165	604,620	-0,087	-0,055	0,103	-0,185
PC_078	PEC	288.353,045	7.474.553,406	602,287	288.353,061	7.474.553,389	602,264	-0,016	0,017	0,023	0,023
PC_083	PEC	288.056,989	7.473.854,298	627,474	288.056,971	7.473.854,381	627,430	0,018	-0,083	0,085	0,044

Total de Pontos utilizados na validação	35	Total de Pontos utilizados na validação	35
Maior diferença em planimetria (m)	0,499	Maior diferença em altimetria (m)	-0,416
Menor diferença em planimetria (m)	0,011	Menor diferença em altimetria (m)	0,004
Média das diferenças em planimetria (m)	0,077	Média das diferenças em altimetria (m)	-0,058
Desvio Padrão da média das diferenças em planimetria (m)	0,092	Desvio Padrão da média das diferenças em altimetria (m)	0,142
Erro Padrão em planimetria (m)	0,016	Erro Padrão em altimetria	0,024

Fonte: O Autor



Tabela 25 Avaliação da ortomagem processo de ortorretificação com dados provenientes do voo  
LiDAR

PONTO	TIPO	E GNSS	N GNSS	E ORTHO	N ORTHO	ΔE	ΔN	Δ TOTAL
PC_001	PC	287.882,950	7.475.821,565	287.882,952	7.475.821,581	-0,002	-0,016	0,016
PC_012	PC	287.722,154	7.475.168,231	287.722,244	7.475.168,152	-0,090	0,079	0,120
PC_031	PC	288.835,803	7.475.608,806	288.835,702	7.475.608,862	0,101	-0,056	0,115
PC_076	PC	287.134,449	7.475.512,085	287.134,440	7.475.512,158	0,009	-0,073	0,074
PC_082	PC	289.297,973	7.473.342,439	289.297,968	7.473.342,481	0,005	-0,042	0,042
PC_084	PC	286.902,641	7.473.570,213	286.902,731	7.473.570,304	-0,090	-0,091	0,128
PC_086	PC	288.272,882	7.472.972,007	288.272,912	7.472.971,925	-0,030	0,082	0,087
PC_003	PEC	288.473,531	7.475.553,075	288.473,539	7.475.553,083	-0,008	-0,008	0,011
PC_004	PEC	288.298,443	7.475.489,076	288.298,443	7.475.489,076	0,000	0,000	0,000
PC_005	PEC	287.907,548	7.475.376,518	287.907,570	7.475.376,552	-0,022	-0,034	0,040
PC_007	PEC	288.662,357	7.475.367,718	288.662,357	7.475.367,763	0,000	-0,045	0,045
PC_008	PEC	287.212,676	7.475.378,306	287.212,631	7.475.378,317	0,045	-0,011	0,046
PC_010	PEC	288.332,600	7.473.618,801	288.332,628	7.473.618,762	-0,028	0,039	0,048
PC_014	PEC	288.464,151	7.475.155,476	288.464,140	7.475.155,465	0,011	0,011	0,016
PC_015	PEC	288.673,407	7.475.136,473	288.673,418	7.475.136,524	-0,011	-0,051	0,052
PC_016	PEC	288.547,495	7.474.948,827	288.547,495	7.474.948,810	0,000	0,017	0,017
PC_018	PEC	287.771,160	7.474.791,730	287.771,239	7.474.791,674	-0,079	0,056	0,097
PC_020	PEC	287.766,022	7.474.504,734	287.766,039	7.474.504,712	-0,017	0,022	0,028
PC_021	PEC	288.096,688	7.474.407,802	288.096,621	7.474.407,886	0,067	-0,084	0,107
PC_022	PEC	288.644,036	7.473.725,733	288.643,834	7.473.725,784	0,202	-0,051	0,208
PC_023	PEC	287.819,644	7.474.099,494	287.819,627	7.474.099,494	0,017	0,000	0,017
PC_024	PEC	288.413,043	7.474.158,807	288.413,026	7.474.158,773	0,017	0,034	0,038
PC_025	PEC	288.397,132	7.473.861,187	288.397,166	7.473.861,187	-0,034	0,000	0,034
PC_026	PEC	287.192,532	7.475.630,400	287.192,439	7.475.630,392	0,093	0,008	0,093
PC_027	PEC	287.556,057	7.475.670,091	287.555,964	7.475.670,111	0,093	-0,020	0,095
PC_028	PEC	288.126,386	7.475.699,898	288.126,279	7.475.699,965	0,107	-0,067	0,126
PC_029	PEC	287.332,045	7.475.311,389	287.331,978	7.475.311,322	0,067	0,067	0,095
PC_030	PEC	287.910,694	7.475.109,019	287.910,795	7.475.108,997	-0,101	0,022	0,103
PC_033	PEC	287.634,236	7.474.618,597	287.634,221	7.474.618,571	0,015	0,026	0,030
PC_034	PEC	288.352,808	7.474.553,733	288.352,806	7.474.553,817	0,002	-0,084	0,084
PC_036	PEC	287.752,167	7.474.014,380	287.752,105	7.474.014,391	0,062	-0,011	0,063
PC_037	PEC	288.059,850	7.473.853,970	288.059,861	7.473.853,981	-0,011	-0,011	0,016
PC_039	PEC	288.499,964	7.473.502,393	288.499,975	7.473.502,393	-0,011	0,000	0,011
PC_048	PEC	287.884,908	7.474.443,981	287.884,770	7.474.444,034	0,138	-0,053	0,148
PC_055	PEC	288.205,985	7.473.907,342	288.206,061	7.473.907,418	-0,076	-0,076	0,107
PC_060	PEC	287.385,186	7.475.251,334	287.385,218	7.475.251,422	-0,032	-0,088	0,094
PC_062	PEC	288.543,930	7.473.436,896	288.544,006	7.473.436,972	-0,076	-0,076	0,107
PC_065	PEC	286.695,989	7.474.968,194	286.696,021	7.474.968,232	-0,032	-0,038	0,050
PC_075	PEC	288.152,239	7.475.523,589	288.152,239	7.475.523,569	0,000	0,020	0,020
PC_077	PEC	286.851,768	7.474.679,110	286.851,757	7.474.679,084	0,011	0,026	0,028

PONTO	TIPO	E GNSS	N GNSS	E ORTHO	N ORTHO	$\Delta E$	$\Delta N$	$\Delta$ TOTAL
PC_078	PEC	288.353,045	7.474.553,406	288.352,950	7.474.553,468	0,095	-0,062	0,113
PC_083	PEC	288.056,989	7.473.854,298	288.056,918	7.473.854,477	0,071	-0,179	0,193

Total de Pontos de Controle utilizados para avaliação	35
Maior Diferença planimétrica (m)	0,208
Menor Diferença planimétrica (m)	0,000
Média das diferenças planimétricas (m)	0,068
Desvio Padrão da média das diferenças planimétricas (m)	0,052
Erro Padrão em planimetria (m)	0,009

Fonte: O Autor

A norma americana possibilita a avaliação de etapas preliminares, com o intuito de avaliar também o processo de geração, e não somente os produtos, além da avaliação da qualidade dos pontos de controle utilizados no processo, esta norma faz menção também à avaliação do processo de aerotriangulação.

Para os pontos de controle, a norma americana lançada em 2014 e atualizada em 2023, estabelece que no caso de dados planimétricos, os pontos de controle deveriam possuir exatidão posicional ao menos 4 vezes melhor que a exatidão do produto a ser gerado, e 2 vezes melhor quando da avaliação da altimetria, com o lançamento da nova norma em fevereiro de 2023 este critério foi flexibilizado, passando a adotar o valor de 2 vezes melhor tanto para planimetria quanto para altimetria, isto é:

$$RMSE_X \text{ ou } RMSE_Y = \frac{1}{2} \times RMSE_{X(MAPA)} \text{ ou } RMSE_{Y(MAPA)}$$

$$RMSE_Z = \frac{1}{2} \times RMSE_{X(MAPA)} \text{ ou } RMSE_{Y(MAPA)}$$

Sendo ainda que para produtos com a componente altimétrica, os pontos de controle utilizados para a aerotriangulação deverão seguir o seguinte critério:

$$RMSE_X, RMSE_Y \text{ ou } RMSE_Z = \frac{1}{2} \times RMSE_{X(MAPA)}, RMSE_{Y(MAPA)} \text{ ou } RMSE_Z(MDE)$$

Levando-se em consideração a resolução das fotos utilizadas (0,10 metros) e avaliando os resultados dos pontos de controle através da Tabela 15, pode-se concluir que todos os pontos de controle estão de acordo com as regras

estabelecidas na norma, isto é, 0,05 metros para a componente planimetria e altimétrica.

A próxima avaliação é executada sobre os resultados do processo de aerotriangulação. Para o primeiro experimento, onde utilizou-se o modelo de terreno proveniente do processo convencional, temos o seguinte resultado:

RMSE pontos de controle:		
$RMSE_{PC}$	x	0.014 [m]
	y	0.015 [m]
	z	0.021 [m]
RMSE pontos de verificação:		
$RMSE_{PV}$	x	0.014 [m]
	y	0.007 [m]
	z	0.018 [m]

Baseado no resultado da aerotriangulação e adotando a Tabela 12, a qual apresenta sugestões de RMSE em relação a resolução geométrica da imagem, pode-se concluir que esta etapa apresenta qualidade suficiente, pois os valores de RMSE estão abaixo de 0,05 metros (1/2 da resolução de 0,10 metros).

Para o segundo experimento, onde utilizou o modelo de terreno proveniente dos dados LiDAR, tem-se os seguintes resultados:

RMSE pontos de controle:		
$RMSE_{PC}$	x	0.007 [m]
	y	0.012 [m]
	z	0.007 [m]
RMSE pontos de verificação:		
$RMSE_{PV}$	x	0.008 [m]
	y	0.019 [m]
	z	0.016 [m]

Nota-se uma melhora nos resultados do segundo experimento, este fato ocorre devido a uma melhor interação na fase de busca automática de pontos homólogos, pois com a possibilidade de utilização de modelo existente nesta fase, o resultado da captura de pontos homólogos se torna mais robusta.

### 5.4.3 Avaliação planialtimétrica da Ortofoto voo executado com aeronave não tripulada.

Para a avaliação da qualidade planimétrica das ortofotos geradas tanto para a área 01 quanto para a área 02, e para a avaliação da qualidade altimétrica do modelo de superfície, foram levantados em campo através de topográfica convencional com a utilização de estação total, 175 pontos para a área 01 e 172 pontos para a área 02, deste total foram utilizados respectivamente 21 e 25 pontos para as áreas 01 e 02.

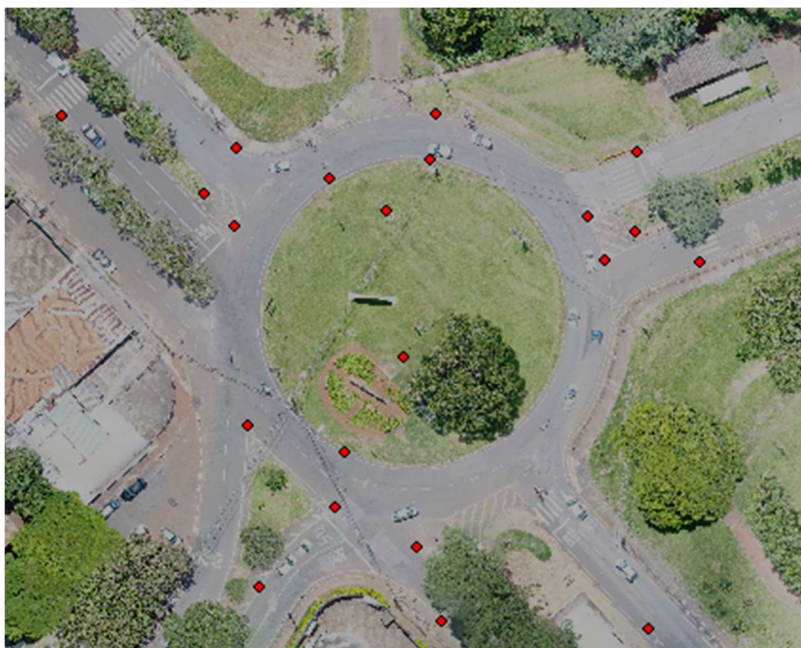
A distribuição dos pontos utilizados para a avaliação é apresentada nas Figuras 41 e 42.

Figura 41 Distribuição dos pontos para avaliação da ortofoto voo com aeronave não tripulada área 01



Fonte: O Autor

Figura 42 Distribuição dos pontos para avaliação da ortofoto voo com aeronave não tripulada área 02



Fonte: O Autor

Para os estudos realizados com o voo proveniente da aeronave não tripulada, o processamento foi realizado de maneira individual para cada área, as Tabelas 26 e 27 apresentam os resultados da avaliação tanto para a planimetria quanto para a altimetria.

Os resultados da área 01 demonstram que do total de 21 pontos utilizados para o controle de qualidade, 19 pontos possuem erro abaixo de 0,28 metros e 2 pontos estão com valores de 0,396 e 0,389 metros, respectivamente. Utilizando o Padrão de Exatidão Cartográfica para produtos digitais, no caso da planimetria, podemos classificar este produto como “PEC Classe A” para a escala 1:1.000, pois 90% dos pontos estão abaixo do máximo estabelecido para esta escala, ou seja abaixo de 0,28 metros, sendo que o critério para o erro padrão também é atendido para esta escala, abaixo de 0,17 metros, conforme tabela 10.

Para a área 02 temos que do total de 25 pontos, somente um ponto está acima de 0,19 metros, podendo então este produto ser classificado como “PEC Classe A” para a escala 1:500, da mesma maneira, o critério para o erro padrão também é atendido.

Para a análise dos dados altimétricos, considerando uma equidistância entre curvas de nível de 0,50 metros, no caso da área 01 todos os pontos ficaram abaixo deste valor, e no caso da área 02, somente um ponto ficou acima, e ainda o erro padrão foi atendido em ambos os casos.

Tabela 26 Avaliação dos dados voo aeronave não tripulada área 01

PTO	LEV. TOPOGRAFICO			DADOS PROCESSAMENTO					ERROS			
	E (m)	N (m)	h (m)	E (m)	N (m)	H (m)	n (m)	h MG 2015 (m)	$\sigma_E$ (m)	$\sigma_N$ (m)	$\Delta$ plan. (m)	$\sigma_h$ (m)
PT 81	287.525,652	7.474.731,278	597,359	287.525,769	7.474.731,131	601,862	-4,440	597,422	-0,117	0,147	0,188	-0,063
PT 13	287.549,034	7.474.718,596	597,711	287.549,115	7.474.718,362	602,174	-4,440	597,734	-0,081	0,234	0,248	-0,023
PT 83	287.553,988	7.474.713,156	597,815	287.554,038	7.474.712,960	602,287	-4,440	597,847	-0,050	0,196	0,202	-0,032
PT 87	287.554,514	7.474.725,950	597,600	287.554,584	7.474.725,755	602,072	-4,440	597,632	-0,070	0,195	0,207	-0,032
PT 126	287.569,775	7.474.720,896	597,210	287.569,793	7.474.720,704	601,720	-4,440	597,280	-0,018	0,192	0,193	-0,070
PT 150	287.578,998	7.474.715,696	597,678	287.579,086	7.474.715,435	602,158	-4,440	597,718	-0,088	0,261	0,275	-0,040
PT 138	287.586,246	7.474.724,040	596,864	287.586,636	7.474.723,974	601,256	-4,440	596,816	-0,390	0,066	0,396	0,048
PT 91	287.587,061	7.474.731,596	596,793	287.587,105	7.474.731,571	601,271	-4,440	596,831	-0,044	0,025	0,051	-0,038
PT 95	287.620,285	7.474.725,416	596,721	287.620,325	7.474.725,299	601,229	-4,440	596,789	-0,040	0,117	0,124	-0,068
PT 38	287.619,799	7.474.712,279	597,019	287.619,732	7.474.712,195	601,622	-4,440	597,182	0,067	0,084	0,107	-0,163
PT 98	287.612,251	7.474.714,698	597,081	287.612,147	7.474.714,544	601,584	-4,440	597,144	0,104	0,154	0,186	-0,063
PT 99	287.615,039	7.474.707,619	597,236	287.615,105	7.474.707,395	601,741	-4,440	597,301	-0,066	0,224	0,234	-0,065
PT 102	287.630,589	7.474.707,381	596,885	287.630,671	7.474.707,149	601,399	-4,440	596,959	-0,082	0,232	0,246	-0,074
PT 148	287.581,853	7.474.691,864	598,836	287.581,970	7.474.691,612	603,271	-4,440	598,831	-0,117	0,252	0,278	0,005
PT 129	287.572,168	7.474.676,270	599,071	287.572,259	7.474.676,010	603,521	-4,440	599,081	-0,091	0,260	0,275	-0,010
PT 118	287.584,156	7.474.660,447	599,598	287.584,027	7.474.660,217	604,052	-4,440	599,612	0,129	0,230	0,264	-0,014
PT 107	287.622,236	7.474.647,129	600,580	287.622,336	7.474.646,890	605,060	-4,440	600,620	-0,100	0,239	0,259	-0,040
PT 70	287.587,970	7.474.648,395	599,955	287.588,070	7.474.648,182	604,418	-4,440	599,978	-0,100	0,213	0,235	-0,023
PT 74	287.558,048	7.474.653,977	600,904	287.558,402	7.474.654,139	605,299	-4,440	600,859	-0,354	-0,162	0,389	0,045
PT 79	287.556,381	7.474.680,470	599,107	287.556,388	7.474.680,409	603,548	-4,440	599,108	-0,007	0,061	0,061	-0,001
PT 78	287.570,599	7.474.667,072	599,578	287.570,616	7.474.666,870	604,035	-4,440	599,595	-0,017	0,202	0,203	-0,017

Total de Pontos utilizados na validação	21	Total de Pontos utilizados na validação	21
Maior diferença em planimetria (m)	0,396	Maior diferença em altimetria (m)	0,163
Menor diferença em planimetria (m)	0,051	Menor diferença em altimetria (m)	0,001
Média das diferenças em planimetria (m)	0,220	Média das diferenças em altimetria (m)	-0,035
Desvio Padrão da média das diferenças em planimetria (m)	0,088	Desvio Padrão da média das diferenças em altimetria (m)	0,045
Erro Padrão em planimetria (m)	0,019	Erro Padrão em altimetria (m)	0,010

Fonte: O Autor

Tabela 27 Avaliação dos dados voo aeronave não tripulada área 02

PTO	LEV. TOPOGRAFICO			DADOS PROCESSAMENTO					ERROS			
	E (m)	N (m)	h (m)	E (m)	N (m)	H (m)	n (m)	h MG 2015 (m)	$\sigma_E$ (m)	$\sigma_N$ (m)	$\Delta$ plan. (m)	$\sigma_h$ (m)
PT 61	288.180,808	7.475.211,629	596,002	288.180,834	7.475.211,730	600,298	-4,440	595,858	-0,026	-0,101	0,104	0,144
PT 73	288.183,754	7.475.208,214	596,106	288.183,747	7.475.208,224	600,448	-4,440	596,008	0,007	-0,010	0,012	0,098
PT 76	288.184,923	7.475.181,437	595,512	288.184,979	7.475.181,439	599,797	-4,440	595,357	-0,056	-0,002	0,056	0,155
PT 121	288.177,578	7.475.177,895	595,462	288.177,661	7.475.177,877	599,820	-4,440	595,380	-0,083	0,018	0,085	0,082
PT 54	288.163,169	7.475.183,715	594,929	288.163,204	7.475.183,743	599,300	-4,440	594,860	-0,035	-0,028	0,045	0,069
PT 128	288.170,396	7.475.182,242	595,941	288.170,538	7.475.182,263	599,309	-4,440	594,869	-0,142	-0,021	0,144	1,072
PT 127	288.159,275	7.475.150,616	593,801	288.159,466	7.475.150,608	598,162	-4,440	593,722	-0,191	0,008	0,191	0,079
PT 124	288.184,151	7.475.151,279	595,469	288.184,245	7.475.151,262	599,828	-4,440	595,388	-0,094	0,017	0,096	0,081
PT 118	288.190,510	7.475.155,473	595,690	288.190,587	7.475.155,417	600,051	-4,440	595,611	-0,077	0,056	0,095	0,079
PT 110	288.192,861	7.475.142,312	595,967	288.193,018	7.475.142,210	600,318	-4,440	595,878	-0,157	0,102	0,187	0,089
PT 113	288.209,040	7.475.138,665	597,246	288.209,140	7.475.138,686	601,605	-4,440	597,165	-0,100	-0,021	0,102	0,081
PT 114	288.225,377	7.475.139,345	598,580	288.225,494	7.475.139,285	602,925	-4,440	598,485	-0,117	0,060	0,131	0,095
PT 87	288.243,780	7.475.134,146	600,448	288.243,785	7.475.134,077	604,788	-4,440	600,348	-0,005	0,069	0,069	0,100
PT 106	288.195,300	7.475.117,140	595,679	288.195,451	7.475.117,103	600,038	-4,440	595,598	-0,151	0,037	0,155	0,081



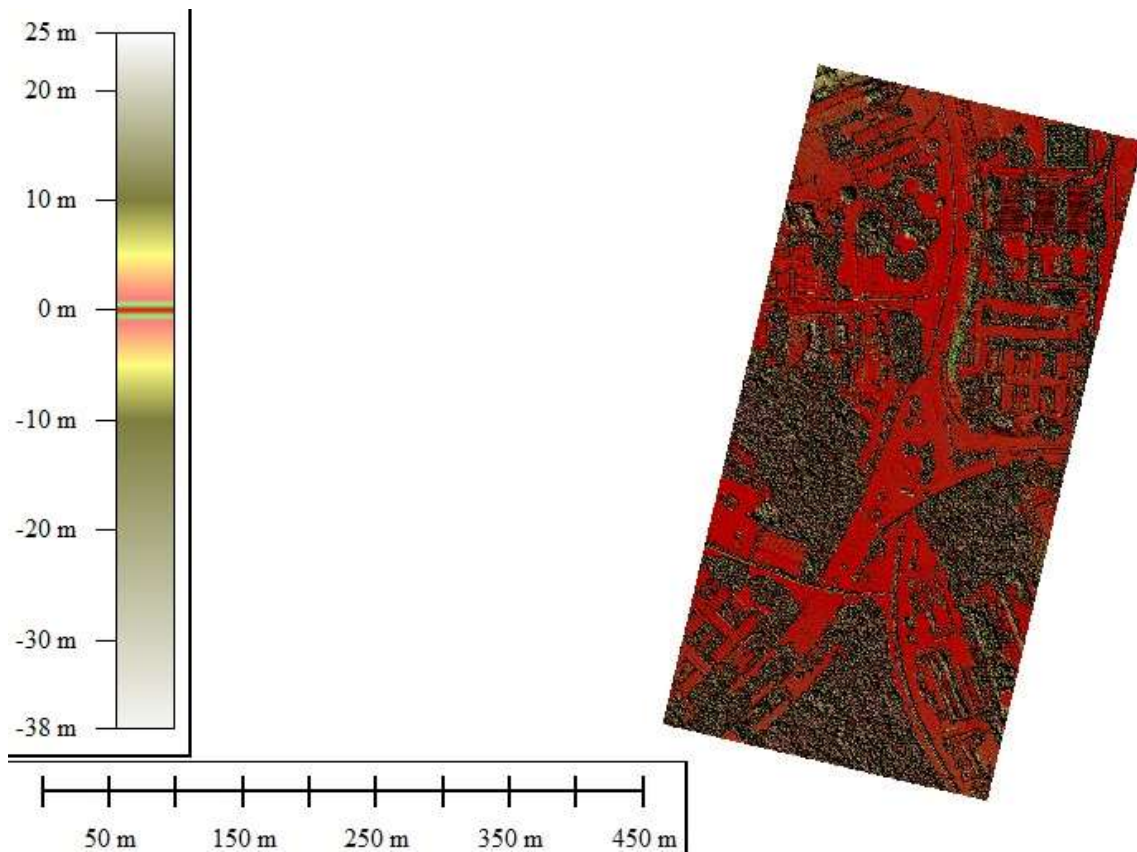
PTO	LEV. TOPOGRAFICO			DADOS PROCESSAMENTO					ERROS			
	E (m)	N (m)	h (m)	E (m)	N (m)	H (m)	n (m)	h MG 2015 (m)	$\sigma_E$ (m)	$\sigma_N$ (m)	$\Delta$ plan. (m)	$\sigma_h$ (m)
PT 175	288.158,507	7.475.122,914	593,505	288.158,574	7.475.122,866	597,735	-4,440	593,295	-0,067	0,048	0,082	0,210
PT 141	288.146,688	7.475.119,522	592,671	288.146,785	7.475.119,473	597,040	-4,440	592,600	-0,097	0,049	0,109	0,071
PT 143	288.151,604	7.475.109,953	592,546	288.151,619	7.475.109,997	596,930	-4,440	592,490	-0,015	-0,044	0,046	0,056
PT 145	288.154,882	7.475.091,900	592,477	288.154,933	7.475.091,819	596,853	-4,440	592,413	-0,051	0,081	0,096	0,064
PT 159	288.175,970	7.475.097,470	593,696	288.175,960	7.475.097,496	598,062	-4,440	593,622	0,010	-0,026	0,028	0,074
PT 146	288.149,772	7.475.087,529	592,130	288.149,753	7.475.087,418	596,521	-4,440	592,081	0,019	0,111	0,113	0,049
PT 153	288.160,156	7.475.081,282	592,493	288.160,129	7.475.081,237	596,871	-4,440	592,431	0,027	0,045	0,052	0,062
PT 20	288.126,268	7.475.073,443	590,980	288.126,275	7.475.073,364	595,304	-4,440	590,864	-0,007	0,079	0,079	0,116
PT 22	288.130,809	7.475.083,116	591,198	288.130,811	7.475.083,064	595,586	-4,440	591,146	-0,002	0,052	0,052	0,052
PT 147	288.143,480	7.475.081,330	591,731	288.143,462	7.475.081,244	596,123	-4,440	591,683	0,018	0,086	0,088	0,048
PT 39	288.183,770	7.475.111,863	594,813	288.183,817	7.475.111,860	599,155	-4,440	594,715	-0,047	0,003	0,047	0,098

Total de Pontos utilizados na validação	25	Total de Pontos utilizados na validação	25
Maior diferença em planimetria (m)	0,191	Maior diferença em altimetria (m)	1,072
Menor diferença em planimetria (m)	0,028	Menor diferença em altimetria (m)	0,048
Média das diferenças em planimetria (m)	0,096	Média das diferenças em altimetria (m)	0,130
Desvio Padrão da média das diferenças em planimetria (m)	0,046	Desvio Padrão da média das diferenças em altimetria (m)	0,219
Erro Padrão em planimetria (m)	0,009	Erro Padrão em altimetria (m)	0,044

Fonte: O Autor

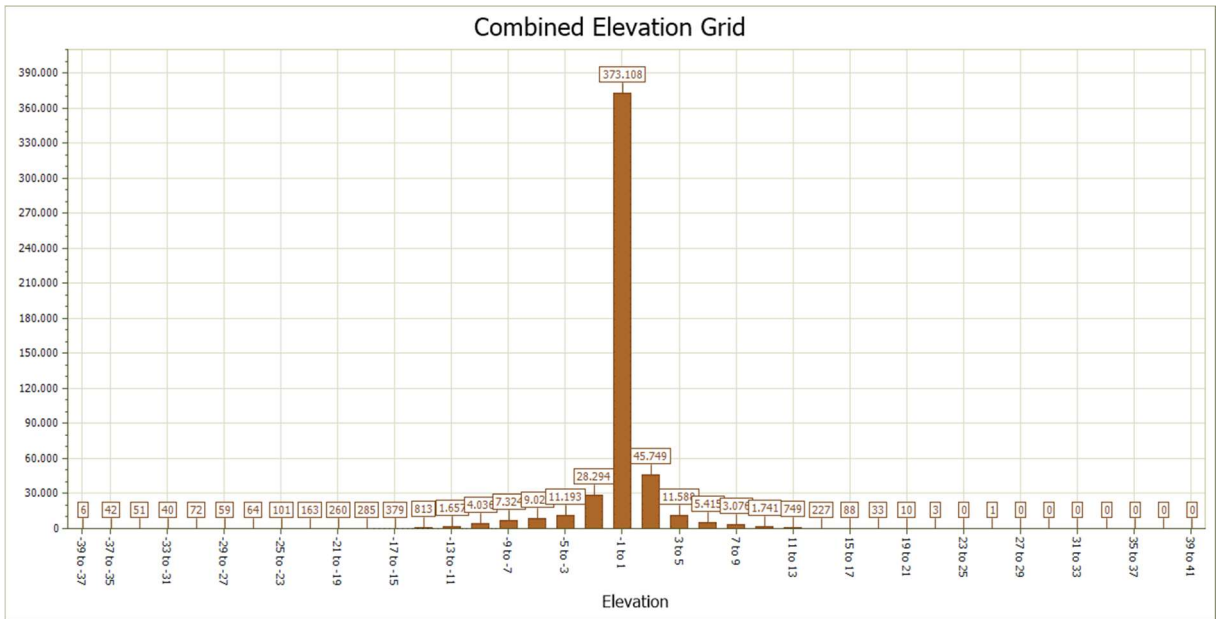
Outra avaliação executada com os dados altimétricos provenientes do levantamento realizado com a aeronave não tripulada, foi a comparação entre os modelos de superfície gerados em relação àqueles provenientes da tecnologia LiDAR. Por meio do software *Global Mapper*, o modelo de superfície proveniente do voo foi re-amostrado para a mesma resolução do modelo proveniente do LiDAR (0,50 metros), ambos receberam o mesmo recorte, e foi efetuada a subtração entre os modelos, gerando assim um terceiro modelo com as diferenças entre os dois modelos iniciais. Os resultados são apresentados através das Figuras 43, 44, 45 e 46.

Figura 43 Resultado da diferença DSM aeronave não tripulada – DSM LiDAR área 01



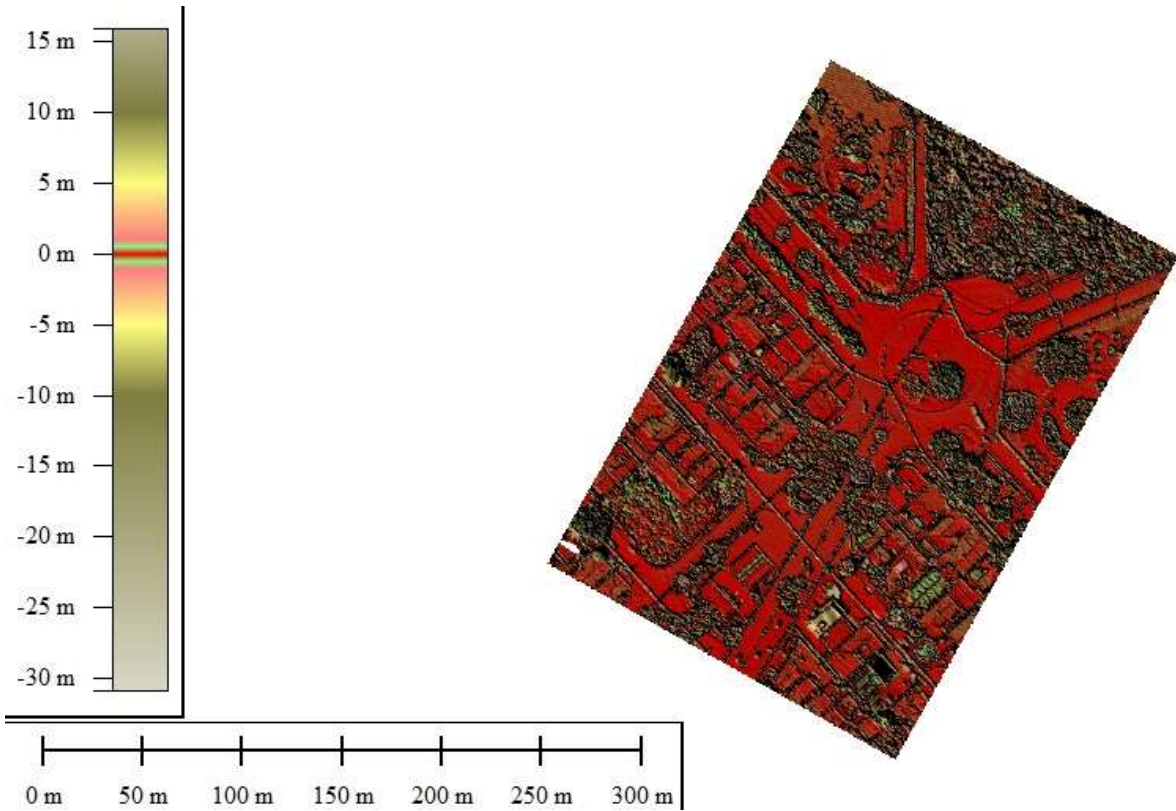
Fonte: O Autor

Figura 44 Histograma das diferenças DSM aeronave não tripulada – DSM LiDAR área 01



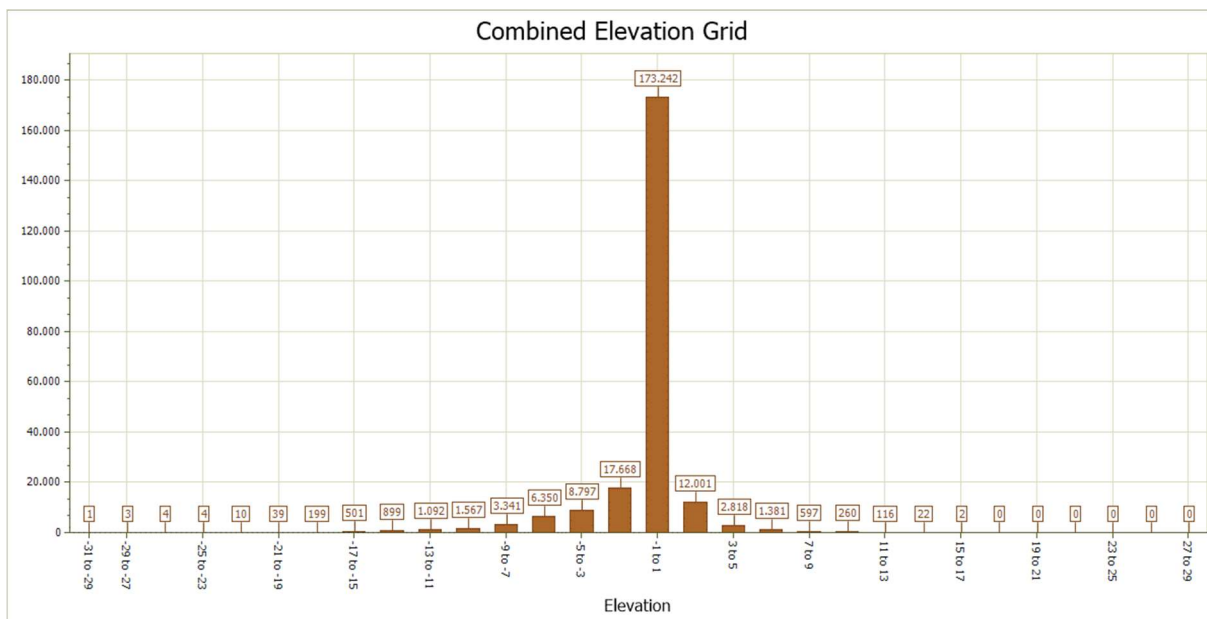
Fonte: O Autor

Figura 45 Resultado da diferença DSM aeronave não tripulada – DSM LiDAR área 02



Fonte: O Autor

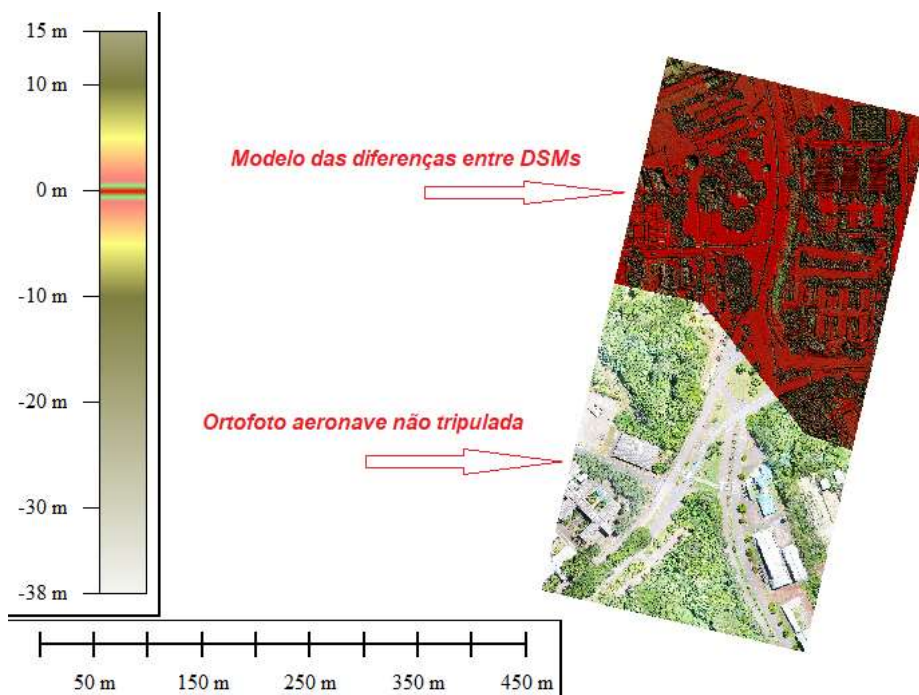
Figura 46 Histograma das diferenças DSM aeronave não tripulada – DSM LiDAR área 02



Fonte: O Autor

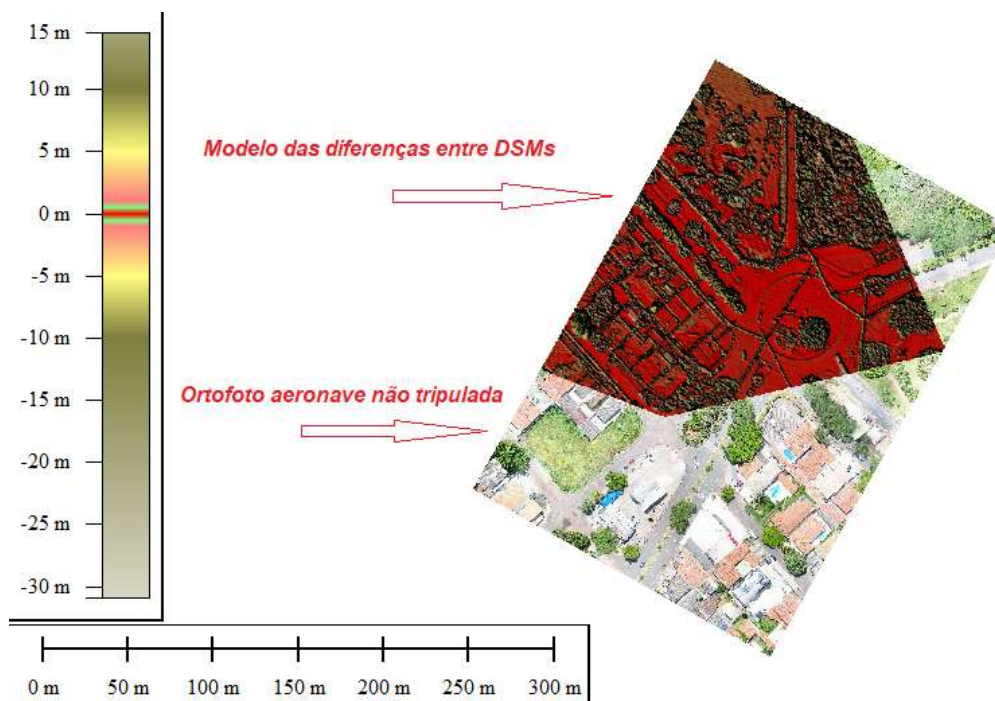
Nota-se que, para ambas as áreas ao analisarmos as Figuras 45 e 47 e os histogramas nas Figuras 46 e 48, pode-se concluir que a grande concentração das diferenças está entre os valores de -1 metro até 1 metro. Avaliando também os resultados, pode-se verificar que as maiores diferenças estão localizadas em áreas cobertas por vegetação, como é apresentado nas Figuras 47 e 48 para as áreas 01 e 02 respectivamente.

Figura 47 Análise das diferenças altimétricas em relação a ortofoto área 01



Fonte: O Autor

Figura 48 Análise das diferenças altimétricas em relação a ortofoto área 02



Fonte: O Autor

## **6 DISCUSSÕES: PROTOCOLO DE PROCESSAMENTO, MELHORES RESULTADOS, COMPARAÇÃO DOS PRODUTOS E NORMAS VOLTADAS PARA TRANSPORTES.**

Neste item, são resumidos os produtos que apresentaram os melhores resultados nas avaliações planimétricas e altimétricas, quando for o caso, a avaliação das vantagens e desvantagens de um produto em relação ao outro com foco em aplicações na área de Transportes e legislações e normas relacionadas a área de Transporte.

Em relação ao desenvolvimento dos produtos, vale destacar que todos os trabalhos foram executados em um mesmo equipamento, laptop modelo Vaio, com processador Intel Core i7 7500U de 7th geração, com 16 Mb de memória RAM e placa de vídeo Nvidia dedicada.

No caso das imagens orbitais (satélite), o melhor resultado foi obtido através da utilização dos dados RPC, aliados aos pontos de controle levantados em campo, e ainda, com a utilização dos dados LiDAR no processo de retificação da imagem. Através deste processo foi possível obter uma ortomagem compatível com cartas/mapas em escala 1:5.000 PEC digital Classe A, sendo a sua utilização em projetos de estradas discutida mais à frente.

Para os dados obtidos com aeronave tripulada além de todos os cuidados a serem tomados quando da captura dos dados/fotos (execução dos voos), relatados no capítulo 2, sugere-se uma análise criteriosa durante a execução do processamento, em especial na fase de aerotriangulação, utilizando como referência os parâmetros mínimos estabelecidos na norma americana. Neste caso a melhor qualidade planimétrica foi apresentada quando da utilização dos dados LiDAR, tanto para o processo de ortorretificação das imagens, quanto para a busca de pontos homólogos, concluindo-se então que, a utilização de um modelo de terreno acurado, apresenta uma vantagem quando no processamento das imagens e geração dos ortomosaicos, chegando a atingir a escala 1:500 PEC digital Classe A.

Quanto a avaliação dos dados provenientes do voo executado com aeronave não tripulada, neste caso, nota-se a necessidade de planejamento rigoroso dos pontos de controle, previa à execução do voo. A pequena área de cobertura das

fotos e as áreas de mapeamento menores, acarretam maior dificuldade na obtenção de pontos foto-identificáveis, necessitando assim um melhor planejamento prévio. Superada esta etapa, pode-se concluir que os resultados planimétricos atingiram valores compatíveis com cartas/mapas em escala 1:500 e 1:1000 PEC digital Classe A.

Considerando que todos os processos foram executados em um mesmo equipamento, ao avaliarmos o desempenho na geração dos produtos, tem-se os seguintes resultados: as imagens orbitais tiveram tempo de processamento de aproximadamente 3 horas, os produtos provenientes do voo executado com aeronave tripulada aproximadamente 9 horas e o produtos do voo executado com aeronave não tripulada aproximadamente 48 horas.

No caso da aquisição dos dados envolvendo a aeronave tripulada sem levarmos em consideração o tempo de deslocamento entre a base da aeronave e a área do projeto foram necessários um total de 30 minutos para a aquisição dos dados de voo, já no caso da aeronave não tripulada para a cobertura das duas áreas de estudo foi necessário o tempo de 2,5 horas.

Com relação à qualidade radiométrica dos materiais, pode-se destacar que tanto as imagens orbitais quanto as imagens provenientes do voo executado por aeronave tripulada apresentaram uma maior qualidade, quando comparadas às imagens obtidas pelo voo não tripulado, devido a qualidade do sensor, os quais são desenvolvidos especialmente para a obtenção de dados geográficos.

Em relação à resolução geométrica, os produtos provenientes dos levantamentos executados por aeronaves, tanto tripulada quanto não tripulada levam vantagem em relação as imagens orbitais, tendo como destaque os dados levantados com aeronaves não tripuladas, quando foi possível obter resoluções geométricas na ordem de 0,02 metros.

Quanto aos valores envolvidos na aquisição e processamento, segundo pesquisa realizada, e com preço médio apresentado pelos fornecedores, temos que as imagens orbitais com 0,30 metros de resolução, com padrão multiespectral, podem variar de US\$ 105,00 dólares americanos por quilometro quadrado quando se tratar de imagens programadas ou US\$ 75,00 dólares americanos por quilometro quadrado

quando se tratar de imagens em acervo, no caso os valores estão apresentados em dólares americanos com uma taxa atual de 5,10 reais por dólar.

Para imagens de satélite aqui utilizadas, são consideradas imagens de acervo aquelas que possuem mais de 90 dias de aquisição, podendo ter um pedido mínimo de 25 km<sup>2</sup>. Já para as imagens com programação, o pedido mínimo é de 100 km<sup>2</sup><sup>12</sup>. Ressaltando mais uma vez que estes detalhes são válidos para o satélite utilizado (WorldView-3), já que cada provedor de dados orbital possui seu critério de comercialização.

No caso dos produtos gerados com dados provenientes do voo realizado com aeronave tripulada, os valores de comercialização de ortofotos com resolução de 0,10 metros, podem variar entre US\$ 140,00 e US\$ 320,00 dólares americanos por quilometro quadrado (fonte: [www.fototerra.com.br](http://www.fototerra.com.br)), esta grande variação de valores, segundo o fornecedor, ocorre devido a fatores como: tamanho de área, distância das bases de apoio (aeroportos), região a ser mapeada, fatores climáticos e época para realização do projeto.

Para o caso dos produtos gerados com os dados provenientes dos voos realizados com aeronave não tripulada, os valores podem variar entre US\$ 100,00 e US\$ 280,00 dólares americanos por quilometro quadrado<sup>13</sup>, tendo em vista os mesmos aspectos apresentados para os voos tripulados.

Outra questão de grande influência na obtenção dos dados geográficos, é a questão climática, para as imagens orbitais temos pouca margem de manobra para a escolha do dia e horário de captura dos dados, apesar de haver um ciclo de periodicidade na captura, algumas regiões apresentam grande dificuldade de obtenção de imagens sem a presença de nuvens.

Já para o caso de aeronaves tripuladas, a margem de manobra quanto à escolha de horário e época de voo é maior, porém mesmo assim esta tecnologia ainda sofre com as questões climáticas. No caso das aeronaves não tripuladas, esta influência é quase nula, levando-se em consideração que podemos escolher época e

---

<sup>12</sup> Fonte: [www.engesat.com.br](http://www.engesat.com.br).

<sup>13</sup> fonte: [www.geoassessoria.com](http://www.geoassessoria.com)



horário de voo, além do equipamento realizar a captura das imagens abaixo do nível das nuvens, sendo impactado apenas por dias de chuva.

Quanto à capacidade de cobertura as imagens orbitais levam vantagem em relação as duas outras tecnologias, e ainda, conforme apresentado anteriormente os levantamentos executados com aeronave não tripulada possuem limitação quanto a extensão da área a ser levantada.

A Tabela 28 apresenta um resumo do comparativo entre as tecnologias e os resultados em termos de classificação, sendo que a cor verde apresenta o melhor resultado, enquanto amarela o resultado intermediário e o vermelho o resultado mais desfavorável em relação aos demais, sendo ainda que a questão da exatidão/acurácia está destaca em tópico anterior.

A métrica apresentada para comparar as tecnologias leva em consideração que o melhor processo tem o valor 1, o valor intermediário e o valor mais desfavorável representam o múltiplo deste primeiro valor. Para os itens radiometria, Interferência climática e área de cobertura estes valores não são apresentados devido a dificuldade de se estabelecer uma métrica que represente valores reais. Para o caso da métrica referente aos custos, foram utilizados os valores médios apresentados anteriormente.

Tabela 28 Resumo comparativo entre tecnologias utilizadas

Tecnologia / Característica	Tempo para processar	Radiometria	Resolução geométrica	Custos	Interferência climática	Área de cobertura
orbital	1 x		15 x	1 x		
aéreo tripulado	3 x		5 x	2,56 x		
aéreo não tripulado	16 x		1 x	2,11 x		

Devemos considerar que as tecnologias estão em franca expansão, principalmente quanto à criação de novos sensores e novos veículos não tripulados, desta forma estas comparações são validas para os equipamentos aqui utilizados, podendo equipamentos e sensores diferentes apresentarem resultados diversos, porém este é um sinalizador valido para uma análise inicial dos trabalhos nesta data.

## 6.1 Normas relacionadas a área de Transportes

Em relação a projetos de estradas, o DNIT através da publicação IPR 739 que trata das diretrizes básicas para elaboração de estudos e projetos rodoviários instruções para acompanhamento e análise, lançada no ano de 2010, traz que anteriormente ao advento da Lei de Licitações, Lei nº. 8.666, de 21.06.93, a legislação pertinente então vigente, para fins de execução das obras, exigia a existência de Projeto de Engenharia – o qual era focalizado em 03 (três) etapas, sendo elas: Os Estudos Preliminares, o Anteprojeto e o Projeto, constituindo esse o conjunto mencionado para o Projeto de Engenharia.

Já a Lei de Licitações, Lei nº. 8.666, de 21.06.93, não menciona explicitamente essas fases, limitando-se a definir Projeto Básico e Projeto Executivo, tendo como diferença entre uma modalidade e outra de Projeto a questão de grau de precisão e de detalhamento.

A definição de projeto básico é tratada, no artigo 6, inciso IX desta lei, conforme segue abaixo:

Projeto Básico: conjunto de elementos necessários e suficientes, com nível de precisão adequado, para caracterizar a obra ou serviço, ou complexo de obras ou serviços objeto da licitação, elaborado com base nas indicações dos estudos técnicos preliminares, que assegurem a viabilidade técnica e o adequado tratamento do impacto ambiental do empreendimento, e que possibilite a avaliação do custo da obra e a definição dos métodos e do prazo de execução, devendo conter os seguintes elementos:

- desenvolvimento da solução escolhida de forma a fornecer visão global da obra e identificar todos os seus elementos constitutivos com clareza;
- soluções técnicas globais e localizadas, suficientemente detalhadas, de forma a minimizar a necessidade de reformulação ou de variantes durante as fases de elaboração do projeto executivo e de realização das obras e montagem;
- identificação dos tipos de serviços a executar e de materiais e equipamentos a incorporar à obra, bem como suas especificações

que assegurem os melhores resultados para o empreendimento, sem frustrar o caráter competitivo para a sua execução;

- informações que possibilitem o estudo e a dedução de métodos construtivos, instalações provisórias e condições organizacionais para a obra, sem frustrar o caráter competitivo para a sua execução;
- subsídios para montagem do plano de licitação e gestão da obra, compreendendo a sua programação, a estratégia de suprimentos, as normas de fiscalização e outros dados necessários em cada caso;
- orçamento detalhado do custo global da obra, fundamentado em quantitativos de serviços e fornecimentos propriamente avaliados;

Sendo o projeto executivo definido neste mesmo artigo, porém no inciso X, como sendo o conjunto dos elementos necessários e suficientes à execução completa da obra, de acordo com as normas pertinentes da Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT.

Porém, em 1º de abril de 2021, foi sancionada pelo Presidente da República à época, a Lei nº 14.133, que estabelece as regras da nova Lei de Licitações e Contratos Administrativos, em substituição à Lei de Licitações (Lei 8.666/1993), Lei do Pregão (Lei 10.520/2002) e Lei do Regime Diferenciado de Contratações (RDC – Lei 12.462/11), as quais trazem as definições para anteprojeto, projeto básico e projeto executivo, descritas a seguir:

Anteprojeto: peça técnica com todos os subsídios necessários à elaboração do projeto básico, que deve conter, no mínimo, os seguintes elementos:

- demonstração e justificativa do programa de necessidades, avaliação de demanda do público-alvo, motivação técnico-econômico-social do empreendimento, visão global dos investimentos e definições relacionadas ao nível de serviço desejado;
- condições de solidez, de segurança e de durabilidade;
- prazo de entrega;
- estética do projeto arquitetônico, traçado geométrico e/ou projeto da área de influência, quando cabível;

- parâmetros de adequação ao interesse público, de economia na utilização, de facilidade na execução, de impacto ambiental e de acessibilidade;
- proposta de concepção da obra ou do serviço de engenharia;
- projetos anteriores ou estudos preliminares que embasaram a concepção proposta;
- levantamento topográfico e cadastral;
- pareceres de sondagem;
- memorial descritivo dos elementos da edificação, dos componentes construtivos e dos materiais de construção, de forma a estabelecer padrões mínimos para a contratação;

Projeto básico: conjunto de elementos necessários e suficientes, com nível de precisão adequado para definir e dimensionar a obra ou o serviço, ou o complexo de obras ou de serviços objeto da licitação, elaborado com base nas indicações dos estudos técnicos preliminares, que assegure a viabilidade técnica e o adequado tratamento do impacto ambiental do empreendimento e que possibilite a avaliação do custo da obra e a definição dos métodos e do prazo de execução, devendo conter os seguintes elementos:

- levantamentos topográficos e cadastrais, sondagens e ensaios geotécnicos, ensaios e análises laboratoriais, estudos socioambientais e demais dados e levantamentos necessários para execução da solução escolhida;
- soluções técnicas globais e localizadas, suficientemente detalhadas, de forma a evitar, por ocasião da elaboração do projeto executivo e da realização das obras e montagem, a necessidade de reformulações ou variantes quanto à qualidade, ao preço e ao prazo inicialmente definidos;
- identificação dos tipos de serviços a executar e dos materiais e equipamentos a incorporar à obra, bem como das suas especificações, de modo a assegurar os melhores resultados para o empreendimento e a segurança executiva na utilização do objeto, para os fins a que se destina, considerados os riscos e os perigos identificáveis, sem frustrar o caráter competitivo para a sua execução;
- informações que possibilitem o estudo e a definição de métodos construtivos, de instalações provisórias e de condições organizacionais para a obra, sem frustrar o caráter competitivo para a sua execução;

- subsídios para montagem do plano de licitação e gestão da obra, compreendidos a sua programação, a estratégia de suprimentos, as normas de fiscalização e outros dados necessários em cada caso;
- orçamento detalhado do custo global da obra, fundamentado em quantitativos de serviços e fornecimentos propriamente avaliados, obrigatório exclusivamente para os regimes de execução previstos nos incisos I, II, III, IV e VII do caput do art. 46 desta Lei;

Projeto executivo: conjunto de elementos necessários e suficientes à execução completa da obra, com o detalhamento das soluções previstas no projeto básico, a identificação de serviços, de materiais e de equipamentos a serem incorporados à obra, bem como suas especificações técnicas, de acordo com as normas técnicas pertinentes; (Lei 14.333, 2021, p.)

Diz o Artigo 7 que:

as licitações para obras e para a prestação de serviços obedecerão ao disposto neste artigo e, em particular, à seguinte sequência”:

- projeto básico;
- projeto executivo;
- execução das obras e serviços

§1º A execução de cada etapa será obrigatoriamente precedida da conclusão e aprovação, pela autoridade competente, dos trabalhos relativos às etapas anteriores, à exceção do projeto executivo, o qual pode ser desenvolvido concomitantemente com a execução das obras e serviços, desde que também autorizado pela Administração.

§ 2ª As obras e os serviços somente poderão ser licitados quando:

- I – “houver projeto básico aprovado pela autoridade competente e disponível para exame dos interessados em participar do processo licitatório. (Lei 14.133, 2021, p.)

De acordo com a sequência lógica apresentada, o Projeto Básico seria a exigência mínima para a realização da licitação da obra, mas nunca para sua execução.

Embora se admita o desenvolvimento do Projeto Executivo, concomitantemente à execução das obras, é altamente desejável que o Projeto

Executivo já esteja disponível a tempo da licitação, assegurando assim uma maior proximidade entre os Termos de Referência e a realidade da obra.

Este entendimento do que seja Projeto de Engenharia, em termos de Projeto Básico e Projeto Executivo, foi devidamente assumido nas Diretrizes Básicas para Elaboração de Estudos e Projetos Rodoviários – Escopos Básicos e Instruções de Serviços – Publicação IPR 726 – Edição 2006.

Assim, segundo estas Diretrizes Básicas, a elaboração do Projeto de Engenharia comporta o desenvolvimento de 03 (três) fases, a saber: Fase Preliminar, Fase de Projeto Básico e Fase de Projeto Executivo – a seguir definidas.

A Fase Preliminar, comum aos Projetos Básico e Executivo de Engenharia, caracteriza-se pelo levantamento de dados e realização de estudos específicos, com a finalidade do estabelecimento dos parâmetros e diretrizes para a elaboração dos itens de projeto do Projeto Básico, sendo, portanto, uma fase de diagnóstico e recomendações.

A Fase de Projeto Básico deve ser desenvolvida com a finalidade de selecionar a alternativa de traçado a ser consolidada e detalhar a solução proposta, por meio da realização de estudos específicos e elaboração dos itens de projeto do Projeto Básico, fornecendo plantas, desenhos e outros elementos que possibilitem uma adequada identificação da obra a executar.

A Fase de Projeto Executivo, específica para Projetos de Engenharia, deve ser desenvolvida com a finalidade de detalhar a solução selecionada, por meio da elaboração dos itens do Projeto Executivo, fornecendo plantas, desenhos e notas de serviço que permitam a construção da rodovia, sendo que esta definição é a mais usual em projetos de engenharia voltados para a área de Transportes.

## **7 CONCLUSÕES**

Considerando a avaliação dos produtos através das três fontes de dados, e com a utilização da metodologia proposta, pode-se considerar que: os produtos gerados através de imagem orbital com resolução geométrica de 0,30 metros são compatíveis com cartas/mapas em escala 1:5.000 PEC digital Classe A. Já os

produtos gerados através das imagens capturadas com câmera digital transportada por aeronave tripulada atingiram exatidões planimétricas compatíveis com o PEC digital Classe A, para a escala 1:750, quando utilizado o modelo de terreno proveniente do sistema LiDAR.

Ao utilizarmos o processo de correspondência de imagens, na geração dos modelos digitais de terreno, tendo como base o voo com resolução geométrica de 0,10 metros realizado com aeronave tripulada, obtivemos produtos compatíveis com a escala 1:1.000 PEC digital Classe A.

Já quando da utilização dos dados provenientes do voo executado com aeronave não tripulada, obteve-se também uma alta qualidade no quesito planimetria, podendo as ortofotos serem classificadas como compatíveis com a escala 1:1.000 PEC digital Classe A. No caso dos dados altimétricos, nas áreas abertas sem cobertura de vegetação, como são as estradas, os resultados obtidos foram ainda melhores, chegando à escala 1:500 PEC digital Classe A.

Apesar de todas as etapas serem realizadas de maneira digital, o controle de qualidade ainda está vinculado à escala do produto e não à resolução geométrica do material inicial. Desta forma, ressalta-se novamente a necessidade do estabelecimento de critérios que vinculem a qualidade posicional do produto gerado, à resolução geométrica da fonte utilizada. Outro aspecto a ser levantado é que, apesar da adoção do PEC Digital para análise dos dados, este simplesmente criou uma classe mais restritiva em relação ao PEC considerado analógico, demonstrando a necessidade de um maior aprofundamento nesta questão.

A respeito dos projetos na área de Transporte, e baseado nas definições presentes no tópico 6.1, pode-se então estabelecer três etapas para a execução de projeto de Engenharia voltados à construção de estradas, sendo elas anteprojeto ou projeto preliminar, o qual se caracteriza-se pelo levantamento de dados e realização de estudos específicos, com a finalidade do estabelecimento dos parâmetros e diretrizes para a elaboração dos itens de projeto do projeto básico. Em seguida o próprio projeto básico, o qual deve possibilitar a seleção da alternativa de traçado a ser consolidada e detalhar a solução proposta. Isso por meio da realização de estudos específicos e elaboração dos itens de projeto do Projeto Básico, fornecendo plantas, desenhos e outros elementos que possibilitem uma adequada identificação da obra a

ser executada. E por fim, o projeto executivo, devendo este ser desenvolvido com a finalidade de detalhar a solução selecionada, por meio da elaboração dos itens do projeto executivo, fornecendo plantas, desenhos e notas de serviço que permitam a construção da rodovia.

Nota-se que, em todas as etapas existe a necessidade da utilização de produtos cartográficos, apesar da não definição clara deste material, nem quanto a sua fonte, tampouco quanto a sua exatidão posicional.

Considerando que para a realização do anteprojeto ou projeto preliminar, é necessário no mínimo o conhecimento do relevo do terreno e ainda característica do uso e cobertura do solo, bem como feições planimétricas como vias de acesso e caminhos, pode-se assumir que a utilização de imagens orbitais de alta resolução (0,30 metros ou melhor) e a utilização de modelos de terrenos pré-existentes como é o caso do *WorldDEM*<sup>14</sup>, fornecido pela agência espacial europeia, podem suprir a fonte de dados inicial para os estudos necessários a esta fase do projeto de Engenharia. Isto é, imagens orbitais com resolução de 0,30 metros são adequadas para esta fase de projeto.

Para as fases de projeto básico e projeto executivo, verifica-se a necessidade da utilização de fontes que garantam uma melhor qualidade posicional e informações altimétricas mais acuradas, tendo em vista a necessidade da definição do traçado geométrico e o detalhamento da execução da obra, sendo fundamental a utilização de dados provenientes de câmeras aerotransportadas, podendo ser utilizadas aeronaves tripuladas ou não, para o caso de dados planimétricos, e ainda com resolução geométrica mínima de 0,10 metros.

A obtenção de dados altimétricos deve ser executada através de sistemas LiDAR ou ainda através do processo convencional de aerotriangulação, utilizando-se fotos aéreas provenientes de voo executado com aeronave tripulada, sendo a primeira alternativa tecnicamente mais favorável, levando sempre em consideração que a exatidão planialtimétrica deverá ser compatível com as características desta fase de projeto.

---

<sup>14</sup> <https://earth.esa.int/eogateway/missions/terrasar-x-and-tandem-x>



Considera-se que para grandes extensões a serem mapeadas, a utilização de aeronaves não tripuladas ainda não se apresenta viável, podendo demandar custos e prazos mais elevados quando comparados com a utilização de aeronaves tripuladas, pode-se assumir que grandes extensões demandam a utilização destas, enquanto projetos pontuais, mesmo em sua fase de detalhamento, podem ser realizados com levantamentos executados por aeronaves não tripuladas, como é o caso de projetos de rotatórias e entroncamentos rodoviários.

Devido ao grande avanço tecnológico em curso, é importante ressaltar que este trabalho leva em consideração os sensores e as aeronaves utilizadas e ainda as características da área de estudo. Entende-se que futuramente as aeronaves não tripuladas deverão atingir melhores resultados, devido ao aumento da capacidade de carga (*payload*), maior autonomia e avanço na legislação vigente, podendo desta forma transportar sensores mais acurados e com maior capacidade de cobertura aérea.

Neste sentido considera-se viável o estudo de normas vinculadas à área de Transportes que estabeleçam resoluções geométricas, resoluções radiométricas e exatidões posicionais mínimas aceitas para as bases cartográficas que serão utilizadas em cada etapa do projeto de engenharia voltado para Estradas.

## 8 BIBLIOGRAFIA BÁSICA

AGÊNCIA NACIONAL DE AVIAÇÃO CIVIL - ANAC. **Requisitos gerais para aeronaves não tripuladas de uso Civil - RBAC - E nº 94.** Agencia Nacional de Aviação Civil. Brasília, Brasil, 2017. Disponível em: <http://www.anac.gov.br/assuntos/legislacao/legislacao-1/rbha-e-rbac/rbac/rbac-e-94>.

AGOURIS, P.; DOUCETTE, P.; STEFANIDIS, A. Automation and digital photogrammetric workstations. In: MCGLONE, J. C. (org.). **Manual of Photogrammetry**. 5<sup>o</sup> ed. Bethesda: American Society for Photogrammetry and Remote Sensing, 2004. p.949–977.

AGRAFIOTIS, P.; GEORGOPOULOS, A. Comparative assessment of very high resolution satellite and aerial orthoimagery. **International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences - ISPRS Archives**. 2015, v.40, n.3W2, p.1–7. Disponível em: <https://www.doi.org/10.5194/isprsarchives-XL-3-W2-1-2015>.

AGUGIARO, G.; POLI, D.; REMONDINO, F. Testfield Trento: Geometric evaluation of very high resolution satellite imagery. **International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences - ISPRS Archives**. 2012, v.39-B1, p.191–196. Disponível em <https://www.doi.org/10.5194/isprsarchives-xxxix-b1-191-2012>.

ALRAJHI, M. N.; JACOBSEN, K.; HEIPKE, C. A procedure for semi-automatic orthophoto generation from high resolution satellite imagery. **International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences - ISPRS Archives**. 2013, v.40, n.7W2, p.7–11. Disponível em <https://www.doi.org/10.5194/isprsarchives-XL-7-W2-7-2013>.

ALRAJHI, M.; JANJUA, K. S.; KHAN, M. A.; ALOBEID, A. Updating maps using high resolution satellite imagery. **International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences - ISPRS Archives**. 2016, v.41, p.711–719. Disponível em <https://www.doi.org/10.5194/isprsarchives-XLI-B4-711-2016>.

ALSPAUGH, D. A brief history of Photogrammetry. In: MCGLONE, J. C. (org.). **Manual of Photogrammetry**. 5. ed. Bethesda: American Society for Photogrammetry and Remote Sensing, 2004. p.1–12.

AMERICAN SOCIETY FOR PHOTOGRAMMETRY AND REMOTE SENSING. 2014. **ASPRS Positional Accuracy Standards for Digital Geospatial Data**. ed.1, v.1, pp.26. Disponível em: [https://www.asprs.org/wp-content/uploads/2015/01/ASPRS\\_Positional\\_Accuracy\\_Standards\\_Edition1\\_Version\\_100\\_November2014.pdf](https://www.asprs.org/wp-content/uploads/2015/01/ASPRS_Positional_Accuracy_Standards_Edition1_Version_100_November2014.pdf).

AMERICAN SOCIETY FOR PHOTOGRAMMETRY AND REMOTE SENSING. 2023. **ASPRS Positional Accuracy Standards for Digital Geospatial Data**. ed.2, v.1,

pp.97. Disponível em: <https://www.asprs.org/revisions-to-the-asprs-positional-accuracy-standards-for-geospatial-data-2023>.

AMORIM, A.; CAMARGO, P. O.; MIYASHITA, P. Mi. Avaliação do potencial das imagens Quickbird ortorretificadas para o mapeamento das propriedades localizadas na área de expansão e vazios urbanos. **Boletim de Ciências Geodésicas**. 2010. Curitiba, v.16, n.3, p.456–474. Disponível em: <https://www.doi.org/10.1590/s1982-21702010000300006>.

ANDREJEVIC, M. **Tornando-se Drones: Vigilância móvel e Sensoriamento Remoto**. 2015. São Paulo, v.3, p.45–54. Disponível em: <http://www.newyorker.com/online/blogs/>

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. 2002. **NBR 6023**: Informação e documentação – Referências – Elaboração. Rio de Janeiro. 24p.

BARBOSA, Z. N. T.; OLIVEIRA, W. N.; ALVES, P. R. Uso de geotecnologia para mapeamento de áreas de riscos - Estudo de caso Angra dos Reis RJ. In: XV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto. 2011, Curitiba, **Anais...** Curitiba, SBSR, 2011, p.4940–4947.

BETÉ, T. S.; CONTI, D. M. Veículos aéreos não tripulados na agricultura para atender o objetivo de desenvolvimento sustentável da organização das nações unidas. In: VII Simpósio Internacional de Gestão de Projetos, Inovação e Sustentabilidade. 2018, São Paulo, **Anais...** São Paulo, SINGEP, 2018, p.1–17.

BOLDO, D. Production of digital orthophotographies. In: **Digital Photogrammetry**. First ed. London: Taylor & Francis, 2002. p.288–292.

BRASIL, **Lei 89.817** de 20 de junho de 1984. Estabelece as instruções reguladoras das normas técnicas da cartografia nacional. Diário Oficial da República Federativa do Brasil, Brasília, DF: Presidência da República [1984]. Disponível em: <https://www2.camara.leg.br/legin/fed/decret/1980-1987/decreto-89817-20-junho-1984-439814-norma-pe.html>.

BRASIL, **Lei 8.666** de 21 de junho de 1993. Regulamenta o art. 37, inciso XXI, da Constituição Federal, institui normas para licitações e contratos da Administração Pública e dá outras providências. Diário Oficial da República Federativa do Brasil, Brasília, DF: Presidência da República [1993]. Disponível em: <https://legis.senado.leg.br/norma/550542/publicacao/15718520>.

BRASIL, **Lei 10.520** de 17 de julho de 2002. Institui, no âmbito da União, Estados, Distrito Federal e Municípios, nos termos do art. 37, inciso XXI, da Constituição Federal, modalidade de licitação denominada pregão, para aquisição de bens e serviços comuns, e dá outras providências. Diário Oficial da República Federativa do Brasil, Brasília, DF: Presidência da República [2002]. Disponível em: <https://www2.camara.leg.br/legin/fed/lei/2002/lei-10520-17-julho-2002-472321-publicacaooriginal-1-pl.html>.

BRASIL, Ministério dos Transportes. Departamento Nacional de Infraestrutura de

Transportes (DNIT). **IPR-726**. Diretrizes básicas para estudos e projetos rodoviários: escopos básicos, instruções de serviço. Brasília, DF, 2006. Disponível em: [https://www.gov.br/dnit/pt-br/assuntos/planejamento-e-pesquisa/ipr/coletanea-de-manuais/vigentes/ipr\\_726\\_3aedicao\\_2006.pdf](https://www.gov.br/dnit/pt-br/assuntos/planejamento-e-pesquisa/ipr/coletanea-de-manuais/vigentes/ipr_726_3aedicao_2006.pdf).

BRASIL, Ministério da Defesa. Diretoria de Serviço Geográfico do Exército. **ET-ADGV v.1.0**. 2008. Especificação técnica para a aquisição de dados geoespaciais vetoriais. Disponível em: [https://geobases.es.gov.br/Media/Geobases/documentos/tecnicos/et-adgv\\_v1.01.pdf](https://geobases.es.gov.br/Media/Geobases/documentos/tecnicos/et-adgv_v1.01.pdf).

BRASIL, Ministério dos Transportes. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT). **IPR-739**. Diretrizes básicas para estudos e projetos rodoviários: escopos básicos, instruções de serviço. Brasília, DF, 2010. Disponível em: [http://www1.dnit.gov.br/arquivos\\_internet/ipr/ipr\\_new/manuais/diretrizes\\_basicas\\_instrucoes\\_servicos.pdf](http://www1.dnit.gov.br/arquivos_internet/ipr/ipr_new/manuais/diretrizes_basicas_instrucoes_servicos.pdf).

BRASIL, **Lei 12.462** de 05 de agosto de 2011. Institui o Regime Diferenciado de Contratações Públicas - RDC; altera a Lei nº 10.683, de 28 de maio de 2003, que dispõe sobre a organização da Presidência da República e dos Ministérios, a legislação da Agência Nacional de Aviação Civil (Anac) e a legislação da Empresa Brasileira de Infraestrutura Aeroportuária (Infraero); cria a Secretaria de Aviação Civil, cargos de Ministro de Estado, cargos em comissão e cargos de Controlador de Tráfego Aéreo; autoriza a contratação de controladores de tráfego aéreo temporários; altera as Leis nºs 11.182, de 27 de setembro de 2005, 5.862, de 12 de dezembro de 1972, 8.399, de 7 de janeiro de 1992, 11.526, de 4 de outubro de 2007, 11.458, de 19 de março de 2007, e 12.350, de 20 de dezembro de 2010, e a Medida Provisória nº 2.185-35, de 24 de agosto de 2001; e revoga dispositivos da Lei nº 9.649, de 27 de maio de 1998. Diário Oficial da República Federativa do Brasil, Brasília, DF: Presidência da República [2011]. Disponível em: <https://legis.senado.leg.br/norma/584318/publicacao/15759370>.

BRASIL. Ministério da Defesa. Exército Brasileiro. Departamento de Ciência e Tecnologia. **Norma EB80-N-72.003**. Norma da especificação técnica para aquisição de dados geoespaciais vetoriais de defesa da força terrestre. 2016.

BRASIL, Ministério dos Transportes. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT). Diretoria de Planejamento e Pesquisa. Coordenação Geral de Desenvolvimento de Projetos. **Guia de análise de projetos rodoviários (versão beta V3)**. Brasília, DF, 2018. Disponível em: [https://www.gov.br/dnit/pt-br/assuntos/planejamento-e-pesquisa/desenvolvimento-e-projetos/1\\_GuiadeAnalise\\_Leiturdigital\\_V3\\_.pdf](https://www.gov.br/dnit/pt-br/assuntos/planejamento-e-pesquisa/desenvolvimento-e-projetos/1_GuiadeAnalise_Leiturdigital_V3_.pdf)

BRASIL, Ministério da Defesa. Divisão de Cartografia. **Conjunto de plataformas e sensores aprovados para aerolevanteamento**. 2020. Disponível em: [https://www.gov.br/defesa/pt-br/arquivos/cartografia/divcar/2022/conjunto-plataformas-sensores-aprovados-para-aerolevanteamento\\_31\\_03\\_2022.pdf](https://www.gov.br/defesa/pt-br/arquivos/cartografia/divcar/2022/conjunto-plataformas-sensores-aprovados-para-aerolevanteamento_31_03_2022.pdf).

BRASIL, **Lei 14.133** de 01 de abril de 2021. Lei de licitações e contratos administrativos. Diário Oficial da República Federativa do Brasil, Brasília, DF: Presidência da República [2021]. Disponível em:

<https://legis.senado.leg.br/norma/33382036>.

BRITO, J. L. N. S.; COELHO, L. C. T. **Fotogrametria Digital**. Rio de Janeiro: Instituto Militar de Engenharia, 2002.

CAMPOS, M. B.; TOMMASELLI, A. M. G.; DE MORAES, M. V. A.; JUNIOR, J. M. Análise comparativa dos resultados obtidos pelos métodos de calibração de campo tridimensional e bidimensional. **Boletim de Ciências Geodésicas** 2015. Curitiba, v.21, n.2, p.308–328. Disponível em: <https://www.doi.org/10.1590/S1982-21702015000200018>.

CAO, H.; TAO, P.; LI, H.; SHI, J. Bundle adjustment of satellite images based on an equivalent geometric sensor model with digital elevation model. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**. 2019, v.56, p.169–183. Disponível em <https://www.doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2019.08.011>.

COELHO, L. C. T.; BRITO, J. L. N. **Fotogrametria Digital**. 1<sup>o</sup> ed. Rio de Janeiro: Editora da Universidade do Estado do Rio de Janeiro, 2007.

COLLINS, J. ; EDMUNDSON, K. ; GRODECK, J. ; HEIER, H. ; HUTTON, J ; LIDDLE, D. ; MOSTAFA, M. ; MONDELLO, C. ; NOVAK, K. ; PACEY, R. ; SCHERZINGER, B. Photogrammetric Platforms. In: MCGLONE, J. C. (org.). **Manual of Photogrammetry**. 5<sup>o</sup> ed. Bethesda: American Society for Photogrammetry and Remote Sensing. 2004. p.677–726.

COLOMINA, I.; MOLINA, P. Unmanned aerial systems for photogrammetry and remote sensing: A review. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**. 2014, v.92, p.79–97. Disponível em: <http://www.doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2014.02.013>.

COMISSÃO NACIONAL DE CARTOGRAFIA. CONCAR. **ET-EDGV 3.0**. Especificação técnica para estruturação de dados geoespaciais vetoriais. 2017. Disponível em: [https://inde.gov.br/pdf/ET-EDGV\\_versao\\_3.0\\_2018\\_05\\_20.pdf](https://inde.gov.br/pdf/ET-EDGV_versao_3.0_2018_05_20.pdf).

COSTA, D. C. **Diretrizes para elaboração de bases cartográficas no planejamento municipal: urbano, rural e de transportes**. 2001. Tese (Doutorado em Engenharia de Transportes), Universidade Estadual de São Paulo, 2001.

CRAMER, M. Digital airborne camera performance – The DGPF test. In: **Photogrammetric Week 09, Dieter Fritsch (Ed.)**. Heidelberg, 2009a.

CRAMER, M. **EuroSDR network on digital camera calibration**. Official Publication n.55. Amsterdam: EuroSDR: European Spatial Data Research, 2009b.

CRAMER, M. Geometry perfect – Radiometry unknown? In: **Photogrammetric Week 11, Dieter Fritsch (Ed.)**. Belin & Offenbach, p.65–77, 2011.

CRAMER, M.; KRESSE, W.; SKALOUD, J.; HAALA, N.; NITTEL, S.; WALLGRUN, J. O. Data capture. In: KRESSE, W.; DANKO, D. M. (orgs.). **Handbook of Geographic Information**. 1<sup>o</sup> ed. Neubrandenburg: Springer, 2012. p.211–297.

CRÓSTA, A. P. **Processamento digital de imagens de sensoriamento remoto**. 1º ed. Campinas: Editora da Universidade Estadual de Campinas, 2002.

D'ANGELO, P.; REINARTZ, P. DSM based orientation of large stereo satellite image blocks. **International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences - ISPRS Sciences**. 2012, v.39-B1, p.209–214. Disponível em: <https://www.doi.org/10.5194/isprsarchives-xxxix-b1-209-2012>.

DA SILVA, P. H. A.; TOMMASELLI, A. M. G.; GALO, M.; COSTA, E. R.. Um estudo sobre o uso do modelo de cor RGB no proceso de correspondência por correlação. **Boletim de Ciencias Geodésicas**. 2007. Curitiba, v.13, n.1, p.91–106.

DELTSIDIS, P.; IOANNIDIS, C. Orthorectification of world view 2 stereo pair using a new rigorous orientation model. **International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences - ISPRS Archives**. 2011, v.38-4/, p.85–90. Disponível em: <https://www.doi.org/10.5194/isprsarchives-xxxviii-4-w19-85-2011>.

DOHR, S.; MUICK, M.; SCHACHINGER, B.; GRUBER, M. Image Motion Compensation – The Vexcel Approach. **International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences - ISPRS Archives**. 2022, v.43-B1, p.333–338. Disponível em <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLIII-B1-2022-333-2022>.

DUBEY, B.; KARTIKEYAN, B.; SUBBIAH, M. M. Rational polynomial coefficients modeling and bias correction by using iterative polynomial augmentation. **Journal of the Indian Society of Remote Sensing**. 2019, v.47, n.1, p.165–175. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s12524-018-0883-y>.

EGELS, Y.; KASSER, M. **Digital Photogrammetry**. First ed. London: Taylor & Francis, 2002.

FEDERAL GEOGRAPHIC DATA COMMITTEE. 1998. **FGDC-STD-007.3-1998**. Geospatial positioning accuracy standards. Part.3. National standard for spatial data accuravy. Disponível em: <https://www.fgdc.gov/standards/projects/FGDC-standards-projects/accuracy/part3/chapter3>.

FORSTENER, W.; WROBEL, B.; PADERES, F.; CRAIG, R.; FRASER, C.; DOLLOFF, J. Analytical Photogrammetric operations. In: MCGLONE, J. C. (org.). **Manual of Photogrammetry**. 5º ed. Bethesda: American Society for Photogrammetry and Remote Sensing. 2004. p.763–936.

FRASER, C. S.; DIAL, G.; GRODECKI, J. Sensor orientation via RPCs. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**. 2006, v.60, n.3, p.182–194. Disponível em <https://www.doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2005.11.001>.

GALO, M.; Camargo, P. O. **Utilização do GPS No Controle de Qualidade de Cartas**. In.: COBRAC – 1994, 1º Congresso Brasileiro de Cadastro Técnico Multifinalitário. Tomo II, p. 41-48, Florianópolis, 1994.

GÁLVEZ, J. P.; MCCALL, M. K.; NAPOLETANO, B. M.; WICH, S. A.; KOH, L. P. Small

drones for community-based forest monitoring: An assessment of their feasibility and potential in tropical areas. **Forests**. 2014, v.5, n.6, p.1481–1507. Disponível em <https://www.doi.org/10.3390/f5061481>.

GARCIA, B. F.; HERNÁNDEZ, L. D.; LERMA, L. Analysis of the ground sample distance on large photogrammetric surveys. **Applied Geomatics**. 2012, v.4, p.231–244. Disponível em <https://www.doi.org/10.1007/s12518-012-0084-2>.

GOVEIA, F. A subjetividade na fotografia com pinhole. In: XXVIII Congresso Brasileiro de Ciências da Comunicação. Intercom - Sociedade Brasileira de Estudos Interdisciplinares da Comunicação. 2005, Rio de Janeiro. **Anais...** Rio de Janeiro: Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2005.

GREENWALT, C. R.; SCHULTZ, M. E. **Principles of error theory and cartographic applications**. ACIC Technical Report n. 96, United States Air Force, St. Louis, 1962.

GREGOLETTO, D.; ZAMPIERI, F. Análise do adensamento urbano e da verticalização através de ferramentas SIG: o caso de Caxias do Sul - Brasil. In: PNUM 2018. A produção do território: formas, processos, desígnios. 2018. Porto, Portugal. **Anais...** Porto: Faculdade de Arquitetura da Universidade do Porto, 2018.

HANSEN, A. **Aplicação de SIG em sistema de gerência de pavimentos para a cidade de Maringá**. 2008. Dissertação (Mestrado em Engenharia Urbana). Universidade Estadual de Maringá, Maringá, 2008.

HENO, R.; EGELS, Y. Digital Photogrammetric workstations. In: KASSER, M.; EGELS, Y. (orgs.). **Digital Photogrammetry**. 1° ed. London: Taylor & Francis, 2002. p.145–159.

HENRI, E. **UAV Photogrammetry**. 2009. Dissertation (Doctor of Sciences). University of Technology Dresden, 2009.

IIZUKA, K.; ITOH, M.; SHIODERA, S.; MATSUBARA, T.; DOHAR, M.; WATANABE, K. Advantages of unmanned aerial vehicle (UAV) photogrammetry for landscape analysis compared with satellite data: A case study of postmining sites in Indonesia. **Cogent Geoscience**. 2018, v.4, n.1, p.1–15. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/23312041.2018.1498180>.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. 2017. **Avaliação da qualidade de dados geoespaciais**. Rio de Janeiro: IBGE. 2017.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. 2019. **Reajustamento da Rede Altimétrica com Números Geopotenciais**. Rio de Janeiro: IBGE. 2019.

INTERNATIONAL CIVIL AVIATION ORGANIZATION. **Unmanned aircraft systems (UAS)**. **Circular 328**. Quebec: ICAO, 2011. Disponível em: [https://www.icao.int/meetings/uas/documents/circular%20328\\_en.pdf](https://www.icao.int/meetings/uas/documents/circular%20328_en.pdf).

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. 2013. **ISO 19157:2013**. Geographic information. Data quality, ed.1.

JACOBSEN, K. Characteristics of very high resolution optical satellites for topographic mapping. In: ISPRS Hannover Workshop 2011: High-Resolution Earth Imaging For Geospatial Information. 2011, Hannover. **Proceedings...** Hannover: ISPRS, 2011, v.38-4, n.W19, p.137–142. Disponível em <https://doi.org/10.5194/isprsarchives-xxxviii-4-w19-137-2011>.

JACOBSEN, K.; BUYUKSALIH, G.; BAZ, I. Mapping from space for developing countries. In: EARSel Joint Workshop: Remote Sensing New Challenges of High Resolution. 2008. **Proceedings...** Bochum, 2008. Disponível em [https://www.ipi.uni-hannover.de/fileadmin/ipi/publications/Mapping\\_Bochum.pdf](https://www.ipi.uni-hannover.de/fileadmin/ipi/publications/Mapping_Bochum.pdf).

JUBANSKI, J.; ALIXANDRINI, M.; BAHR, H. P. Câmeras Aerofotogramétricas digitais: Novos conceitos e normas. **Revista Brasileira de Cartografia**, Uberlândia, v.61, n.1, p.51–62, 2009.

JUNG, F.; FUCHS, F.; BOLDO, D. Automatization of Aerotriangulation. In: EGELS, Y.; KASSER, M. (orgs.). **Digital Photogrammetry**. London: Taylor & Francis, 2002. p.124–145.

KASSER, M. Digital Image Acquisition with Airborne CCD Cameras. In: EGELS, Y.; KASSER, M. (orgs.). **Digital Photogrammetry**. London: Taylor & Francis, 2002. p.39–63.

KIM, H.; KIM, M. G.; SEO, D. C. The suggestion of the image registration using terrain relief correction based on RFM. **Journal of the Korean Society of Surveying, Geodesy, Photogrammetry and Cartography**. 2012, v.30, n.1, p.21–30. Disponível em <https://www.doi.org/10.7848/ksgpc.2012.30.1.021>.

KORNUS, W.; MAGARIÑOS, A.; PLA, M.; SOLER, E.; PEREZ, F. Photogrammetric processing using ZY-3 satellite imagery. **International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences - ISPRS Archives**. 2015, v.40, n.3W2, p.109–113. Disponível em: <https://www.doi.org/10.5194/isprsarchives-XL-3-W2-109-2015>.

LANGENDOLFF, A.; PELLEGRINI, G. **Fundamentos da Cartografia e o Sistema de Posicionamento Global GPS**. 1º ed. Santa Maria: Universidade Federal de Santa Maria, 2008.

LEITE, M. E.; LESSA, S. N.; SANTOS NETO, N. F.; ANICETO, D. SIG aplicado a roteirização do transporte público exclusivo para pessoas portadoras de necessidades especiais. **Hygeia Revista Brasileira de Geografia Médica e da Saúde**. 2012. Uberlândia, v.8, n.14, p.129–142. Disponível em: <http://www.seer.ufu.br/index.php/hygeia>.

LEITE, M. E.; RODRIGUES, H. L. A.; BORGES, M. G. Atualização do cadastro imobiliário por Sensoriamento Remoto e os impactos fiscais. **InterEspaço: Revista de Geografia e Interdisciplinaridade**. 2018. Grajaú, v.4, n.13, p.07–25. Disponível em: <https://www.doi.org/10.18764/2446-6549.v4n13p07-25>.



MAILLET, G.; FLAMANC, D. Comparison of aerial images , satellite images and laser scanning DSM in a 3D City models production framework. In: ISPRS Congress Istambul 2004: Geo-Imagery Bridging Continents. 2004, Istambul. **Proceedings...** Istambul: ISPRS, 2004, v.35, n.B3, p.1196–1201. Disponível em: <https://www.isprs.org/proceedings/xxxv/congress/comm3/papers/447.pdf>.

MAUNE, D.F. **Digital Elevation Model Technologies and Applications: The DEM Users Manual**. Second ed. Maryland: American Society for Photogrammetry and Remote Sensing, 2007.

MAURER, T. How to Pan-Sharpen Images Using The Gram-Schmidt Pan-Sharp Method – A RECIPE, **International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences - ISPRS Archives**. 2013, v.40, n.1W1, p.239–244. Disponível em <https://doi.org/10.5194/isprsarchives-XL-1-W1-239-2013>.

MELIN, M.; SHAPIRO, A. C.; GLOVER-KAPFER, P. **LiDAR for ecology and conservation WWF Conservation technology series**. Disponível em: <https://www.wwf.org.uk/project/conservationtechnology>.

MENESES, P. R.; ALMEIDA, T.; SANTA ROSA, A. N. C.; SANO, E. E.; DE SOUZA, E. B.; BAPTISTA, G. M.; BRITES, R. S. **Introdução ao processamento de imagens de Sensoriamento Remoto**. Brasília: Editora da Universidade de Brasília, 2012.

MIKHAIL, E. M.; MCGLONE, J. C.; BETHEL, J. S. **Introduction to modern photogrammetry**. Hoboken: Wiley, 2001.

MILLER, S. Photogrammetric Products. In: MCGLONE, J. C. (org.). **Manual of Photogrammetry**. 5. ed. Bethesda: American Society for Photogrammetry and Remote Sensing, 2004. p.983–1012.

MONICO, J. F. G.; PÓZ, P. D. A.; GALO, M.; DOS SANTOS, M. C.; OLIVEIRA, L. C. Acurácia e Precisão: Revendo os conceitos de forma acurada. **Boletim de Ciências Geodésicas**. 2009. Curitiba, v.15, n.3, p.469-483. Disponível em: <https://www.doi.org/10.13140/2.1.1815.8086>.

MOSTAFA, M. M. R.; HUTTON, J. Direct positioning and orientation systems: How do they work? What is the attainable accuracy. In: American Society of Photogrammetry and Remote Sensing Annual Meeting. 2001. St. Louis. **Proceedings...** St. Louis. ASPRS, 2001. Disponível em: [https://www.applanix.com/pdf/POSAV\\_2001\\_04\\_DirectPositioning.pdf](https://www.applanix.com/pdf/POSAV_2001_04_DirectPositioning.pdf).

MUGNIER, C. J.; FORSTENER, W.; WROBEL, B.; PAREDES, F.; MUNJY, R. The Mathematics of Photogrammetry. In: MCGLONE, J. C. (org.). **Manual of Photogrammetry**. 5. ed. Bethesda: International Society for Photogrammetry and Remote Sensing, Inc. (ISPRS), 2004. p.181–306.

NATIONAL AERONAUTICS AND SPACE ADMINISTRATION. NASA. 2020. Disponível em: <https://www2.jpl.nasa.gov/srtm/>. Acesso em: 2 maio. 2020.

OLIVEIRA, H. C. **Detecção de oclusão via análise de gradientes de superfície**

sobre um poliedro para geração de ortoimagem verdadeira. 2016. Tese (Doutorado em Ciências Cartográficas) Universidade Estadual Paulista – UNESP. Presidente Prudente, 2016.

OLIVEIRA, H. C.; PÓZ, P. D. A.; GALO, M.; HABIB, A. F. Surface gradient approach for occlusion detection based on triangulated irregular network for true orthophoto generation. **IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing**. 2018, v.11, n.2, p.443–457. Disponível em: <https://www.doi.org/10.1109/JSTARS.2017.2786162>.

PETRIE, G. Airborne pushbroom line scanners: An alternative to digital frame cameras. **Geoinformatics**. 2005, n.1, p.50–57.

PETRIE, G.; TOTH, C. K. Introduction to laser ranging, profiling and scanning. In: SHAN, J.; TOTH, C. K. (orgs.). **Topographic Laser Ranging and Scanning: Principles and Processing**. 2<sup>o</sup> ed. London: CCR Press, 2018a. p.1–27.

PETRIE, G.; TOTH, C. K. Airborne and spaceborne laser profilers and scanners. In: SHAN, J.; TOTH, C. K. (orgs.). **Topographic Laser Ranging and Scanning: Principles and Processing**. 2<sup>o</sup> ed. London: CRC Press, 2018b. p. 30–83.

PILARSKA, M.; OSTROWSKI, W.; BAKUŁA, K.; GÓRSKI, K.; KURCZYŃSKI, Z. The potential of light laser scanners developed for unmanned aerial vehicles – The review and accuracy. **International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences - ISPRS Archives**. 2016, v.42, n.2W2, p.87–95. Disponível em: <https://www.doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-2-W2-87-2016>.

PREOSCK, R. E.; MITISHITA, E. A.; ANTUNES, A. F. B. A. Otimização da restituição fotogramétrica digital urbana: relação escala da fotografia e a resolução geométrica da imagem. **Boletim de Ciências Geodésicas**. 2008. Curitiba, v.14, n.2, p.242–255.

REX, F. E.; CORTE, A. P. D.; DEBASTIANI, A. B.; KAZAMA, V. S.; SANQUETTA, C. R. Uso de dados LiDAR na estimativa de variáveis biofísica na Amazônia, sob diferentes resoluções espaciais. 2018. *Nativa*, v.6, p.841–847. Disponível em: <https://www.doi.org/10.31413/nativa.v6i0.6312>.

RHEE, S.; KIM, T. Automated DSM extraction from UAV images and performance analysis. **International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences - ISPRS Archives**. 2015, v.40, n.1W4, p.351–354. Disponível em: <https://www.doi.org/10.5194/isprsarchives-XL-1-W4-351-2015>.

RUPNIK, E.; NEX, F.; TOSCHI, I.; REMONDINO, F. Aerial multi-camera systems: Accuracy and block triangulation issues. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**. 2015, v.101, p.233–246. Disponível em: <http://www.doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2014.12.020>.

SÃO PAULO (Estado). Secretaria dos Transportes. Departamento de Estradas de Rodagem - DER. **Instrução de projeto**. São Paulo: DER, 2005.

SATO, S. S. **Sistema de controle de qualidade dos processos fotogramétricos**

**digitais para produção de dados espaciais.** 2003. Tese (Doutorado em Engenharia de Transportes) Universidade de São Paulo, São Carlos, 2003.

SCHENK, T. **Introduction to Photogrammetry.** First ed. Ohio: The Ohio State University, 2005.

SHIBASAKIM, A. K. R. **Inspeção da torre do monte da virgem com auxílio de veículo aéreo não tripulado.** 2019. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Instituto Superior de Engenharia do Porto, Cidade do Porto, 2019.

SUN, Y.; SUN, H.; YAN, L.; FAN, S.; CHEN, R. RBA: Reduced bundle adjustment for oblique aerial photogrammetry. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing.** 2016, v.121, p.128–142. Disponível em: <http://www.doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2016.09.005>.

TAO, C. V.; HU, Y. A comprehensive study of the rational function model for photogrammetric processing. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing.** 2001, v.67, n.12, p.1347–1357. Disponível em: [https://www.asprs.org/wp-content/uploads/pers/2001journal/december/2001\\_dec\\_1347-1357.pdf](https://www.asprs.org/wp-content/uploads/pers/2001journal/december/2001_dec_1347-1357.pdf).

THOMSON, G. H. Digital camera performance where spatial resolution is determined by the optical component. **The Photogrammetric Record.** 2010. Oxford: v.25, n.129, p.42–49.

TOMMASELLI, A. M. G. **Fotogrametria Básica.** 1<sup>o</sup> ed. Presidente Prudente: Universidade Estadual Paulista “Julio de Mesquita Filho”, 2009.

TULER, M.; SARAIVA, S. **Fundamentos de Topografia.** 1<sup>o</sup> ed. Porto Alegre: Bookman, 2014.

WEHR, A. LiDAR: Airbone and terrestrial sensors. In: LI, Z.; CHE, J.; BALTSAVIAS, E. (orgs.). **Advances in Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences.** London: Taylor & Francis Group, 2008. p.73–84.

WEHR, A.; LOHR, U. Airborne laser scanning - An introduction and overview. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing.** 1999, v.54, n.2-3, p.68–82. Disponível em: [https://www.doi.org/10.1016/S0924-2716\(99\)00011-8](https://www.doi.org/10.1016/S0924-2716(99)00011-8).

WIDYANINGRUM, E.; FAJARI, M.; OCTARIADY, J. Accuracy comparison of VHR systematic-ortho satellite imageries against VHR orthorectified imageries using GCP. **International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences - ISPRS Archives.** 2016, v.41, n.B1, p.305–309. Disponível em: <https://www.doi.org/10.5194/isprsarchives-XLI-B1-305-2016>.

WOLF, P. R.; DEWITT, B. A. **Elements of photogrammetry with applications in GIS.** 3. ed. Boston: Mc Graw Hill, 2000.

XIE, L.; HU, H.; WANG, J.; ZHU, Q.; CHEN, M. An asymmetric re-weighting method for the precision combined bundle adjustment of aerial oblique images. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing.** 2016, v.117, p.92–107. Disponível em:

<http://www.doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2016.03.017>.

YAO, H.; QIN, R.; CHEN, X. Unmanned aerial vehicle for remote sensing applications - A review. **Remote Sensing**. 2019, v.11, n.12, pp.22. Disponível em: <https://www.doi.org/10.3390/rs11121443>.

9 ANEXOS

Anexo 01- Relatório de estação geodésica SAT 99520

<b>IBGE</b>		<b>Relatório de Estação Geodésica</b>	
Estação :	99520	Nome da Estação :	99520
Município :	CAMPINAS	Tipo :	Estação GPS
Última Visita :	09/09/2009	Situação Marco Principal :	BOM
		Última Atualização :	17/07/2017
		Inscrição chapa :	SAT 99520

DADOS PLANIALTIMÉTRICOS		DADOS ALTIMÉTRICOS		DADOS GRAVIMÉTRICOS	
Latitude	22° 48' 58,63056" S	Altitude Ortométrica(m)		Gravidade(mGal)	
Longitude	47° 03' 45,69613" W	Fonte		Datum	
Altitude Geométrica(m)	622,985	Sigma Altitude(m)		Data Medição	
Fonte	GPS Geodésico	Datum		Data Cálculo	
Origem	Ajustada	Data Medição			
Datum	SIRGAS2000	Data Cálculo			
Data Medição	09/09/2009				
Data Cálculo	08/03/2010				
Sigma Latitude(m)	0,001				
Sigma Longitude(m)	0,001				
Sigma Altitude Geométrica(m)	0,007				
UTM(N)	7.475.338,888				
UTM(E)	288.294,846				
MC	-45				

- Ajustamento Altimétrico Simultâneo da Rede Altimétrica em 30/07/2018 - REALT 2018 2ª edição disponível em: <https://biblioteca.ibge.gov.br/visualizacao/livros/liv101666.pdf>
- Ajustamento Planimétrico SIRGAS2000 em 23/11/2004 e 06/03/2006 - Relatório em: [http://geotip.ibge.gov.br/informacoes\\_sobre\\_posicionamento\\_geodesico/rede\\_planialtimetrica/relatorio/sirgas2000.pdf](http://geotip.ibge.gov.br/informacoes_sobre_posicionamento_geodesico/rede_planialtimetrica/relatorio/sirgas2000.pdf)
- Para obtenção de Altitude Ortométrica referente a levantamento SAT utilizar o MAPGEO2015 disponível em: <https://www.ibge.gov.br/geociencias-novoportafm/modelos-digitais-de-superfície/modelos-digitais-de-superfície/10835-modelo-de-ondulacao-geoidal.html>
- As informações de coordenadas estão relacionadas ao sistema SIRGAS2000, em conformidade com a RPR 01/2015 de 24/02/2015 disponível em: [http://geotip.ibge.gov.br/metodos\\_e\\_outros\\_documentos\\_de\\_referencia/normas/rpr\\_01\\_2015\\_sirgas2000.pdf](http://geotip.ibge.gov.br/metodos_e_outros_documentos_de_referencia/normas/rpr_01_2015_sirgas2000.pdf)

	Localização
Indisponível temporariamente	
	Descrição
Indisponível temporariamente	
	Observação
Indisponível temporariamente	

Foto(s)



Mantenha-se atualizado consultando periodicamente o BDG. Agradecemos a comunicação de falhas ou omissões. Para entrar em contato conosco, utilize os recursos abaixo: Fale conosco: 0800 721 8181. Email: [ibge@ibge.gov.br](mailto:ibge@ibge.gov.br)

## Anexo 02 - Exemplo de monografia – levantamento em campo.

MONOGRAFIA PONTO DE VERIFICAÇÃO ALTIMÉTRICA - PVA	
Nome do Ponto: PC001	Localização do Ponto: UNICAMP
RBMC utilizada no processamento: SPCA – Campinas	
Software de Proc.: GNSS Solution	Data do Rastreo: 23/08/2020
COORDENADAS GEODÉSICAS	
DATUM PLANIMÉTRICO: SIRGAS2000	DATUM ALTIMÉTRICO: IMBITUBA - SC
$\phi$ : 22°48'42,75645"S	h (m): 585,582 $\sigma_h$ :0,005m
$\lambda$ : 47°03'59,89966"W	N <sub>MAPGEO2015</sub> (m): -4,46
Altura da Antena (m): 2,03	H (m): 590,042
COORDENADAS UTM (MC: -45) – SIRGAS2000/ IMBITUBA-SC	
E (m): 287882,950	$\sigma_E$ : 0,003m
N (m): 7475821,565	$\sigma_N$ : 0,003m
	
Descrição do ponto: Ponto localizado no estacionamento do Hotel da FUNCAMP.	