MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA, INOVAÇÕES E COMUNICAÇÕES
INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS

sid.inpe.br/mtc-m21c/2018/07.17.11.58-TDI

AVALIAÇÃO DA ACURÁCIA DO POSICIONAMENTO E ORIENTAÇÃO DE AERONAVES REMOTAMENTE PILOTADAS COM USO DE TÉCNICAS DE FOTOGRAMETRIA E PROCESSAMENTO DIGITAL DE IMAGENS

Sidney Andrade de Lima

Dissertação de Mestrado do Curso de Pós-Graduação em Sensoriamento Remoto, orientada pelos Drs. Hermann Johann Heinrich Kux, e Elcio Hideiti Shiguemori, aprovada em 26 de julho de 2018.

URL do documento original:
<http://urlib.net/8JMKD3MGP3W34R/3RFE6CH>

INPE
São José dos Campos
2018

PUBLICADO POR:

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE
Gabinete do Diretor (GBDIR)
Serviço de Informação e Documentação (SESID)
CEP 12.227-010
São José dos Campos - SP - Brasil
Tel.:(012) 3208-6923/7348
E-mail: pubtc@inpe.br

COMISSÃO DO CONSELHO DE EDITORAÇÃO E PRESERVAÇÃO DA PRODUÇÃO INTELECTUAL DO INPE (DE/DIR-544):

Presidente:

Dr. Marley Cavalcante de Lima Moscati - Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (CGCPT)

Membros:

Dra. Carina Barros Mello - Coordenação de Laboratórios Associados (COCTE)

Dr. Alisson Dal Lago - Coordenação-Geral de Ciências Espaciais e Atmosféricas (CGCEA)

Dr. Evandro Albiach Branco - Centro de Ciência do Sistema Terrestre (COCST)

Dr. Evandro Marconi Rocco - Coordenação-Geral de Engenharia e Tecnologia Espacial (CGETE)

Dr. Hermann Johann Heinrich Kux - Coordenação-Geral de Observação da Terra (CGOBT)

Dra. Ieda Del Arco Sanches - Conselho de Pós-Graduação - (CPG)

Silvia Castro Marcelino - Serviço de Informação e Documentação (SESID)

BIBLIOTECA DIGITAL:

Dr. Gerald Jean Francis Banon

Clayton Martins Pereira - Serviço de Informação e Documentação (SESID)

REVISÃO E NORMALIZAÇÃO DOCUMENTÁRIA:

Simone Angélica Del Ducca Barbedo - Serviço de Informação e Documentação (SESID)

André Luis Dias Fernandes - Serviço de Informação e Documentação (SESID)

EDITORAÇÃO ELETRÔNICA:

Marcelo de Castro Pazos - Serviço de Informação e Documentação (SESID)

Murilo Luiz Silva Gino - Serviço de Informação e Documentação (SESID)

MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA, INOVAÇÕES E COMUNICAÇÕES
INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS

sid.inpe.br/mtc-m21c/2018/07.17.11.58-TDI

AVALIAÇÃO DA ACURÁCIA DO POSICIONAMENTO E ORIENTAÇÃO DE AERONAVES REMOTAMENTE PILOTADAS COM USO DE TÉCNICAS DE FOTOGRAMETRIA E PROCESSAMENTO DIGITAL DE IMAGENS

Sidney Andrade de Lima

Dissertação de Mestrado do Curso de Pós-Graduação em Sensoriamento Remoto, orientada pelos Drs. Hermann Johann Heinrich Kux, e Elcio Hideiti Shiguemori, aprovada em 26 de julho de 2018.

URL do documento original:
<http://urlib.net/8JMKD3MGP3W34R/3RFE6CH>

INPE
São José dos Campos
2018

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

Lima, Sidney Andrade de.

L628a Avaliação da acurácia do posicionamento e orientação de aeronaves remotamente pilotadas com uso de técnicas de fotogrametria e processamento digital de imagens / Sidney Andrade de Lima. – São José dos Campos : INPE, 2018.

xxvi + 187 p. ; (sid.inpe.br/mtc-m21c/2018/07.17.11.58-TDI)

Dissertação (Mestrado em Sensoriamento) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2018.

Orientadores : Drs. Hermann Johann Heinrich Kux, e Elcio Hideiti Shiguemori.

1. Posicionamento. 2. Fotogrametria. 3. Resseção espacial. 4. Imagem. 5. ARP. I.Título.

CDU 528.85

Esta obra foi licenciada sob uma Licença Creative Commons Atribuição-NãoComercial 3.0 Não Adaptada.

This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 3.0 Unported License.

Aluno (a): ***Sidney Andrade de Lima***

Título: "AVALIAÇÃO DA ACURÁCIA DO POSICIONAMENTO E ORIENTAÇÃO DE AERONAVES REMOTAMENTE PILOTADAS COM USO DE TÉCNICAS DE FOTOGRAMETRIA E PROCESSAMENTO DIGITAL DE IMAGENS"

Aprovado (a) pela Banca Examinadora em cumprimento ao requisito exigido para obtenção do Título de ***Mestre*** em

Sensoriamento Remoto

Dr. Luiz Eduardo Oliveira e Cruz de Aragão

Presidente / INPE / São José dos Campos - SP

( ) Participação por Vídeo - Conferência

(X) Aprovado ( ) Reprovado

Dr. Hermann Johann Heinrich Kux

Orientador(a) / INPE / SJCampos - SP

( ) Participação por Vídeo - Conferência

(X) Aprovado ( ) Reprovado

Dr. Elcio Hideiti Shiguemori

Orientador(a) / IEAv / São José dos Campos - SP

( ) Participação por Vídeo - Conferência

(X) Aprovado ( ) Reprovado

Dr. Camilo Daleles Rennó

Membro da Banca / INPE / SJCampos - SP

( ) Participação por Vídeo - Conferência

(X) Aprovado ( ) Reprovado

Dr. Jorge Luís Nunes e Silva Brito

Convidado(a) / UERJ / Rio de Janeiro - RJ

( ) Participação por Vídeo - Conferência

(X) Aprovado ( ) Reprovado

Este trabalho foi aprovado por:

( ) maioria simples

(X) unanimidade

São José dos Campos, 26 de julho de 2018

Aprovado (a) pela Banca Examinadora em cumprimento ao requisito exigido para obtenção do Título de ***Mestre*** em

Sensoriamento Remoto

Dr. Rafael Lemos Paes

Convidado(a) / IEAv / São José dos Campos - SP

( ) Participação por Vídeo - Conferência

(x) Aprovado ( ) Reprovado

Este trabalho foi aprovado por:

( ) maioria simples

(x) unanimidade

São José dos Campos, 26 de julho de 2018

“Pois a sabedoria entrará no teu coração, e o conhecimento será aprazível à tua alma”.

Provérbios 2:10

AGRADECIMENTOS

Primeiramente a Deus que é minha rocha firme e me susteve nos momentos mais difíceis. A minha família que me propiciou momentos de lazer, descontração e motivação para seguir estudando, em especial a minha esposa Cristiane Lamarques Andrade, meu filho Arthur de Macedo Andrade, minha filha Sophia de Macedo Andrade.

A meus pais Luís Andrade do Nascimento e Inez Andrade de Lima pelo exemplo de vida, pela compreensão das horas perdidas de convivência gastos no desenvolvimento do trabalho em tela. Ao meu irmão Luís Felipe Andrade de Lima, pela ajuda na aquisição e uso do RPA Phantom 4 da DJI, indispensável para a realização deste trabalho e a minha irmã Janaina Andrade de Lima, pelo incentivo na realização do mestrado.

Aos diretores do IEAv, o Sr. Cel Av Roberto da Cunha Follador e Cel Av Lester de Abreu Faria, que disponibilizaram apoio incondicional para realização deste trabalho no âmbito do IEAv e do DCTA. Agradeço a todos os meus superiores, pares e subordinados que me auxiliaram de alguma forma para a realização deste trabalho.

Ao meu orientador do INPE o professor Dr. Hermann Johann Heinrich Kux, por aceitar o desafio de me orientar no mestrado de Sensoriamento Remoto do INPE. Por disponibilizando tempo e atenção na escolha das disciplinas a serem realizadas, bem como nas melhores atividades a serem realizadas para o atendimento das exigências do curso no INPE.

Ao meu orientador do IEAv o Dr. Elcio Hideiti Shiguemori por disponibilizar seu tempo para me orientar nas atividades do mestrado e suas aplicações no projeto estratégico do IEAv, denominado de Processamento de Imagem em Tempo Real (PITER), sugeriu melhorias e adaptações no tema e no texto desta

dissertação, sem as quais não seria possível a conclusão coerente deste trabalho.

Aos meus chefes imediatos o TCel Eng Marcus Vinicius Teixeira Monteiro, o PhD Maj. Av Rafael Lemos Paes, ao Maj. Eng Leandro Roberto e ao Dr. Ruy Morgado de Castro pelo incentivo e apoio incondicional na realização deste mestrado, disponibilizando tempo e atenção para tirar dúvidas e orientar quanto a execução dos trabalhos.

Ao professor Ph.D. Jorge Luis Nunes e Silva Brito, da UERJ, pelas excelentes aulas ministradas na graduação, que serviram de base para a realização deste trabalho e pelas excelentes orientações dos conceitos de fotogrametria, área do conhecimento fundamental para o desenvolvimento desta dissertação.

Ao Professor Dr Luiz Eduardo Oliveira e Cruz de Aragão por disponibilizar a licença do programa Pix4D Mapper Pro do INPE, para processamento dos dados deste projeto e pelas orientações na apresentação da proposta de mestrado.

Ao Tecnologista em C&T Remo Cesar Carnevalli e ao Técnico Gilmar José Ramos Lima pela disponibilização do servidor, que foi utilizado para processar as imagens, os Modelos Digitais de Superfície e as ortoimagens. Ajudaram-me, ainda, na confecção do pedido de aquisição do software Pix4D Mapper Pro para o IEAv.

Ao segundo sargento Daniel Rodrigues Roos pelo auxilio nesta dissertação, tendo desenvolvido a rotina para a identificação automática dos pontos homólogos utilizando os algoritmos SURF e o RANSAC do Matlab.

RESUMO

Este trabalho tem por objetivo avaliar a acurácia do cálculo do posicionamento e a orientação de Aeronaves Remotamente Pilotadas (ARP) usando conceitos de fotogrametria a partir de imagens geradas por câmaras embarcadas, visando à navegação aérea autônoma. Esse tipo de navegação pode ser utilizado como uma alternativa aos sistemas de navegação atualmente em uso na maioria das ARP. A técnica de navegação por imagens de casamento de padrão utiliza ortoimagens e Modelos Digitais de Superfície (MDS) como referência para representar o espaço objeto, ou seja, o terreno e imagens obtidas pela câmara embarcada no momento do voo. Assim durante o voo são obtidas fotografias, encontrando-se pontos homólogos entre a imagem e a ortoimagem é possível calcular a posição e ângulos de atitudes do centro perspectivo da câmara através dos conceitos de fotogrametria. As ARP usualmente navegam através do Sistema Global de Navegação por Satélite (GNSS) associado a um Sistema de Navegação Inercial (INS). No entanto, o GNSS pode ter sua acurácia degradada a qualquer momento, pois está sujeito ao controle dos proprietários destes sistemas, que podem inserir ruídos ou até mesmo desligar o seu sinal. Além disso, existe a possibilidade de interferências maliciosas, conhecidas pelo termo em inglês "*jamming*". Apesar de o INS ser um sistema autônomo, após algum tempo de navegação este sistema perde acurácia, pois o posicionamento é determinado pela medição de aceleração e rotações, acumulando erros com o passar do tempo. Por isso, o INS tem suas coordenadas corrigidas pelo GNSS. Neste caso o sistema de navegação GNSS/INS é dependente do GNSS. Portanto o sistema de navegação por imagem pode resolver o problema de autonomia, pois caso o GNSS seja desabilitado ou degradado, o sistema de navegação por imagem continuaria fornecendo informação de coordenadas para o INS, viabilizando a autonomia do sistema. A informação da acurácia do posicionamento por imagem é muito importante, pois quando a acurácia da coordenada do INS for menor do que a acurácia obtida pela navegação por imagem, o INS terá suas coordenadas reinicializadas. Neste trabalho foram avaliadas a influência do relevo, inclinação da câmara, distorções geométricas e dos algoritmos SURF e RANSAC na acurácia das coordenadas do centro perspectivo e ângulos de atitudes da câmara. Com a metodologia aplicada foi possível verificar erros médios na ordem de 0,5 metros no posicionamento e 0,5º nos ângulos de atitudes da câmera. Assim verificou-se que a navegação através de imagens pode atingir valores iguais ou superiores aos receptores GNSS sem correção diferencial. Portanto, navegar por imagem é uma boa alternativa para possibilitar a navegação autônoma de RPA.

Palavras-chave: Posicionamento. Fotogrametria. Ressecção Espacial. Imagem. ARP. Navegação. Ortoimagem. MDT. Sensoriamento Remoto. Calibração.

EVALUATION OF THE ACCURACY OF THE POSITIONING AND ORIENTATION OF REMOTELY PILOTED AIRCRAFT USING PHOTOGRAMMETRY AND DIGITAL IMAGE PROCESSING TECHNIQUES

ABSTRACT

The objective of this work is to evaluate the accuracy of the positioning calculation and the guidance of Remotely Piloted Aircraft (RPA) using concepts of photogrammetry from images generated by embedded cameras, aiming at autonomous air navigation. This type of navigation can be used as an alternative to the navigation systems currently in use in most RPA. The technique of image navigation uses orthomosaic and Digital Surface Models (DSM) as a reference, to represent the object space, that is, the terrain and images obtained by the camera boarded at the time of the flight. Thus, during the flight, photographs are obtained and when homologous points are found between these images and the orthomosaic it is possible to calculate the position and attitudes of the perspective center of the camera through the concepts of photogrammetry. The RPA usually navigate through the Global Navigation Satellite System (GNSS) associated with an Inertial Navigation System (INS). However, GNSS may have its accuracy degraded at any time as it is subject to the control of the owners of these systems, which may insert noises or even turn off their signal. In addition, there is the possibility of malicious interference, known as Jamming. Although the INS is an autonomous system, after some time of navigation this system loses accuracy, because the positioning is determined by the measurement of acceleration and rotations, accumulating errors with time. Therefore, the INS has its coordinates corrected from time to time by GNSS. In this case the GNSS / INS navigation system is dependent on GNSS. Therefore, the image navigation system can solve the autonomy problem, because if the GNSS is disabled or degraded, the image navigation system would continue to provide coordinate information for the INS, making the system autonomous. The accuracy information of the image positioning is also very important, since when the accuracy of the INS coordinate is smaller, than the accuracy obtained by image navigation, the INS will have its coordinates reset. In this work the influence of the relief, camera inclination, geometric distortions and the influence of SURF and RANSAC algorithms on the accuracy of the perspective center coordinates and attitudes angles of the camera were evaluated. With the applied methodology it was possible to verify average errors in the order of 0.5 meters in the positioning and 0.5º in the angle of attitudes of the camera. So the navigation through the image can reach values equal to or higher than the GNSS receivers without differential correction. Therefore, navigating through the image is a good alternative to enable autonomous navigation.

Keywords: Positioning. Photogrammetry. Spatial Resection. Image. UAV. Navigation. Orthomosaic. DSM. Remote sensing. Calibration.

LISTA DE FIGURAS

Pág.

Figura 2.1 – Exemplo de reconhecimento de pontos homólogos..... 12
Figura 2.2 – Número de satélites GNSS lançados entre 1978 a 2014. 14
Figura 2.3 – Sistema inercial com três acelerômetros e três giroscópios..... 16
Figura 2.4 – Programas: a) Pix4D Mapper Pro e b) Agisoft PhotoScan. 19
Figura 2.5 – Georeferênciamento Direto, Ressecção e Intersecção Espacial.. 21
Figura 2.6 – Câmara pinhole. 24
Figura 2.7 – Formação da imagem em uma câmara de lente simples. 24
Figura 2.8 – Eixo Óptico, distância focal e plano de foco no infinito da lente. . 25
Figura 2.9 – Transformação de sistemas de coordenadas..... 27
Figura 2.10 – Referencial geodésico. 28
Figura 2.11 – Relação entre o Sistema Fotogramétrico e Fiducial. 30
Figura 2.12 – Sistema de Coordenadas Fiduciais. 31
Figura 2.13 – Sistema de coordenadas de Imagem. 32
Figura 2.14 – Relação entre o sistema de imagem e o fiducial. 33
Figura 2.15 – Transformação entre sistemas Afim Caso Geral. 34
Figura 2.16 – Colinearidade entre o espaço imagem e o objeto. 36
Figura 2.17 – Relação entre os espaços imagem e objeto..... 37
Figura 2.18 – Equações de colinearidade. 38
Figura 2.19 – Deslocamento devido ao relevo (Paralaxe)..... 41
Figura 2.20 – Representação gráfica da linearização de Série de Taylor. 50
Figura 2.21 – Fluxograma para avaliação do PEC. 57
Figura 2.22 – Teste de hipótese t-Student bilateral. 58
Figura 2.23 – Teste de hipótese chi-quadrado unilateral. 59
Figura 3.1 – Fluxograma dos trabalhos. 61
Figura 3.2 – Localização do IEAv e área restrita do Aeroporto no SARPAS.... 64
Figura 3.3 – ARP para fotografia e filmagem Phantom 4 da DJI 65
Figura 3.4 – Plano de Voo no Pix4D Capture para cada voo do IEAv. 66
Figura 3.5 – Alvos pré-sinalizados utilizado como Check Point. 67

Figura 3.6 – Alvos nas alturas de voo de: a) 20, b) 80 e c) 120m. 68
Figura 3.7 – Tela de seleção dos pontos de controle no Pix4D Mapper Pro.... 68
Figura 3.8 – Visualização dos alvos no voo de 70m de altura do solo. 69
Figura 3.9 – Visualização dos alvos no voo de 120m de altura do solo. 69
Figura 3.10 – Receptor GTR-G2 da TechGEO. 70
Figura 3.11 – Disposição dos pontos de controle (GCP) e Verificação. 71
Figura 3.12 – Levantamento de pontos por GNSS: a) base e b) irradiado..... 74
Figura 3.13 – Mapa de localização das fotografias 74
Figura 3.14 – Nuvem de pontos gerado no Pix4D Mapper Pro. 75
Figura 3.15 – Seleção dos pontos de controle de campo no Pix4D. 76
Figura 3.16 – Modelo Digital de Superfície (MDS) no QGIS 76
Figura 3.17 – Edição das fotografias sobre a ortoimagem no Pix4D. 77
Figura 3.18 – Ortoimagem a) IEAv, b) Novo prédio do ITA e c) CLA. 79
Figura 3.19 – Altura de voo das ortoimagens IEAv: a) 70, b) 80 e c) 120m. 80
Figura 3.20 – Feições das Ortoimagens: a) 70, b) 80 e c) 120m. 82
Figura 3.21 – Programa ImageJ para obter as coordenadas da imagem..... 83
Figura 3.22 – Programa QGIS usado para obter as coordenadas de terreno. . 84
Figura 3.23 – Pontos homólogos identificados pelo SURF e SURF/RANSAC. 85
Figura 3.24 – Relação entre os sistemas imagem e fiducial. 87
Figura 4.1 – Ortoimagem e MDS do voo a 70m de altura. 98
Figura 4.2 – Gráficos Quartil x Quartil dos eixos (E, N, H), voo a 70m..... 98
Figura 4.3 – Diagrama de caixa do voo a 70m de altura. 99
Figura 4.4 – Desvios planimétricos da ortoimagem no voo a 70m de altura. ... 99
Figura 4.5 – Ortoimagem e MDS do voo a 80m de altura. 101
Figura 4.6 – Gráficos Quartil x Quartil dos eixos (E, N, H), voo de 80m..... 102
Figura 4.7 – Diagrama de caixa do voo de 80m de altura. 102
Figura 4.8 – Desvios planimétricos da ortoimagem a 80m de altura de voo. . 103
Figura 4.9 – Ortoimagem e MDS do voo de 120m de altura. 105
Figura 4.10 – Gráficos Quartil x Quartil dos eixos (E, N, H), voo de 120m..... 105
Figura 4.11 – Diagrama de caixa do voo a 120m de altura. 106
Figura 4.12 – Desvios planimétrico da ortoimagem a 120m de altura de voo. 106

Figura 4.13 – Posição das fotos com pontos de baixo e alto desnível. 110
Figura 4.14 – 1º Caso - Fotos na vertical com pontos de baixo desnível. 111
Figura 4.15 – 2º Caso - Fotos na vertical com pontos de alto desnível. 111
Figura 4.16 – Comparação entre os Centro Perspectivo do 1º e 2º Caso..... 113
Figura 4.17 – Comparação entre as atitudes do 1º e 2º Caso..... 113
Figura 4.18 – Posição das fotos com altura média de 80 e 120 metros. 114
Figura 4.19 – 3º Caso - Fotos verticais com altura média de voo de 80m. 115
Figura 4.20 – 4º Caso - Fotos verticais com altura média de voo de 120m. .. 115
Figura 4.21 – Comparação entre os Centros Perspectivos do 3º e 4º Casos 117
Figura 4.22 – Comparação entre as atitudes do 3º e 4º Casos..... 117
Figura 4.23 – Posição das fotos inclinadas. 118
Figura 4.24 – 5º Caso - Fotos com aproximadamente 55º de inclinação. 119
Figura 4.25 – 6º Caso - Fotos com aproximadamente 75º de inclinação. 119
Figura 4.26 – 7º Caso - Fotos com aproximadamente 80º de inclinação. 120
Figura 4.27 – Comparação entre Centros Perspectivos do 5º, 6º e 7º Casos.122
Figura 4.28 – Comparação entre atitudes do 5º, 6º e 7º Casos. 122
Figura 4.29 – Erros do CP em Este para os 7 casos..... 123
Figura 4.30 – Erros do CP em Norte para os 7 casos. 124
Figura 4.31 – Erros do CP em Altitude para os 7 casos. 125
Figura 4.32 – Erros da atitude em *Ômega* ($\Delta\omega$) para os 7 casos. 126
Figura 4.33 – Erros da atitude em *Phi* ($\Delta\phi$) para os 7 casos..... 127
Figura 4.34 – Erros da atitude em *Kappa* (ΔK) para os 7 casos. 128
Figura 4.35 – Comparação entre os Erros e os Desvios Padrões..... 130
Figura 4.36 – Comparação entre Erros Com e Sem Calibração Geométrica. 132
Figura 4.37 – Imagens utilizadas na identificação automática. 135
Figura 4.38 – Identificação de 6 pontos através do SURF 137
Figura 4.39 – Distribuição de erros utilizando apenas o SURF 138
Figura 4.40 – Identificação de 6 ponto através do SURF e RANSAC 139
Figura 4.41 – Distribuição de Erros utilizando o SURF e RANSAC 141

LISTA DE TABELAS

Pág.

Tabela 2.1 – Padrão de Exatidão Cartográfica da Planimetria dos Produtos Cartográficos Digitais. 54
Tabela 2.2 – Padrão de Exatidão Cartográfica Altimétrica dos Pontos Cotados e do MDT, MDE e MDS para a produção de Produtos Cartográficos Digitais. 55
Tabela 3.1 – Coordenadas dos pontos de controle de terreno (GCP)..... 72
Tabela 3.2 – Coordenadas dos pontos de verificação (*Checkpoints*). 72
Tabela 3.3 – Voos utilizados para os estudos sobre o IEAv..... 79
Tabela 3.4 – Número de fotos x tempo de processamento. 80
Tabela 4.1 – Estatistica do voo a 70m de altura..... 100
Tabela 4.2 – Teste de hipóteses para a Média do voo a 70m de altura. 100
Tabela 4.3 – Teste de hipóteses para a Variância do voo a 70m de altura.... 101
Tabela 4.4 – Estatística do voo a 80m de altura. 103
Tabela 4.5 – Teste de hipóteses para a Média do voo de 80m de altura. 104
Tabela 4.6 – Teste de hipóteses para a Variância do voo de 80m de altura.. 104
Tabela 4.7 – Estatística do voo a 120m de altura. 107
Tabela 4.8 – Teste de hipóteses para a Média do voo a 120m de altura. 107
Tabela 4.9 – Teste de hipóteses para a Variância do voo a 120m de altura.. 108
Tabela 4.10 – Teste de hipóteses para o 1º e 2º casos. 112
Tabela 4.11 – Teste de hipótese para o 3º e 4º casos. 116
Tabela 4.12 – Teste de hipótese para os 5º, 6º e 7º casos.. 121
Tabela 4.13 – Percentual de Erros menores que os Desvios Padrão. 131
Tabela 4.14 – Percentual de Erros menores que os Desvios Padrão. 134

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

AAT	Automatic Aerial Triangulation
ANAC	Agência Nacional de Aviação Civil
ANATEL	Agência Nacional de Telecomunicações
ARP	Aeronave Remotamente Pilotada
AST	Aproximações por Série de Taylor
ASPRS	Sociedade Americana de Fotogrametria e Sensoriamento Remoto
BAA	Bloco de Ajustamento Aerofotogramétrico
BBA	Bundle Block Adjustment
CP	Check Point
CONCAR	Comissão Nacional de Cartografia
DECEA	Departamento de Controle do Espaço Aéreo
DSG	Diretoria de Serviço Geográfico do Exército Brasileiro
FAB	Força Aérea Brasileira
GCP	Ground Control Points
GLONASS	Russian Global Navigation Satellite System
GNSS	Global Navigation Satellite System
GPS	Global Positioning System
GSD	Ground Sample Distance
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
ICAO	International Civil Aviation Organization
ICA	Instituto de Cartografia Aeronáutica
IEAv	Instituto de Estudos Avançados
IFOV	Instantaneous Field of View
IMU	Inertial Measurement Unit
INPE	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
INS	Inertial Navigation System
KF	Kalman Filter
LSM	Least Squares Method
MD	Ministério da Defesa
MDS	Modelo Digital de Superfície

MDT	Modelo Digital de Terreno
MNE	Modelo Numérico de Elevação
MMQ	Método dos Mínimos Quadrados
MVC	Matriz Variância e Covariância
ND	Número digital
NOTAM	Notice to Airmen
ORB	Oriented-Fast Rotated-BRIEF UAV
PEC	Padrão de Exatidão Cartográfica
PEC-PCD	Padrão de Exatidão Cartográfica dos Produtos Cartográficos Digitais
PITER	Processamento de Imagens em Tempo Real
RBMC	Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo
RLOS	Radio Line Of Sight
RMS	Root Mean Square
RPA	Remotely Piloted Aircraft
RPAS	Remotely Piloted Aircraft System
RANSAC	Random Sample Consensus
OACI	Organização da Aviação Civil Internacional
SA	Selective Availability
SARPAS	Solicitação de Autorização de Voos com RPAS do DECEA
SISCEAB	Sistema de Controle do Espaço Aéreo Brasileiro
SISANT	Sistema de Aeronaves Não Tripuladas da ANAC
SRPV-SP	Serviço Regional de Proteção ao Voo de São Paulo
SURF	Speeded Up Robust Features
TWR	Torre de Controle de Tráfego Aéreo
UAV	Unmanned Aircraft Vehicle
VFR	Regras de Voo Visual
VANT	Veículo Aéreo Não Tripulado
VLOS	Regras de Voo Visual
WGS	World Geodetic System

LISTA DE SÍMBOLOS

H	Altitude ortométrica
h	Altura elipsoidal
m_{ij}	Coeficientes da matriz de rotação dos parâmetros (ω, ϕ, K)
(E_0, N_0, H_0)	Coordenadas do centro perspectivo, no sistema de terreno
(x_0, y_0)	Coordenadas do ponto principal no sistema fiducial
(X, Y, Z)	Coordenadas no sistema de câmara
(x_n, y_n)	Coordenadas no sistema de fiducial
(C_n, L_n)	Coordenadas no sistema de imagem
(ϕ, λ, h)	Coordenadas no sistema geodésico
$(\delta r_x, \delta r_y)$	Correções de distorções radiais
$(\delta t_x, \delta t_y)$	Correções de distorções tangenciais
$(\Delta\omega, \Delta\phi, \Delta K)$	Desvio angular em ômega, phi e kappa
$(\Delta Eo, \Delta No, \Delta Ho)$	Desvio do centro perspectivo
S	Desvio padrão amostral
σ	Desvio padrão populacional
f	Distância focal da câmara
t_c	Distribuição t-student
χ_c	Distribuição Qui-quadrada
H_1	Hipótese alternativa
H_0	Hipótese nula
ϕ	Latitude
λ	Longitude
X	Matriz das incógnitas
A	Matriz dos coeficientes
L	Matriz dos valores observados
L_0	Matriz dos valores calculados
L_a	Matriz dos valores ajustados
J	Matriz jacobiana
P	Matriz Peso das observações
ΣL	Matriz variância e covariância das observações

ΣL_a	Matriz variância e covariância dos valores ajustados
$\Sigma \bar{X}$	Matriz variância e covariância das incógnitas ou parâmetros
$\bar{X}$	Média amostral
$\overline{\Delta X}$	Média dos desvios amostral
μ	Média populacional
α	Nível de significância
N	Ondulação geoidal
$(\omega, \phi, \mathrm{K})$	Rotações em torno dos eixos $(\mathrm{X}, \mathrm{Y}, \mathrm{Z})$, no sistema de câmara
σ	Variância de referência
$\hat{\sigma}$	Variância a posteriori
V	Vetor resíduo

SUMÁRIO

Pág.

1 INTRODUÇÃO 1
1.1. Problema 1
1.2. Objetivo 6
1.3. Contribuição 7
1.4. Motivação 7
1.5. Estrutura do Trabalho 8
2 FUNDAMENTAÇÃO 11
2.1. Reconhecimento Automático de Marcos em Imagens Aéreas 11
2.2. Sistema Satelital de Navegação Global (GNSS) 13
2.3. Sistema de Navegação Inercial (INS) 15
2.4. Interferências maliciosas nos sinais de GNSS 17
2.4.1. Programas de Processamento de imagens de Fotogrametria 18
2.4.2. Navegação por imagem utilizando Fotogrametria 20
2.5. Princípios de Fotografia e Imagem 23
2.6. Fotogrametria 26
2.7. Sistemas de Coordenadas 26
2.7.1. Sistemas de Coordenadas Geodésicas 28
2.7.2. Sistemas de Coordenadas de Projeções Cartográficas 29
2.7.3. Sistemas de Coordenadas de Câmara 29
2.7.4. Sistemas de Coordenadas Fiduciais ou de Foto 31
2.7.5. Sistemas de Coordenadas de Imagem 32
2.8. Transformações Geométricas 33
2.8.1. Transformação Afim 34
2.8.2. Transformação Projetiva 35
2.9. Distorções Geométricas em Imagens Fotográficas 40
2.9.1. Paralaxe 40
2.9.2. Correção das Distorções Radiais 41
2.9.3. Correção das Distorções Tangenciais 42

2.9.4. Equações de Colinearidade com Correção Tangencial e Radial 42
2.10. Resolução de Sistemas de Equações Lineares 44
2.11. Método dos Mínimos Quadrados (MMQ) 46
2.12. Modelos Lineares 49
2.13. Resolução de Sistemas de Equações Não-Lineares 49
2.13.1. Aproximação por Série de Taylor 49
2.13.2. Matriz Jacobiana 51
2.13.3. Resolução de Sistemas de Equações não Lineares 52
2.14. Padrão de Exatidão Cartográfica 53
2.14.1. Avaliação da ortoimagem e MDS quanto ao PEC 55
2.14.2. Teste de Hipóteses para a Média 57
2.14.3. Teste de Hipóteses para a Variância 58
3 MÉTODOS 61
3.1. Voo Para obtenção das Fotos 63
3.1.1. Autorização de voo de RPA 63
3.1.2. Phanton 4 da DJI 65
3.1.3. Planejamento de voo para obtenção das fotografias 66
3.2. Levantamento com GNSS 66
3.2.1. Implantação dos Pontos de Controle 66
3.2.2. Determinação das Coordenadas dos Pontos de Controle 70
3.3. Produção das Ortoimagens e DSM 74
3.3.1. Processamento das Imagens 74
3.3.2. Geração de Ortoimagem e MDS 78
3.4. Cálculo da Ressecção Espacial 83
3.4.1. Transformação do Sistema de Imagem em Fiducial 86
3.4.2. Cálculo do Centro Perspectivo e das Atitudes da Câmara 89
4 RESULTADOS E DISCURSÕES 95
4.1. Avaliação do PEC da Ortoimagem e do MDS 97
4.1.1. Avaliação do PEC com Altura de Voo a 70m 98
4.1.2. Avaliação do PEC com Altura de Voo a 80m 101
4.1.3. Avaliação do PEC com Altura de Voo a 120m 105

4.2. Estudo de Casos da Ressecção Espacial 108
4.2.1. Influência do relevo na posição e atitude da câmara 110
4.2.2. Influência da altura de voo na posição e atitude da câmara 114
4.2.3. Influência da inclinação na posição e atitude da câmara 118
4.3. Comparação entre o posicionamento por GNSS/INS e a Ressecção 122
4.4. Comparação entre os Erros e os Desvios Padrão calculados 129
4.5. Comparação entre Erros Com e Sem Calibração Geométrica 131
4.6. Influência da identificação errada dos pontos homólogos 133
4.7. Cálculo do erro utilizando os algoritmos SURF e RANSAC..... 135
5 CONCLUSÃO E RECOMENDAÇÕES 143
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS 145
APÊNDICE A – Rotina de Cálculo da Posição e Atitude da Câmara 159
APÊNDICE B – Relatório do Pix4D do IEAv com Altura de Voo de 80m 174

1 INTRODUÇÃO

1.1. Problema

Atualmente a Aeronave Remotamente Pilotada (ARP) vêm sendo empregado em diversas aplicações, onde a intervenção humana é de difícil acesso, exaustiva, arriscada, cara ou até mesmo impossível (SILVA; VIJAYKUMAR; SHIGUEMORI, 2016). Como exemplo pode-se citar o monitoramento de região costeira (GONÇALVES; HENRIQUES, 2015); operação de busca e resgate (CHAVES, 2013); vigilância de fronteiras (ANDRADE, 2013); agricultura de precisão (ZARCO-TEJADA et al., 2014); controle de florestas (BERVEGLIERI; TOMMASELLI, 2016; DASH et al., 2017); monitoramento ambiental (ALVES JÚNIOR; CÔRTES; FERREIRA, 2014); incêndios florestais (DANTAS, 2014); topografia (AGÜERA-VEGA; CARVAJAL-RAMÍREZ; MARTÍNEZ-CARRICONDO, 2017; JAMES et al., 2017); fotogrametria (COLOMINA; MOLINA, 2014; MITISHITA et al., 2014; AGÜERA-VEGA; CARVAJAL-RAMÍREZ; MARTÍNEZ-CARRICONDO, 2016; ERCOLIN FILHO, 2017; LIMA et al., 2017); e navegação (SILVA FILHO, 2016; ROBERTO, 2017; LIMA; KUX; SHIGUEMORI, 2018), entre outras.

Os Sistemas de Aeronaves Não Tripuladas, em inglês *Unmanned Aircraft Systems (UAS)*, têm sido uma nova área da aviação mundial que as organizações internacionais, a indústria e diversos órgãos governamentais no mundo inteiro vem buscando estudar e trabalhar para compreender, definir e promover sua completa integração aos espaços aéreos nacionais e internacionais (DECEA/ICA_100-40, 2016).

No Brasil, essas aeronaves são amplamente conhecidas como Drones (do inglês Zangão, termo muito utilizado pelos órgãos de imprensa) e ainda Veículo Aéreo Não Tripulado (VANT). A Sigla VANT é oriunda do inglês *Unmanned Aerial Vehicle (UAV), sendo* considerado um termo obsoleto na comunidade aeronáutica internacional (DECEA/ICA_100-40, 2016).

O termo adotado tecnicamente pela Organização Internacional de Aviação Civil (OACI), que possui abrangência internacional, para esse tipo de aeronave não tripulada é o *Remotely Piloted Aircraft System (RPAS).* Por este motivo o DECEA nomeou seu Sistema de Autorização de RPAS de SARPAS (DECEA/ICA_100-40, 2016).

Contando com variados tipos (dirigíveis, asas fixas, asas rotatórias, etc.), e diversas características (tamanhos, performances e aplicações). A regulamentação para o emprego de uma Aeronave Não Tripulada tem-se mostrado complexa no mundo inteiro por diversas questões, sendo o principal motivo o fato de não haver piloto a bordo (DECEA/ICA_100-40, 2016). Tendo em vista a crescente demanda pelo acesso ao espaço aéreo por ARP, a segurança aérea torna-se indispensável. A segurança aérea é uma matéria multidisciplinar, composta por diversas especialidades profissionais aplicadas à aviação. Seu objetivo principal é evitar ocorrências ou recorrências de um incidente ou de um acidente através de estudo sistemático, com o objetivo de prevenir acidentes (ANAC/RBAC-E-94, 2017).

A ANAC define que a responsabilidade e autoridade é do piloto remoto em comando, devendo este estar regulamentando. Assim o piloto é diretamente responsável pela condução segura da aeronave, pelas consequências advindas de sua condução e tem a autoridade final por sua operação (ANAC/RBAC-E-94, 2017).

O DECEA define que as aeronaves não tripuladas **automáticas** são aquelas que permitem a intervenção do piloto na condução e no gerenciamento do voo, a qualquer momento, apesar da possibilidade de os voos serem conduzidos por sistemas computacionais. Esse Departamento define, ainda, que as aeronaves não tripuladas **autônomas** são aquelas que não permitem a intervenção do piloto durante o voo (DECEA/ICA_100-40, 2016).

O DECEA define atualmente que as **aeronaves autônomas** não serão regulamentadas e seu voo **não será autorizado**. A aeronave autônoma é

aquela que após iniciado o voo, não existe a possibilidade de intervenção do piloto. Sendo assim, somente os RPAS estarão sujeitas à autorização para utilização do espaço aéreo (DECEA/ICA_100-40, 2016).

Um dos motivos para as aeronaves autônomas não terem seus voos autorizados é o fato de os sistemas sempre estarem sujeitos a falhas. Assim, caso ocorra uma falha no sistema dito autônomo, pode ocorrer uma possibilidade de acidente ou incidente, e não há a possibilidade de imputar a responsabilidade a alguém (DECEA/ICA_100-40, 2016).

Apesar de voos autônomos de VANTs não estarem autorizados no Brasil, várias propostas têm sido apresentadas para a navegação de VANTs (SILVA FILHO, 2016). A primeira proposta prevê a comunicação com a aeronave e processamento e uso de uma estação no solo com rádio-controle para pilotagem, realizada por um piloto (LONGHITANO, 2010). A segunda proposta associa Sistema Inercial de Navegação (INS, do inglês, *Inertial Navigation System*) (MORI, 2013) e um GNSS (*Global Navigation Satellite System*) (MONICO, 2008).

O GNSS possui alguns problemas técnicos, a saber: dependência da tecnologia estrangeira, pois o Brasil não possui um sistema nacional em funcionamento, podendo apresentar erros de posicionamento devido a anomalias na ionosfera (PULLEN; PARK; ENGE, 2009); pode ter seu sinal bloqueado por ataques eletrônicos, conhecidos como *jamming*; além do *spoofing* e *Selective Avaliable (SA)* (FARIA; SILVESTRE; CORREIA, 2016).

Para que um ARP voe, de forma autônoma, para um local definido, deve-se inicialmente conhecer a sua posição, num determinado instante de tempo, para poder comandar atitudes e acelerações neste veículo. Assim o posicionamento de uma aeronave é uma informação fundamental para a sua navegação (MUNARETTO, 2017).

Apesar da disponibilidade de diversos equipamentos que proporcionam informações de direção, distância e altitude como bússolas, acelerômetros, barômetros, altímetros que podem ser embarcados, a auto localização não é tarefa fácil. Isto porque somente com esses equipamentos não é possível se fornecer informações de posicionamento absoluto de forma direta (SHIGUEMORI; MARTINS; MONTEIRO, 2007).

A integração do INS ao GNSS é uma solução de baixo custo para navegar, mesmo em situações de perda temporária do sinal GNSS. Para realizar essa integração quando as coordenadas do INS possuem uma incerteza maior do que as coordenadas informadas pelo GNSS, o INS é reinicializado com as coordenadas do GNSS, fazendo com que o sistema de posicionamento seja dependente do GNSS, inviabilizando a autonomia do referido sistema, caso o sistema GNSS fique inoperante por muito tempo (OLIVEIRA, 2014).

Os sistemas inerciais determinam a sua posição no espaço através de acelerômetros e giroscópios. No entanto, com o passar do tempo o cálculo da posição e da atitude utilizando somente o INS tornam-se imprecisas (AMBRÓSIO, 2010).

Com a finalidade de aumentar a confiabilidade e autonomia da navegação, vem sendo estudados sistemas de navegação por imagem, que despontam como uma opção para aumentar a confiabilidade das navegações, podendo viabilizar a autonomia da navegação (MEDEIROS et al., 2007; CASTRO et al., 2009; BRAGA et al., 2016).

A navegação por imagem é uma área em pleno desenvolvimento, sendo que essa técnica pode aumentar a confiabilidade da navegação e ser empregada na melhoria da acurácia de diversos trabalhos aplicados, a saber: topografia, fotogrametria, bases cartográficas, levantamento florestal, agricultura de precisão, controle e desenvolvimento urbano, construção civil, inspeção de linhas de transmissão, monitoramento de oleodutos, gasodutos, estruturas

metálicas, prédios, e no acompanhamento de obras civis, terraplanagem, mineração, arqueologia, geologia, entre outros (ALMEIDA, 2014).

A navegação autônoma é estudada em diversas aplicações como veículos aquáticos, terrestres e aéreos. Em especial, para os veículos aéreos têm sido propostas diferentes técnicas, utilizando os sistemas inerciais, associados ao emprego de visão computacional, com a aquisição de informações de posicionamento através de processamento de imagens (SILVA; VIJAYKUMAR; SHIGUEMORI, 2016).

O posicionamento de RPAS por imagens é uma aplicação que merece destaque, pois propõe realizar a navegação do ARP utilizando reconhecimento automático de imagens, ou seja, determinando a sua posição exclusivamente a partir de feições em imagens geradas por um sensor a bordo (SHIGUEMORI; MARTINS; MONTEIRO, 2007).

Assim a abordagem de utilização de imagens georreferenciadas de sensores orbitais ou aerotransportados da região de interesse e sua comparação com imagens obtidas no momento do voo, associado a um INS, viabiliza a navegação de forma autônoma (SILVA FILHO, 2016).

Neste caso, para a determinação das coordenadas tridimensionais e dos ângulos de atitude do sensor embarcado no RPAS de forma acurada é imprescindível a utilização dos conceitos de fotogrametria (MCGLONE; LEE, 2013).

No entanto, vários erros podem ocorrer ao se tentar realizar a navegação por imagem, dentre eles podem se citar: dificuldades de realizar a identificação automática dos pontos de referência (BRAGA et al., 2016); não consideração das características intrínsecas da câmara (ROBERTO et al., 2017); não correção das distorções projetivas, não consideração da perspectiva da imagem adotando a transformação afim no lugar da projetiva e não

consideração dos desníveis ocorridos na imagem devidos a variação do terreno, que acarretam variação de escala (LIMA et al., 2017).

1.2. Objetivo

O objetivo deste trabalho foi analisar os erros da estimação do posicionamento e atitude de uma câmara embarcada em um RPA, simulando a determinação do posicionamento de uma câmara ao obter uma imagem aérea, para fins de navegação por imagem.

Assim o objetivo principal é avaliar o método fotogramétrico de estimação de posição e ângulos de atitudes da câmara embarcadas em um RPA; avaliar a acurácia da estimação de posição e ângulos de atitude da câmera; avaliar a importância da calibração da câmera e Avaliar uma abordagem de identificação automática de pontos homólogos.

O objetivo específico é a geração de MDT e ortoimagem com a análise de seus erros, pois estes servirão de base para o cálculo da posição e ângulos de atitude da câmara. Serão avaliadas tanto as incertezas da Ortoimagem e do MDT, através da análise do Padrão de Exatidão Cartográfica (PEC), quanto os erros da determinação das coordenadas do centro perceptivo e ângulos de atitude.

Além disso, neste trabalho será analisada a influência do relevo e das atitudes da câmara no erro de posicionamento e atitudes ao se realizar a ressecção espacial. Será averiguada a influência do terreno, da altura de voo e de diferentes ângulos de inclinação da câmara utilizando os conceitos de fotogrametria.

Serão aplicadas técnicas de fotogrametria, que fundamentam a determinação das coordenadas e a ângulos de atitude da câmara no espaço, com suas respectivas acurácias, visando utilizá-las na navegação autônoma de um

RPAS. Para tanto, será considerada a influência das distorções na imagem causadas pela variação do relevo e dos parâmetros intrínsecos da câmara.

Outro objetivo secundário deste trabalho é a realização de experimentos para calibrar a câmara geometricamente e caracterizar a resolução espacial efetiva. Isso permitirá conhecer melhor os parâmetros intrínsecos da câmara e melhorar assim a precisão de determinação da posição da câmara no espaço.

Também serão analisadas a influência na determinação do centro perspectivo e atitudes da câmara no espaço, quando se realiza a identificação dos pontos homólogos de forma automática através dos algoritmos SURF e RANSAC, para a obtenção dos pontos correspondentes na fotografia obtida em voo e na ortoimagem/MDS.

1.3. Contribuição

A contribuição desta pesquisa é uma análise da estimativa da posição e atitudes de uma câmara no espaço, utilizando conceitos de fotogrametria e técnicas de processamento de imagens, para serem empregadas na navegação de RPAS e aeronaves não tripuladas, que possam utilizar imagens para navegação autônoma.

Outra contribuição do trabalho é o cálculo de acurácia da posição e atitudes do centro perspectivo da câmara e a influência que as diferentes condições de voo, declividade do relevo e o ângulo de apontamento acarretam nesta acurácia. Além disso, será feita uma análise do acréscimo das variâncias quando se utiliza algoritmos de identificação automática de pontos homólogos para a obtenção destes dados.

1.4. Motivação

A principal motivação desta pesquisa é possibilitar a obtenção de informações mais precisas do posicionamento no desenvolvimento das metodologias que buscam realizar a auto localização por imagem. Esta técnica pode ser

empregada para aumentar a segurança de voo, dentro e fora de ambientes fechados, possibilitando a implantação de sistemas de posicionamento redundantes para a navegação aérea.

Outra motivação deste estudo é analisar uma metodologia para avaliar o erro de posicionamento. Tendo a finalidade de verificar no momento do voo a acurácia da navegação por imagens, disponibilizando-se dados para a tomada de decisão do momento em que devem ser substituídas as coordenadas dos atuais sistemas de navegação pelas coordenadas dos sistemas de navegação por imagem.

1.5. Estrutura do Trabalho

O presente trabalho está organizado em 6 Capítulos, descritos a seguir:

No Capítulo 1, é apresentada a introdução deste trabalho e no Capítulo 2 uma revisão bibliográfica com a apresentação do estado da arte.

No Capítulo 3, apresenta-se um esboço da fundamentação teórica necessária ao entendimento básico dos conceitos que serão utilizados para a determinação das coordenadas e orientação da câmara embarcada no ARP. Tais conceitos não são esgotados neste projeto, pois não é este o seu objetivo principal. Nestes casos, procurou-se orientar o leitor para a respectiva bibliografia.

No Capítulo 4, é descrita a metodologia utilizada para a avaliação da acurácia do cálculo das coordenadas do centro perspectivo e atitude da câmara no espaço e suas respectivas acurácias.

No Capítulo 5, são apresentados os resultados dos testes realizados, baseado na imagem gerada pela câmara do RPA. Será analisada a acurácia da ortoimagem e o MDS. Inicialmente os pontos homólogos entre a foto e a ortoimagem foram obtidas manualmente, para se analisar a influência do relevo e dos parâmetros intrínsecos da câmara. Posteriormente foram utilizados os

algoritmos SURF e o RANSAC para a identificação automática de pontos homólogos, com a finalidade de verificar o incremento de erros ao se utilizar estes algoritmos.

No Capítulo 6, são apresentadas a conclusão e sugestões para trabalhos futuros.

2 FUNDAMENTAÇÃO

2.1. Reconhecimento Automático de Marcos em Imagens Aéreas

Com o avanço da tecnologia de eletrônica embarcada e dos algoritmos de visão computacional, os métodos que utilizam imagens para a navegação tornaram-se bastante promissores. A utilização de imagens se justifica por empregar sensores imageadores, com eletrônica de baixo custo e não envolver tecnologia sensível (SILVA FILHO, 2016).

O sistema de navegação visual autônomo para ARP tem sido assunto de grande interesse na comunidade científica (GUIMARÃES, 2017). Atualmente os sistemas de navegação autônomos para RPA são, na maioria, compostos por INS e GNSS, auxiliados por um filtro de Kalman para a estimativa da posição (ELKAIM; ADHIKA; LIE, 2015). Para a maioria das aplicações em RPA este sistema de navegação tem sido bem sucedido (SILVA FILHO, 2016).

No entanto, quando são realizados voos em ambientes fechados ou locais onde há a indisponibilidade de sinal GNSS, surge a necessidade de outro sistema de navegação, que possa manter a confiabilidade da estimação da posição se o GNSS vier a falhar. A principal estratégia desenvolvida tem sido os sistemas de navegação visual autônomo (SILVA FILHO, 2016).

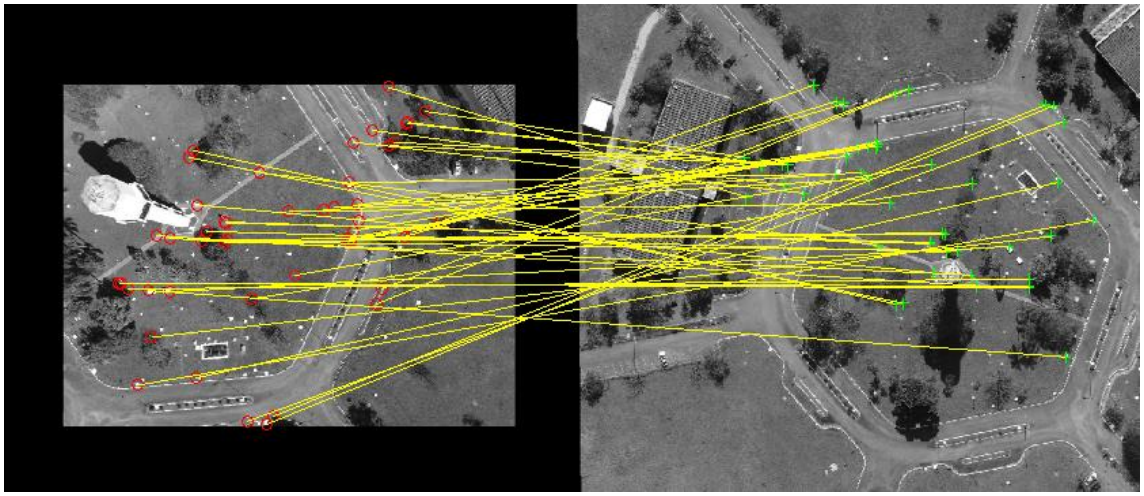
Os principais tipos de navegação visuais autônomos desenvolvidos são odométrica visual (QUIST; BEARD, 2016), casamento de padrões (CONTE; DOHERTY, 2011), SLAM do inglês *Simultaneous Localization and Mapping* (SUBRAMANYA, 2016); e reconhecimento de marcos (MICHAELSEN; MEIDOW, 2014), cada tipo possui diferentes aspectos, que trabalham melhor dependendo das condições de navegação (SILVA FILHO, 2016).

Trabalhos como de Shaw, Barners, Summers (2002) têm uma abordagem mais direta da navegação baseada em reconhecimento de marcos e feições em imagens. A abordagem de Kong, Egan, Cornall (2006) é voltada para o método

de odométrica visual. Algoritmos baseados em feições como o *Scale Invariant Feature Transform* (SIFT), *Speeded Up Robust Feature* (SURF), *Orientated BRIEF Rotated FAST* (ORB), *Accelerated KAZE* (AKAZE) e *Random Sample Consensus* (RANSAC) têm mudado o campo de estudo de reconhecimento de objetos (LI et al., 2015) e têm sido aplicados no reconhecimento de marcos para veículos terrestres (ABDEL-HAKIM; FARAG, 2004; MIKSIK; MIKOLAJCZYK, 2012), e aéreos (KEZHENG; HUANZHOU; LANG, 2015; SILVA FILHO, 2016).

A Figura 2.1 apresenta um exemplo de reconhecimento de padrões de pontos homólogos entre duas imagens. A esquerda é mostrada uma fotografia vertical do local, obtida através da câmara FC330 da SONY, embarcada no RPA Phantom 4 da empresa DJI (DJI, 2016a); à direita observa-se uma ortoimagem produzida por um conjunto de fotografias obtidas pelo mesmo sensor e processadas no software Pix4D Mapper PRO (PIX4D SA, 2017a). Os pontos homólogos são identificados através de uma função de distância entre vetores descritores das duas imagens, sendo que aqui foram utilizados os algoritmos SURF e RANSAC (SILVA FILHO, 2016).

Figura 2.1 – Exemplo de reconhecimento de pontos homólogos



Fonte: Produzido pelo autor.

2.2. Sistema Satelital de Navegação Global (GNSS)

Os métodos de pesquisas utilizando os sistemas de posicionamento por satélites se tornaram bastante difundidos na comunidade científica, substituindo, em muitos casos, os métodos convencionais. Este processo se iniciou com os primeiros resultados obtidos com o *NAVSTAR Global Positioning System (GPS)*, um sistema americano. Durante muito tempo o sistema Russo denominado GLONASS foi o único que competiu como o sistema americano (MORI, 2013).

Os europeus criaram o seu próprio sistema de navegação por satélite no final da década de 90, denominado de Galileo. Espera-se que este sistema esteja operacional em 2020. Esta iniciativa trouxe consequências positivas para os usuários, pois a partir de maio de 2000, os detentores do GPS anunciaram a desativação da disponibilidade seletiva *(S/A – Selective Availability)*, que deteriorava a acurácia do sistema NAVSTAR GPS (MONICO, 2013).

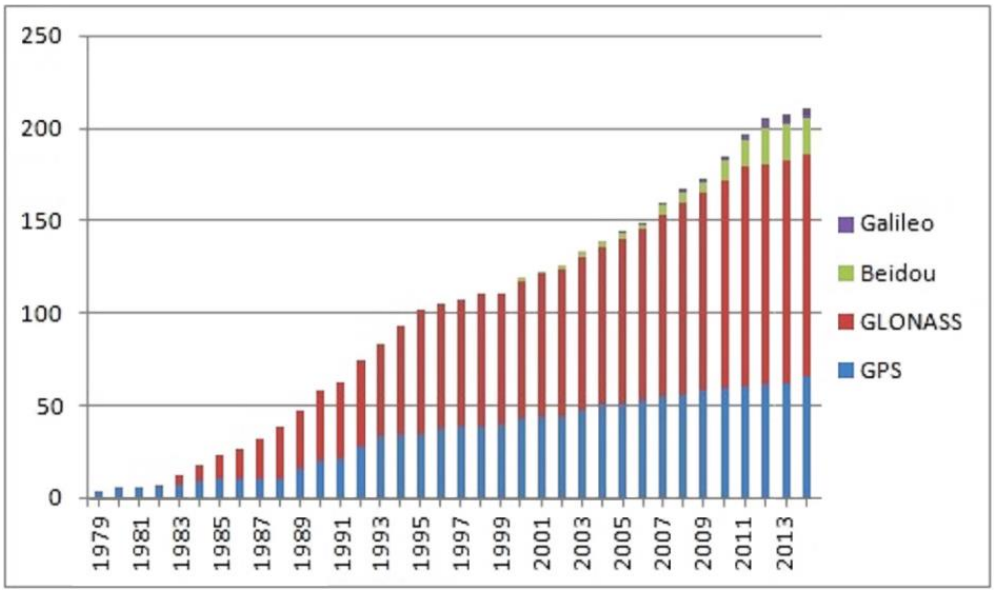
Os satélites do sistema GPS vem sofrendo atualizações ao longo do tempo, incluindo o acréscimo da portadora L5, além das já transmitidas L1 e L2. Com os atuais avanços do sistema americano, os receptores mais simples poderão alcançar acurácia da ordem de 1 metro, pois a maioria dos efeitos da Ionosfera poderá ser corrigida (SYSTEMS, 2010; EMAER, 2012; MONICO, 2013).

Em 2006 foi anunciado que a China terá seu próprio sistema de navegação por satélite. Este sistema é denominado de Beidou/Compass, que teve o seu *Interface Control Document* (ICD) disponibilizado publicamente em dezembro de 2012 (MONICO, 2013).

Atualmente a maioria dos receptores buscam ter a capacidade de rastrear os satélites dos sistemas GPS, GLONASS, Galileo e Compass. Eles são denominados receptores *Global Navigation Satellite System* (GNSS), que podem também rastrear e receber correções dos *Satellite Base Augmentation*

Systems (SBAS). A Figura 2.2 mostra o número de satélites lançados com a finalidade de utilização para sistemas de navegação global até o ano de 2014.

Figura 2.2 – Número de satélites GNSS lançados entre 1978 a 2014.



Fonte: Wikipedia (2018).

O Brasil pretende possuir seu próprio sistema de navegação por satélite, com uma frota de satélites prevista no Programa Estratégico de Sistemas Espaciais (PESE), denominado de Attícora, que ainda não possuí data prevista do lançamento dos primeiros satélites (EMAER, 2012; LEMOS JUNIOR, 2014). O PESE está de acordo com a legislação aprovada pela Estratégia Nacional de Defesa (END) e pela Política Nacional de Defesa (PND), que estabeleceu os objetivos a serem alcançados pelo Brasil e atribui também a Força Aérea Brasileira o desenvolvimento de projetos Aeroespaciais (BRASIL, 2012).

Ter a navegação, o posicionamento e o tempo das aeronaves tripuladas e dos ARP, constitui uma vulnerabilidade crítica, pois os acessos aos sistemas de navegação global podem ser negados a qualquer instante, por qualquer provedor destes sistemas. Torna-se claro que essa é uma fragilidade a ter sua solução priorizada ou mitigada através de sistemas de navegação que

possibilitem a continuidade da navegação, caso alguns destes sistemas se tornarem inacessíveis (MEDINA, 2015).

2.3. Sistema de Navegação Inercial (INS)

A inércia é a tendência de um corpo em permanecer em repouso ou em movimento retilíneo uniforme desde que não haja nenhuma influência de forças ou torques externos. O sistema de navegação inercial, do inglês *Inertial Navigation System* (INS) mede estes movimentos lineares e angulares. Os sensores utilizados na construção do INS podem ser acelerômetros e giroscópios (MORI, 2013).

Os giroscópios medem as variações de atitude ou a taxa de rotação em relação a um espaço inercial. Na prática, os acelerômetros não são capazes de separar a aceleração total do objeto da aceleração devida à presença do campo gravitacional. Assim as medidas fornecidas pelos acelerômetros, quando próximas a um corpo de grande massa como a Terra, precisam ser combinadas com o conhecimento do campo gravitacional para se determinar a aceleração do objeto com respeito ao espaço inercial (TITTERTON; WESTON, 2004).

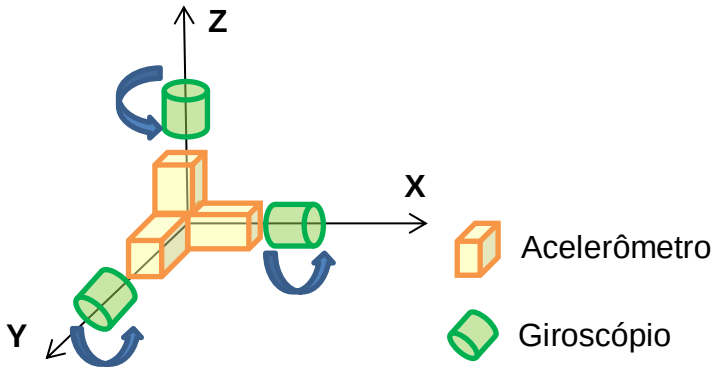
Assim a navegação é feita combinando as medições da rotação do objeto e a força específica, sendo possível calcular as estimativas da orientação, velocidade e posição em relação a um sistema de referência. Sensores inerciais juntamente com o modelo de gravidade e as condições iniciais do objeto constituem a entrada de um sistema de navegação inercial (TITTERTON; WESTON, 2004).

O tamanho, a massa, o desempenho e o custo dos sensores inerciais variam devido a tecnologia de cada componente empregado. Normalmente os sensores de alto desempenho são maiores, mais robustos e bem mais caros. Atualmente os sensores inerciais estão focados na tecnologia, do inglês *Micro Electro Mechanical Systems* (MEMS) (MORI, 2013). Existem ainda os sensores

a laser e fibra ótica. O giroscópio denominado *Ring Laser Gyro* (RLG), possui alta precisão de medição mesmo quando exposto a velocidades angulares mais intensas (AMBRÓSIO, 2010).

Os acelerômetros usualmente medem a força específica ao longo de um único eixo e os giroscópios normalmente medem a velocidade angular em relação a um único eixo. Como mostrado na Figura 2.3, uma unidade de medição inercial, do inglês *Inertial Measurement Unit* (IMU), combina ou pode combinar vários acelerômetros e giroscópios. Assim na construção de um IMU usualmente são utilizados três acelerômetros e três giroscópios sendo um para cada eixo (GROVES, 2013).

Figura 2.3 – Sistema inercial com três acelerômetros e três giroscópios



Fonte: Adaptado Mori (2013).

Os erros provenientes dos giroscópios podem afetar diretamente a obtenção da atitude do objeto e também na eliminação dos efeitos da aceleração da gravidade nas medições do acelerômetro. Os erros nos acelerômetros afetam diretamente a estimativa de posição da Solução de Navegação (MORI, 2013).

Devido ao fato dos acelerômetros acumularem erros, decorrido algum tempo de navegação, o erro de posicionamento se torna grande. Esses erros são corrigidos usualmente pelos sistemas de posicionamento global. No entanto, estes sistemas são proprietários de países soberanos podem desabilita-los a

qualquer momento, estando ainda sujeitos a sabotagem por interferências maliciosas em seus sinais, conforme apresentado no item 2.4 a seguir.

2.4. Interferências maliciosas nos sinais de GNSS

O GNSS é um sistema de navegação por satélite que fornece informações de localização e tempo. Esse sistema atualmente suporta aplicativos críticos para usuários militares, civis e comerciais em todo o mundo e é acessível a qualquer operador usando um único receptor de GNSS. Atualmente, uma série de aplicativos são desenvolvidos e apoiados principalmente por esta tecnologia, tornando-se altamente dependentes desses sistemas de navegação. Eles são chamados de sistemas dependentes do GNSS, que incluem diferentes sistemas de rastreamento, criptografia e navegação (FARIA; SILVESTRE; CORREIA, 2016).

As aplicações GNSS, como o tempo de transferência, o cronograma do sinal de trânsito e a sincronização das estações base do telefone celular, usam a infraestrutura do GNSS barata e altamente precisa. No entanto, embora seja essencialmente dependente dos sinais do GNSS, apenas alguns deles apresentam algum tipo de contramedida aos ataques eletromagnéticos (bloqueio), mostrando um alto nível de vulnerabilidade aos ataques intencionais (FARIA; SILVESTRE; CORREIA, 2016).

Considerando os fundamentos que regem a operação de tal sistema, é relativamente simples interferir nos sinais do GNSS e por sua vez na localização de receptores militares ou civis. A eficácia da interferência, dependendo da distância e da potência do equipamento, também é de cálculo bastante simples, tornando o dimensionamento de um sistema de interferência (do inglês *Jamming)* uma tarefa fácil e acessível para a maioria da população (FARIA; SILVESTRE; CORREIA, 2016).

Em geral, os interferentes podem ser usados contra quaisquer sinais de comunicação por rádio, sejam sinais GPS, sinais Wi-Fi e / ou comunicação

entre celulares. Apesar de serem ilegais em diferentes países, projetos que ensinam a construir este tipo de interferentes são facilmente encontrados na rede mundial de computadores. Disso ressalta a vulnerabilidade dos dispositivos "dependentes do GNSS" (FARIA; SILVESTRE; CORREIA, 2016).

Em um passado recente, a vulnerabilidade do GPS foi demonstrada em diferentes episódios militares. Em 2010, 2011 e 2012, quando a Coréia do Sul sofreu muitos bloqueios originados da Coréia do Norte. Como contramedida a tal interferência, foi utilizada uma integração de GNSS com Navegação de longo alcance aprimorada (eLoran) (CHO et al., 2013; LEE, 2013).

Outro incidente foi demonstrado em dezembro de 2011, quando o Irã surpreendeu o mundo impondo um pouso controlado a um RPAS americano RQ-170 Sentinel. Supõe-se que o link de comunicação entre a estação de controle e a aeronave estava preso e, em seguida, o receptor de GNSS foi submetido a falsificação do sinal do GNSS (GHOLIZADEH, 2011).

Por isso é necessário desenvolver sistemas autônomos redundantes, a fim de garantir o posicionamento para a navegação dos RPAS, que não possuem tripulação a bordo, que poderiam identificar estas interferências. Assim para viabilizar a navegação utilizando câmaras embarcadas é necessário possuir imagens ortoretificadas e MDS da área a ser sobrevoada.

Além da possibilidade da utilização das imagens de satélites, atualmente existem softwares de fotogrametria, que geram imagens ortoretificadas e MDT. Esses produtos podem ser utilizados como imagens de referência do terreno para viabilizar a navegação por imagens. A seguir algumas delas serão apresentados.

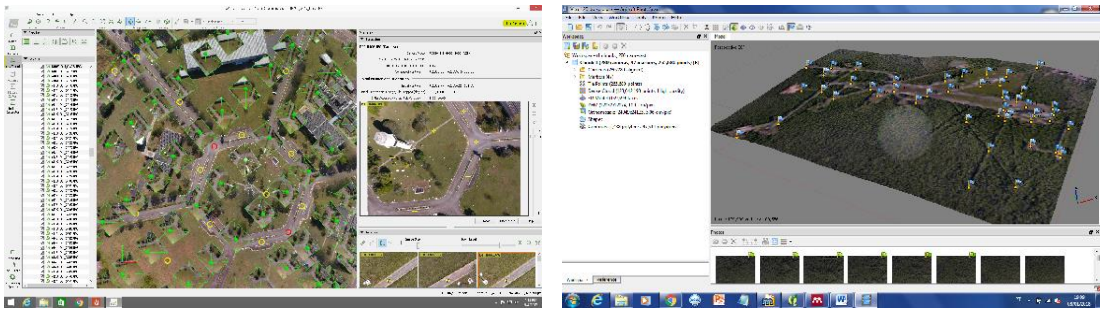
2.4.1. Programas de Processamento de imagens de Fotogrametria

A fotogrametria digital atualmente dispõe de programas que entre outras funcionalidades permite gerar de forma automática nuvens de pontos, Modelos

Digitais de Superfície (MDS), Modelos Digitais de Terreno e Ortoimagens, sem a necessidade de visualização estereoscópica para a restituição das feições do terreno. Nestes programas, a determinação das feições no terreno é realizada de forma automatizada. Atualmente destacam-se os programas Pix4D Mapper Pro Figura 2.4a e Agisoft PhotoScan Professional Figura 2.4b (ALVES JÚNIOR; CÔRTES; FERREIRA, 2014; BENASSI et al., 2017).

Os programas de processamento de imagem baseiam-se em encontrar automaticamente milhares de pontos comuns entre as imagens com sobreposição, utilizando algoritmos de reconhecimento de padrões, conforme descritos no Item 2.1. Cada ponto característico encontrado em uma imagem é chamado de ponto chave, do inglês *Keypoint*. Quando dois pontos chaves em duas imagens diferentes correspondem é possível gerar um ponto 3D (PIX4D SA, 2017b).

Figura 2.4 – Programas: a) Pix4D Mapper Pro e b) Agisoft PhotoScan.



(a) (b)

Fonte: Produzido pelo autor.

Quando há uma alta sobreposição entre as imagens, a área comum capturada é maior e mais pontos chave podem ser combinados. Quanto mais pontos chave existerem, mais precisamente os pontos podem ser computados a partir de diversas fotos. Portanto, a regra principal é manter uma alta sobreposição entre as imagens para obter uma melhor precisão (PIX4D SA, 2017b).

Diversas pesquisas têm sido realizadas com a finalidade de se obter uma superposição ótima, com o menor número possível de pontos de controle e

buscando a melhor exatidão possível. Quanto maior o número de fotos maior será o tempo de processamento e não obrigatoriamente haverá uma melhoria na qualidade da ortoimagem gerada. Igualmente quanto maior o número de pontos de controle de campo mais demorada e onerosa será a confecção da ortoimagem (BENASSI et al., 2017).

Outro aspecto importante estudado é o número de pontos de controle de campo necessário para a realização do ajustamento do bloco aerofotogramétrico, para a obtenção da acurácia exigida para este tipo de aerolevantamento, utilizando como referência o Padrão de Exatidão Cartográfica (PEC) (NOGUEIRA; ROBERTO, 2017).

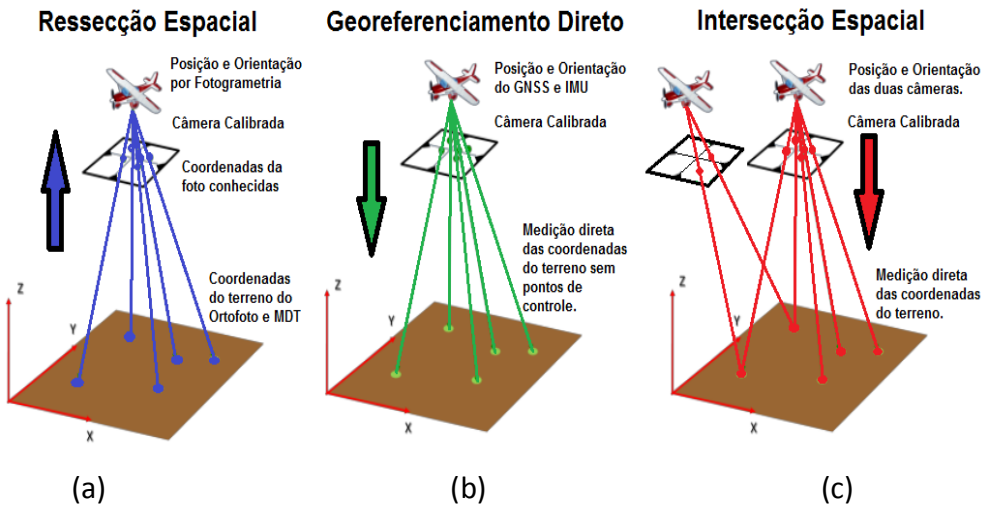
2.4.2. Navegação por imagem utilizando Fotogrametria

Uma das técnicas para se navegar por imagem, conhecida como Reconhecimento de Padrões, faz uso de ortoimagens e MDS, representando o terreno e fotografias aéreas obtidas no momento do voo, a fim de realizar a estimação de posição. Assim, conhecendo as coordenadas do terreno e seus homólogos na fotografia, é possível calcular a posição e orientação do Centro Perspectivo da câmara embarcada. Este processo é conhecido na fotogrametria como “Ressecção Espacial”, estando ilustrado na Figura 2.5a e referido na bibliografia (BRITO; COELHO, 2007; BRAGA et al., 2016; SILVA FILHO, 2016).

O Georeferenciamento Direto é a medição direta da posição e orientação do sensor de mapeamento aéreo, de uma câmara ou scanner a laser, de modo que cada pixel ou intervalo possa ser georreferenciado sem a necessidade de informações do solo coletadas no campo. Isto é obtido atualmente com o uso de dados coletados do GNSS e INS, que estão diretamente conectados ao sensor de mapeamento, a fim de produzir medidas acuradas da posição e orientação do sensor, exatamente no momento de tomada da fotografia, conforme ilustrado na Figura 2.5b, (ROBERTO, 2017).

Quando se conhece as coordenadas e as atitudes de fotografias adjacentes é possível calcular as coordenadas das feições no terreno a partir das coordenadas no sistema de foto da mesma feição em duas fotografias adjacentes. Este processo é denominado de Intersecção Espacial sendo utilizado para realizar a restituição do terreno gerando as ortoimagens e MDS, conforme apresentado na Figura 2.5c, (BRITO; COELHO, 2007).

Figura 2.5 – Georeferênciamento Direto, Ressecção e Intersecção Espacial



Fonte: Adaptado de Mian et al. (2015).

Quanto mais adequado for o modelo geométrico utilizado para a determinação das coordenadas do Centro perspectivo da Câmara, melhor será a acurácia de seu posicionamento no espaço. O modelo que representa a geometria de uma imagem gerada através de uma câmara é o modelo projetivo, que define as equações de colinearidade estudado na fotogrametria (WOLF; DEWITT; WILKINSON, 2014).

A ressecção espacial consiste no cálculo da posição e atitude de uma câmara no espaço, no momento da obtenção da fotografia. Para isso, resolve-se um sistema de equação, montando a partir das equações de colinearidade, sendo necessário o conhecimento das coordenadas no espaço-objeto e no espaço-imagem. Ao se resolver o sistema de equações é obtido os 6 parâmetros originais do modelo, considerando que a distância focal é conhecida. Esses

parâmetros são as coordenadas do centro perspectivo da câmara *(Xo, Yo, Zo)* e os ângulos de rotação em torno dos eixos *X, Y* e *Z*, respectivamente as atitudes (*ω, ϕ, K*). Existe ainda a escala que por definição é utilizado a distância focal (*f*) (BRITO; COELHO, 2007).

Os parâmetros intrínsecos da câmara são obtidos através de sua calibração. Esse procedimento fornece os seguintes parâmetros: a distância focal calibrada, as coordenadas ajustadas do centro perceptivo, as coordenadas das marcas fiduciais, os parâmetros de distorções radiais e tangenciais. Essas informações são essenciais para melhorar a exatidão das medidas realizadas na fotografia gerada pela câmara calibrada (MCGLONE; LEE, 2013).

Para a resolução das equações de colinearidade é necessário conhecer pelo menos as coordenadas de terreno de 3 pontos de controle não colineares e bem definidos na imagem e um valor inicial aproximado dos parâmetros (ANDRADE, 1998). Neste trabalho, para a resolução do sistema de equações, foi utilizada a Aproximação por Série de Taylor, para a linearização da função e cálculo das incógnitas do sistema, por ser um modelo consagrado na fotogrametria (MUNEM; FOULIS, 1982).

Se houver um número maior de pontos é possível calcular a precisão utilizando o Método dos Mínimos Quadrados (GEMAEL, 1994). Por se dispor de um número de equações maior do que o número de incógnitas, pois para cada ponto há duas equações de colinearidade: uma para a abcissa e outra para a ordenada (WOLF; DEWITT; WILKINSON, 2014). Assim, com 4 pontos obtêm-se 8 equações para resolver 6 incógnitas. Para uma maior confiabilidade na estimativa do erro é importante dispor de um número maior de pontos para melhorar a estimativa dos parâmetros. Neste trabalho foram adotados 6 pontos, que totalizam 12 equações (LIMA; BRITO, 2006).

Outro fator bastante importante é a distorção que as câmaras causam nas imagens, pois cada câmara possui distorções intrínsecas. As distorções são causadas pelo sistema óptico, e por isso é necessário conhece-las (MIKHAIL;

BETHEL; MCGLONE, 2001). Por isso foi realizada uma calibração da câmara num campo de calibração de laboratório e de campo, a fim de corrigir os erros sistemáticos das imagens geradas pela mesma.

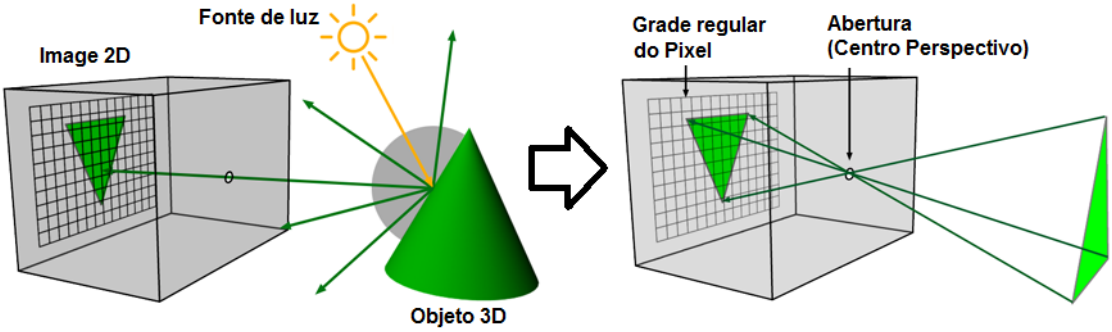
Conhecendo os parâmetros intrínsecos da câmara, os desvios da imagem podem ser corrigidos, aumentando assim a acurácia das coordenadas obtidas por processamento de imagem. Outro fator que desperta grande interesse é a ortorretificação de imagens, que possibilita a transformação de imagens em perspectiva cônica, obtidas pelo método fotográfico, em imagens ortogonais; ou seja, os feixes perspectivos que convergem para o centro perspectivo tornam-se paralelos tendo neste caso o centro perspectivo no infinito (BRITO; COELHO, 2007).

Através do Modelo Digital de Superfície podem ser corrigidas as deformações provenientes das variações de altitude do terreno, que acarretam variações na escala e o deslocamento da posição das feições devido à paralaxe. A imagem pode então ser retificada, tornando os feixes perspectivos paralelos e eliminando os problemas de diferença da paralaxe. Assim o usuário pode realizar medidas diretamente na ortoimagem, já que esta representa o terreno em escala uniforme (ANDRADE, 1998).

2.5. Princípios de Fotografia e Imagem

O dispositivo mais simples e primitivo que desempenha as funções de uma lente é um pequeno orifício que, teoricamente, permite que um único raio de cada ponto do objeto passe no mesmo. O pequeno orifício da câmara “pinhole”, apresentado na Figura 2.6, produz uma imagem invertida do objeto. A imagem está teoricamente em foco, independentemente da distância entre o orifício e o plano de imagem dentro da câmara (WOLF; DEWITT; WILKINSON, 2014).

Figura 2.6 – Câmara pinhole.

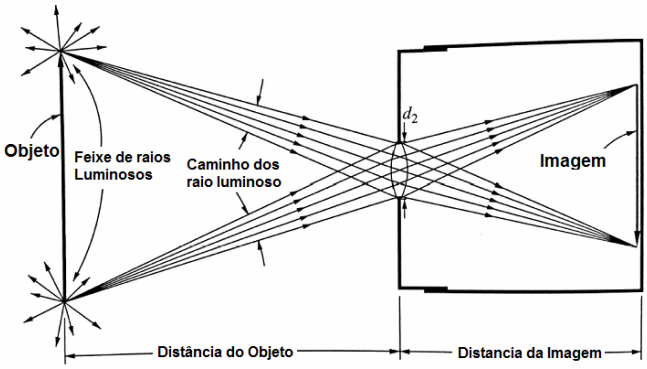


Fonte: Adaptado de Scratchapixel (2018).

Os pequenos orifícios permitem que pouca luz passe pelo mesmo, no entanto, isso não é adequado para os trabalhos de fotogrametria. Para fins práticos, este orifício é substituído por uma abertura maior e no lugar do orifício é colocada uma lente de vidro. A sua principal função é reunir raios de luz do ponto do objeto e levá-los a focar numa certa distância no lado oposto da lente Figura 2.7. Uma lente realiza esta função através do princípio da refração (WOLF; DEWITT; WILKINSON, 2014).

A vantagem de uma lente sobre um orifício é o aumento da quantidade de luz que pode passar. Uma lente reúne um feixe de raios de cada ponto do objeto, em vez de apenas um único raio (WOLF; DEWITT; WILKINSON, 2014), conforme ilustrado na Figura 2.7.

Figura 2.7 – Formação da imagem em uma câmara de lente simples.



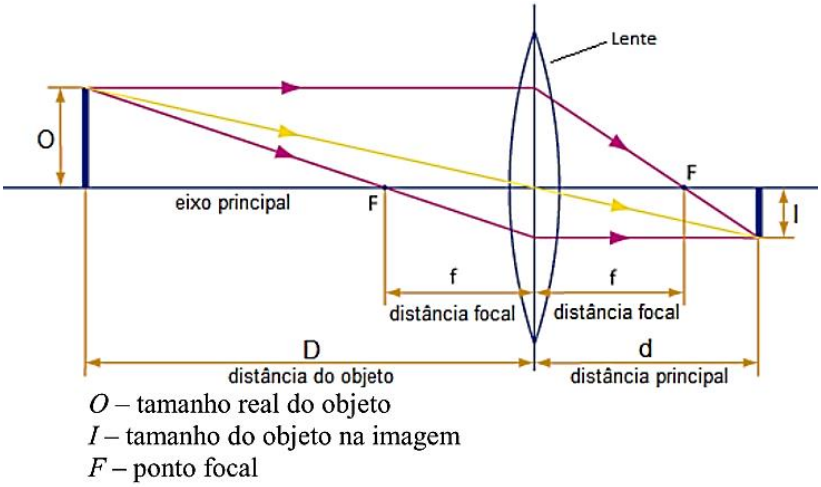
Fonte: Wolf, Dewitt e Wilkinson (2014).

Por isso numa câmara real, utilizam-se lentes no centro perspectivo e os raios de luz passam a obedecer à Equação 2.1 (ANDRADE, 1998), onde *f* é a distância focal e *D* é a distância ao objeto. A medida do centro de perspectiva até o plano da imagem através do eixo óptico, denotada por d, é chamada de distância principal. Esses parâmetros são ilustrados na Figura 2.8.

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{D} + \frac{1}{d} \qquad 2.1$$

Nas câmaras com lente em vez das distâncias entre o objeto e as distâncias da imagem serem irrestritas, como ocorre na câmara do Pinhole, essas distâncias são regidas pela equação das lentes. Para satisfazer esta equação, a lente da câmara deve focar para cada distância de cada objeto diferente, ajustando a distância da imagem. Quando a distância do objeto se aproxima do infinito, como ocorre nos objetos da fotogrametria, que estão a grandes distâncias da câmara, o termo (*1/D*) na equação 2.1, aproxima-se de zero e a distância principal (*d*) é então igual a distância focal (*f*). Como na fotografia aérea, a distância dos objetos (*D*) é muito grande em relação à distância da imagem, usualmente as câmaras aéreas são fabricadas com foco no infinito (WOLF; DEWITT; WILKINSON, 2014).

Figura 2.8 – Eixo Óptico, distância focal e plano de foco no infinito da lente.



Fonte: Roberto (2017).

2.6. Fotogrametria

A Fotogrametria é uma área do Sensoriamento Remoto que objetiva realizar medidas através de fotografias, sendo seu objetivo principal a reconstrução do espaço tridimensional (espaço-objeto), a partir de imagens bidimensionais (espaço-imagem) (BRITO; COELHO, 2007).

Na fotogrametria digital, o sistema de imagem é convertido para o sistema de coordenadas fiduciais, com a finalidade de correlacionar o espaço-imagem ao espaço-objeto, que é representado usualmente em um sistema de coordenadas cartográficas. Este procedimento será apresentado em detalhes no Item 3.4.1 (MCGLONE; LEE, 2013).

A Transformação Afim pode ser usada para transformar o sistema de coordenadas de imagens digitais (linhas, colunas), para um sistema de coordenadas de marcas fiduciais (x, y). O modelo matemático de transformação projetiva liga o sistema de coordenadas de marcas fiduciais ao sistema de coordenadas do terreno (E, N, H). Assim, através de uma função composta pela Transformação Afim e a Transformação Projetiva, o sistema de imagem é ligados ao sistema de coordenadas cartográficas, que representa o terreno (LIMA et al., 2017).

A orientação da imagem em relação ao sistema cartográfico é designada de Orientação Exterior. Através dela são obtidas as coordenadas e atitudes do Centro perspectivo da câmara no sistema de coordenadas de terreno a partir de pontos bem definidos na imagem digital e de suas respectivas coordenadas de terreno (ANDRADE, 1998).

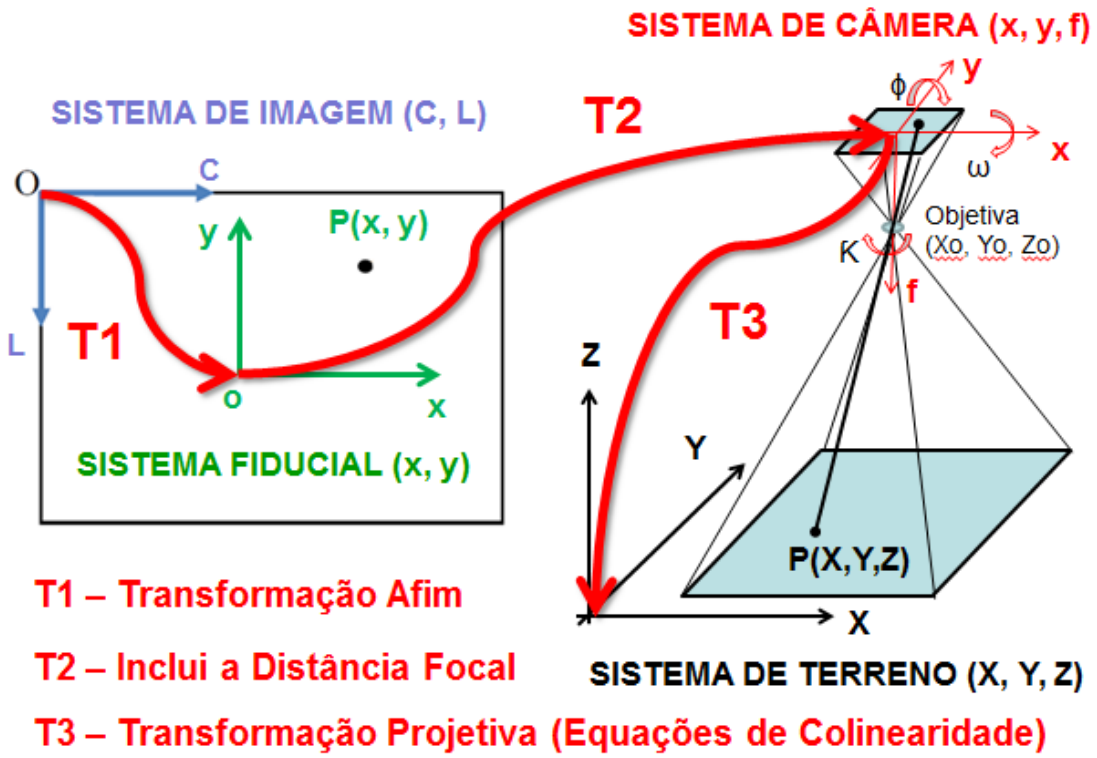
2.7. Sistemas de Coordenadas

A Fotogrametria digital utiliza transformações de sistemas de coordenadas, sendo que cada transformação entre sistemas necessita de um modelo

matemático que representa de forma matemática a conversão entre um sistema de coordenadas e outro (ANDRADE, 1998).

Na resolução do sistema de equações são obtidos os parâmetros de conversão entre os sistemas de coordenadas. No entanto, para se converter o sistema imagem (L, C) num sistema de coordenadas de terreno (E, N, H) são necessárias sucessivas transformações, conforme pode ser visualizado na Figura 2.9, (ROBERTO et al., 2017).

Figura 2.9 – Transformação de sistemas de coordenadas.



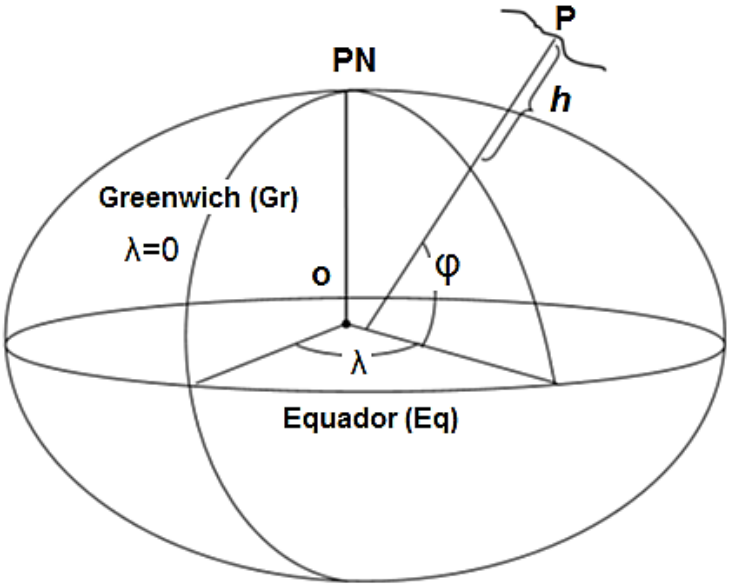
Fonte: Produzido pelo autor.

Nos sistemas analógicos eram utilizadas as orientações: interior, relativa e absoluta. Nos sistemas digitais estas operações são feitas a partir de modelos matemáticos advindos dos sistemas analógicos, sendo os parâmetros de orientação calculados analiticamente, com suporte computacional e as orientações feitas através de funções compostas (ANDRADE, 1998).

2.7.1. Sistemas de Coordenadas Geodésicas

No referencial geodésico, a latitude (φ) é o ângulo formado entre o Equador e o ponto no terreno (P), variando de 0º a 90º ao Norte e de 0º a -90º ao Sul; a longitude λ é o ângulo formado entre o meridiano de Greenwich e o ponto no terreno (P), variando de 0º a 180º graus a Este e de 0º a -180º a Oeste, a terceira coordenada conhecida como altitude geométrica (h) é a distância contada sobre a normal do ponto (P), a partir deste ponto até a superfície do elipsóide (SANTOS, 2013), conforme pode ser visto na Figura 2.10.

Figura 2.10 – Referencial geodésico.



Fonte: Adaptada de Santos (2013).

Estas coordenadas usam como referência um elipsóide de revolução, cujos parâmetros que o definem é denominado “Datum do sistema geodésico”. Na engenharia, a altitude geométrica não é utilizada de forma direta, por não representar uma grandeza física, assim usualmente é utilizada a altitude ortométrica (H), que é a distância na vertical do lugar entre o ponto (P) e a superfície equipotencial da gravidade no nível médio dos mares, denominado de “Geóide de Referência” (SANTOS, 2013).

2.7.2. Sistemas de Coordenadas de Projeções Cartográficas

Há vários sistemas de projeção cartográficas que utilizam superfícies de projeções, como o plano, o cone ou o cilindro para projetar as coordenadas geográficas da superfície de referência, tendo a finalidade de possibilitar a obtenção de coordenadas em um sistema cartesiano a duas dimensões (BAKKER, 1965).

É importante ressaltar que ao projetar a superfície terrestre na superfície de referência para gerar mapas cartográficos, esses nunca estarão isentos de distorções. As projeções cartográficas são desenvolvidas para minimizar as imperfeições dos mapas e proporcionar maior rigor científico à cartografia. Dentre as principais projeções cartográficas destacam-se: as planas, as cônicas e as cilíndricas (BAKKER, 1965).

Um dos principais sistemas de projeção utilizado é o Universal Transverso de Mercator (UTM), que usualmente representa suas coordenadas com Este (E), Norte (N) e altitude Ortométrica (H). Dependendo dos requisitos do projeto e de suas aplicações podem ser utilizados outros sistemas plano retangulares com o topocêntrico local ou mesmo os Local Transverso de Mercator (LTM). Para mais informações vide (BAKKER, 1965).

2.7.3. Sistemas de Coordenadas de Câmara

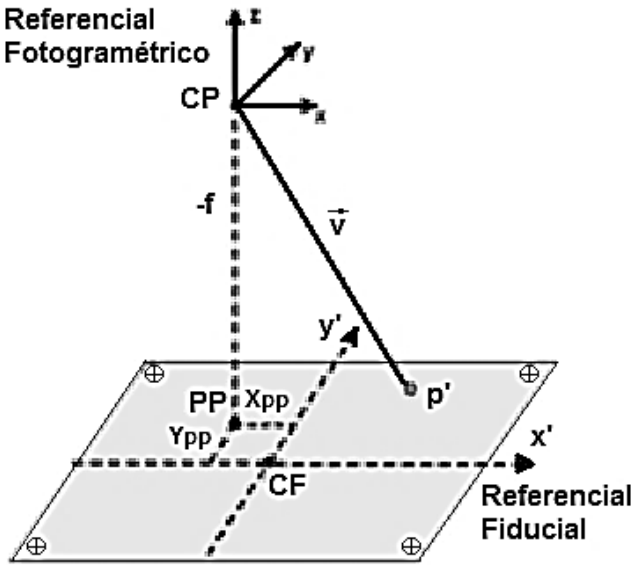
O referencial fotogramétrico, ou fotográfico, é um sistema cartesiano tridimensional, cuja orientação dos eixos CPx e CPy é paralela, respectivamente, aos eixos CFx' e CFy' do sistema referencial fiducial. Vide Figura 2.11. O eixo CPz coincide com o eixo óptico da câmara, cujo sentido é tal que torna o sistema dextrogiro (SANTOS, 2013).

A origem do sistema fotogramétrico é o centro de projeção do sistema de lentes, ou seja, o ponto nodal anterior, caso se esteja trabalhando com o diapositivo ou o ponto nodal posterior se for utilizado o negativo. Como a

coordenada z é constante e igual à distância focal da câmara, utiliza-se um referencial plano cuja origem é o ponto principal (pp) (SANTOS, 2013).

Na **Erro! Fonte de referência não encontrada.**, (CP) é o Centro Perspectivo da câmara, considerado para fins de simplificação como uma abstração pontual do sistema de lentes; f é a distância focal da câmara; (PP) é o Ponto Principal definido pelo ponto de intersecção entre a projeção ortogonal do CP da câmara e o plano fotográfico e (v) é o vetor posição no espaço imagem (SANTOS, 2013).

Figura 2.11 – Relação entre o Sistema Fotogramétrico e Fiducial.



Fonte: Adaptada de Santos (2013).

Vale ressaltar que uma câmara possui um conjunto de parâmetros de orientação interior, a saber: a distância focal da câmara (f), o ponto principal (pp), os coeficientes de distorção radial simétrica (K_1, K_2, K_3) e os coeficientes de distorção descentrada (P_1, P_2), cujas componentes são divididas em abcissas e ordenadas e serão detalhados nos Itens 2.9.2 e 2.9.3.

Os coeficientes de distorção das lentes são devidos às imperfeições na construção de lentes perfeitamente côncavas e convexas e a imprecisão no alinhamento dos eixos ópticos no momento da formação do sistema de lentes.

A Equação que modela estas distorções e interliga os pontos do sistema de terreno com o sistema de marcas fiduciais é apresentada no Item 2.9.4.

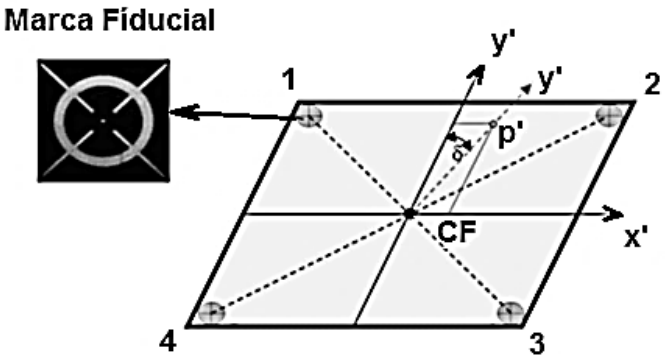
2.7.4. Sistemas de Coordenadas Fiduciais ou de Foto

O sistema de referencial fiducial é cartesiano bidimensional, construído a partir da intersecção das retas que ligam as marcas fiduciais opostas de uma fotografia, usualmente tomadas com uma câmara métrica convencional, vide Figura 2.12. Essa intersecção define o centro fiducial da fotografia (CF). ou seja, a origem do sistema referencial fiducial (SANTOS, 2013).

As marcas fiduciais são impressas pela câmara métrica convencional no instante de tomada da fotografia. Nas câmaras digitais não-métricas as marcas fiduciais não são impressas. Neste caso podem-se utilizar como marcas fiduciais os pixels dos cantos superior, inferior, esquerdo e direito da imagem.

As câmaras métricas possuem de 4 a 8 marcas fiduciais normalmente, através dos quais se materializa o sistema fiducial no caso analógico. Nas câmaras digitais não-métricas pode-se utilizar o tamanho do sensor para materializar este sistema, possibilitando a ligação entre os sistemas de imagem e o sistema fiducial (SANTOS, 2013).

Figura 2.12 – Sistema de Coordenadas Fiduciais.



Fonte: Adaptada de Santos (2013).

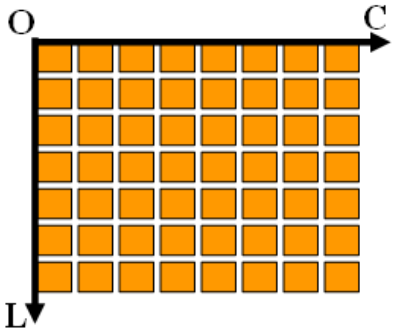
Na Figura 2.12 (CF) é a origem do sistema referencial fiducial; (x') é a orientação no sentido de voo positivamente; (y') é orientada 90º graus anti-

horário em relação ao eixo x'; (p') é o ponto imagem com coordenadas no sistema referencial fiducial; e δ é o ângulo de não ortogonalidade entre os eixos x' e y'.

2.7.5. Sistemas de Coordenadas de Imagem

Uma imagem pode ser compreendida como uma matriz, onde há linhas e colunas, a interseção entre elas é chamada de "pixel", ou unidade elementar da imagem. Neste caso a matriz se comporta como um sistema cartesiano e o "pixel" como um ponto, associado a valores de tons de cinza. Cada pixel possui um par de coordenadas (Colunas, Linhas) e um valor inteiro associado a uma cor ou tonalidade de cinza, ou seja, $Pixel = F(C, L)$ (JANSEN, 2009) e (BRITO; COELHO, 2007). O sistema referencial digital é usualmente definido conforme apresentado na Figura 2.13.

Figura 2.13 – Sistema de coordenadas de Imagem.

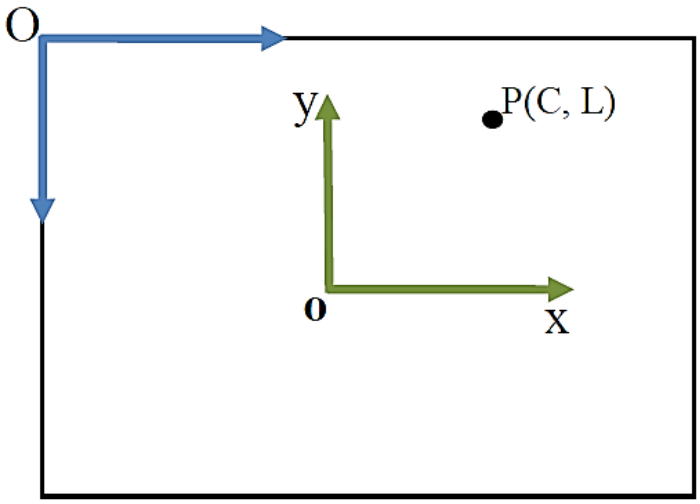


Fonte: Adaptada de Santos (2013).

Na Figura 2.13 (O) é a Origem do sistema, localizado no canto superior esquerdo; (OC) é a direção horizontal, com sentido positivo para a direita; e (OL) é orientado 90º graus em relação ao eixo OC, com sentido positivo para baixo (sistema levógiro).

Vale ressaltar que os sistemas de coordenadas de imagem e de marca fiducial possuem sentido e orientação distintos, conforme apresentado na Figura 2.14. Para a conversão do sistema fiducial num sistema de imagem e vice-versa pode-se utilizar a transformação afim, que será apresentada no Item 2.8.1.

Figura 2.14 – Relação entre o sistema de imagem e o fiducial.



Fonte: Adaptada de Santos (2013).

Para se realizar os cálculos das equações de colinearidade, descritas no Item 2.9.4, as coordenadas do sistema imagem devem ser transformadas em coordenadas fiduciais, nas mesmas unidades de medida.

2.8. Transformações Geométricas

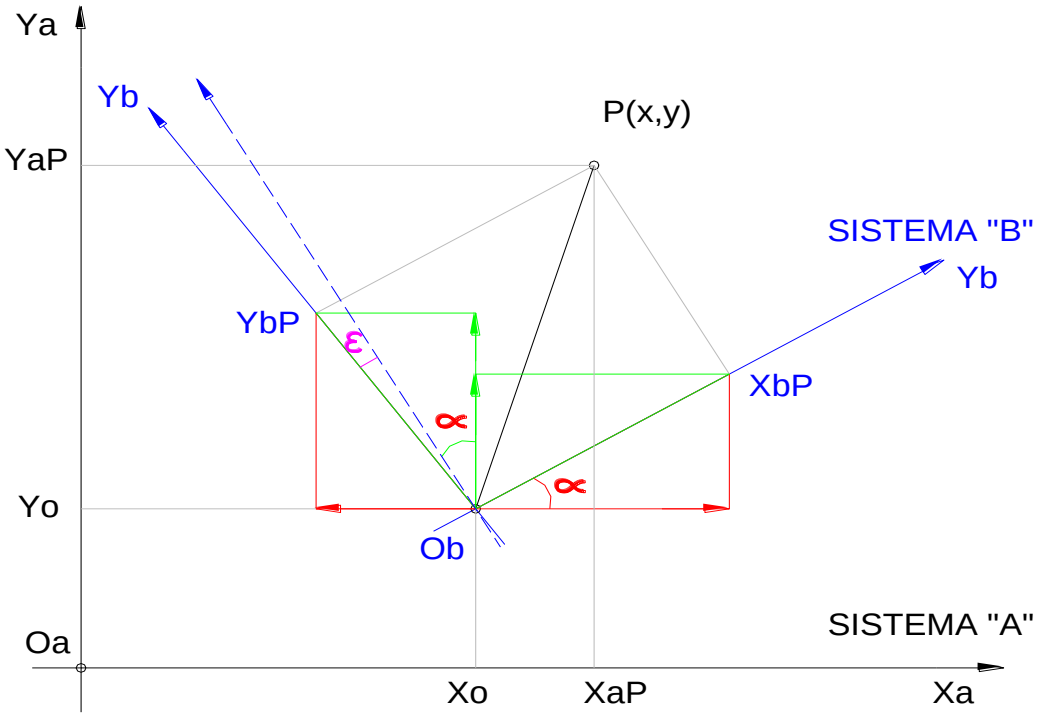
As transformações geométricas transformam as coordenadas de um sistema em outro e vice versa. Para tal, é necessário conhecer os modelos matemáticos de transformação entre os sistemas, além das coordenadas em ambos os sistemas. De posse destes valores, podem-se determinar os parâmetros de transformação entre eles (LIMA; BRITO, 2006)

Uma vez determinados os parâmetros de transformação entre os sistemas, através de um determinado modelo matemático, utiliza-se este modelo para converter qualquer outra coordenada do sistema de origem para o sistema de destino. Neste trabalho, dois tipos de transformações geométricas são utilizados para a transformação de coordenadas entre sistemas, visando o cálculo do centro perspectivo e as atitudes da câmara no espaço, a saber: transformação Afim e Transformação Projetiva (ANDRADE, 1998).

2.8.1. Transformação Afim

Esta transformação é processada em duas dimensões, sendo o caso mais completo o das transformações do grupo Afim, possuindo 6 parâmetros, como mostrado na Figura 2.15 e descrito a seguir.

Figura 2.15 – Transformação entre sistemas Afim Caso Geral.



Fonte: Produzido pelo autor.

Conhecendo os parâmetros de transformação entre o sistema “A” e “B”, pode-se calcular a coordenada de um ponto do sistema “B” no sistema “A”, utilizando para isso as Equações 2.2 e 2.3, a saber:

$$X(X_0, Y_0, Cx, Cy, \alpha, \varepsilon) = \Delta X + Cx.x.\cos\alpha + Cy.y.(\sin\alpha + \sin\varepsilon.\cos\alpha) \qquad 2.2$$

$$Y(X_0, Y_0, Cx, Cy, \alpha, \varepsilon) = \Delta Y - Cx.x.\sin\alpha + Cy.y.(\cos\alpha - \sin\varepsilon.\cos\alpha) \qquad 2.3$$

Onde: (α) é a rotação entre os sistemas; (ε) é a rotação entre eixos para torná-los ortogonais; (Δx) e (Δy) são as duas translações uma para cada eixo; e (Cx) e (Cy) são os dois fatores de escala, sendo um para cada eixo (ANDRADE, 1998).

Para a determinação dos parâmetros das Equações 2.2 e 2.3, que não são lineares, utilizam-se pontos de controle conhecidos nos dois sistemas de coordenadas e monta-se um sistema de equações a partir daquelas apresentadas. Para calcular tais parâmetros, utiliza-se o método de resolução de sistemas de equações descrito no Item 2.10.

$$X(a_0, a_1, a_2, b_0, b_1, b_2) = a_0 + a_1.x + a_2.y \qquad 2.4$$

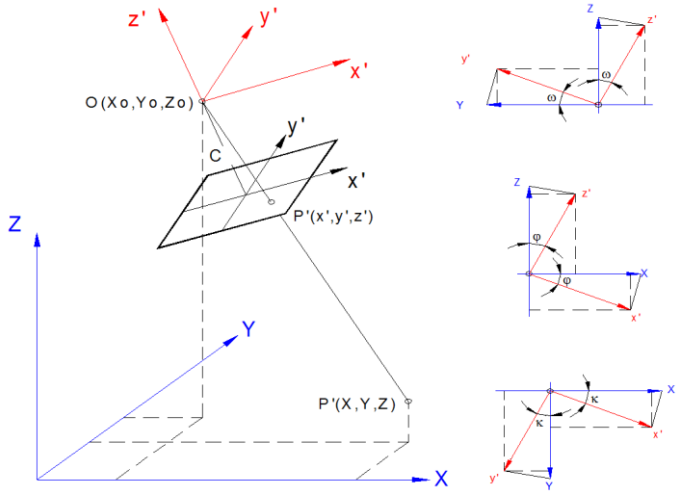
$$Y(a_0, a_1, a_2, b_0, b_1, b_2) = b_0 + b_1.x + b_2.y \qquad 2.5$$

O modelo matemático para a transformação Afim Caso Geral pode ser simplificado, tornando o modelo linear, visando facilitar a sua implementação, de acordo com a teoria apresentada no Item 2.10. Neste caso, os parâmetros são agrupados, conforme pode ser visto nas equações 2.4 e 2.5. Tal estratégia é adotada quando não se deseja saber os parâmetros diretamente, sendo importante apenas a conversão entre os sistemas (LIMA; BRITO, 2006).

2.8.2. Transformação Projetiva

A transformação projetiva é uma transformação a três dimensões. Esta transformação geométrica transforma um sistema de coordenadas tridimensionais em outro e vice-versa. O modelo matemático que traduz esta transformação é denominado de “Equação de colinearidade” (WOLF; DEWITT; WILKINSON, 2014). As equações de colinearidade fundamentam-se no conceito de que o espaço objeto, o centro perspectivo (objetiva da câmara) e o espaço imagem estão interligados por uma reta (MCGLONE; LEE, 2013), como apresentado na Figura 2.16.

Figura 2.16 – Colinearidade entre o espaço imagem e o objeto.



Fonte: Produzido pelo autor.

O sistema de coordenadas fotogramétricas é definido da seguinte maneira: a origem coincide com o centro perspectivo; os eixos *Ox* e *Oy* são paralelos aos seus homônimos no sistema fiducial e orientados da mesma forma. O eixo *Oz* é perpendicular ao plano do negativo e forma com os outros dois um sistema dextrógiro de coordenadas (BRITO; COELHO, 2007)

Pela Figura 2.16 visualizam-se as 3 rotações existentes entre um sistema de coordenadas no espaço imagem e no sistema do espaço objeto. Estas rotações são definidas pelos parâmetros denominados Ômega (ω), Phi (φ) e Kappa (κ); sendo respectivamente as rotações em torno dos eixos *X*, *Y* e *Z* (ANDRADE, 1998). Estas 3 rotações definem a matriz de rotação apresentada na Equação 2.10.

$$R_{\omega} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\omega & \operatorname{sen}\omega \\ 0 & -\operatorname{sen}\omega & \cos\omega \end{bmatrix} \qquad 2.6$$

$$R_{\varphi} = \begin{bmatrix} \cos\varphi & 0 & -\sin\varphi \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin\varphi & 0 & \cos\varphi \end{bmatrix} \qquad 2.7$$

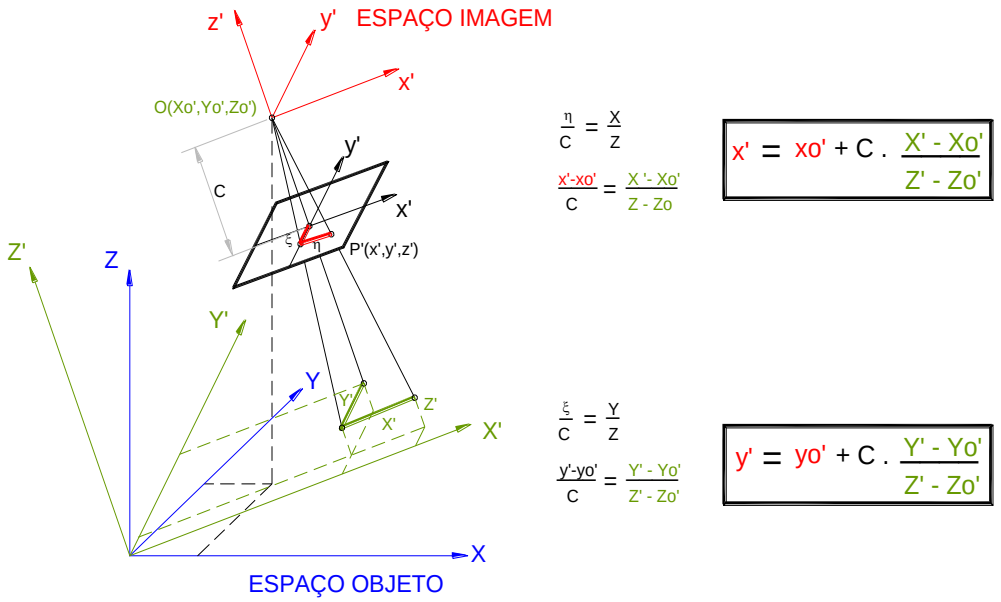
$$R_\kappa = \begin{bmatrix} cos\,\kappa & sin\,\kappa & 0 \\ -\,sin\,\kappa & cos\,\kappa & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \qquad 2.8$$

$$M = R_\omega . R_\varphi . R_\kappa = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{bmatrix} \qquad 2.9$$

$$M = \begin{bmatrix} cos\,\varphi cos\,\kappa & cos\,\omega sen\,\kappa + sen\,\omega sen\,\varphi cos\,\kappa & sen\,\omega sen\,\kappa - cos\,\omega sen\,\varphi cos\,\kappa \\ -cos\,\varphi sen\,\kappa & cos\,\omega cos\,\kappa - sen\,\omega sen\,\varphi sen\,\kappa & sen\,\omega cos\,\kappa + cos\,\omega sen\,\varphi sen\,\kappa \\ sen\,\varphi & -sen\,\omega cos\,\varphi & cos\,\omega cos\,\varphi \end{bmatrix} \qquad 2.10$$

Os 9 elementos da matriz de rotação são calculados a partir da multiplicação matricial entre as matrizes de rotação R_ω, R_φ e R_κ, apresentadas na Figura 2.16, resultando nos elementos apresentados na Equação 2.10 (MCGLONE; LEE, 2013). Acrescenta-se um terceiro sistema paralelo ao sistema imagem, mas com sua origem coincidente ao sistema do espaço objeto com a mesma escala do espaço objeto, como ilustra a Figura 2.17.

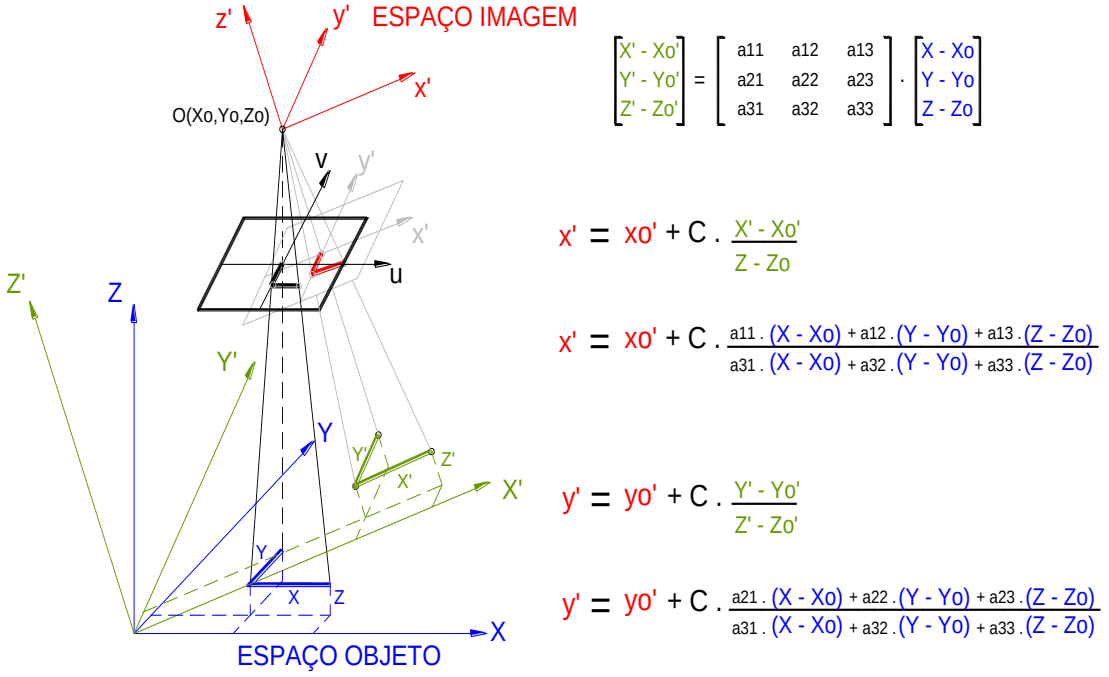
Figura 2.17 – Relação entre os espaços imagem e objeto.



Fonte: Produzido pelo autor.

Podem ser visualizados mais 4 parâmetros: um fator de escala (C), representado pela distância focal (f), e 3 translações (Δx, Δy e Δz) entre a origem dos sistemas. Esta transformação é do tipo isogonal, pois possui uma única escala para os 3 eixos dos sistemas (ANDRADE, 1998).

Figura 2.18 – Equações de colinearidade.



Fonte: Produzido pelo autor.

Do apresentado na Figura 2.18, pode-se montar as equações de colinearidade que ligam um sistema de coordenadas de 3 dimensões a outro também de 3 dimensões. Obtem-se assim as Equações 2.11 e 2.12, que são não lineares (MIKHAIL; BETHEL; MCGLONE, 2001; BRITO; COELHO, 2007; MCGLONE; LEE, 2013).

$$x' = (x - x_0) = -c.\frac{a_{11}(X - X_0) + a_{12}(Y - Y_0) + a_{13}(Z - Z_0)}{a_{31}(X - X_0) + a_{32}(Y - Y_0) + a_{33}(Z - Z_0)} \qquad 2.11$$

$$y' = (y - y_0) = -c.\frac{a_{21}(X - X_0) + a_{22}(Y - Y_0) + a_{23}(Z - Z_0)}{a_{31}(X - X_0) + a_{32}(Y - Y_0) + a_{33}(Z - Z_0)} \qquad 2.12$$

Onde:

- x' e y' são as coordenadas no sistema fiducial considerando o deslocamento do ponto principal da câmara;
- x e y são as coordenadas no sistema fiducial;
- x_0 e y_0 são as coordenadas do centro perspectivo no sistema fiducial;
- $X, Y\ e\ Z$ são as coordenadas no sistema Geodésico;
- $\mathrm{X}_0, \mathrm{Y}_0\ e\ \mathrm{Z}_0$ são as coordenadas do centro perspectivo no sistema Geodésico;
- c é a escala entre os sistemas geodésico e fiducial; e
- a_{ij} são os parâmetros da matriz de rotação.

Para a determinação dos parâmetros das Equações 2.11 e 2.12, utilizam-se pontos de controle conhecidos nos dois sistemas de coordenadas e monta-se um sistema de equações a partir das equações apresentadas. Para calcular tais parâmetros, utiliza-se o método de resolução de sistemas de equações descrito no Item 2.13.

O modelo matemático para a transformação projetiva pode ser simplificado, tornando o modelo linear, visando facilitar a sua resolução, de acordo com a teoria apresentada no Item 2.10. Neste caso, os parâmetros estão agrupados, conforme pode ser visto nas Equações 2.13 e 2.14. Tal estratégia é adotada, quando não se deseja saber os parâmetros diretamente, sendo importante apenas a conversão entre os sistemas.

$$x(a_1, a_2, a_3, b_1, b_2, b_3, c_1, c_2) = X.a_1 + Y.a_2 + a_3 - x.X.c_1 - x.Y.c_2 \qquad 2.13$$

$$y(a_1, a_2, a_3, b_1, b_2, b_3, c_1, c_2) = X.b_1 + Y.b_2 + b_3 - y.X.c_1 - y.Y.c_2 \qquad 2.14$$

Assim, a partir das equações de colinearidade, podem-se montar as equações projetivas linearizadas onde os parâmetros $(a_1, a_2, a_3, b_1, b_2, b_3, c_1, c_2)$ são uma

mescla dos parâmetros originais das equações de colinearidade (c, φ, ω, κ, Δx, Δy, Δz).

2.9. Distorções Geométricas em Imagens Fotográficas

As fontes de erro em imagens fotográficas são inúmeras. Essas fontes são devidas tanto às condições ambientais, quanto ao sistema fotográfico. Em relação às condições ambientais convêm ressaltar a refração e a curvatura da Terra, além do deslocamento devido ao relevo (paralaxe). Relacionado ao sistema fotográfico pode-se citar: falta de verticalidade da foto, deslocamento do ponto principal, aberrações e distorções radiais e tangenciais (ANDRADE, 1998).

Para a determinação das coordenadas e atitudes de uma imagem digital, pode-se utilizar um modelo matemático para interligar dois sistemas de coordenadas. Entretanto, deve-se considerar que tal modelo é uma aproximação da realidade. A complexidade do modelo matemático deve ser compatível com a precisão requerida para o trabalho fotogramétrico. No entanto, uma imagem bruta contém distorções geométricas decorrentes da influência de diversos fatores intrínsecos e extrínsecos ao sensor (BRITO; COELHO, 2007).

Assim, para a obtenção de informações métricas confiáveis a partir de imagens é recomendável que o sensor seja calibrado. A principal tarefa no processo fotogramétrico é estabelecer uma rigorosa relação geométrica entre o espaço imagem e o espaço objeto, para extrair informações do objeto unicamente através da imagem (MIKHAIL; BETHEL; MCGLONE, 2001; WOLF; DEWITT; WILKINSON, 2014).

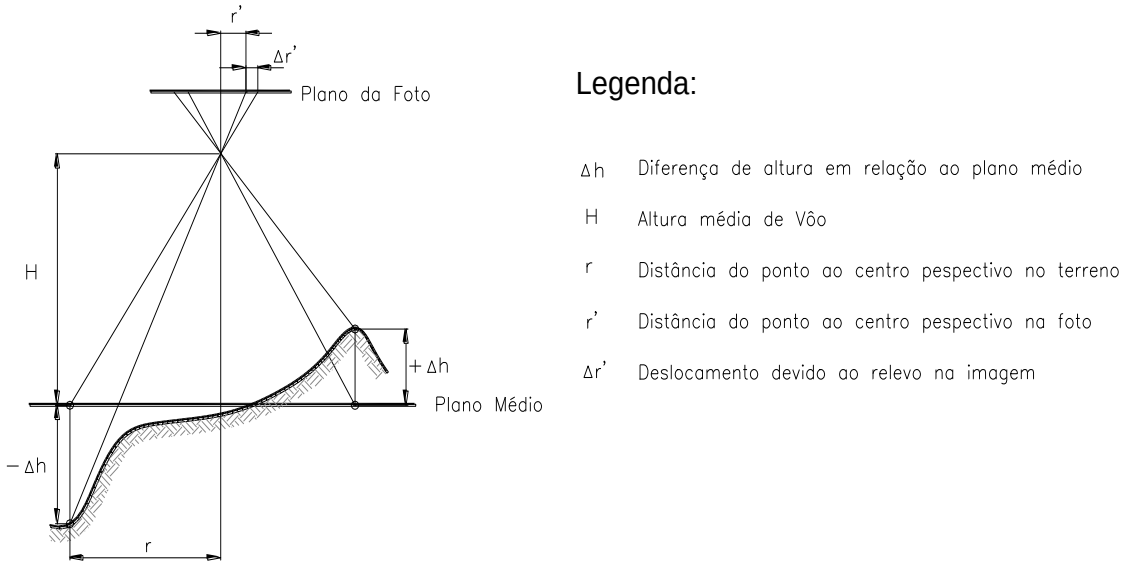
2.9.1. Paralaxe

Uma das principais distorções é o Deslocamento Devido ao Relevo, decorrente da heterogeneidade do relevo da área fotografada, que resulta no

deslocamento dos feixes perspectivos, devido às diferenças de altitudes (MCGLONE; LEE, 2013), conforme ilustrado na Figura 2.19.

Assim a distância de um objeto em relação a lente da câmara e a posição onde ele será projetado na imagem, influenciará no deslocamento da feição no espaço imagem, ou seja, pelo fato da fotografia ser de perspectiva cônica as feições na imagem são deslocadas de forma diferente de uma fotografia para outra. Isso possibilita o cálculo do desnível de um ponto para outro em um par de fotografias adjacentes (SILVEIRA et al., 2008)

Figura 2.19 – Deslocamento devido ao relevo (Paralaxe).



Fonte: Adaptada de Andrade (1998).

2.9.2. Correção das Distorções Radiais

A Distorção Radial tem caráter simétrico, pois é função do ângulo de incidência do raio de luz. Quando um raio penetrar numa lente, com um ângulo α em relação ao eixo óptico, ao atravessar o sistema de lentes fará um ângulo de $(\alpha + \delta\alpha)$, causando um deslocamento δr, na posição da imagem no plano do negativo.

As distorções radiais simétricas podem ser modeladas através das equações polinomiais de grau par nas componentes *x* e *y* do sistema de coordenadas de

marcas fiduciais. Usualmente utiliza-se para tanto apenas os coeficientes K_1, K_2, e K_3. Caso seja necessário uma maior acurácia do modelo pode-se expandir o polinômio até K_n, conforme apresentado nas Equações 2.16 e 2.17, respectivamente (ANDRADE, 1998; WOLF; DEWITT; WILKINSON, 2014).

$$R = \sqrt{x^2 + y^2} \qquad 2.15$$

$$\delta rx_n = K_1.R^2 + K_2.R^4 + K_3.R^6 + \cdots + K_n.R^{2n} \qquad 2.16$$

$$\delta ry_n = K_1.R^2 + K_2.R^4 + K_3.R^6 + \cdots + K_n.R^{2n} \qquad 2.17$$

2.9.3. Correção das Distorções Tangenciais

A distorção tangencial tem origem na montagem da objetiva da câmara, sendo proveniente da impossibilidade do fabricante em alinhar perfeitamente os eixos ópticos das lentes que compõem uma objetiva, resultando no deslocamento do pixel da imagem. Essas distorções podem ser modeladas através das equações nas componentes x e y do sistema de coordenadas das marcas fiduciais. Usualmente utiliza-se apenas os coeficientes $p_1\ e\ p_2$, conforme apresentado nas Equações 2.18 e 2.19, respectivamente, (ANDRADE, 1998; WOLF; DEWITT; WILKINSON, 2014).

$$\delta tx = p_1.(R^2 + 2.x^2) + 2.p_2.x.y \qquad 2.18$$

$$\delta ty = p_2.(R^2 + 2.y^2) + 2.p_1.x.y \qquad 2.19$$

2.9.4. Equações de Colinearidade com Correção Tangencial e Radial

Para se obter um modelo matemático que melhor represente a transformação entre os sistemas de coordenadas de terreno e da câmara é necessário

adicionar às equações de colinearidade, apresentadas nas Equações 2.11 e 2.12, as respectivas distorções radiais ($\delta rx,\ \delta ry$) e tangencias ($\delta tx,\ \delta ty$) em cada componente, apresentadas nas Equações 2.16, 2.17, 2.18 e 2.19. Além das distorções, devem ser consideradas também as coordenadas do ponto principal ($x_0,\ y_0$), sendo a escala representada pela distância focal da câmara (f).

Estes parâmetros são denominados de parâmetros intrínsecos da câmara, sendo que quanto mais próximos da realidade o modelo se parecer, mais precisas serão as medições realizadas. As equações de colinearidade adicionadas aos parâmetros intrínsecos são apresentadas nas Equações 2.20 e 2.21.

$$x = x_0 + \delta rx + \delta tx - f.\frac{a_{11}(X - X_0) + a_{12}(Y - Y_0) + a_{13}(Z - Z_0)}{a_{31}(X - X_0) + a_{32}(Y - Y_0) + a_{33}(Z - Z_0)} \qquad 2.20$$

$$y = y_0 + \delta ry + \delta ty - f.\frac{a_{21}(X - X_0) + a_{22}(Y - Y_0) + a_{23}(Z - Z_0)}{a_{31}(X - X_0) + a_{32}(Y - Y_0) + a_{33}(Z - Z_0)} \qquad 2.21$$

Onde:

- $x\ e\ y$ são as coordenadas dos pontos no sistema fiducial;
- $x_0\ e\ y_0$ são as coordenadas do ponto principal no sistema fiducial;
- $\delta r_x\ e\ \delta r_y$ são as correções radiais;
- $\delta t_x\ e\ \ \delta t_y$ são as correções tangenciais;
- f é a distância focal da câmara;
- a_{ij} são os coeficientes da matriz de rotação dos parâmetros ($\omega, \varphi\ e\ \kappa$);
- $X, Y\ e\ Z$ são as coordenadas dos pontos no sistema de terreno; e
- $\mathrm{X}_0, \mathrm{Y}_0\ e\ \mathrm{Z}_0$ são as coordenadas do centro perspectivo da câmara no sistema de terreno.

Estes parâmetros intrínsecos podem ser obtidos em laboratório utilizando um campo de calibração ou através de pontos de controle no terreno (do inglês

Ground Control Point - GCP). No caso da utilização dos pontos de controle de campo para o cálculo dos parâmetros intrínsecos da câmara, a calibração é realizada junto com o ajustamento de bloco aerofotogramétrico (do inglês *Bundle Block Adjustment - BBA)*. Esse último processo possui a denominado de calibração em serviço (do inglês, *calibration on the job)*. Os atuais programas de aerofotogrametria possuem recursos para realizar este tipo de calibração de câmaras (NOGUEIRA; ROBERTO, 2017).

2.10. Resolução de Sistemas de Equações Lineares

O estudo da resolução de sistemas de equações lineares é de grande importância para o entendimento do cálculo dos parâmetros de transformação de um sistema de coordenadas cartesianas para outro qualquer. Para isso é necessário conhecer as coordenadas de pontos homólogos em ambos os sistemas de origem e destino (espaço objeto e imagem) (ANDRADE, 1998).

Assim, dado um sistema de equações possível e determinado (SPD) pode-se resolvê-las pelo método matricial. Este método consiste em representar matricialmente o sistema, obtendo-se a matriz quadrada dos coeficientes (A), a matriz coluna das incógnitas (X) e a matriz coluna dos valores observados (L) (GEMAEL, 1994), resultando na seguinte igualdade:

$$A.X = L \qquad 2.22$$

$$A = \begin{bmatrix} a_{11} a_{12} a_{13} \dots a_{1n} \\ a_{21} a_{22} a_{23} \dots a_{2n} \\ a_{31} a_{32} a_{33} \dots a_{3n} \\ \vdots \quad \vdots \quad \vdots \quad \ddots \quad \vdots \\ a_{n1} a_{n2} a_{n3} \cdots a_{nn} \end{bmatrix} \qquad 2.23$$

$$X = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ \vdots \\ x_n \end{bmatrix} \qquad 2.24$$

$$L = \begin{bmatrix} l_1 \\ l_2 \\ l_3 \\ \vdots \\ l_n \end{bmatrix} \qquad 2.25$$

A notação matricial apresentada na Equação 2.22 representa um Sistema de equação Possível e Determinado (SPD) genérico, que é idêntico a aquele apresentado na Equação 2.26.

$$\begin{cases} a_{11}.x_1 + a_{12}.x_2 + \cdots + a_{1n}.x_n = l_1 \\ a_{21}.x_1 + a_{22}.x_2 + \cdots + a_{2n}.x_n = l_2 \\ a_{31}.x_1 + a_{32}.x_2 + \cdots + a_{2n}.x_n = l_3 \\ \quad \vdots \quad + \quad \vdots \quad + \cdots + \quad \vdots \quad = \vdots \\ a_{n1}.x_1 + a_{n2}.x_2 + \cdots + a_{nn}.x_n = l_n \end{cases} \qquad 2.26$$

Para resolver o sistema de equação multiplicam-se os dois lados da Equação 2.22, pela inversa da matriz dos coeficientes "A^{-1}" para explicitar a matriz das incógnitas, conforme apresentado nas equações a seguir:

$$(A^{-1}.A).X = A^{-1}.L \qquad 2.27$$

$$I.X = A^{-1}.L \qquad 2.28$$

$$X = A^{-1}.L \qquad 2.29$$

Como as medidas reais de uma determinada grandeza física não podem ser alcançadas de uma forma absoluta, para se obter o valor que melhor represente essa grandeza são realizadas várias medidas e através de um método de ajustamento, encontra-se um valor que melhor representa este conjunto de observações. Geralmente é utilizado o Método dos Mínimos Quadrados (MMQ) para tal ajustamento, onde a média das observações representa o melhor valor esperado e a variância das observações representa quanto os valores estão agrupados em relação a esta média (GEMAEL, 1994).

2.11. Método dos Mínimos Quadrados (MMQ)

Quando o número de equações for maior do que o número de incógnitas, tem-se um Sistema Possível e Indeterminado (SPI). Para resolver este tipo de sistema, utiliza-se o MMQ, que estima um valor para as incógnitas de modo a minimizar a soma dos quadrados dos desvios ou resíduos em relação à média (GEMAEL, 1994). Assim dado o sistema de equações Possível e Indeterminado genérico apresentado na Equação 2.30, temos:

$$\begin{cases} a_{11}.x_1 + a_{12}.x_2 + \cdots + a_{1n}.x_n = l_1 \\ a_{21}.x_1 + a_{22}.x_2 + \cdots + a_{2n}.x_n = l_2 \\ a_{31}.x_1 + a_{32}.x_2 + \cdots + a_{3n}.x_n = l_3 \\ a_{41}.x_1 + a_{42}.x_2 + \cdots + a_{4n}.x_n = l_4 \\ \vdots \quad + \quad \vdots \quad + \cdots + \quad \vdots \quad = \vdots \end{cases} \qquad 2.30$$

$$A = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} & \cdots & a_{2n} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} & & a_{3n} \\ & \vdots & & \ddots & \vdots \\ a_{m1} & a_{m2} & a_{m3} & \cdots & a_{mn} \end{bmatrix} \qquad 2.31$$

$$X = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ \vdots \\ x_n \end{bmatrix} \qquad 2.32$$

$$L = \begin{bmatrix} l_1 \\ l_2 \\ l_3 \\ \vdots \\ l_m \end{bmatrix} \qquad 2.33$$

Para resolver este sistema de equações possível e indeterminado, ora apresentado, basta explicitar a matriz das incógnitas "X", partindo-se da mesma premissa descrita no Item 2.10. No entanto, a matriz dos coeficientes "A", neste caso, não é quadrada. Assim sendo é necessário multiplicar os dois lados da equação pela transposta "A^T" a fim de torna-la quadrada e em seguida multiplicar por "$(A^T.A)^{-1}$" (GEMAEL, 1994), conforme equações a seguir:

$$(A^T.A).X = A^T.L \qquad 2.34$$

$$(A^T.A)^{-1}.(A^T.A).X = (A^T.A)^{-1}.A^T.L \qquad 2.35$$

$$I.X = (A^T.A)^{-1}.A^T.L \qquad 2.36$$

$$X = (A^T.A)^{-1}.A^T.L \qquad 2.37$$

Conhecendo-se as variâncias das observações, adota-se a matriz peso das observações "P", para se ter uma ponderação das observações, atribuindo-se assim às observações, um peso tanto maior quanto menor for a variância de uma dada observação. Quando se supõe que os pesos das observações são iguais e não há correlação entre as observações, utiliza-se a matriz Identidade (I_n), como sendo a Matriz Variância e Covariância das Observações (ΣL_b) e calcula-se a Matriz Peso das Observações (LIMA; BRITO, 2006), conforme apresentado a seguir:

$$\sigma = 1 \qquad 2.38$$

$$\Sigma L_b = I_n \qquad 2.39$$

$$P = \sigma . \Sigma L_b{}^{-1} \qquad 2.40$$

Utilizando o mesmo desenvolvimento realizado para o cálculo da Equação 2.37 e acrescentando a matriz peso das observações, obtém-se a fórmula geral da matriz das incógnitas ajustadas pelo MMQ, conforme apresentado a seguir:

$$X = (A^T . P . A)^{-1} . A^T . P . L \qquad 2.41$$

Para a estimativa das variâncias dos parâmetros calculados da matriz das incógnitas (X), calcula-se o Vetor dos Resíduos (V) e a Variância a posteriori ($\overline{\sigma}$), onde: (n) é o número de observações e (u) é o número de parâmetros (GEMAEL, 1994), conforme equações a seguir:

$$V = A . X - L \qquad 2.42$$

$$\overline{\sigma} = \frac{V^T . P . V}{n - u} \qquad 2.43$$

Para calcular a Matriz Variância e Covariância das Observações Ajustadas (ΣLa) é necessário Calcular Matriz a Variância e Covariância dos Parâmetros ($\Sigma \bar{X}$), conforme apresentado nas equações a seguir. O Vetor das Observações Ajustadas (La) é calculado conforme a Equação 2.45. Para a obtenção de informações mais detalhadas vide (GEMAEL, 1994).

$$\Sigma \bar{X} = |\overline{\sigma}| . (A^T . P . A)^{-1} \qquad 2.44$$

$$La = A.X \qquad 2.45$$

$$\Sigma La = A.\Sigma\bar{X}.A^T \qquad 2.46$$

2.12. Modelos Lineares

Entende-se por modelos lineares aqueles em que as variáveis de um sistema de equações estão multiplicando apenas uma constante. Tais modelos já foram utilizados nos Itens anteriores para a determinação da matriz dos coeficientes (A). Segue um exemplo abaixo.

$$F(x_1, x_2, \dots, x_n) = a_1.x_1 + a_2.x_2 + \cdots + a_n.x_n \qquad 2.47$$

Onde: $(a_1, a_2, \dots, a_n)$ são os coeficientes da equação e $(x_1, x_2, \dots, x_n)$ são os parâmetros da equação.

2.13. Resolução de Sistemas de Equações Não-Lineares

Como já apresentado nos capítulos anteriores, para a resolução de sistemas de equações por matrizes é necessária a determinação da matriz dos coeficientes (A). No caso das equações não lineares, para a determinação de tal matriz, é necessária a linearização do modelo matemático. Apesar de existirem outros métodos para resolução de funções não lineares, neste projeto optou-se pela aproximação por série de Taylor, por ser um método consagrado e bastante robusto quando há valores aproximados dos parâmetros coerentes (MUNEM; FOULIS, 1982).

2.13.1. Aproximação por Série de Taylor

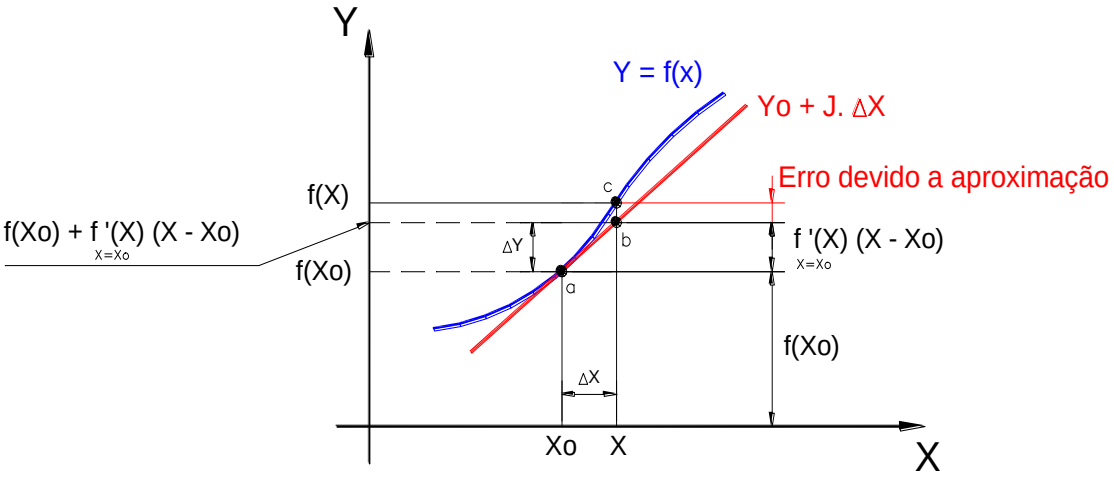
Dada uma função não linear $f(x)$, a linearização por Série de Taylor consiste em calcular por iterações um valor para as correções aos valores iniciais do vetor das incógnitas. A solução inicia-se por uma aproximação da $f(x)_{x=x_0}$.

Para tanto, calcula-se a $f(x_0)$, ou coeficiente linear da equação da reta, somando-o a uma primeira aproximação pela reta tangente, que é a derivada primeira $f'(x_0)$, ou ainda o coeficiente angular da equação da reta.

Este valor deve ser multiplicado por $(x - x_0)$, assim, dado um (x) próximo de (x_0), pode-se considerar a aproximação apresentada pela Equação 2.48, que realiza uma aproximação do ponto (x), substituindo a função original pela equação da reta (MUNEM; FOULIS, 1982), conforme visualizado na Figura 2.20.

$$f(x) \cong f(x_0) + f'(x)_{x=x_0}.(x - x_0) \qquad 2.48$$

Figura 2.20 – Representação gráfica da linearização de Série de Taylor.



Fonte: Adaptada de Munem e Foulis (1982).

Para um maior refinamento soma-se como segunda aproximação à derivada segunda $f''(x_0)$ e assim sucessivamente até a $f^n(x_0)$.

$$f(x) \cong f(x_0) + f'(x_0).x + f''(x_0).\frac{x^2}{2!} + \cdots + f^n(x_0).\frac{x^n}{n!} \qquad 2.49$$

Como a maior “energia” destas aproximações está na primeira derivada $f'(x_0)$ e considera-se que "x_0" esteja nas proximidades de "x" desprezam-se os termos de ordem igual ou superior a 2ª ordem; resulta que o valor tenderá a convergir para $f(x)$. São então feitas interações, até que o valor inicial "x_0" seja igual ao valor final "x", dentro de uma determinada precisão (MUNEM; FOULIS, 1982).

2.13.2. Matriz Jacobiana

Considerando a teoria de aproximação por série de Taylor, deduz-se a construção da matriz dos coeficientes “A”, que passa a ser a matriz das derivadas parciais da função $F(x_1, x_2, \dots, x_n)$ em relação às suas variáveis. Esta matriz é denominada “Jacobiano” (MUNEM; FOULIS, 1982). A sua expressão é representada a seguir.

$$J = \begin{bmatrix} \frac{d}{dx_1}F_1(x_1, x_2, \dots, x_n) & \frac{d}{dx_2}F_1(x_1, x_2, \dots, x_n) & & \frac{d}{dx_n}F_1(x_1, x_2, \dots, x_n) \\ \frac{d}{dx_1}F_2(x_1, x_2, \dots, x_n) & \frac{d}{dx_2}F_2(x_1, x_2, \dots, x_n) & \cdots & \frac{d}{dx_n}F_2(x_1, x_2, \dots, x_n) \\ \frac{d}{dx_1}F_3(x_1, x_2, \dots, x_n) & \frac{d}{dx_2}F_3(x_1, x_2, \dots, x_n) & & \frac{d}{dx_n}F_3(x_1, x_2, \dots, x_n) \\ \vdots & & \ddots & \vdots \\ \frac{d}{dx_1}F_m(x_1, x_2, \dots, x_n) & \frac{d}{dx_2}F_m(x_1, x_2, \dots, x_n) & \cdots & \frac{d}{dx_n}F_m(x_1, x_2, \dots, x_n) \end{bmatrix} \quad 2.50$$

A definição vista no Item 2.13.1 é para uma função onde (x) é um escalar; no caso de uma função vetorial, (X) é um vetor e não um escalar, então a matriz dos coeficientes (A), apresentada no Item 2.11, torna-se a matriz das derivadas parciais no caso da resolução de sistemas não lineares, denominada matriz Jacobiana (J). A Equação 2.48 é representada conforme a Equação 2.51.

$$Y \cong Y_0 + J.\Delta X \quad 2.51$$

$$Y - Y_0 \cong J.\Delta X \qquad 2.52$$

$$\Delta Y \cong J.\Delta X \qquad 2.53$$

Onde: $(\Delta \mathrm{Y})$ é o Vetor de correções das observações; (Y) é o Vetor das observações; (Y_0) é o Vetor das observações aproximadas em função de X_0; (J) é a Matriz Jacobiana, calculada para $\mathrm{X} = \mathrm{X}_0$; $(\Delta \mathrm{X})$ é o Vetor de correções das incógnitas; (X) é o Vetor das incógnitas; e (X_0) é o Vetor dos valores aproximados das incógnitas.

Analisando o caso das equações lineares, nota-se que a derivada parcial de cada uma das funções, em relação a cada variável é o respectivo coeficiente que a multiplica. Assim para este caso, o Jacobiano reduz a matriz dos coeficientes das equações, como era de se esperar. Para mais informações vide (GEMAEL, 1994).

2.13.3. Resolução de Sistemas de Equações não Lineares

O estudo da resolução de sistemas de equações não lineares é de grande importância para o entendimento do cálculo dos parâmetros de transformação de um sistema de coordenadas cartesianas para outro qualquer, conhecendo-se apenas as coordenadas de pontos homólogos em ambos os sistemas de origem e destino. Assim, por exemplo, podem-se calcular os parâmetros de transformação das equações de colinearidade que ligam o Espaço Objeto ao Espaço Imagem (LIMA; BRITO, 2006).

Quando o número de equações for maior do que o número de incógnitas, há um sistema possível e indeterminado. Para resolver este tipo de sistema, pode-se utilizar o MMQ, que estima um valor para as incógnitas de modo a minimizar a soma dos quadrados dos desvios ou resíduos em relação à média. Pode ser resolvido pelo método matricial, conforme as equações matriciais a seguir. Para mais informações vide (GEMAEL, 1994).

$$\Delta X = (J^T.P.J)^{-1}.J^T.P.(L - L_0) \qquad 2.54$$

$$\overline{\mathrm{X}} = X_0 + \Delta X \qquad 2.55$$

$$\Sigma\overline{\mathrm{X}} = |\overline{\sigma}|.(J^T.P.J)^{-1} \qquad 2.56$$

Onde: (ΔX) é o vetor dos valores que somados ao valor inicial aproxima o valor inicial do valor ajustado das incógnitas; (L) é o vetor dos valores observados no espaço imagem; (L_0) é o vetor dos valores calculados com os parâmetros iniciais, a partir do espaço objeto; ($L - L_0$) são os desvios entre o valor observado e o calculado; (P) é a matriz dos pesos das observações; (X_0) é o vetor dos valores aproximados das incógnitas; ($\overline{\mathrm{X}}$) é o vetor dos valores das incógnitas ajustados; ($\Sigma\overline{\mathrm{X}}$) é a matriz variância covariância dos parâmetros ajustados; e ($\overline{\sigma}$) é a variância da unidade de peso a posteriori. Mais detalhes a respeito encontram-se em Gemael (1994).

Vale ressaltar que as medições das coordenadas do Espaço Imagem e do Espaço Objeto possuem incerteza, sendo que estas incertezas são propagadas quando se utilizam estas coordenadas para determinar os parâmetros das equações de colinearidade que as interligam. Por este motivo é necessário dimensionar as acurácias dos sistemas que os definem. Para o espaço objeto a ortoimagem e o MDT foram as referências das coordenadas do terreno, cujas acurácias devem ser analisadas. Para tanto foi realizado o estudo do Padrão de Exatidão Cartográfica (PEC) dessas bases, detalhado no Capítulo 5 deste trabalho.

2.14. Padrão de Exatidão Cartográfica

O Decreto nº 89.817, de 20 de Junho de 1984, estabelece critérios para classificação de cartas com relação a exatidão ou acurácia, utilizando um indicador estatístico da qualidade posicional, denominado de “Padrão de

Exatidão Cartográfica (PEC)". Segundo o § 4° do item 2. do Art. 8° os termos Desvio Padrão (DP), Erro Padrão (EP) e Erro Quadrático Médio (EQM) são sinônimos. A classificação das cartas quanto à sua exatidão deve obedecer a seguinte norma:

"Noventa por cento dos pontos bem definidos em uma carta, quando testados no terreno, não deverão apresentar erro superior ao Padrão de Exatidão Cartográfica – Planimétrica estabelecido" (BRASIL, 1984).

O PEC é um indicador estatístico de dispersão, relativo a 90% de probabilidade que define a exatidão de trabalhos cartográficos. A probabilidade de 90% corresponde a 1,6449 vezes o Erro-Padrão, conforme a Equação 2.57.

$$PEC = 1{,}6449\,.EP \qquad 2.57$$

A qualidade posicional desejada para os Produtos Cartográficos Digitais (PCD) utiliza os termos Acurácia e Exatidão. Para esclarecer a relação entre os termos Desvio-Padrão e Acurácia (ou Exatidão), Monico et al. (2009) realizou uma revisão conceitual desses termos. Na definição original de Gauss a acurácia relaciona os efeitos sistemáticos e aleatórios dos erros nas medições, enquanto que a precisão se relaciona apenas com seus efeitos aleatórios. Na Tabela 2.1, o PEC-PCD Planimétrico e o EP das classes "B", "C" e "D" correspondem, nessa ordem, às classes "A", "B", "C" do PEC Planimétrico (BRASIL, 1984; DCT/EB80-N-72.003, 2016).

Tabela 2.1 – Padrão de Exatidão Cartográfica da Planimetria dos Produtos Cartográficos Digitais.

PEC	PEC-PCD	1:1.000		1:2.000		1:5.000		1:10.000		1:25.000		1:50.000		1:100.000		1:250.000	
		PEC (m)	EP (m)	PEC (m)	EP (m)	PEC (m)	EP (m)	PEC (m)	EP (m)	PEC (m)	EP (m)	PEC (m)	EP (m)	PEC (m)	EP (m)	PEC (m)	EP (m)
-	A	0,28	0,17	0,56	0,34	1,40	0,85	2,80	1,70	7,00	4,25	14,0	8,5	28,0	17,0	70,0	42,5
A	B	0,50	0,30	1,00	0,60	2,50	1,50	5,00	3,00	12,50	7,50	25,0	15,0	50,0	30,0	125,0	75,0
B	C	0,80	0,50	1,60	1,00	4,00	2,50	8,00	5,00	20,00	12,50	40,0	25,0	80,0	50,0	200,0	125,0
C	D	1,00	0,60	2,00	1,20	5,00	3,00	10,00	6,00	25,00	15,00	50,0	30,0	100,0	60,0	250,0	150,0

Fonte: DCT/EB80-N-72.003 (2016).

O Tabela 2.2 estabelece o PEC-PCD para os Modelos Digitais de Terreno (MDT) ou de Superfície (MDS), e para os Pontos Cotados. Os valores previstos para a classe “A” (PEC-PCD) foram definidos a partir de adaptações dos estudos realizados por (BARATTO et al., 2014), nos quais o PEC-PCD = 0,27*(Equidistância do produto cartográfico) e o EP = 1/6*(Equidistância do produto cartográfico). As classes “B”, “C” e “D” do PEC-PCD correspondem, em ordem, às classes “A”, “B”, “C” do PEC Altimétrico (BRASIL, 1984; DCT/EB80-N-72.003, 2016).

Tabela 2.2 – Padrão de Exatidão Cartográfica Altimétrica dos Pontos Cotados e do MDT, MDE e MDS para a produção de Produtos Cartográficos Digitais.

PEC	PEC-PCD	1:1.000		1:2.000		1:5.000		1:10.000		1:25.000		1:50.000		1:100.000		1:250.000	
		PEC (m)	EP (m)	PEC (m)	EP (m)	PEC (m)	EP (m)	PEC (m)	EP (m)	PEC (m)	EP (m)	PEC (m)	EP (m)	PEC (m)	EP (m)	PEC (m)	EP (m)
-	A	0,27	0,17	0,27	0,17	0,54	0,34	1,35	0,84	2,70	1,67	5,50	3,33	13,70	8,30	27,00	16,67
A	B	0,50	0,33	0,50	0,33	1,00	0,66	2,50	1,67	5,00	3,33	10,00	6,66	25,00	16,66	50,00	33,33
B	C	0,60	0,40	0,60	0,40	1,20	0,80	3,00	2,00	6,00	4,00	12,00	8,00	30,00	20,00	60,00	40,00
C	D	0,75	0,50	0,75	0,50	1,50	1,00	3,75	2,50	7,50	5,00	15,00	10,00	37,50	25,00	75,00	50,00

Fonte: DCT/EB80-N-72.003 (2016).

2.14.1. Avaliação da ortoimagem e MDS quanto ao PEC

Ao se gerar a ortoimagem e o Modelo Digital de Superfície (MDS) a partir das imagens obtidas do voo sobre a área de interesse é necessário realizar a análise do Padrão de Exatidão Cartográfica (PEC). Para a análise são levantados pontos de controle de campo, com GPS geodésico, para ajustar a ortoimagem e o MDS. Outros pontos são levantados para realizar o estudo do PEC.

O método escolhido para avaliar os produtos de acordo com PEC-PCD, mostrado no fluxograma da Figura 2.21, foi uma combinação dos procedimentos realizados por (MONICO et al., 2009; NOGUEIRA; ROBERTO, 2017), além dos conceitos apresentados pela Sociedade Americana de

Fotogrametria e Sensoriamento Remoto (*American Society for Photogrammetry and Remote Sensing – ASPRS*) (BARATTO et al., 2014).

A análise estatística da qualidade geométrica de um produto cartográfico é obtida através das análises de precisão e de tendência, sendo a última usada para verificar erros sistemáticos (MONICO et al., 2009). Estas análises são realizadas através de testes de hipóteses sobre a média e o desvio padrão amostral dos resíduos, obtidos pela diferença entre as coordenadas de levantamento de campo (E_c N_c) e as coordenadas obtidas da imagem georeferenciada analisada (E_i, N_i), conforme a Equação 2.58.

$$(\Delta E_j, \quad \Delta N_j) = (E_c - E_i, \quad N_c - N_i) \qquad 2.58$$

Podem-se também obter as estatísticas, usando a resultante planimétrica a partir da Equação 2.59. Para isso, obtêm-se a média de ($\overline{\Delta E}$, $\overline{\Delta N}$) e desvio padrão (S) para cada uma das componentes, Este (E) e Norte (N).

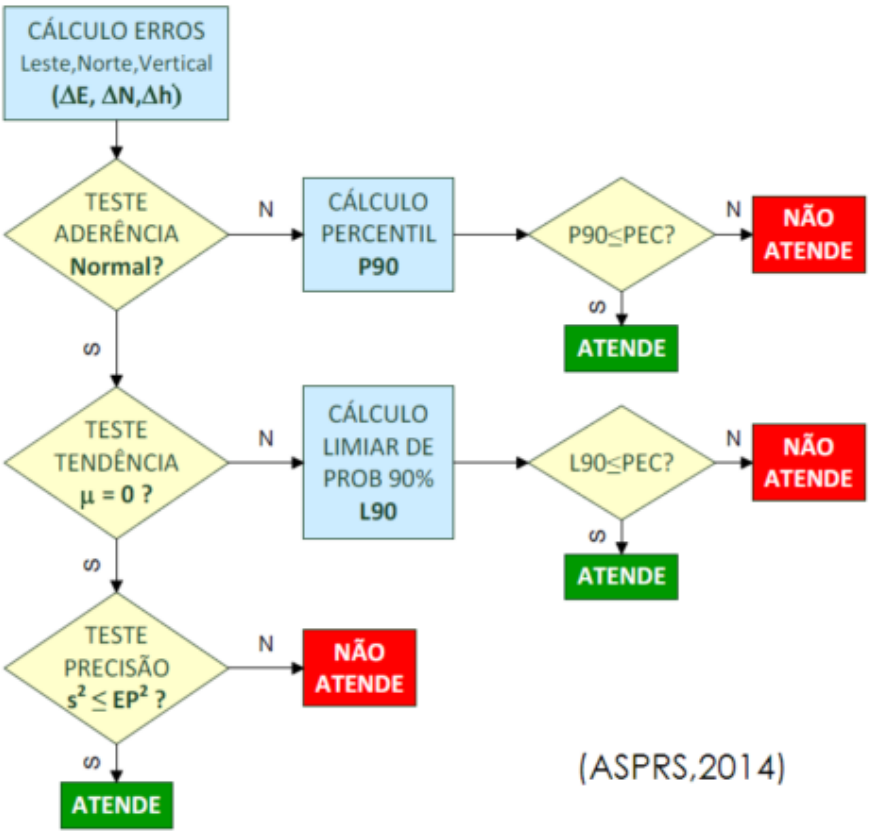
$$\Delta R_j = \sqrt{(E_c - E_i)^2 + (N_c - N_i)^2} \qquad 2.59$$

Foram analisados também os erros da componente vertical, obtida por meio da diferença entre a altitude ortométrica medida em campo (H_c) e as altitudes obtidas no Modelo Digital de Terreno (H_i).

$$\Delta H_j = H_c - H_i \qquad 2.60$$

Com as estatísticas amostrais de cada componente são realizados os testes para a avaliação de aderência à distribuição normal, verificação da existência de tendência da média, realizado através do teste de hipótese da média amostral, e a verificação se o desvio padrão pode ser considerado dentro dos padrões especificados pelo PEC, realizado através do teste de hipótese da variância amostral. O organograma apresentado na Figura 2.21 apresenta a metodologia de avaliação do PEC-PCD usada.

Figura 2.21 – Fluxograma para avaliação do PEC.



Fonte: Nogueira e Roberto (2017).

2.14.2. Teste de Hipóteses para a Média

Para testar se uma Variável Aleatória (VA) qualquer, com Média Populacional (μ) e Desvio Padrão Populacional (σ) desconhecidos pode ser representada por uma amostra, obtém-se uma amostra de n valores e calcula-se a Média Amostral ($\bar{X}$) e Desvio Padrão Amostral (S). A verificação do erro sistemático nas componentes Este, Norte e Vertical é feita através do teste de hipótese.

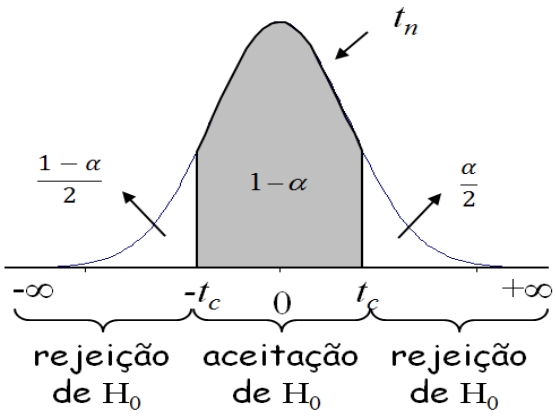
A estatística deve ser calculada através da Média dos Erros Amostrais ($\bar{X}$) e do Desvio Padrão Amostral (S) de componente separadamente, baseado na distribuição de probabilidade t-Student com n-1 graus de liberdade, de acordo com a Equação 2.62. As regiões de aceitação e rejeição podem ser visualizadas na Figura 2.22.

Hipóteses:

$$H_0: \mu_X = 0 \text{ (hipótese nula)}$$
$$H_1: \mu_X \neq 0 \text{ (hipótese alternativa)} \qquad 2.61$$

$$t_c = \frac{\bar{X}}{\frac{S}{\sqrt{n}}} \sim t_{n-1} \qquad 2.62$$

Figura 2.22 – Teste de hipótese t-Student bilateral.



Fonte: Adaptado Rennó e Banon (2017).

Os valores críticos ($t_{\alpha/2,n-1}$) e ($t_{(1-\alpha)/2,n-1}$) são obtidos dos limites teóricos da região de não aceitação da distribuição t-student com o nível de significância de α=0,01 e comparados com o valor calculado (t_c) pela Equação 2.62. A hipótese nula H_0 é aceita quando $t_{(1-\alpha)/2,n-1} < t_c < t_{\alpha/2,n-1}$ e rejeitado caso contrário.

2.14.3. Teste de Hipóteses para a Variância

A hipótese para a variância é realizada através do teste do Qui-quadrado (χ^2), que testa se a variância do resíduo (σ^2) é igual ao Erro Padrão (EP) estabelecida pelo PEC, ou seja, se a variância (σ_0^2) estabelecida no PEC é igual do resíduo. A seguir são apresentadas a hipótese e as fórmulas para o

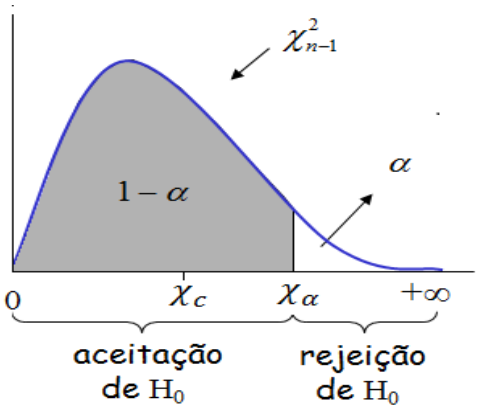
cálculo do teste Qui-quadrado, Equações 2.63 e 2.64, respectivamente. As regiões de aceitação e rejeição podem ser visualizadas na Figura 2.23.

Hipóteses:

$$H_0: \sigma^2 = \sigma_0^2 \text{ (hipótese nula)}$$
$$H_1: \sigma^2 < \sigma_0^2 \text{ (hipótese alternativa)} \qquad 2.63$$

$$\chi_c = \frac{(n-1){S_X}^2}{\sigma_X^2} \sim \chi_{n-1} \qquad 2.64$$

Figura 2.23 – Teste de hipótese chi-quadrado unilateral.



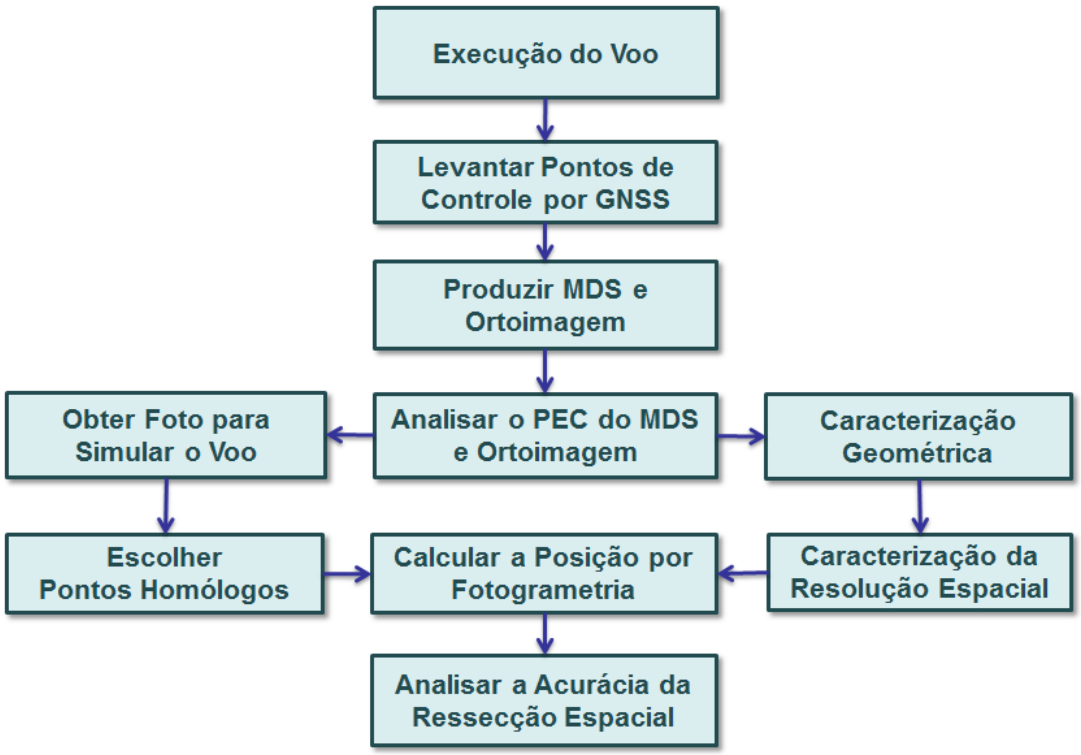
Fonte: Adaptado Rennó e Banon (2017).

O valor crítico ($\chi_{\alpha,(n-1)}$) é obtido do limite teórico da região de não-aceitação da distribuição Qui-quadrada (χ^2) com o nível de significância de α=0,01 e comparados com o valor calculado (χ_c) pela Equação 2.64. A hipótese nula H_0 é aceita quando $\chi_c < \chi_\alpha$ e rejeitada caso contrário.

3 MÉTODOS

Neste Capítulo, são descritas as metodologias aplicadas para a realização dos experimentos para avaliação da acurácia do posicionamento e atitude de uma câmara no espaço-objeto, utilizando como referência para o espaço-imagem as fotografias aéreas e como referência do espaço-objeto as ortoimagens e MDS da região a ser sobrevoada. O fluxograma dos trabalhos realizados pode ser visto na Figura 3.1.

Figura 3.1 – Fluxograma dos trabalhos.



Fonte: Produzido pelo autor

Para a realização dos experimentos inicialmente é necessário realizar os planejamentos de voo para a obtenção das fotografias aéreas da área de interesse. Inicialmente é necessário obter a autorização para a realização do voo nos órgãos competentes. Posteriormente define-se a resolução final da imagem, com a finalidade de definir a altura de voo e as superposições laterais e longitudinais. Para tanto deve-se conhecer as características da câmara para definir o *Ground Sample Distance* (GSD)

Com a finalidade de controlar o bloco aerofotogramétrico é necessário o levantamento de pontos de controle no campo, para a geração controlada das ortoimagens e dos Modelos Digitais de Superfícies (MDS), pois o Phantom 4 não possui GNSS e INS de precisão para garantir a posição e atitudes do RPA no espaço. No Item 3.1.2 é feita uma descrição do Phantom 4, RPA utilizado neste trabalho.

Para a geração das ortoimagens e do MDS são necessários pontos de controle de campo, denominados de *Ground Control Points* (GCP), para ajustar o bloco. Após a geração da ortoimagem e do MDS são utilizados outros pontos de controle de campo, denominados *checkpoints*, a fim de verificar a qualidade dos produtos gerados, sendo para isso utilizado o Padrão de Exatidão Cartográfica (PEC), descrito no Item 2.14.

Para a realização do levantamento dos pontos de controle em campo podem ser utilizados receptores GNSS geodésicos, para se garantir a exatidão posicional destes pontos. Em seguida devem ser processados os cálculos das coordenadas dos pontos de controle em escritório a partir das estações base da Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo (RBMC) do IBGE.

A caracterização geométrica da câmara a ser utilizada para navegação é de fundamental importância, pois toda câmara possui distorções radiais e tangenciais, deslocamento do ponto principal e distância focal. Estes parâmetros intrínsecos variam de câmara para câmara, por isso é necessário conhecer estes parâmetros, a fim de se obter maior acurácia no posicionamento da câmara no espaço.

A caracterização da resolução espacial efetiva da câmara deve ser verificada. Para confirmar as características da câmara, descritas em suas especificações técnicas, é necessário verificar a que altura de voo uma feição será detectada. Em especial deve ser verificado se os pontos de controle de campo serão detectados pelo sensor da câmara. Assim, nesta etapa, verifica-se qual a

menor feição que a câmara detecta e qual a sensibilidade à variação de tonalidade.

Com a finalidade de avaliar a influência na acurácia do posicionamento da câmara no espaço, foram escolhidas fotografias nas seguintes condições: alta e baixa declividade do relevo, duas alturas de voo diferentes e três inclinações em relação à vertical do lugar. Nestes sete estudos de caso a identificação dos pontos homólogos foi realizada inicialmente de forma visual.

A etapa seguinte foi a escolha dos pontos homólogos entre as fotografias aéreas e a ortoimagem/DSM para calcular o centro perspectivo e os ângulos de atitude da câmara no espaço. A escolha dos pontos homólogos foi realizada de duas formas: a primeira visualmente, com pontos bem definidos nas duas imagens; a segunda forma de escolha utilizou algoritmos de identificação automática de pontos homólogos. Este passo tem a finalidade de verificar a influência dos métodos de detecção automática de pontos homólogos na acurácia posicional.

Para a análise de acurácia da coordenada do centro perspectivo e dos ângulos de atitude da câmara no espaço foram utilizadas as coordenadas e atitudes das fotografias provenientes do ajustamento no bloco fotogramétrico que geraram a ortoimagem e o MDS. Os pontos homólogos foram escolhidos de forma aleatória na fotografia, a fim de não coincidirem com os pontos utilizados como referência para o ajustamento da ortoimagem. A descrição de cada etapa será apresentada nos itens a seguir.

3.1. Voo Para obtenção das Fotos

3.1.1. Autorização de voo de RPA

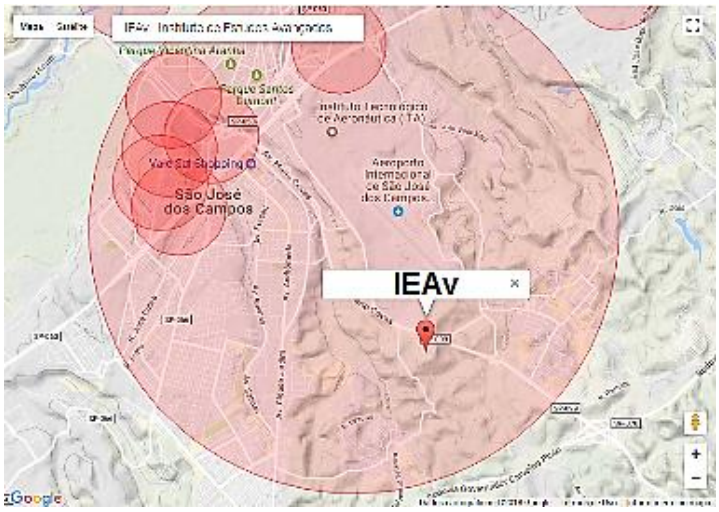
Para a realização do voo primeiramente é necessário se cadastrar e obter autorização do Departamento de Controle do Espaço Aéreo (DECEA), através do Sistema de Autorização de voos para RPAS (SARPAS). Para se cadastrar

no DECEA é necessário ter o certificado de homologação do controle do RPA, expedido pela Agência Nacional de Telecomunicações (ANATEL) e a Certidão de Cadastro de Aeronaves Não Tripuladas, expedido pela Agência Nacional de Aviação Civil (ANAC). Para a realização dos voos programados estas autorizações foram obtidas (DECEA/ICA_100-40, 2016; ANAC/RBAC-E-94, 2017; ANATEL, 2017; DECEA/SARPAS, 2017; GUIMARÃES, 2017; DECEA/AIC-N-23, 2018).

A atividade de aerolevantamento é regulada pelo Decreto-Lei nº 1.177/1971, Decreto nº 2.278/1997 e Portaria nº 953/2014 do Ministério da Defesa (MD). A Portaria nº 953/2014, em seu Art. 14, consideradas inscritas ex-offício, as organizações do Governo Federal especializadas na execução de serviços de aerolevantamento e, dentre elas, se enquadra o Departamento de Ciência e Tecnologia Aeroespacial (DCTA).

O IEAv localiza-se próximo ao aeroporto de São José dos Campos – SP, estando portanto dentro da área de 5 milhas náuticas do referido aeródromo, conforme pode ser visualizado no página de localização da operação de voo do sistema SARPAS, destacado pelo circulo vermelho da Figura 3.2.

Figura 3.2 – Localização do IEAv e área restrita do Aeroporto no SARPAS



Fonte: Sistema SARPAS do DECEA (2017).

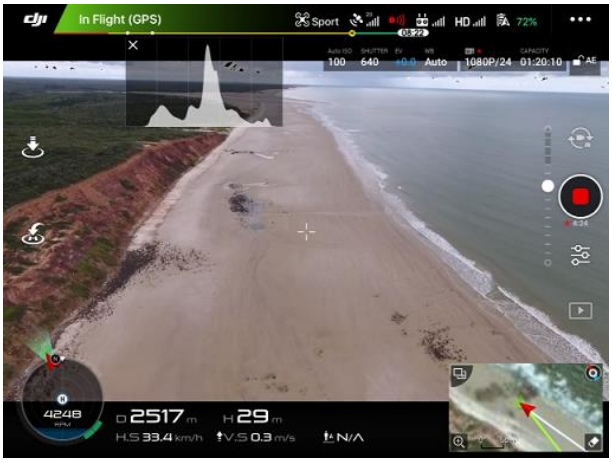
Por este motivo houve a necessidade de expedir o Ofício nº 06/EGI-S/678, de 13 de abril de 2017, do Diretor do IEAv para o Chefe do SRPV-SP, regional responsável pela área de São José dos Campos - SP. Neste documento foi solicitada a autorização do voo sobre o IEAv e foram passadas informações detalhadas a respeito da área a ser sobrevoada, bem como os procedimentos de segurança, a serem adotados para a execução dos voos. Os voos foram autorizados através do Ofício nº 9/OTTA/7608, de 26 de abril de 2017, do Chefe do SRPV-SP, no qual foram autorizados os voos em coordenação como a Torre de controle (TWR) do DTCEA-SJ.

3.1.2. Phanton 4 da DJI

O RPAS utilizado para a obtenção das fotografias foi o modelo Phantom 4 da empresa DJI, que possui uma câmara integrada a aeronave. A aeronave é pilotada por um controle e um dispositivo tipo IOS ou Android, que apresenta o programa de navegação. A câmara FC-330 da SONY possui resolução de 12 megapixels e distância focal nominal de 3,61 mm, de acordo com o manual do Phantom 4 da empresa DJI (DJI, 2016b). Na Figura 3.3a são apresentadas o RPA com a câmara integrada da Sony FC-330 e o respectivo controle.

Figura 3.3 – ARP para fotografia e filmagem Phantom 4 da DJI

(a)



(b)

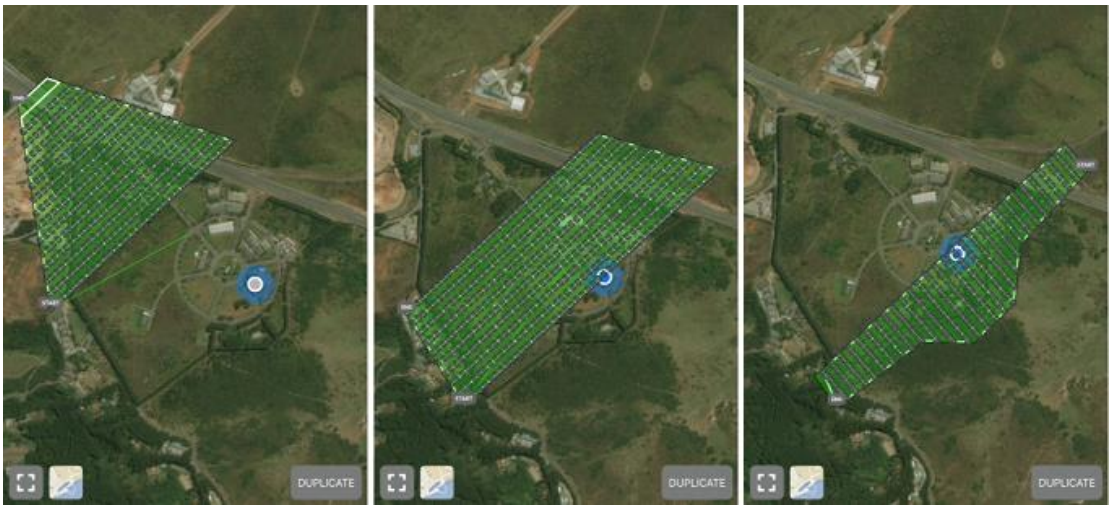
Fonte: Produzido pelo autor.

A imagem captada pela câmara FC-330 é enviada para o controle e apresentada pelo programa DJI Go, um "*tablete*" ou celular. Uma imagem da tela do programa DJI Go é apresentada na Figura 3.3b.

3.1.3. Planejamento de voo para obtenção das fotografias

Para o planejamento de voo utilizou-se o programa Pix4D Capture. O programa é especializado em gerar plano de voo para obtenção de fotografias com superposição longitudinal e lateral. Para realizar a cobertura fotográfica de uma área de interesse é necessário apenas delimitar a área na tela e informar a altura de voo em relação ao solo, o programa é capaz de criar as linhas de voo e planejar os momentos de obtenção das fotografias (PIX4D SA, 2017b). A Figura 3.4 apresenta o planejamento de voo da área do IEAv.

Figura 3.4 – Plano de Voo no Pix4D Capture para cada voo do IEAv.



Fonte: Produzido pelo autor.

3.2. Levantamento com GNSS

3.2.1. Implantação dos Pontos de Controle

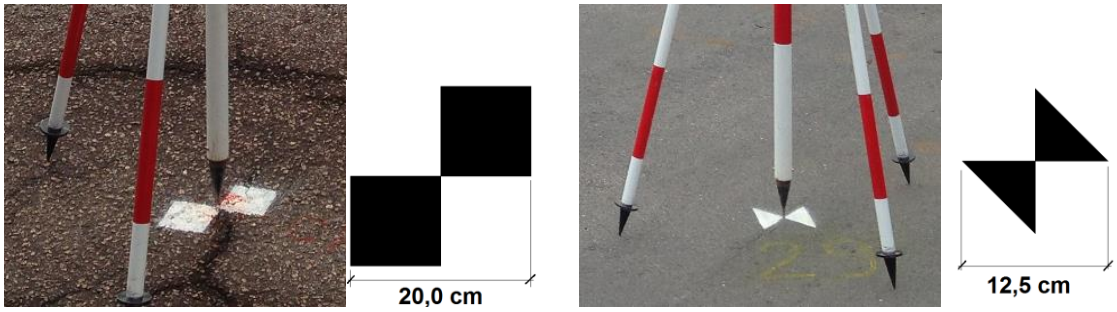
Para a implantação dos pontos de controle devem ser estudadas a dimensão e forma dos alvos de modo que possam ser visualizados na maior altitude permitida para o voo do RPA. De acordo com a ICA 100-40 este valor é de

120m de altura em relação ao nível do solo de forma que o voo não venha a prejudicar a navegação aérea (DECEA/ICA_100-40, 2016).

De acordo com o critério modificado de Johnson, uma feição pode ser detectada se tivermos 0,75 ciclos de linhas ou pixels sobre o tamanho médio de um alvo. Este alvo é reconhecido se tivermos 3 linhas sobre o alvo e identificado com 6 linhas (LEACHTENAUER; ASSOCIATES; AVE, 2003).

A câmara da Sony FC330 do RPA Phantom 4 apresentou o GSD de 5,58 cm para a altura de voo de 120 metros e o GSD de 3,06 cm para a altura de voo de 70 m. Por este motivo inicialmente foram pré-sinalizados, com pintura a tinta óleo branca, no asfalto, com formatos distintos. Os alvos utilizados como GCP foram pintados a Figura 3.5a e os alvos utilizados como *Checkpoint* foram pintados conforme a Figura 3.5b.

Figura 3.5 – Alvos pré-sinalizados utilizado como Check Point.



(a) (b)

Fonte: Produzido pelo autor.

Posteriormente, a fim de verificar de forma experimental como os alvos seriam visualizados nas imagens para diferentes alturas de voo, foram realizados voos para obtenção de imagens a 20, 40, 60, 80, 100 e 120 metros de altura. Os alvos utilizados foram semelhantes aos apresentados na Figura 3.5a.

Para se verificar o contraste das imagens, os alvos foram pintados na cor amarela, com tamanho de 20 x 20 cm e outros três alvos, variando a tonalidade de branco para cinza, com tamanho de 20 x 25 cm. As Figura 3.6a, b e c

apresentam os alvos nas fotografias com alturas de voo de 20, 80 e 120 metros, respectivamente.

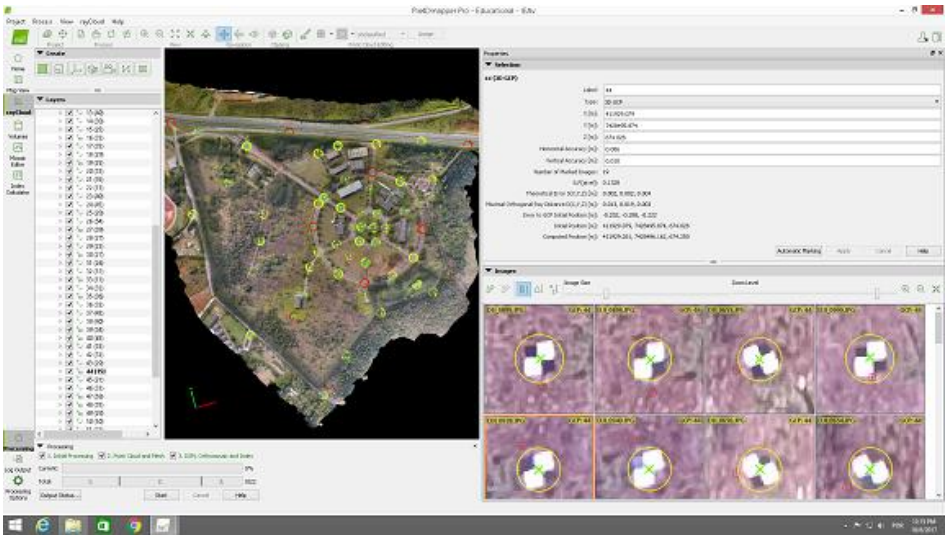
Figura 3.6 – Alvos nas alturas de voo de: a) 20, b) 80 e c) 120m.

(a) (b) (c)

Fonte: Produzido pelo autor.

Posteriormente, para uma distribuição mais homogênea e uma melhor visualização dos GCPs foram confeccionados alvos móveis de 35 cm. Esses alvos foram colocados sobre os pontos de controle, que ficavam na vegetação. O resultado de como este marcos apareceram na imagem para a identificação dos GCPs pode ser visto na Figura 3.7. Nos pontos que foram pintados no asfalto os GCPs foram pintados na cor amarela a fim de melhor destacar estes alvos, principalmente nas fotografias com maior altura de voo.

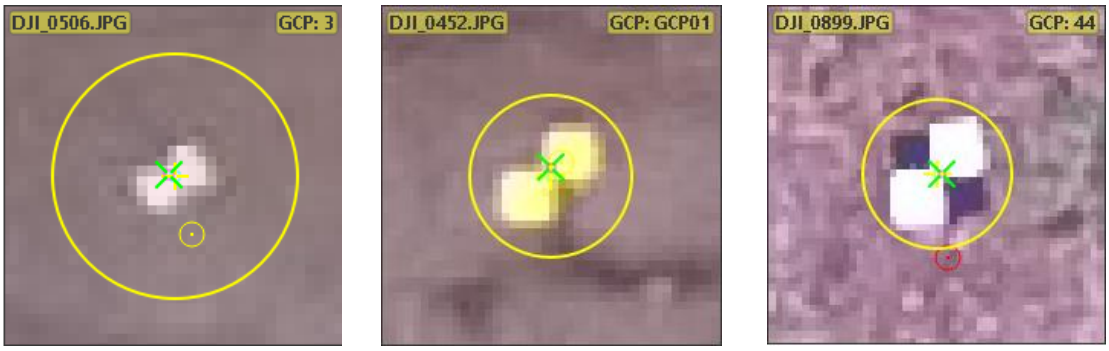
Figura 3.7 – Tela de seleção dos pontos de controle no Pix4D Mapper Pro.



Fonte: Produzido pelo autor.

A Figura 3.8 apresenta alvos implantados para o voo realizado na altura de 70 metros. O alvo de 12,5 cm é apresentado na Figura 3.8a, o de 20 cm na Figura 3.8b e o de 35 cm na Figura 3.8c.

Figura 3.8 – Visualização dos alvos no voo de 70m de altura do solo.

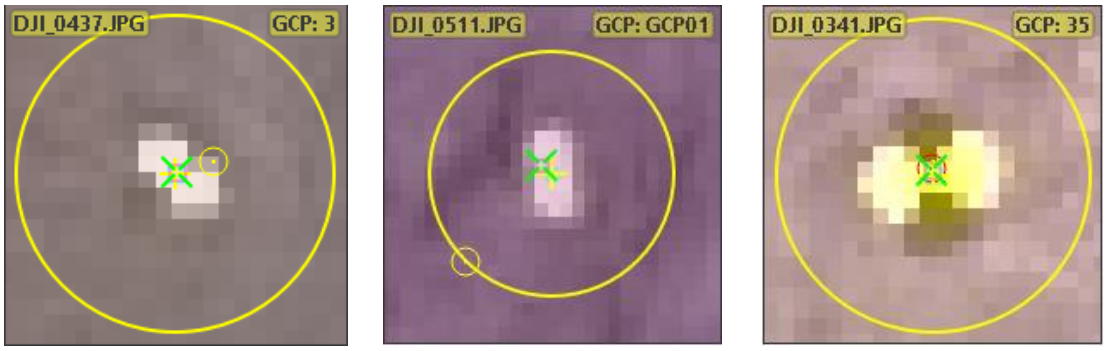


(a) (b) (c)

Fonte: Produzido pelo autor.

Na Figura 3.9 são apresentados os alvos implantados para o voo realizado na altura de 120 metros. O alvo de 12,5 cm é apresentado na Figura 3.9a, o de 20 cm na Figura 3.9b e o de 35 cm na Figura 3.9c.

Figura 3.9 – Visualização dos alvos no voo de 120m de altura do solo.



(a) (b) (c)

Fonte: Produzido pelo autor.

Alguns Testes em laboratório foram realizados de forma alternativa ao ponto de vista do domínio espacial, função de resposta ao impulso. O processo de formação de imagens também pode ser analisado do ponto de vista do domínio da frequência, ou mais especificamente, da frequência espacial, função de

transferência de modulação, do inglês *Modulation Transfer Function (MTF)*, (HOLST, 2011).

A MTF é uma medida objetiva da qualidade da imagem gerada por um sistema imageador. Ela mostra a eficiência do sistema em reproduzir um sinal, onde o contraste varia de forma senoidal numa frequência espacial. Normalmente os sistemas imageadores apresentam a frequência espacial em ciclos/metro ou ciclos/pixel, nos sistemas digitais (KIOHARA, 2017).

Como parte do trabalho de caracterização da câmara Sony FC330, embarcado no Phantom 4, foi realizado a caracterização da MTF do Phantom 4 utilizado neste trabalho. Os resultados deste trabalho foram publicados no XIX Simpósio de Aplicações Operacionais em Áreas de Defesa (SIGE-2017), realizado no ITA. Para mais informações vide (KIOHARA, 2017).

3.2.2. Determinação das Coordenadas dos Pontos de Controle

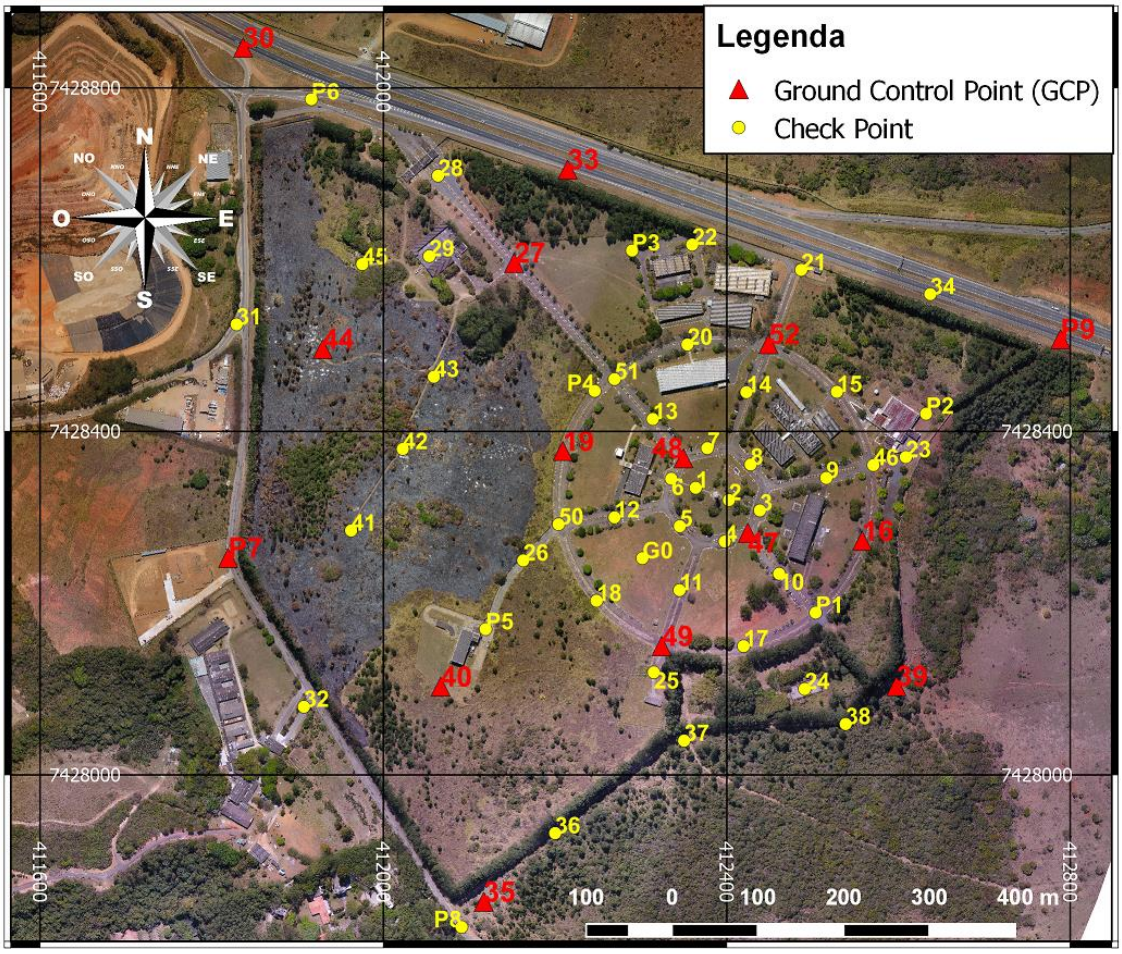
Os pontos de controle no terreno, do inglês *Ground Control Point* (GCP) e os pontos de verificação, do inglês Checkpoint, foram levantados com um par de receptores GNSS geodésicos de dupla frequência, GTR-G2, da empresa TechGEO. O processamento foi realizado no programa GTR Processor v2.92, no modo estático rápido. O receptor GTR-G2 é apresentado na Figura 3.10.

Figura 3.10 – Receptor GTR-G2 da TechGEO.

Fonte: Produzido pelo autor.

O posicionamento estático das bases foi realizado usando as estações de referência da RBMC. Os pontos de controle no terreno foram transportados tomando como base o ponto G0, situado no interior do IEAv, obtendo-se uma acurácia sub-centimétrica. A distribuição dos pontos na área levantada é apresentada na Figura 3.11.

Figura 3.11 – Disposição dos pontos de controle (GCP) e Verificação.



Fonte: Produzido pelo autor.

O sistema de projeção utilizado neste trabalho foi o Universal Transversal de Mercator (UTM), no fuso 23 e no Datum de referência SIRGAS2000. A escolha deste sistema é devido ao fato do sistema de câmara também estar em metros, mantendo assim a relação entre as coordenadas em metros do sistema de terreno e da câmara. As coordenadas dos GCPs, que foram utilizados no

ajustamento de bloco aerofotogramétrico, (em Inglês, *Bundle Block Adjustment* - BBA), estão listadas na Tabela 3.1

Tabela 3.1 – Coordenadas dos pontos de controle de terreno (GCP).

nº	ID	E (m)	N (m)	H (m)	Planimétrico σ (m)	Altimétrico σ (m)
01	**P7**	411818,835	7428252,569	669,812	0,006	0,008
02	**P9**	412788,650	7428507,425	653,107	0,006	0,011
03	**16**	412557,548	7428272,575	682,045	0,006	0,011
04	**19**	412208,735	7428377,206	674,702	0,005	0,008
05	**27**	412152,102	7428596,227	670,354	0,006	0,009
06	**30**	411836,375	7428846,923	657,189	0,006	0,009
07	**33**	412214,541	7428704,938	669,211	0,007	0,010
08	**35**	412116,703	7427852,176	670,730	0,004	0,011
09	**39**	412597,430	7428103,360	676,110	0,004	0,007
10	**40**	412066,484	7428102,749	665,494	0,006	0,012
11	**44**	411929,079	7428495,874	674,028	0,006	0,010
12	**47**	412424,294	7428281,857	681,289	0,008	0,018
13	**48**	412349,413	7428368,619	679,021	0,007	0,016
14	**49**	412323,947	7428149,882	679,397	0,009	0,020
15	**52**	412448,394	7428501,591	677,647	0,012	0,026

Fonte: Produzido pelo autor.

Após a geração da ortoimagem e do MDS foram utilizados os pontos de verificação ou *Checkpoints*, para realizar a análise do Padrão de Exatidão Cartográfica (PEC). Esta análise tem como finalidade verificar a qualidade geométrica das imagens geradas em pontos diferentes daqueles utilizados para ajustar o bloco fotogramétrico. As coordenadas dos pontos de verificação estão listadas na Tabela 3.2.

Tabela 3.2 – Coordenadas dos pontos de verificação (*Checkpoints*).

nº	ID	E (m)	N (m)	H (m)	Planimétrico σ (m)	Altimétrico σ (m)
01	**G0**	412301,542	7428252,295	679,076	0,009	0,017
02	**P1**	412503,346	7428188,815	682,503	0,006	0,011
03	**P2**	412631,993	7428420,511	682,473	0,005	0,009
04	**P3**	412289,589	7428610,578	670,838	0,006	0,009
05	**P4**	412245,953	7428447,084	674,182	0,006	0,008
06	**P5**	412118,885	7428169,590	666,753	0,006	0,010
07	**P6**	411915,924	7428786,711	661,420	0,006	0,011
08	**P8**	412090,926	7427822,748	667,467	0,005	0,010

Continua

Tabela 3.2 - Conclusão.

nº	ID	E (m)	N (m)	H (m)	Planimétrico σ (m)	Altimétrico σ (m)
09	**1**	412363,655	7428334,293	680,160	0,004	0,011
10	**2**	412402,331	7428319,988	680,828	0,004	0,011
11	**3**	412438,436	7428307,912	680,999	0,004	0,011
12	**4**	412397,465	7428271,714	681,014	0,004	0,011
13	**5**	412345,144	7428289,550	680,311	0,005	0,011
14	**6**	412335,199	7428344,784	679,480	0,005	0,012
15	**7**	412377,219	7428380,391	679,406	0,005	0,012
16	**8**	412427,639	7428361,405	680,258	0,005	0,012
17	**9**	412515,785	7428345,770	681,229	0,006	0,013
18	**10**	412460,861	7428234,162	681,937	0,006	0,012
19	**11**	412344,802	7428215,090	680,130	0,006	0,012
20	**12**	412269,109	7428299,850	677,947	0,005	0,011
21	**13**	412313,706	7428414,366	677,031	0,005	0,010
22	**14**	412422,771	7428445,592	678,647	0,006	0,012
23	**15**	412528,133	7428446,063	679,659	0,005	0,010
24	**17**	412419,440	7428149,882	681,035	0,009	0,009
25	**18**	412248,157	7428202,692	677,442	0,006	0,010
26	**20**	412354,009	7428501,101	675,600	0,006	0,010
27	**21**	412486,600	7428588,024	670,967	0,006	0,010
28	**22**	412359,572	7428617,404	671,931	0,006	0,011
29	**23**	412608,482	7428370,022	682,040	0,006	0,010
30	**24**	412490,533	7428099,953	678,060	0,005	0,008
31	**25**	412314,826	7428119,349	679,608	0,006	0,010
32	**26**	412162,761	7428249,649	670,539	0,005	0,009
33	**28**	412063,491	7428697,726	668,256	0,006	0,009
34	**29**	412053,322	7428604,021	673,394	0,005	0,009
35	**31**	411828,835	7428524,558	668,225	0,005	0,008
36	**32**	411907,199	7428079,246	663,131	0,006	0,009
37	**34**	412636,993	7428559,784	657,678	0,008	0,014
38	**36**	412199,904	7427932,084	675,156	0,007	0,010
39	**37**	412350,201	7428039,774	677,070	0,009	0,014
40	**38**	412538,344	7428059,194	670,934	0,005	0,011
41	**41**	411962,248	7428284,493	660,561	0,006	0,009
42	**42**	412022,378	7428379,451	662,793	0,006	0,009
43	**43**	412058,638	7428463,570	667,423	0,006	0,009
44	**45**	411975,288	7428594,715	673,762	0,006	0,012
45	**46**	412570,618	7428360,736	681,594	0,010	0,022
46	**50**	412203,904	7428291,797	675,924	0,009	0,021
47	**51**	412269,078	7428460,845	674,315	0,012	0,025

Fonte: Produzido pelo autor.

Os pontos foram pré-sinalizados em locais de fácil visualização aérea e posteriormente levantados com o receptor GTR-G2 da TechGEO, uma

fotografia do ponto base G0, utilizado para transportar as demais coordenadas é apresentada na Figura 3.12a e um dos pontos irradiados a partir do ponto base é apresentado na Figura 3.12b.

Figura 3.12 – Levantamento de pontos por GNSS: a) base e b) irradiado.

(a) (b)

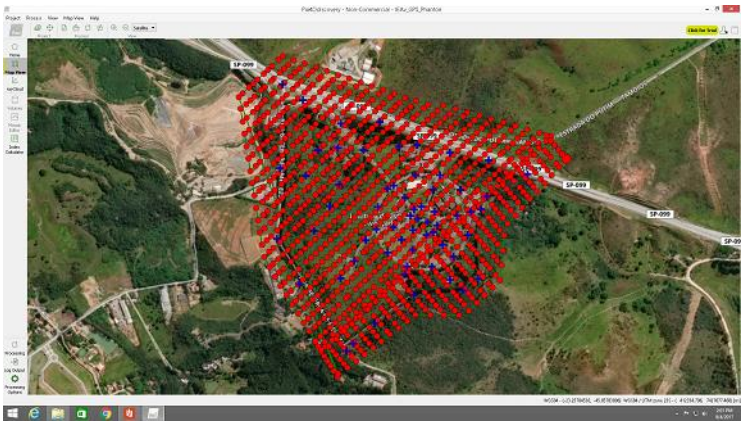
Fonte: Produzido pelo autor.

3.3. Produção das Ortoimagens e DSM

3.3.1. Processamento das Imagens

Para o processamento das imagens aéreas foi empregado o software comercial Pix4D Maper PRO, a fim de gerar as ortoimagens e DSM (PIX4D SA, 2017a). As coordenadas e atitudes salvas nos metadados de cada imagem são importadas pelo programa e apresentadas georeferenciadas sobre um mapa índice, conforme pode ser visualizado na Figura 3.13.

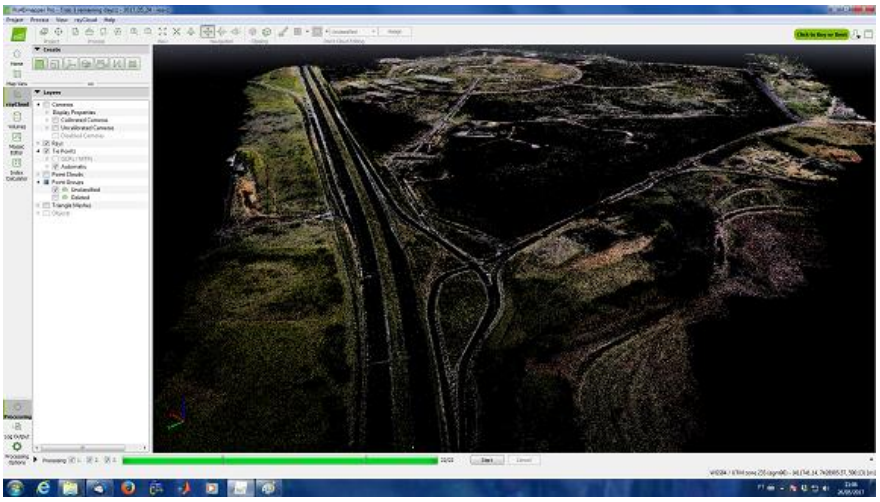
Figura 3.13 – Mapa de localização das fotografias



Fonte: Produzido pelo autor.

Na etapa seguinte foi realizado o processamento da orientação relativa e o ajustamento de bloco de forma parcial. Com o uso do programa é possível identificar automaticamente pontos correlatos entre todos os pares de fotografias e realizar um ajustamento inicial dos parâmetros de calibração da câmara. O programa possibilita também realizar um ajustamento preliminar da posição do bloco, utilizando como base as coordenadas informadas pelo GNSS do RPA, gerando uma nuvem de pontos característicos do terreno, conforme apresentado na Figura 3.14.

Figura 3.14 – Nuvem de pontos gerado no Pix4D Mapper Pro.

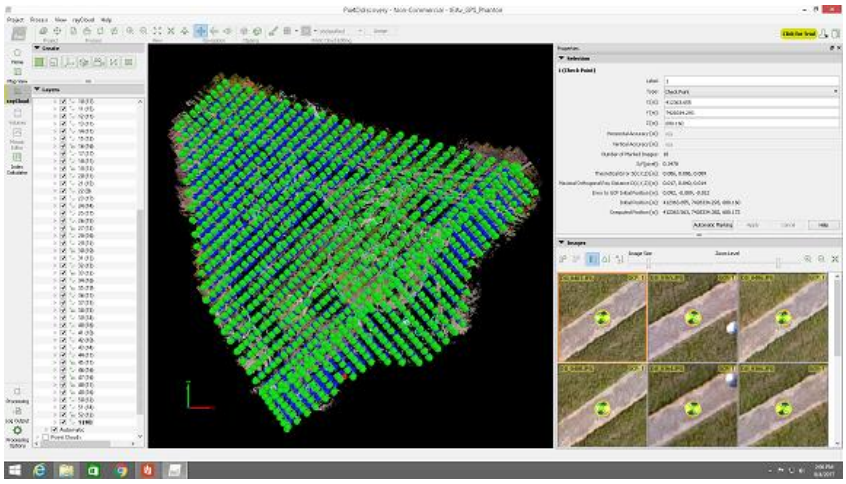


Fonte: Produzido pelo autor.

O ajustamento gerado com o uso das coordenadas do GNSS/INS do RPA, sem correção diferencial e sem um sistema INS de precisão, gera baixa acurácia posicional apesar de ter uma boa precisão interna do bloco aerofotogramétrico nesta fase. Por isso é necessário empregar os pontos de controle de terreno (GCPs) e os pontos de verificação (*Checkpoint*), para ajustar o bloco aos GCP e em seguida conferir o ajustamento com os *Checkpoints*.

Após o processamento inicial são importados os pontos de controle de campo e sendo informado ao programa em cada fotografia a localização exata de cada GCP e Checkpoint, para que o programa possa recalcular a posição do bloco fotogramétrico, conforme pode ser visualizado na Figura 3.15.

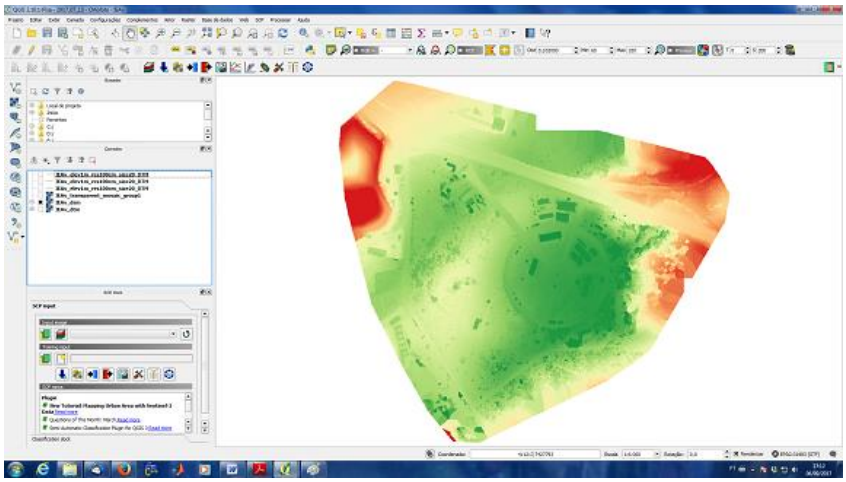
Figura 3.15 – Seleção dos pontos de controle de campo no Pix4D.



Fonte: Produzido pelo autor.

Após o processo de seleção dos pontos de controle de campo recalcula-se o bloco aerofotogramétrico e os parâmetros intrínsecos da câmara. A nuvem de pontos é então reposicionada conferindo acurácia ao bloco de ajustamento aerofotogramétrico. Posteriormente a nuvem de pontos é densificada para a geração do Modelo Digital de Superfície, que possibilita a ortorretificação do mosaico aerofotogramétrico. O MDS é uma representação matricial que associa uma altitude da superfície do terreno para cada coordenada. A Figura 3.16 apresenta um MDS utilizado no programa QGIS.

Figura 3.16 – Modelo Digital de Superfície (MDS) no QGIS .

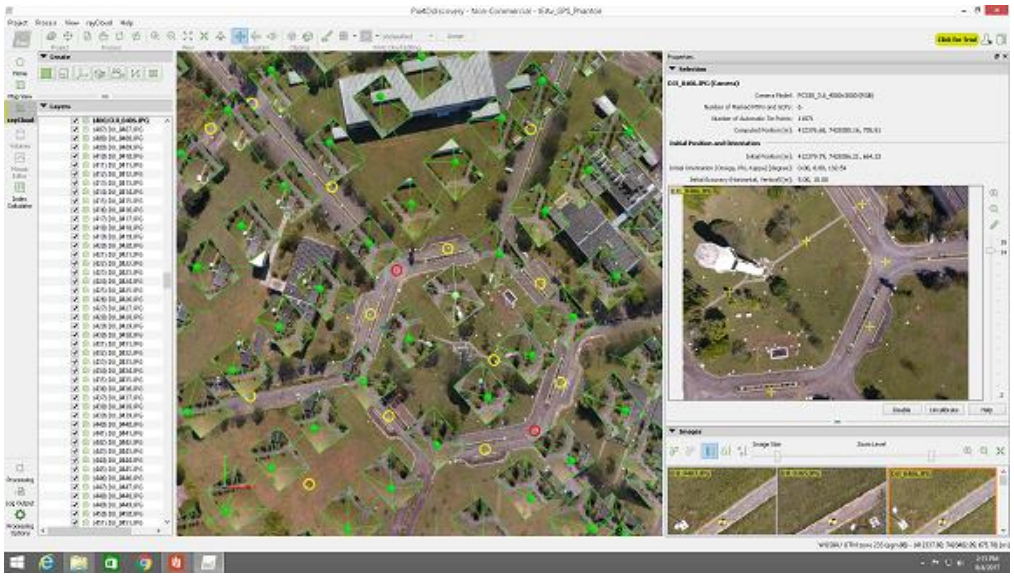


Fonte: Produzido pelo autor.

A partir do MDS as imagens podem ser retificadas corrigindo o deslocamento devido à paralaxe para cada pixel, transformando o mosaico (conjunto de fotografias) em uma ortoimagem. O mosaico é a junção de várias fotografias sem correção da perspectiva cônica, cuja finalidade é gerar uma imagem da área total sobrevoada. A ortoimagem é um mosaico da área total imageada onde foram corrigidas as distorções devido ao relevo, as distorções radiais, as distorções tangenciais e o deslocamento do Centro perspectivo de cada fotografia, gerando uma imagem onde o centro perspectivo está no infinito.

Vale ressaltar que quanto melhor o MDS melhor será a retificação da ortoimagem. Na Figura 3.17 é apresentada a visualização 3D, com um ortomosaico ao fundo e as fotografias que o gerou. No canto superior à direita visualiza-se uma fotografia com alguns pontos de controle de campo e abaixo três fotografias distintas onde aparece o mesmo ponto de controle.

Figura 3.17 – Edição das fotografias sobre a ortoimagem no Pix4D.



Fonte: Produzido pelo autor.

Os ortomosaicos e MDS são salvos em formatos que podem ser importados em Sistemas de Informações Geográficas (SIG), incluindo as coordenadas e atitudes das fotografias antes e depois de serem processadas e ajustadas pelo ajustamento de bloco aerofotogramétrico.

3.3.2. Geração de Ortoimagem e MDS

No decorrer desta pesquisa foram realizados diversos voos para a geração de ortoimagens e MDS. Estes voos tiveram a finalidade de familiarização com os procedimentos de pilotagem e utilização do programa de geração do plano de voo para a obtenção do conjunto de fotografias necessário ao recobrimento da área a ser mapeada.

Para os testes de processamento foram adquiridos blocos fotogramétricos em diversos horários e em diferentes condições de iluminação. Assim foram obtidos conjuntos de fotografias no período da manhã, por volta do meio dia e no período da tarde. Também foram adquiridos conjuntos de fotografias em dias ensolarados, ou seja, com radiação solar direta, o que gera sombra, e em dias com cobertura de nuvens, que geram imagens sem sombras.

Nas fotografias com sombra ocorreu a diminuição e até a completa perda de pontos correlatos, nas áreas de sombras próximas às árvores e edificações, diminuindo assim a quantidade de pontos nas nuvens de pontos nestas regiões e por sua vez perda de informação para a geração do MDS e ortoimagem. No entanto, nos dias ensolarados o contraste é bem maior nas áreas diretamente iluminadas, facilitando a identificação automática dos pontos correlatos entre as fotos e gerando uma nuvem de pontos bastante densa nestes locais.

Nas fotografias em dias com cobertura de nuvens existe o benefício do programa identificar pontos em toda a área, inclusive nas proximidades de árvores e edificações. Visto que não há sombras, toda a área imageada fica uniformemente recoberta, gerando nuvens de pontos mais uniformes, através da interseção espacial automática do programa. No entanto, o contraste é baixo, havendo em toda a região, uma menor identificação automática dos pontos correlatos entre as fotografias.

As áreas sobrevoadas utilizadas para a realização dos testes foram: o Instituto de Estudos Avançados (IEAv), situado em São José dos Campos – SP; a área

onde está sendo construído o novo prédio de ciências fundamentais do Instituto Tecnológico da Aeronáutica (ITA), situado dentro do campus do DCTA, também situado em São José dos Campos – SP; e o Centro de Lançamento de Alcântara (CLA), situado em Alcântara – MA, conforme ortoimagens apresentadas na Figura 3.18.

Figura 3.18 – Ortoimagem a) IEAv, b) Novo prédio do ITA e c) CLA.

(a) (b) (c)

Fonte: Produzido pelo autor.

No caso da área imageada sobre o IEAv foram realizados diversos voos em diferentes alturas de voo, recobrimento fotogramétrico e condições de luminosidade. Para efeito dos estudos deste trabalho foram avaliados os PEC das ortoimagens e do MDS que apresentaram melhores resultados. Assim foram utilizados os seguintes voos, conforme apresentado na Tabela 3.3.

Tabela 3.3 – Voos utilizados para os estudos sobre o IEAv.

Data	Horário Início e Término	Condição do Céu	Altura (m)	Nº de fotos	Visualização
08/06/2017	11:22hs às 13:56hs	Sol sem nuvens	70	2414	Figura 3.19a
13/07/2017	11:36hs às 12:58hs	Sol sem nuvens	80	990	Figura 3.19b
14/09/2017	11:50hs às 12:45hs	Sol sem nuvens	120	647	Figura 3.19c

Fonte: Produzido pelo autor.

Vale ressaltar que quanto maior a superposição das fotografias, maior será a quantidade de fotos para a geração de ortoimagens, gerando uma maior rigidez do Bloco de Ajustamento Aerofogramétrico (BAA). Por outro lado, quanto maior

for o número de fotografias maior será o esforço computacional para o processamento das imagens e maior será também o tempo gasto para o processamento. A Figura 3.19 apresenta os ortomosaicos de 70, 80 e 120 metros de altura realizados sobre o IEAv.

Figura 3.19 – Altura de voo das ortoimagens IEAv: a) 70, b) 80 e c) 120m.

(a) (b) (c)

Fonte: Produzido pelo autor.

O servidor utilizado para o processamento dos voos do IEAv foi o Intel(R) Xeon(R), CPU E5-2698 v4 @ 2.20GHz, com memória RAM de 256GB e GPU RDPUDD Chained DD. O sistema operacional instalado neste servidor é o Windows 8.1 Pro, 64-bit.

Na Tabela 3.4 são apresentados os resultados do processamento dos três voos realizados sobre o IEAv e os tempos gastos para a realização das principais etapas de processamento no Pix4D Mapper Pro, a saber: Tempo de Processamento Inicial (T1), Tempo para Geração de Nuvem de Pontos (T2), Tempo para Geração do MDT (T3) e Tempo para Geração da ortoimagem (T4).

Tabela 3.4 – Número de fotos x tempo de processamento.

Altura de Voo (m)	Nº de Fotos	Área (Km²)	GSD (cm)	RMS (m)	T1 (h:min)	T2 (h:min)	T3 (h:min)	T4 (h:min)
70	2414	1,0054	3,04	0,036	18:03	23:04	19:27	3:29
80	990	1,2037	3,57	0,032	0:29	22:00	20:07	1:13
120	647	2,0456	5,58	0,070	0:23	16:44	12:50	0:54

Fonte: Produzido pelo autor.

Vale ressaltar que na medida em que a altura de voo aumenta o número de fotos necessário para recobrir a mesma área diminui, o que impacta diretamente na quantidade de imagens a serem processadas e no tempo gasto para o processamento da geração da nuvem de pontos, do MDS e da ortoimagem.

A grande quantidade de fotografias obtidas no voo a 70 metros é devido ao fato de terem sido realizados voos longitudinais e transversais, pois com uma maior quantidade de fotografias aumenta a rigidez geométrica para o cálculo do ajustamento de bloco aerofotogramétrico. No entanto, isto duplicou a quantidade de fotografias, se comparada com o voo a 80 metros de altura.

A precisão gráfica é a menor grandeza medida no terreno, que pode ser representada em desenho na escala mencionada. Portanto a experiência demonstrou que o menor comprimento gráfico que se pode representar em um desenho é de 1/5 de milímetro ou 0,2 mm, sendo este o erro admissível. Assim um fator importante para a escolha da altura de voo é o GSD e o Erro Médio Quadrático do produto cartográfico gerado.

Para que se obtenha um GSD compatível com a escala final de representação desejada para a ortoimagem, utiliza-se como referência a precisão gráfica. Assim, por exemplo, se a escala da carta for 1:1.000, o menor detalhe a ser representado será de 20 cm e caso a escala for 1:500, o menor detalhe será de 10 cm. Neste caso os GSDs obtidos nos voos atendem à resolução espacial da escala até 1:250. No entanto, é necessário o estudo da exatidão cartográfica destes produtos, que serão analisados no capítulo de resultados, através da análise do Padrão de Exatidão Cartográfica (PEC).

Analisando o aspecto das imagens geradas em cada processamento foi constatado que, na ortoimagem de 70 metros de altura de voo, apesar da resolução espacial ser alta, o grande número de fotografias trouxe um aspecto de imagem fora de foco, conforme visualizado na Figura 3.20a. Pode-se verificar também na Figura 3.20a que a sombra não fica definida e a torre que

possui 36 metros de altura ficou bastante deformada. Nos outros casos, tanto a sombra quanto a torre foram melhor representados, conforme apresentado nas Figura 3.20a e b.

Isto possivelmente ocorreu porque, para cada área da ortoimagem, existiam diversas fotos, diferentes horários de obtenção e que a ortoimagem apresentada é a média de todas as fotografias superpostas na região. Assim as sombras são suavizadas em posições distintas e os objetos ficam desfocados.

Figura 3.20 – Feições das Ortoimagens: a) 70, b) 80 e c) 120m.

(a) (b) (c)

Fonte: Produzido pelo autor.

Os programas comerciais possuem recursos para editar este tipo de problema, possibilitando escolher apenas as imagens que melhor representem determinada região. Essa edição também pode ser utilizada para a retirada de fotografias com perspectivas que prejudiquem a composição da ortoimagem.

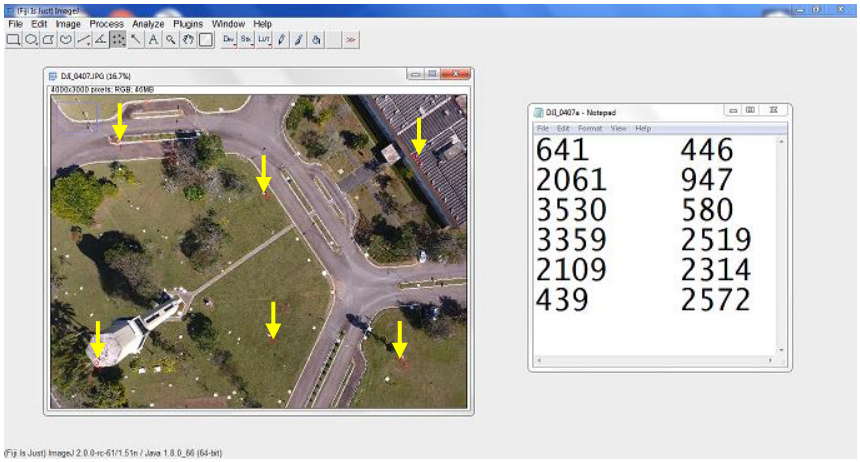
No entanto, este processo é manual e quando o número de fotografias é muito grande, o tempo necessário para realizar a edição torna o trabalho inviável. Por este motivo apenas as ortoimagens de 80m e 120m foram escolhidas para a realização dos testes de resseção espacial, pois apresentam os detalhes das feições com maior nitidez do que a ortoimagem a 70m de altura de voo.

3.4. Cálculo da Ressecção Espacial

O Objetivo do cálculo da Ressecção Espacial é determinar as coordenadas do Centro Perspectivo e as atitudes da câmara no espaço utilizando para tal as coordenadas de pontos homólogos no Espaço-Objeto e no Espaço-Imagem, o algoritmo de cálculo pode ser vista no APÊNDICE A. Para os testes iniciais foram escolhidos inicialmente de forma visual pontos bem definidos e bem distribuídos na fotografia e na ortoimagem. As coordenadas da fotografia em Linha e Coluna (L, C), representando o Espaço-Imagem, e as coordenadas de terreno Este, Norte e Altitude (E, N, H), representando o Espaço-Objeto.

Inicialmente foram obtidas as coordenadas (C, L) da imagem através do programa ImageJ na Versão 1.51n, que salva um arquivo texto com as linhas e as colunas dos pixels selecionados na tela. Para tanto foram selecionados 6 pontos em cada imagem conforme apresentado na Figura 3.21.

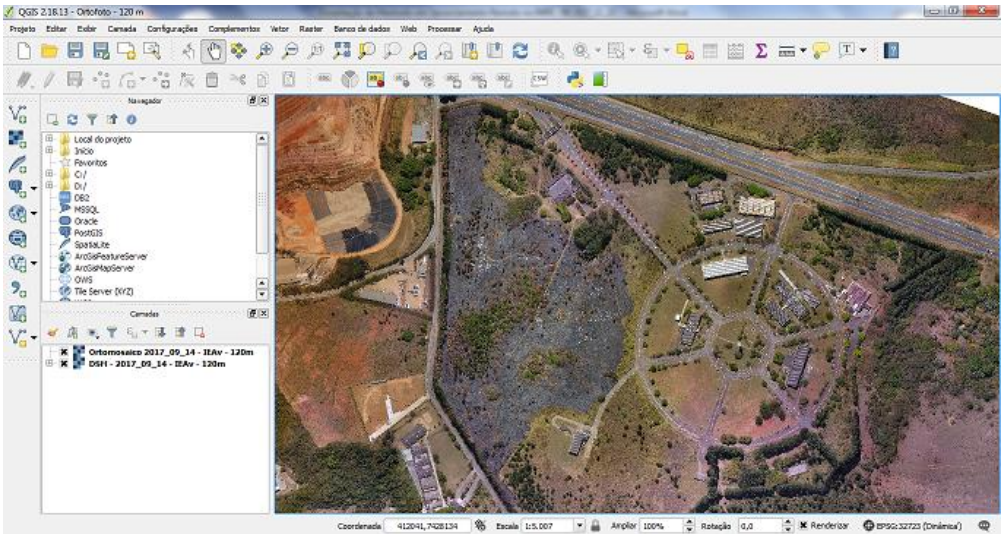
Figura 3.21 – Programa ImageJ para obter as coordenadas da imagem.



Fonte: Produzido pelo autor.

Para a obtenção das coordenadas de terreno (E, N, H) foi utilizado o programa QGIS Versão 2.18.13. A ortoimagem e o MDS gerados no Pix4D foram importados no QGIS. As coordenadas planimétricas, do sistema de terreno, dos 6 pontos homólogos foram obtidas das ortoimagens e as respectivas altitudes do MDS. Uma visualização da tela do programa é apresentado na Figura 3.22.

Figura 3.22 – Programa QGIS usado para obter as coordenadas de terreno.



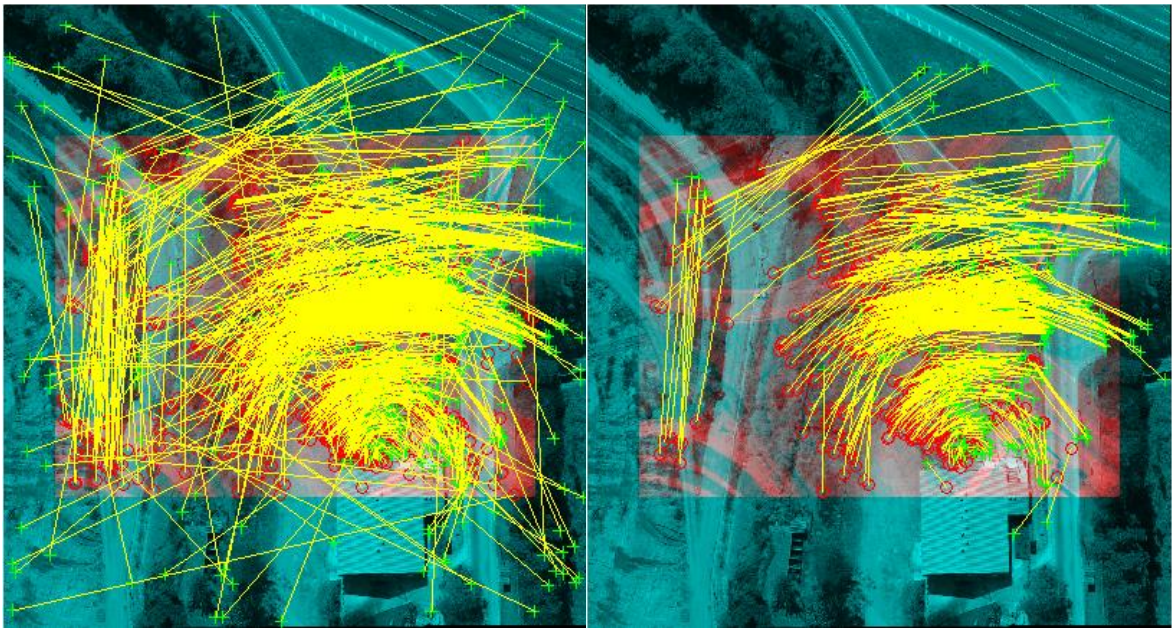
Fonte: Produzido pelo autor.

Posteriormente foram realizados testes de identificação automática de pontos utilizando o Programa Matlab e os algoritmos *Speeded Up Robust Features (SURF)* e *RAndom SAmple Consensus (RANSAC)* (SILVA FILHO, 2016). Nestes casos a identificação dos pontos homólogos é realizada de forma automática, ou seja, sem a interferência humana na escolha desses pontos.

O algoritmo SURF realiza a descrição das características em duas imagens e em seguida realiza uma correspondência entre os pontos característicos com maior semelhança entre si. No entanto, estas correspondências podem ocasionar “casamentos” errôneos entre os pontos homólogos da imagem e da ortoimagem. Isso pode ocorrer caso um ponto da imagem seja mais semelhante às características de um ponto diferente na ortoimagem. A Figura 3.23a apresentada esta conexão de pontos utilizando apenas o SURF e na

Figura 3.23b é apresentada a ligação de pontos utilizando o SURF e o RANSAC combinados.

Figura 3.23 – Pontos homólogos identificados pelo SURF e SURF/RANSAC



(a) (b)

Fonte: Produzido pelo autor.

Na Figura 3.23a visualiza-se que na identificação de pontos homólogos utilizando apenas o SURF aparecem alguns pontos aleatórios no conjunto de conexões de pontos homólogos. Estes pontos são identificações errôneas, sendo denominados em inglês de *outliers.*

O algoritmo RANSAC é utilizado para identificar e retirar estes *outliers*. Na Figura 3.23b se visualiza o conjunto de pontos homólogos sem os *outliers*. Apesar do algoritmo RANSAC retirar a grande maioria dos pontos aleatórios, ainda assim alguns *outliers* podem permanecer no conjunto de pontos selecionados, sendo este um fator que pode inserir erros na determinação da posição e atitude da câmara.

Para a navegação autônoma por imagem a identificação automática de pontos é imprescindível, sendo a única que pode ser utilizada para navegação em

tempo real. Os dois métodos de identificação foram utilizados para se verificar as limitações de cada processo, bem como a acurácia de cada um dos métodos.

Para o cálculo do centro perspectivo e atitude da câmara é necessário realizar a Transformação Projetiva, que liga o Sistema Fiducial ao Sistema de Terreno, através da distância focal. Assim, foram medidas as coordenadas no Sistema de Imagem, sendo necessária a Transformação Afim para transformar o Sistema de Imagem digital em Fiducial. Estas transformações serão detalhadas a seguir nos Itens 3.4.1 e 3.4.2.

3.4.1. Transformação do Sistema de Imagem em Fiducial

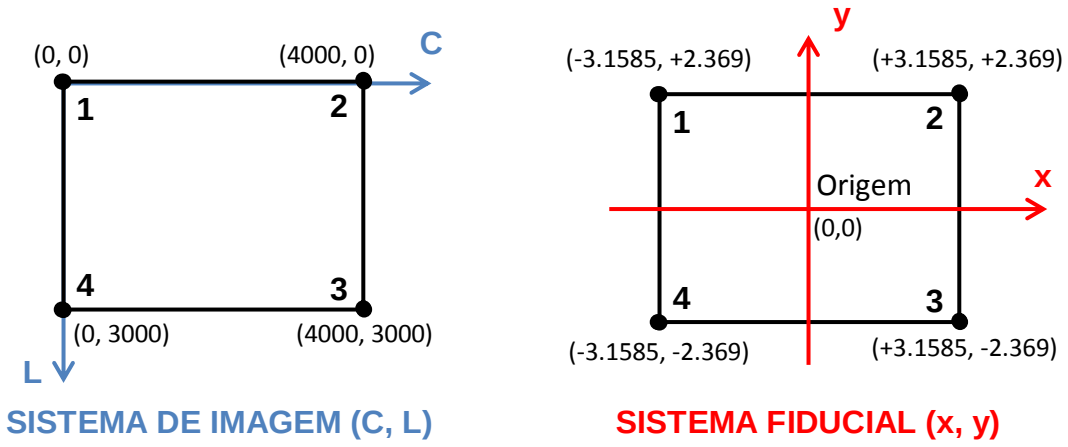
Para a o cálculo da ressecção espacial é necessário que o Sistema de Imagem digital seja convertido em Sistema Fiducial. Assim a partir das coordenadas da imagem (C, L) são calculadas as coordenadas no Sistema Fiducial (x, y) por intermédio de uma Transformação Afim Plana.

A câmara empregada, FC330 da SONY, dispõe de um sensor EXMO 1/2.3'', com resolução de 12Mb, gerando imagens com 4000 colunas por 3000 linhas, sendo as respectivas dimensões do sensor 6,317 mm por 4,738 mm. A representação dos pontos utilizados como marcas fiduciais, para o cálculo dos parâmetros de Transformação Afim entre os sistemas é visualizada na Figura 3.24.

Para a transformação das coordenadas dos sistemas imagem para o sistema fiducial utilizam-se as equações de Transformação Afim modelo linearizado, apresentado no Item 2.8.1, equações 2.4 e 2.5 pois, neste caso, não se deseja obter os parâmetros originais da transformação.

Os parâmetros lineares de transformação entre os sistemas são obtidos conforme a resolução apresentada nos Itens 2.10 a 2.12, utilizando os quatro pontos conhecidos nos dois sistemas, conforme Figura 3.24.

Figura 3.24 – Relação entre os sistemas imagem e fiducial.



Fonte: Produzido pelo autor.

A partir dos 4 pontos nos dois sistemas são montadas as matrizes dos parâmetros A, com as coordenadas do sistema imagem (C_n, L_n), e a matriz dos valores observados L, com as coordenadas do sistema fiducial (x_n, y_n), conforme Equações 3.1 e 3.2.

$$A = \begin{bmatrix} 1 & C_1 & L_1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & C_1 & L_1 \\ 1 & C_2 & L_2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & C_2 & L_2 \\ 1 & C_3 & L_3 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & C_3 & L_3 \\ 1 & C_4 & L_4 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & C_4 & L_4 \end{bmatrix} \qquad 3.1$$

$$L = \begin{bmatrix} x_1 \\ y_1 \\ x_2 \\ y_2 \\ x_3 \\ y_3 \\ x_4 \\ y_4 \end{bmatrix} \qquad 3.2$$

Resolvendo o sistema obtêm-se os parâmetros da Transformação Afim, para o caso linear, dispostos na matriz das incógnitas X, conforme apresentado na Equação 3.3. Para a resolução do sistema de equações e obtenção dos

valores das incógnitas utiliza-se a Equação 3.4, já apresentada no Item 2.11, Equação 2.41 e repetida neste capítulo a fim de facilitar o entendimento do desenvolvimento dos cálculos.

$$X = \begin{bmatrix} a_0 \\ a_1 \\ a_2 \\ b_0 \\ b_1 \\ b_2 \end{bmatrix} \qquad 3.3$$

$$X = (A^T.P.A)^{-1}.A^T.P.L \qquad 3.4$$

Após a obtenção dos parâmetros de conversão entre os sistemas, conforme descrito anteriormente, são convertidas as coordenadas do Sistema Imagem dos 6 pontos escolhidos na fotografia para o Sistema Fiducial. Para Tanto, a matriz dos parâmetros A, é preenchida com as coordenadas dos 6 pontos de cada imagem no Sistema de Imagem (C_n, L_n), conforme Equação 3.5.

$$A = \begin{bmatrix} 1 & C_1 & L_1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & C_1 & L_1 \\ 1 & C_2 & L_2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & C_2 & L_2 \\ 1 & C_3 & L_3 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & C_3 & L_3 \\ 1 & C_4 & L_4 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & C_4 & L_4 \\ 1 & C_5 & L_5 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & C_5 & L_5 \\ 1 & C_6 & L_6 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & C_6 & L_6 \end{bmatrix} \qquad 3.5$$

A matriz das incógnitas X é preenchida com os parâmetros calculados a partir dos 4 pontos apresentados na Figura 3.24 e resolvidos pela Equação 3.4. Para a obtenção das coordenadas no Sistema Fiducial multiplica-se a matriz dos parâmetros A, apresentada na Equação 3.5 pela matriz X, obtendo-se a matriz

L, que contém as coordenadas dos 6 pontos no Sistema Fiducial, conforme a Equação 3.6.

$$L = A.X = \begin{bmatrix} x_1 \\ y_1 \\ x_2 \\ y_2 \\ x_3 \\ y_3 \\ x_4 \\ y_4 \\ x_5 \\ y_5 \\ x_6 \\ y_6 \end{bmatrix} \qquad 3.6$$

3.4.2. Cálculo do Centro Perspectivo e das Atitudes da Câmara

No caso da ressecção espacial, utilizada neste trabalho, são calculados ângulos atitude da câmara, a saber: os ângulos de rotações em torno dos eixos (X, Y, Z), respectivamente (ω, ϕ, k), e as coordenadas do Centro perspectivo da câmara no sistema de coordenadas de terreno (E_0, N_0, H_0), no instante da tomada fotográfica. Para o cálculo destas informações utilizou-se a Transformação Projetiva, vista no Item 2.8.2 e no APÊNDICE A.

Neste caso, para conhecer as incógnitas da função, é necessária a resolução do sistema de equações não-linear, conforme apresentado no Item 2.13. Para tal é necessário o conhecimento dos valores aproximados dos ângulos de atitude e as coordenadas aproximadas do centro perspectivo da câmara, no momento da tomada da fotografia.

Inicialmente buscou-se uma solução independente de outros sistemas. Assim, utilizou-se como aproximação inicial para as coordenadas do centro perspectivo (E_0, N_0, H_0) a média das coordenadas Este e Norte dos seis pontos de controle e para a altitude ortométrica a média das altitudes dos seis pontos,

somada à altura de voo. Para os ângulos de rotação (ω, ϕ, k) utilizou-se como valor inicial zero.

Verificou-se que quando a câmara estava no Nadir e o terreno não apresentava grandes diferenças de declividade, a Aproximação por Série de Taylor convergia. Mesmo com os valores iniciais não sendo acurado, inclusive o ângulo *kappa* (*k*), que não possuía valores próximos do zero, pois o voo não era na direção Norte, pois já na primeira iteração é corrigido, não caindo em um mínimo local. No entanto, nos terrenos com grandes declividades ou quando a câmara estava com seu apontamento fora da vertical do lugar, a Aproximação por Série de Taylor não convergiu, pois esta aproximação não era suficiente.

Quando a câmara estava apontando para o nadir e o terreno bastante irregular, a solução do sistema de equações não lineares convergia para um mínimo local e não para o mínimo global. Isso ficou evidente na variância e na comparação com as coordenadas de referência do Ajustamento de Bloco Aerofotogramétrico. Quando a câmara estava fora da vertical do lugar, a média das coordenadas dos 6 pontos, como valores iniciais para as Aproximações por Série de Taylor, não representaram adequadamente as coordenadas aproximadas do centro perspectivo e, por este motivo, as aproximações divergiam do valor real.

Este problema foi contornado utilizando como valores iniciais, as coordenadas e atitudes fornecidas pelo sistema GNSS/INS e a partir deles foram calculadas as coordenadas e atitude, ajustadas a partir dos 6 pontos correlatos entre a imagem e a ortoimagem. Apesar de ter se utilizado as coordenadas do GNSS, para a realização do calculo é possível obter as coordenadas e ângulos de atitudes apenas com o INS, neste trabalho não foi possível realizar isto, pois estes dados não são disponibilizados separadamente. O cálculo é realizado utilizando o Ajustamento por Mínimos Quadrados e Aproximação por Série de Taylor, conforme apresentado no Item 2.9.

A função que transforma o Sistema de Terreno em Sistema Fiducial é a Transformação Projetiva apresentada nas Equações 2.11 e 2.12. Conhecendo-se os parâmetros intrínsecos da câmara, obtidos através de uma calibração geométrica, o modelo que melhor representa a transformação projetiva é apresentado nas Equações 2.20 e 2.21, pois adicionam às equações de colinearidade as correções das deformações radiais, tangenciais e o deslocamento do ponto principal, apresentadas respectivamente nas Equações 2.16, 2.17, 2.18 e 2.19.

Substituindo os valores da matriz de rotação nas equações de colinearidade e conhecendo os parâmetros intrínsecos da câmara nas duas funções, as variáveis são apenas as rotações $(\omega, \phi, \mathrm{K})$ e as translações (E_0, N_0, H_0). Essas duas funções levam as coordenadas de um ponto do terreno ao seu respectivo ponto no sistema fiducial, conforme apresentado nas Equações 3.7 e 3.8.

$$x_n = F_n(\omega, \phi, \mathrm{K}, E_0, N_0, H_0) \qquad 3.7$$

$$y_n = G_n(\omega, \phi, \mathrm{K}, E_0, N_0, H_0) \qquad 3.8$$

Com os valores aproximados das incógnitas da função e as coordenadas dos seis pontos nos sistemas de terreno e de Imagem é possível montar as matrizes necessárias para a resolução do sistema.

A matriz coluna dos Valores Observados (L_b) é igual ao resultado da transformação das coordenadas de imagem $(L_i,\ C_i)$ para Fiducial $(x_i,\ y_i)$ apresentado na Equação 3.6. A matriz coluna dos Valores Calculados (L_0) é o resultado das Equações 3.7 e 3.8 para os seis pontos, considerando os valores aproximados para as rotações $(\omega, \phi, \mathrm{K})$ e as translações (E_0, N_0, H_0) em cada interação, conforme apresentado na Equação 3.10.

$$L_b = L = A.X \qquad 3.9$$

$$L_0 = \begin{bmatrix} F_1(\omega, \phi, \mathrm{K}, E_0, N_0, H_0) \\ G_1(\omega, \phi, \mathrm{K}, E_0, N_0, H_0) \\ F_2(\omega, \phi, \mathrm{K}, E_0, N_0, H_0) \\ G_2(\omega, \phi, \mathrm{K}, E_0, N_0, H_0) \\ F_3(\omega, \phi, \mathrm{K}, E_0, N_0, H_0) \\ G_3(\omega, \phi, \mathrm{K}, E_0, N_0, H_0) \\ F_4(\omega, \phi, \mathrm{K}, E_0, N_0, H_0) \\ G_4(\omega, \phi, \mathrm{K}, E_0, N_0, H_0) \\ F_5(\omega, \phi, \mathrm{K}, E_0, N_0, H_0) \\ G_5(\omega, \phi, \mathrm{K}, E_0, N_0, H_0) \\ F_6(\omega, \phi, \mathrm{K}, E_0, N_0, H_0) \\ G_6(\omega, \phi, \mathrm{K}, E_0, N_0, H_0) \end{bmatrix} \qquad 3.10$$

Para o cálculo da Aproximação por Série de Taylor foi montada a matriz Jacobiana (J), conforme apresentado na Equação 3.11. Nesta matriz são calculadas as derivadas parciais das Equações 3.7 e 3.8 em relação às incógnitas $(\omega, \phi, \mathrm{K}, E_0, N_0, H_0)$ para cada um dos seis pontos homólogos do sistema, resultando em uma matriz de J_{6x12}.

$$J = \begin{bmatrix} \frac{d}{d\omega} F_1(\omega, \phi, \mathrm{K}, E_0, N_0, H_0) & \frac{d}{d\phi} F_1(\omega, \phi, \mathrm{K}, E_0, N_0, H_0) & & \frac{d}{dZ_0} F_1(\omega, \phi, \mathrm{K}, E_0, N_0, H_0) \\ \frac{d}{d\omega} G_1(\omega, \phi, \mathrm{K}, E_0, N_0, H_0) & \frac{d}{d\phi} G_1(\omega, \phi, \mathrm{K}, E_0, N_0, H_0) & \cdots & \frac{d}{dZ_0} G_1(\omega, \phi, \mathrm{K}, E_0, N_0, H_0) \\ \frac{d}{d\omega} F_2(\omega, \phi, \mathrm{K}, E_0, N_0, H_0) & \frac{d}{d\phi} F_2(\omega, \phi, \mathrm{K}, E_0, N_0, H_0) & & \frac{d}{dZ_0} F_2(\omega, \phi, \mathrm{K}, E_0, N_0, H_0) \\ \vdots & & \ddots & \vdots \\ \frac{d}{d\omega} F_n(\omega, \phi, \mathrm{K}, E_0, N_0, H_0) & \frac{d}{d\phi} F_n(\omega, \phi, \mathrm{K}, E_0, N_0, H_0) & & \frac{d}{dZ_0} F_n(\omega, \phi, \mathrm{K}, E_0, N_0, H_0) \\ \frac{d}{d\omega} G_n(\omega, \phi, \mathrm{K}, E_0, N_0, H_0) & \frac{d}{d\phi} G_n(\omega, \phi, \mathrm{K}, E_0, N_0, H_0) & \cdots & \frac{d}{dZ_0} G_n(\omega, \phi, \mathrm{K}, E_0, N_0, H_0) \end{bmatrix} \qquad 3.11$$

São necessários no mínimo 3 pontos, para a solução do sistema de equações, visto que para cada ponto há duas equações, assim com 3 pontos montam-se 6 equações para 6 incógnitas. Neste caso o sistema é possível e determinado. No entanto, para calcular a variância e a covariância do Centro Perspectivo e das atitudes da câmara é necessário um número maior que 3 pontos. Neste trabalho optou-se por 6 pontos, resultando em 12 equações para 6 incógnitas.

Assim, utilizando um número maior de pontos para calcular as incógnitas, basta aumentar o número de linhas das matrizes dos Valores Observados (L), dos Valores Calculados (L_0) e da matriz Jacobiana (J). Para o resolução do sistema de equações não lineares utiliza-se a resolução matricial apresentada nas Equações 3.12 e 3.13., onde (X_0) é a matriz dos valores iniciais, (ΔX) é a matriz das aproximações, que somadas a X_0 obtém-se (X) que é a matriz dos valores ajustados.

$$\Delta X = (J^T.P.J)^{-1}.J^T.P.(L_b - L_0) \qquad 3.12$$

$$X = X_0 + \Delta X \qquad 3.13$$

O cálculo da primeira aproximação dos valores ajustados para os parâmetros é realizados conforme apresentado nas Equações 2.54 e 2.55, do Item 2.13.3. Então os valores aproximados iniciais das incógnitas são substituídos pelos valores calculados pela aproximação por Série de Taylor e o processo é repetido até que os desvios se aproximem de zero, ou seja, o valor inicial seja igual ao valor da aproximação final.

O cálculo do Desvio Padrão Amostral das incógnitas é efetuado utilizando a Equação 2.56, que resulta na Matriz Variância e Covariância (MVC) das incógnitas ajustadas.

4 RESULTADOS E DISCURSÕES

Para o desenvolvimento dos algoritmos e cálculo da ressecção espacial foram utilizadas imagens digitais obtidas com uma câmara não métrica embarcada no RPA Phantom 4, tomada sobre a área do Instituto de Estudos Avançados (IEAv), situado em São José dos Campos - SP. Os resultados destes testes foram publicados no XVII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto (SBSR-2017), (LIMA et al., 2017).

Para aumentar a precisão nas medidas de posicionamento e atitude da câmara no espaço os parâmetros intrínsecos da câmara devem ser definidos. O ideal é dispor de uma câmara métrica, como a utilizada na obtenção das imagens na UERJ, pois este tipo de câmara possui certificado de calibração, que define com acurácia os seus parâmetros intrínsecos (MCGLONE; LEE, 2013).

Nas fotografias obtidas com a câmara SONY FC330 do Phantom 4 foi necessário realizar uma calibração geométrica, a fim de definir os parâmetros intrínsecos desta câmara e consequentemente diminuir os erros sistemáticos provenientes das distorções geométricas. Existem vários métodos para se calibrar câmaras, os utilizados neste trabalho foram: calibração em laboratório (ROBERTO, 2017) e a calibração utilizando um voo aerofotogramétrico com pontos de controle de campo, conhecido pelo termo em inglês *"calibration on the job",* disponíveis nos programas atuais de fotogrametria, sendo os dados deste último método o que foi utilizado neste trabalho (SHAHBAZI et al., 2015; NOGUEIRA; ROBERTO, 2017).

Foram realizados voos aerofotogramétricos sobre toda a área do IEAv, utilizando um RPA Phantom 4, para a obtenção de uma cobertura fotográfica do terreno sob responsabilidade do IEAv e de sua vizinhança, gerando vários grupos de fotografias em diferentes condições de iluminação. Esses conjuntos de fotografias foram utilizados para a confecção de ortoimagens e Modelos Digitais de Superfície (MDS), que serviram como imagem de referência, ou seja, representaram o espaço objeto fornecendo as coordenadas do terreno, a

fim de possibilitar o cálculo do Centro Perspectivo e dos ângulos de atitude de quaisquer fotografias a serem obtidas sobre o IEAv a partir da ortoimagem e do MDS. Uma rotina de cálculo pode ser vista no APÊNDICE A e um relatório de processamento de um levantamento encontra-se no APÊNDICE B.

Durante a obtenção destes conjuntos de imagens para a produção de um bloco fotogramétrico, foram testadas diversas superposições longitudinais e laterais, para um posterior processamento no programa de fotogrametria Pix4D Mapper PRO, que fornece os seguintes produtos: nuvem de pontos, Modelo Digital de Superfície (MDS), Modelo Digital de Terreno (MDT), curvas de nível e Ortoimagem.

As ortoimagens e MDS gerados foram avaliados quanto ao Padrão de Exatidão Cartográfica – PEC, para obter as estimativas das acurácias das imagens de referência, pois através dessas imagens somente se calculou as coordenadas dos centros perspectivos e as atitudes das fotografias obtidas sobre o IEAv.

Como a câmara FC330 não é calibrada foi necessário realizar a sua calibração em laboratório. Os resultados da calibração estão publicados nos anexos da dissertação de mestrado de Roberto (2017). A partir do processamento das imagens no Pix4D Mapper Pro obteve-se a calibração "*on the job*", que também foi utilizada. Os dados desta calibração se encontram nos relatórios de processamento de imagem do Pix4D; um destes relatórios é apresentado no APÊNDICE B.

Com os dados de calibração puderam ser comparados aos cálculos de Ressecção Espacial utilizando apenas as especificações técnicas da câmara apresentadas pelo fabricante do Phantom 4 com os dados utilizando a câmara calibrada. Com isso pode-se avaliar a melhoria da precisão na determinação da coordenadas do centro perspectivo e da atitude da câmara.

4.1. Avaliação do PEC da Ortoimagem e do MDS

Neste item são apresentadas as avaliações de acurácia planimétrica e altimétrica das ortoimagens e do MDS gerados sobre o IEAv, citados no Item anterior. Para a avaliação da ortoimagem e do MDS foi seguido o fluxograma apresentado na Figura 2.21 do Item 2.14.

Após a geração da ortoimagem e do MDS ajustado pelos 15 GCPs levantados por GNSS, apresentados na Tabela 3.1, foram obtidas as coordenadas dos 47 pontos de verificação ou C*heckpoint* calculados pelo ajustamento de bloco fotogramétrico. Para obter os desvios entre essas coordenadas e suas respectivas coordenadas levantadas por GNSS, apresentadas na Tabela 3.2, foram realizadas a subtração entre as coordenadas. Assim foi calculada a Média Amostral dos Desvios ($\bar{X}$) e o Desvio Padrão Amostral (S) ou Erro Padrão (EP).

Para a verificação dos testes de aderência à normal, esses desvios foram analisados independentemente para os eixos Este (E), Norte (N) e a Altitude ortométrica (H). Os gráficos Quantil x Quantil foram apresentados para cada caso, para visualizar de forma qualitativa a aderência das amostras à distribuição normal.

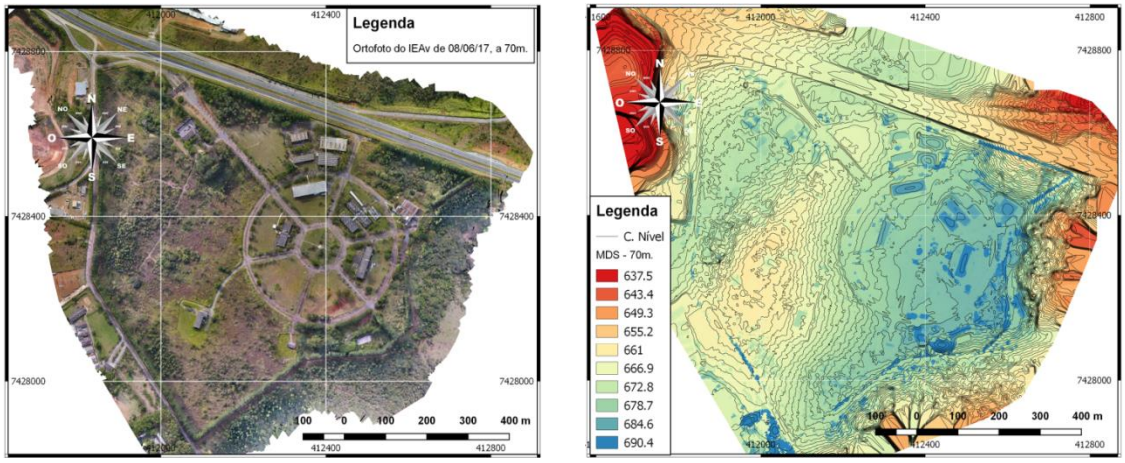
Nesses gráficos no eixo das abcissas foi apresentado o quartil de uma amostra normal de mesmo número de elementos da amostra e no eixo das ordenadas o quartil da amostra. Caso as amostras fossem perfeitamente normais os pontos do gráfico formariam uma reta que tenderia a bissetriz e passaria na origem do gráfico.

Para facilitar a visualização dos desvios ocorridos em cada eixo foram confeccionados os diagramas de caixa e gráficos de dispersão planimétrica dos desvios para cada voo. Em seguida foram realizados os testes de hipóteses para a Média Amostral dos Desvios ($\bar{X}$) e para o Desvio Padrão Amostral (S) ou Erro Padrão (EP).

4.1.1. Avaliação do PEC com Altura de Voo a 70m

Neste item são apresentados os resultados dos dados levantados no voo a 70m de altura, com um conjunto de 2414 fotografias, realizado no dia 08 de junho de 2017. A ortoimagem e o MDS gerados por este conjunto de fotografias são apresentados nas Figura 4.1a e b.

Figura 4.1 – Ortoimagem e MDS do voo a 70m de altura.

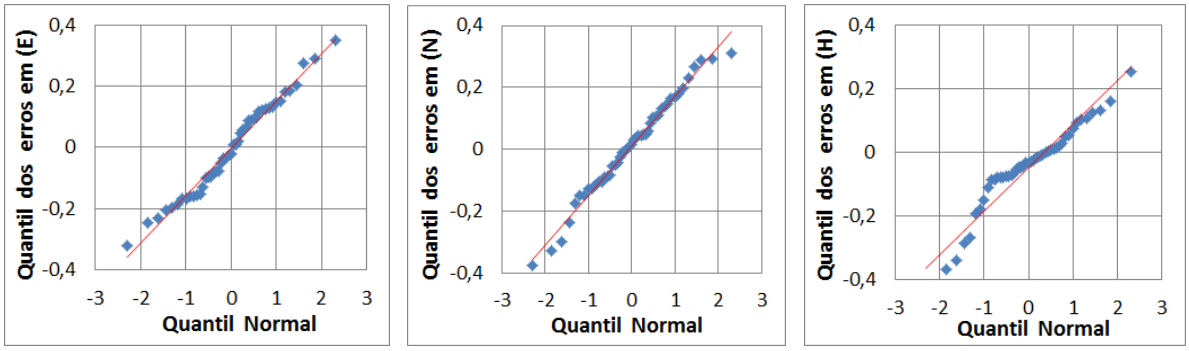


(a) (b)

Fonte: Produzido pelo autor.

Na Figura 4.2 nos 3 eixos, a amostra tende à reta bissetriz e intercepta o eixo das abcissas e das ordenadas próxima à origem do gráfico, indicando que as amostras tendem a uma distribuição normal.

Figura 4.2 – Gráficos Quartil x Quartil dos eixos (E, N, H), voo a 70m.

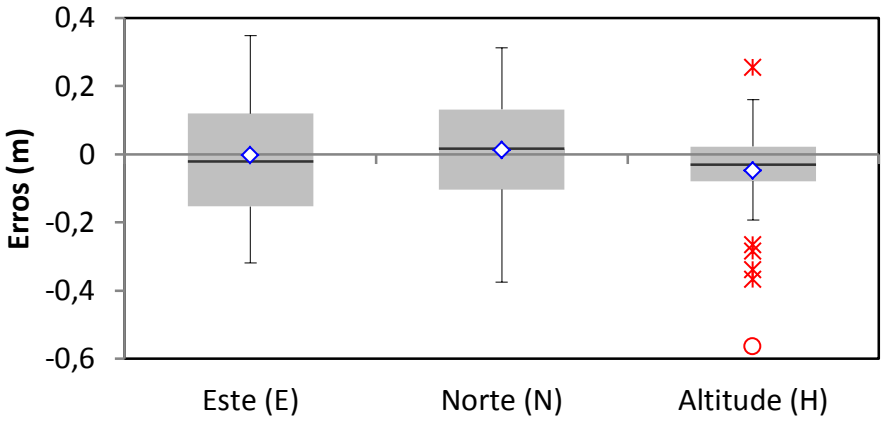


(a) (b) (c)

Fonte: Produzido pelo autor.

Com a finalidade de verificar, graficamente os desvios na amostra dos 47 pontos de teste da qualidade (*Checkpoints)* para o voo a 70m de altura foi apresentado o diagrama de caixa na Figura 4.3

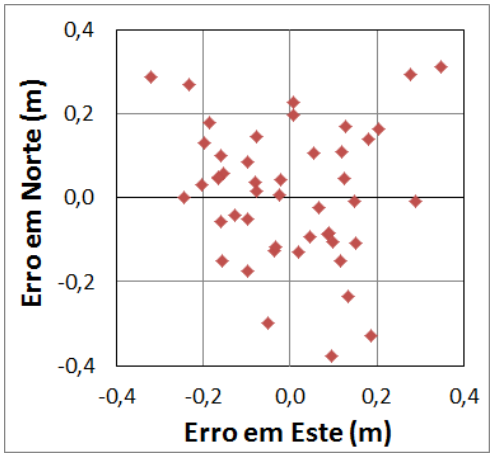
Figura 4.3 – Diagrama de caixa do voo a 70m de altura.



Fonte: Produzido pelo autor.

Os desvios ocorridos nos 47 *Checkpoints* podem ser visualizados planimétricamente no gráfico da Figura 4.4, as abcissas apresentam os desvios na direção Este em metros e as ordenadas os desvios na direção Norte em metros.

Figura 4.4 – Desvios planimétricos da ortoimagem no voo a 70m de altura.



Fonte: Produzido pelo autor.

A Média do Erro Amostral ($\overline{\Delta X}$) e o Desvio Padrão Amostral (S) estão na Tabela 4.1, separado por componentes. A média planimétrica observada foi de

0,011m, pois as componentes Este e Norte contribuíram de forma similar para o deslocamento planimétrico dos pontos, apresentando respectivamente -0,004m e -0,011m de deslocamento médio em relação à origem. Dos 47 pontos observados, 68,1% se situaram abaixo do Erro Médio Quadrático Planimétrico (DRMS) de 0,224m.

Tabela 4.1 – Estatistica do voo a 70m de altura.

	E (m)	**N (m)**	**H (m)**
Média do Erro Amostral ($\overline{\Delta X}$)	**-0,004**	**0,011**	**-0,048**
Desvio Padrão (S) ou Erro Padrão (EP)	**0,155**	**0,161**	**0,144**
Erro Médio Quadrático (RMS)	**0,155**	**0,161**	**0,151**
RMS Planimétrico (DRMS)	**0,224**		

Fonte: Produzido pelo autor.

Para o teste de hipóteses de a média ser considerada igual a zero, ou seja, hipótese nula $H_0: \mu_X = 0$, foi calculado o valor da amostra para a distribuição t-student (t_c), conforme apresentado no Item 2.14.2. Então foi efetuada a comparação com os valores críticos tabelados superiores e inferiores, conforme a Tabela 4.2. Em todas as componentes as hipóteses H_0 foram aceitas, ou seja, as médias são significativamente (a 1%) iguais a zero.

Tabela 4.2 – Teste de hipóteses para a Média do voo a 70m de altura.

	E (m)	**N (m)**	**H (m)**
Valor Tabelado Superior ($t_{\alpha/2,n-1}$)	2,687	2,687	2,687
t-student Calculado (t_c)	**-0,167**	**0,457**	**-2,280**
Valor Tabelado Inferior ($t_{(1-\alpha)/2,n-1}$)	-2,687	-2,687	-2,687
Nível de significância (α)	0,01	0,01	0,01
Grau de liberdade (n-1)	46	46	46
Teste de Hipóteses para a Média	**Aceita**	**Aceita**	**Aceita**

Fonte: Produzido pelo autor.

Para o teste de hipóteses de a Variância Amostral ser considerada igual a uma determinada classe de Variância descrita no PEC-PCD, ou seja, a hipótese nula $H_0: {S_X}^2 = \sigma_X^2$, foi calculado o valor da amostra para a distribuição Qui-quadrado (χ_c), conforme apresentado no Item 2.14.3. Então foi comparado com o valor crítico tabelado unilateral, conforme Tabela 4.3. Em todas as

componentes as hipóteses H_0 foram aceitas, ou seja, as Variâncias são significativamente (a 1%) iguais ao Erro Padrão de 0,17, ou seja, o Erro Padrão da Classe A do PEC-PCD para a escala 1:1.000, conforme Tabela 2.1.

Tabela 4.3 – Teste de hipóteses para a Variância do voo a 70m de altura.

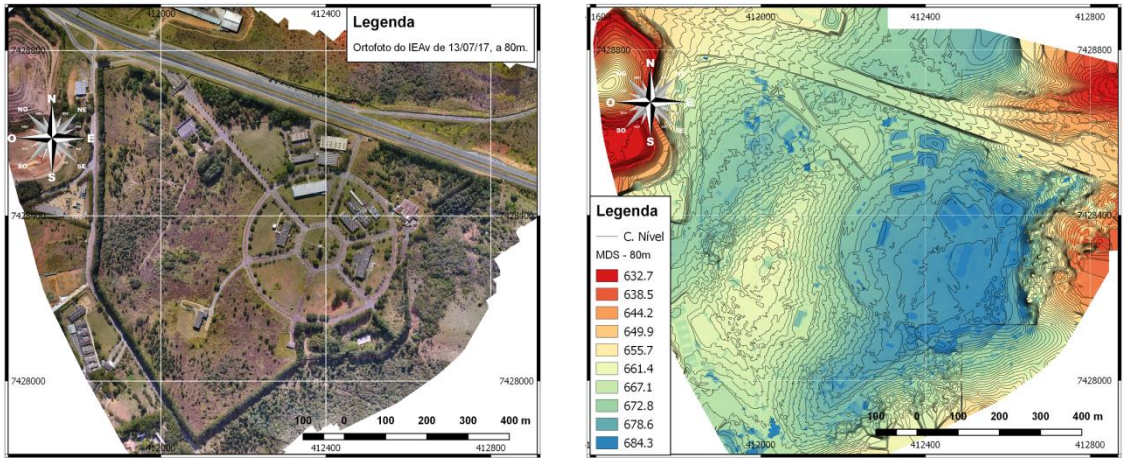
Erro Padrão (EP) do PEC-PCD (Esc. 1:1.000 - Classe A)	**E (EP) 0,17**	**N (EP) 0,17**	**H (EP) 0,17**
Valor Qui-quadrado Tabelado (χ_α)	71,201	71,201	71,201
Valor Qui-quadrado Calculado (χ_c)	38,393	41,244	32,794
Teste de Hipótese para a Variância	**Aceita**	**Aceita**	**Aceita**

Fonte: Produzido pelo autor.

4.1.2. Avaliação do PEC com Altura de Voo a 80m

Neste item são apresentados os resultados dos dados levantados no voo a 80m de altura, com um conjunto de 990 fotografias, realizado no dia 12 de julho de 2017, cujo relatório de processamento se encontra no APÊNDICE B. A ortoimagem e o MDS gerados por este conjunto de fotografias são apresentados nas Figura 4.5 (a) e (b), respectivamente.

Figura 4.5 – Ortoimagem e MDS do voo a 80m de altura.



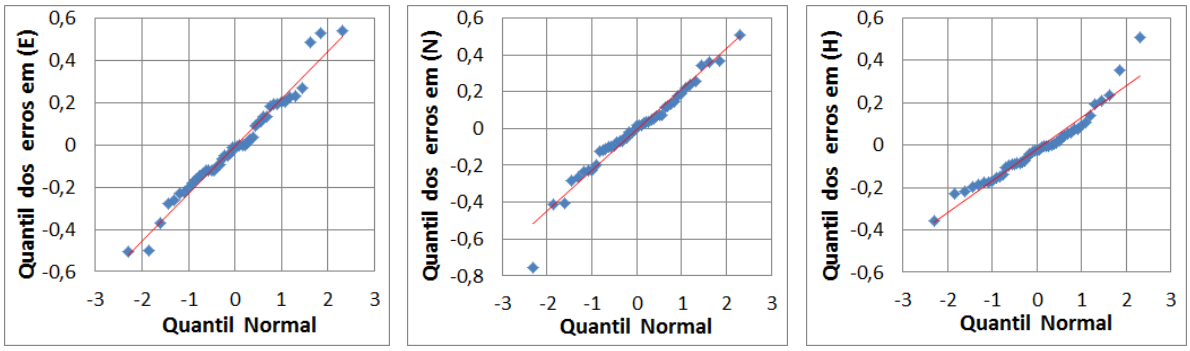
(a) (b)

Fonte: Produzido pelo autor.

Para se verificar a normalidade da distribuição dos pontos de verificação na ortoimagem e MDS para cada um dos eixos, foi gerado o gráfico Quartil x

Quartil para os eixos Este, Norte e Altitude, conforme as Figura 4.6 (a), (b) e (c). Verifica-se que a amostra tende a reta bissetriz e intercepta o eixo das abcissas e das ordenadas próximas à origem do gráfico.

Figura 4.6 – Gráficos Quartil x Quartil dos eixos (E, N, H), voo de 80m.

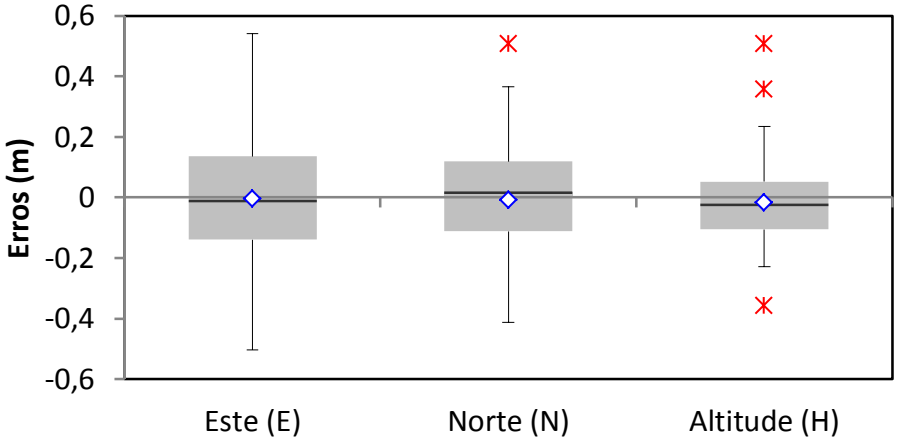


(a) (b) (c)

Fonte: Produzido pelo autor.

O diagrama de caixa da Figura 4.7 apresenta a dispersão dos erros para cada eixo. Neste diagrama são apresentados graficamente os desvios dos 47 *Checkpoints*, que foram tomados como amostra para o voo a 80m de altura.

Figura 4.7 – Diagrama de caixa do voo de 80m de altura.

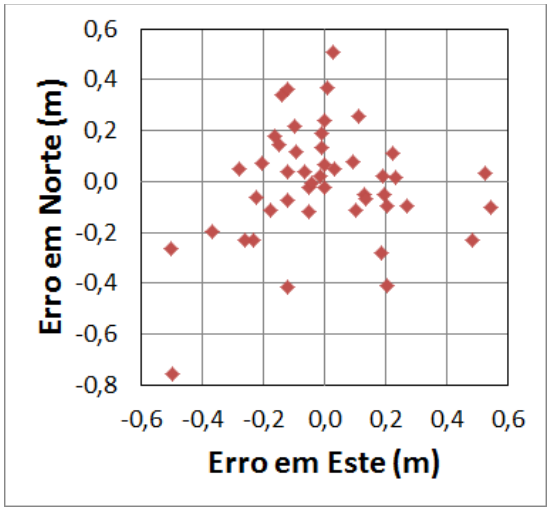


Fonte: Produzido pelo autor.

Com a finalidade de visualizar planimétricamente os desvios ocorridos nos mesmos 47 *Checkpoints,* foi gerado o gráfico de dispersão planimétrica, apresentado na Figura 4.8, tendo no eixo das abcissas os desvios ocorridos em

Este e no eixo das ordenadas os desvios ocorridos em Norte, ambos representados em metros.

Figura 4.8 – Desvios planimétricos da ortoimagem a 80m de altura de voo.



Fonte: Produzido pelo autor.

Dos 47 pontos observados, 68,1% ficaram dentro do Erro Médio Quadrático Planimétrico (DRMS) de 0,315m. Os erros planimétricos máximo e mínimo foram 0,906m e 0,021m, respectivamente. Os resultados de média e variância dos erros do voo a 80 metros de altura estão apresentados na Tabela 4.4.

Tabela 4.4 – Estatística do voo a 80m de altura.

	E (m)	N (m)	H (m)
Média do Erro Amostral ($\overline{\Delta X}$)	**-0,005**	**-0,008**	**-0,018**
Desvio Padrão (S) ou Erro Padrão (EP)	**0,224**	**0,222**	**0,153**
Erro Médio Quadrático (RMS)	**0,224**	**0,222**	**0,154**
RMS Planimétrico (DRMS)	**0,315**		

Fonte: Produzido pelo autor.

Visto que a média do erro amostral em Este e Norte foram -0,005m e -0,008m, respectivamente, a média do erro planimétrica para a ortoimagem foi de 0,009m. Isso demonstra que o deslocamento planimétrico dos pontos em relação à origem é praticamente nulo, no entanto isso será verificado no teste de hipóteses da média.

Com a finalidade de testar a hipótese da média ser considerada igual à zero, adotou-se a hipótese nula de $H_0: \mu_X = 0$. Para tanto se calcularam os valores amostrais da distribuição t-student (t_c), conforme apresentado no Item 2.14.2. Confrontando com os valores críticos tabelados superiores e inferiores, conforme Tabela 4.5. Sendo aceitas para todas as componentes as hipóteses H_0, significando que as médias são significativamente (a 1%) iguais à zero.

Tabela 4.5 – Teste de hipóteses para a Média do voo de 80m de altura.

	E (m)	**N (m)**	**H (m)**
Valor Tabelado Superior ($t_{\alpha/2,n-1}$)	2,687	2,687	2,687
t-student Calculado (t_c)	**-0,156**	**-0,244**	**-0,802**
Valor Tabelado Inferior ($t_{(1-\alpha)/2,n-1}$)	-2,687	-2,687	-2,687
Nível de significância (α)	0,01	0,01	0,01
Grau de liberdade (n-1)	46	46	46
Teste de Hipótese para a Média	**Aceita**	**Aceita**	**Aceita**

Fonte: Produzido pelo autor.

Para o teste de hipótese de a Variância Amostral ser considerada igual a uma determinada classe de Variância descrita no PEC-PCD, a hipótese nula tem a seguinte expressão $H_0: {S_X}^2 = \sigma_X^2$. Para isso foi calculado o valor da amostra para a distribuição Qui-quadrado (χ_c), conforme apresentado no Item 2.14.3.

Este valor foi comparado com os valores críticos tabelados unilaterais. Em todas as componentes as hipóteses H_0 foram aceitas, ou seja, as Variâncias são significativamente (a 1%) iguais ao Erro Padrão de 0,17, valor para a Classe A do PEC para a escala 1:1.000, conforme Tabela 4.6.

Tabela 4.6 – Teste de hipóteses para a Variância do voo de 80m de altura.

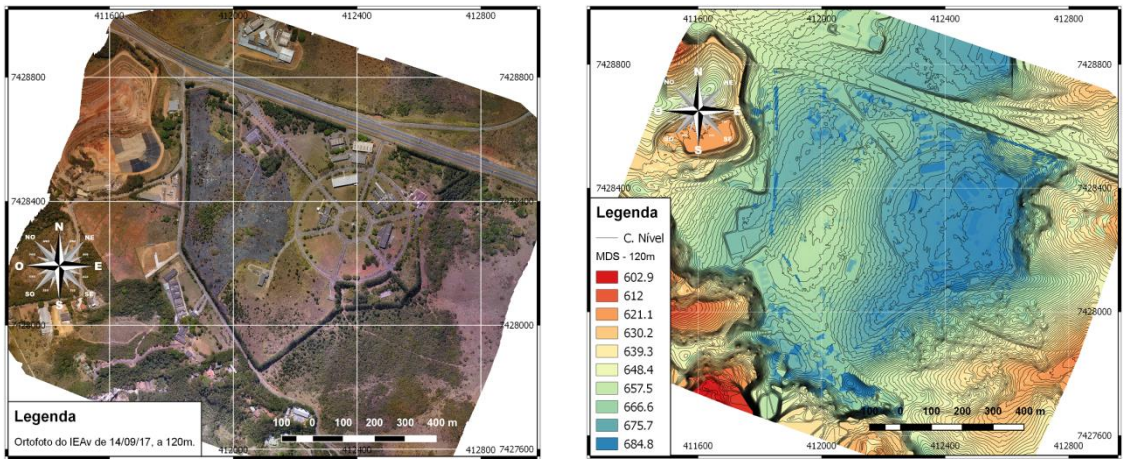
Erro Padrão (EP) PEC (Esc. 1:1.000 - Classe A) ou PEC-PCD (Esc. 1:1.000 - Classe B)	**E (EP) 0,30**	**N (EP) 0,30**	**H (EP) 0,30**
Valor Qui-quadrado Tabelado (χ_α)	71,201	71,201	71,201
Valor Qui-quadrado Calculado (χ_c)	25,689	25,133	11,905
Teste de Hipótese para a Variância	**Aceita**	**Aceita**	**Aceita**

Fonte: Produzido pelo autor.

4.1.3. Avaliação do PEC com Altura de Voo a 120m

A ortoimagem e o MDS gerados pelo levantamento aerofotogramétrico do voo a 120m de altura, com 647 fotografias, realizado no dia 17 de setembro de 2017 são apresentados respectivamente nas Figura 4.9a e b.

Figura 4.9 – Ortoimagem e MDS do voo de 120m de altura.

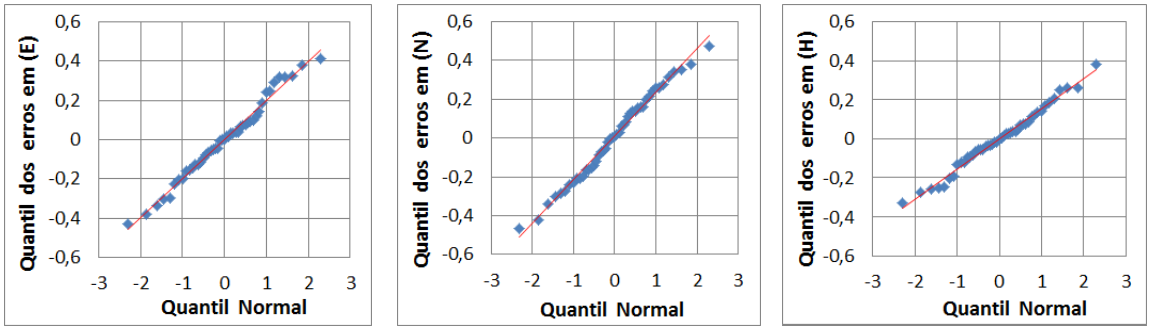


(a) (b)

Fonte: Produzido pelo autor.

Para a avaliação do PEC foi verificado inicialmente se o conjunto de pontos de verificação se comportou como uma distribuição normal para cada eixo, conforme apresentado nas Figura 4.10 (a), (b) e (c). Nesses gráficos verifica-se nos 3 eixos que a amostra tende a uma reta com 45º de inclinação e a reta tende a interceptar a origem do gráfico.

Figura 4.10 – Gráficos Quartil x Quartil dos eixos (E, N, H), voo de 120m.

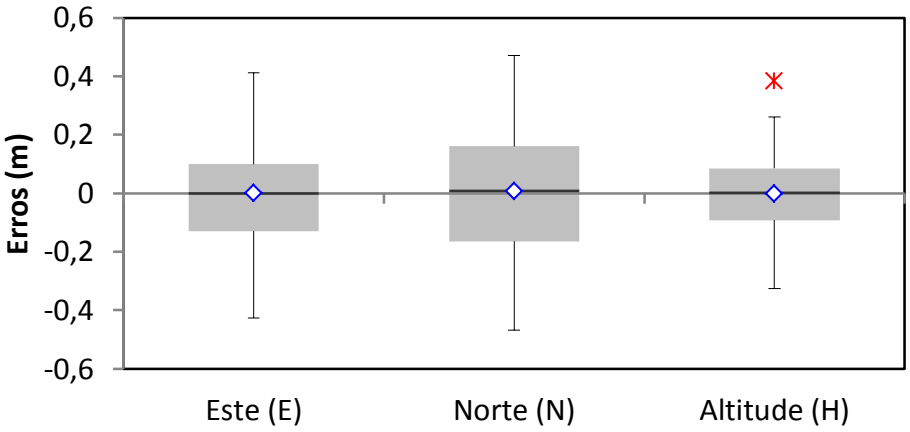


(a) (b) (c)

Fonte: Produzido pelo autor.

Para melhor visualização dos erros em Este, Norte e Altitude dos 47 pontos de verificação levantados no terreno para conferir a acurácia da ortoimagem e MDS, foi confeccionado o diagrama de caixa, apresentado na Figura 4.11.

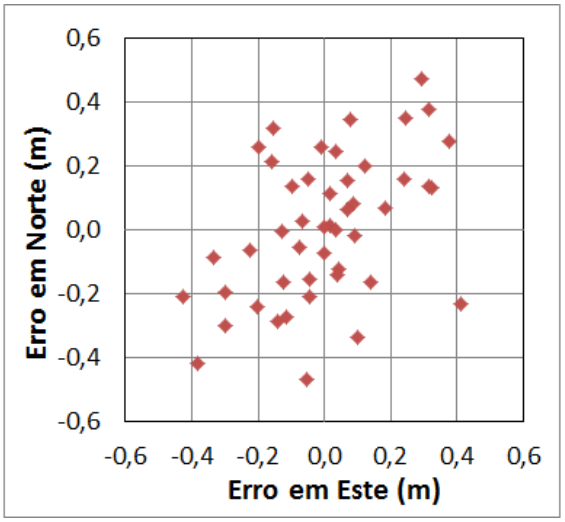
Figura 4.11 – Diagrama de caixa do voo a 120m de altura.



Fonte: Produzido pelo autor.

Os desvios ocorridos nos 47 pontos de verificação foram também plotados no gráfico apresentado na Figura 4.12, onde o eixo das abcissas apresenta os desvios em Este (m) e o eixo das ordenadas os desvios em Norte (m). Nos dois eixos os erros são de ±0,4cm.

Figura 4.12 – Desvios planimétrico da ortoimagem a 120m de altura de voo.



Fonte: Produzido pelo autor.

A média planimétrica observada foi de 0,018m, para as componentes Este e Norte, apresentando respectivamente 0,005m e -0,017m de deslocamento médio em relação à origem, que contribuiu igualmente para o deslocamento planimétrico dos pontos nos dois eixos. O erro planimétrico máximo observado foi de 0,567m e o mínimo de 0,008m.

A estatística da Média do Erro Amostral ($\overline{\Delta X}$) e o Desvio Padrão Amostral (S) estão apresentados na Tabela 4.7, separado por componentes. Dos 47 pontos observados, 61,7% ficaram dentro do Erro Médio Quadrático Planimétrico (DRMS) de 0,321m.

Tabela 4.7 – Estatística do voo a 120m de altura.

	E (m)	**N (m)**	**H (m)**
Média do Erro Amostral ($\overline{\Delta X}$)	**0,005**	**-0,017**	**-0,004**
Desvio Padrão (S) ou Erro Padrão (EP)	**0,252**	**0,197**	**0,166**
Erro Médio Quadrático (RMS)	**0,252**	**0,198**	**0,166**
RMS Planimétrico (DRMS)	**0,321**		

Fonte: Produzido pelo autor.

O teste da hipótese nula, $H_0: \mu_X = 0$, onde é testado se a média pode ser considerada igual à zero, é realizado calculando o valor da amostra para a distribuição t-student (t_c), conforme apresentado no Item 2.14.2. Os valores são comparados com os valores críticos tabelados superiores e inferiores. A Tabela 4.8 mostra que as hipóteses H_0 foram aceitas, ou seja, as médias são significativamente (a 1%) iguais à zero.

Tabela 4.8 – Teste de hipóteses para a Média do voo a 120m de altura.

	E (m)	**N (m)**	**H (m)**
Valor Tabelado Superior ($t_{\alpha/2,n-1}$)	2,687	2,687	2,687
t-student Calculado (t_c)	**0,140**	**-0,596**	**-0,170**
Valor Tabelado Inferior ($t_{(1-\alpha)/2,n-1}$)	-2,687	-2,687	-2,687
Nível de significância (α)	0,01	0,01	0,01
Grau de liberdade (n-1)	46	46	46
Teste de Hipótese para a Média	**Aceita**	**Aceita**	**Aceita**

Fonte: Produzido pelo autor.

A hipótese nula, $H_0: {S_X}^2 = \sigma_X^2$, foi calculada utilizando o valor da amostra para a distribuição Qui-quadrado (χ_c), conforme apresentado no Item 2.14.3, sendo comparados com o valor crítico tabelado unilateral. Na Tabela 4.9 verifica-se que para todas as componentes as hipóteses H_0 foram aceitas, ou seja, as Variâncias são significativamente (a 1%) iguais ao Erro Padrão de 0,17, valor de referencia para Classe A do PEC para a escala 1:1.000.

Tabela 4.9 – Teste de hipóteses para a Variância do voo a 120m de altura.

Erro Padrão (EP) PEC (Esc. 1:1.000 - Classe A) ou PEC-PCD (Esc. 1:1.000 - Classe B)	**E (EP) 0,300**	**N (EP) 0,300**	**H (EP) 0,300**
Valor Qui-quadrado Tabelado (χ_α)	71,201	71,201	71,201
Valor Qui-quadrado Calculado (χ_c)	32,554	19,792	14,076
Teste de Hipótese para a Variância	**Aceita**	**Aceita**	**Aceita**

Fonte: Produzido pelo autor.

4.2. Estudo de Casos da Ressecção Espacial

Para testar como se comporta o modelo matemático das equações de colinearidade, na determinação do centro perspectivo e da atitude da câmara, foram escolhidos sete casos. Esses casos foram agrupados em três experimentos, escolhidos a fim de comparar a influenciam no erro do posicionamento e nos ângulos de atitude da câmara, a saber: 1) a declividade do terreno, 2) a altura de voo e 3) a inclinação da objetiva.

Nos dois primeiros casos, apresentados no Item 4.2.1, foi analisado se o relevo com baixas e altas declividades de terreno influencia de alguma forma nos erros do posicionamento do centro perspectivo e atitudes em relação à referência. No primeiro experimento, nas fotografias do 1º Caso foram escolhidos pontos, com desníveis de até 5 metros e do 2º Caso foram escolhidos pontos de 5 metros até 37 metros de desnível em cada fotografia. A altura de voo média foi de 80 metros e, em ambos, os casos as fotografias estavam na vertical.

No segundo experimento foram utilizados os 3º e 4º Casos, apresentados no Item 4.2.2, verificou-se a influência da altura do voo nos erros do posicionamento do centro perspectivo e ângulos de atitudes em relação à referência. Nestes casos foram escolhidos grupos de imagens de dois níveis de altura do voo. No 3º Caso a altura média de voo foi de 80 metros e no 4º Caso 120 metros e em ambos os casos as fotografias foram obtidas na vertical.

No terceiro experimento foram utilizados os 5º, 6º e 7º Casos, apresentados no Item 4.2.3, verificou-se a influência da inclinação da câmara, em relação ao nadir, nos erros do posicionamento do centro perspectivo e ângulos de atitudes em relação à referência. Nestes casos foram escolhidos grupos de imagens com inclinação da câmara em relação ao Nadir de 55º, 75º e 80º.

Cada imagem obtida pelo RPA possui em seus metadados as informações de coordenadas e atitudes, provenientes do GNSS/INS. Com esses dados iniciais empregou-se um programa para posicionar as fotografias no espaço e encontrar pontos correlatos entre as fotografias adjacentes realizando a orientação relativa entre todas as fotos do bloco fotogramétrico (PIX4D SA, 2017b). Através da orientação relativa entre todas as fotos o programa utiliza os pontos de controle de terreno para ajustar os centros perspectivos e as atitudes de todas as fotografias, em um processo denominado de Ajustamento de Bloco, calculando também os parâmetros intrínsecos da câmara para cada bloco (MCGLONE; LEE, 2013; WOLF; DEWITT; WILKINSON, 2014).

As coordenadas ajustadas no BBA são utilizadas para a geração da ortoimagem e do MDT, guardando uma relação geométrica dada pelas equações de colinearidade. Assim, conhecendo as acurácias das ortoimagens pode-se considerar que os centros perspectivos e as atitudes advindas do BBA tenham acurácias compatíveis ou superiores aos seus produtos gerados. As análises do PEC para a ortoimagem e o MDS foram apresentadas no item 4.1.

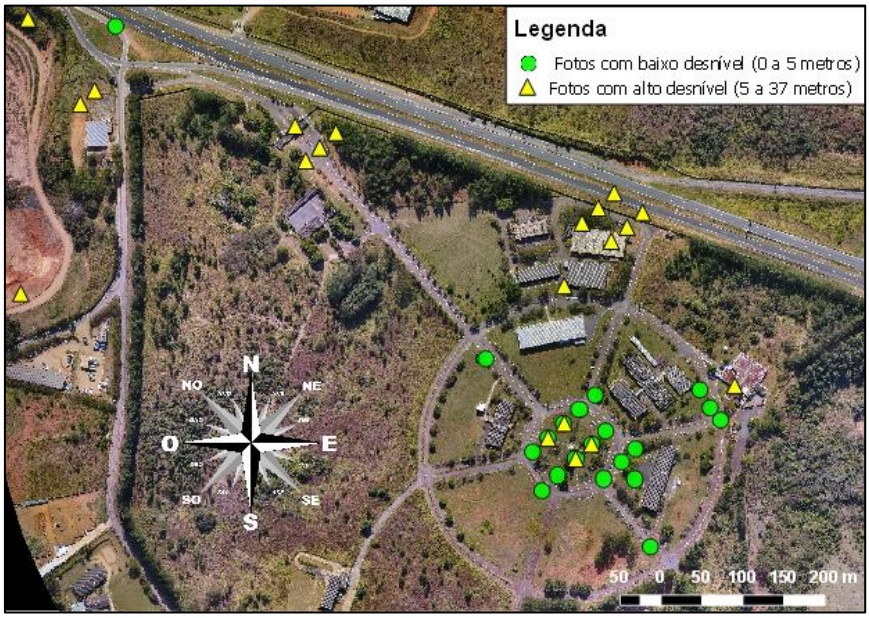
As coordenadas ajustadas no BBA foram utilizadas como referência para verificar os erros tanto para as coordenadas do GNSS/INS, quanto para as

coordenadas calculadas pela Ressecção Espacial. Os resultados estão apresentados no Item 4.3. Outra análise realizada foi verificar os erros em relação à referência do BBA, quando se utiliza os parâmetros nominais informados pelo fabricante para o cálculo da ressecção espacial e quando se considera os parâmetros calibrados. Esses resultados são apresentados no Item 4.5. Por último foi verificado a influência nos erros da ressecção espacial, quando se utiliza os algoritmos de identificação automática de pontos homólogos SURF e RANSAC. Os resultados são apresentados no Item 4.7.

4.2.1. Influência do relevo na posição e atitude da câmara

Para a análise da influência do relevo, na determinação das coordenadas do centro perspectivo e da atitude da câmara, foram estudados dois casos. No primeiro foram escolhidas 20 fotografias com desníveis menores que 5 metros e no segundo 20 fotografias com desníveis entre 5 a 37 metros. A disposição das fotografias para cada caso é apresentada na Figura 4.13.

Figura 4.13 – Posição das fotos com pontos de baixo e alto desnível.



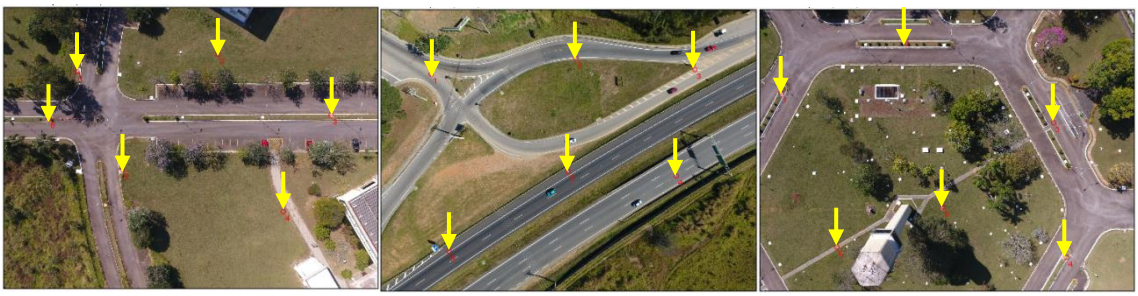
Fonte: Produzido pelo autor.

Para garantir amostras de tamanhos suficientes para uma abordagem estatística, em cada caso foram calculadas entre 20 a 30 coordenadas dos

centros perspectivos e atitude das fotos, utilizando as equações de colinearidade, conforme descrito no Item 3.4. Foram calculados os erros para cada amostra em relação à referência do BBA.

Na Figura 4.14 são apresentados três exemplos de fotografias escolhidas para o 1º caso. Em cada fotografia os seis pontos utilizados para o cálculo da ressecção espacial foram sinalizados com setas. Na escolha dos pontos foram utilizados pontos com pequenos desníveis e evitados pontos sobre edificações e grandes desníveis.

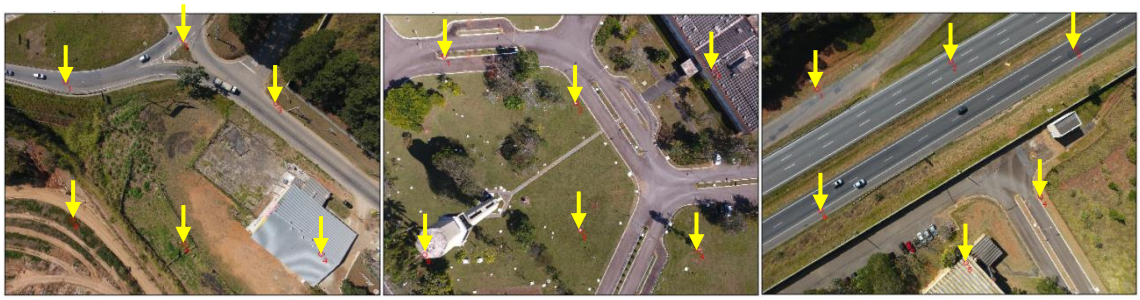
Figura 4.14 – 1º Caso - Fotos na vertical com pontos de baixo desnível.



Fonte: Produzido pelo autor.

Na Figura 4.15 são apresentados três exemplos de fotografias para o 2º caso. As setas indicam, em cada fotografia, a posição dos seis pontos escolhidos para o cálculo da ressecção espacial. Na escolha dos pontos selecionaram-se pontos com altos desníveis bem como pontos na parte superior e inferior das edificações para obter grandes desníveis.

Figura 4.15 – 2º Caso - Fotos na vertical com pontos de alto desnível.



Fonte: Produzido pelo autor.

A partir das coordenadas de imagem e de terreno dos seis pontos para cada imagem foram calculados os centros perspectivos e as atitudes para as 20 fotografias do 1º e 2º casos. Foram calculados seus erros em relação à referência, que são as coordenadas e atitudes ajustadas no BBA, fornecidas pelo Pix4D Mapper Pro, para o voo a 80m de altura apresentado no Item 4.1.2. Foram analisados os erros da amostra para cada uma das 6 incógnitas, a saber: Centro Perspectivo em Este (ΔEo), Centro Perspectivo em Norte (ΔNo), Centro Perspectivo na altitude ortométrica (ΔHo), atitude em *Ômega* ($\Delta\omega$), atitude em *Phi* ($\Delta\phi$) e atitude em *Kappa* (ΔK).

Nos 1º e 2º casos foram realizadas as análises estatísticas do PEC-PCD para os erros conforme descrito no Item 2.14 Na Tabela 4.10 são apresentadas as médias, os desvios padrões e o RMS dos centros perspectivos e das atitudes dessas amostras. Nela também são apresentados os resultados de aceitação para os testes de hipóteses da Média Amostral ($\overline{\Delta X}$) e do Desvio Padrão Amostral (S), para o nível de significância (α) de 1% para o Erro Padrão de 0,17, ou seja, para o Erro Padrão da Classe A do PEC-PCD da escala 1:1.000, conforme a Tabela 2.1.

Tabela 4.10 – Teste de hipóteses para o 1º e 2º casos.

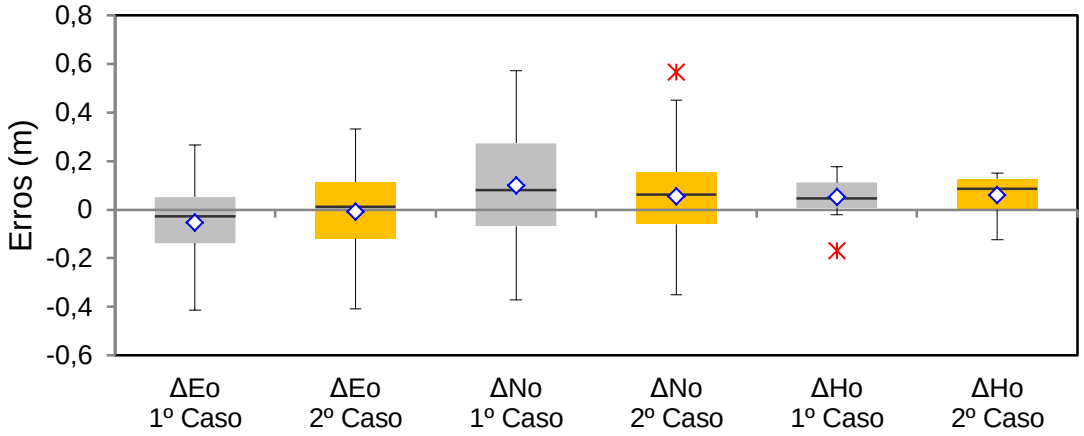
	ΔEo 1º Caso	**ΔNo 1º Caso**	**ΔHo 1º Caso**	**Δω 1º Caso**	**Δϕ 1º Caso**	**ΔK 1º Caso**
Média ($\overline{X}$)	-0,055	0,096	0,050	-0,0743	-0,0355	-0,0015
Hipótese H_0 : $\mu = 0$	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Desvio Padrão (S)	0,178	0,216	0,077	0,1652	0,1254	0,0458
Hipótese H_0 : $\sigma^2 = 0,17$	✓	✓	✓	✓	✓	✓
RMS	0,186	0,237	0,092	0,1811	0,1303	0,0458

	ΔEo 2º Caso	**ΔNo 2º Caso**	**ΔHo 2º Caso**	**Δω 2º Caso**	**Δϕ 2º Caso**	**ΔK 2º Caso**
Média ($\overline{X}$)	-0,009	0,054	0,057	-0,0187	-0,0169	-0,0120
Hipótese H_0 : $\mu = 0$	✓	✓	×	✓	✓	✓
Desvio Padrão (S)	0,169	0,217	0,081	0,1545	0,1116	0,0318
Hipótese H_0 : $\sigma^2 = 0,17$	✓	✓	✓	✓	✓	✓
RMS	0,170	0,224	0,099	0,1556	0,1128	0,0340

Fonte: Produzido pelo autor.

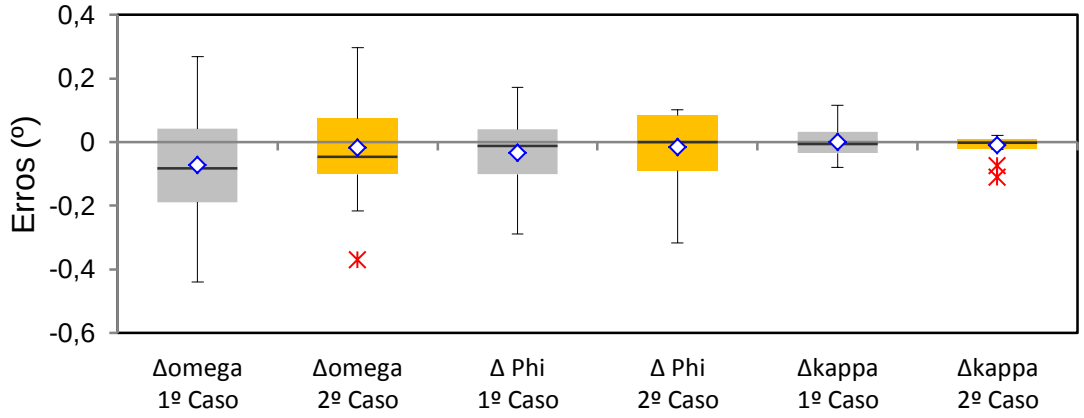
A hipótese da Média ($\bar{X}$) ser igual à zero para ΔHo foi rejeitada no 2º caso devido ao baixo Desvio Padrão (S) apresentado pela amostra. Com a finalidade de melhor visualizar os resultados desses erros, foram elaborados os diagramas de caixa. Na Figura 4.16 é apresentada a comparação entre os dois casos para os três eixos do centro perspectivo e a Figura 4.17 mostra a comparação das três atitudes.

Figura 4.16 – Comparação entre os Centro Perspectivo do 1º e 2º Caso



Fonte: Produzido pelo autor.

Figura 4.17 – Comparação entre as atitudes do 1º e 2º Caso



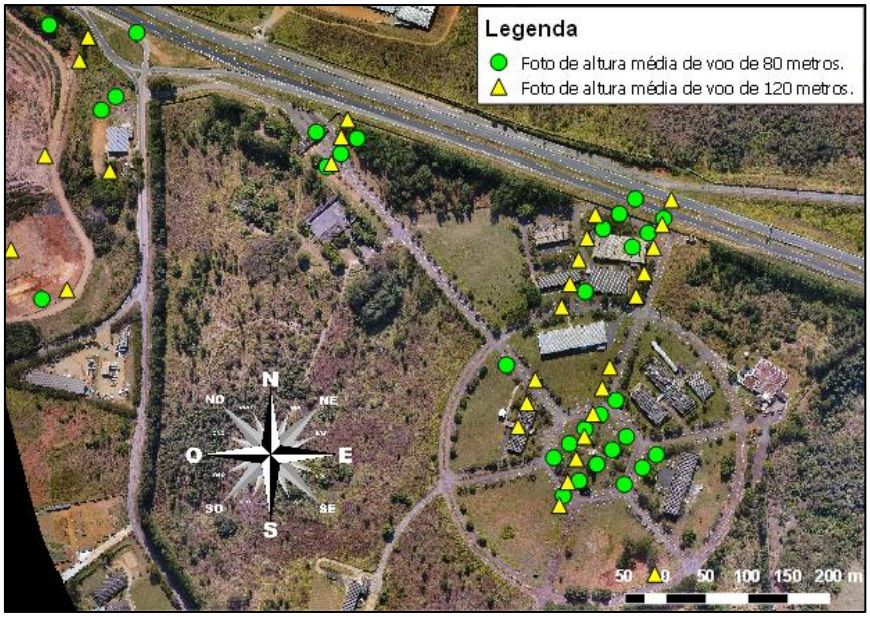
Fonte: Produzido pelo autor.

Para as seis incógnitas verificou-se que as variações dos erros foram semelhantes. Esse fato indica que o modelo matemático projetivo, expresso pelas equações de colinearidade apresentadas no Item 2.8.2, possui parâmetros que preveem adequadamente as variações de altitude do terreno.

4.2.2. Influência da altura de voo na posição e atitude da câmara

Para a análise da influência da altura de voo na determinação das coordenadas do centro perspectivo e da atitude da câmara foram estudados outros dois casos. No 3º caso foram escolhidas 30 fotografias do voo a 80m de altura, apresentada no Item 4.1.2 e no 4º caso foram escolhidas 30 fotografias do voo a 120m de altura, apresentado no Item 4.1.3. A disposição das fotografias para cada caso é mostrada na Figura 4.18.

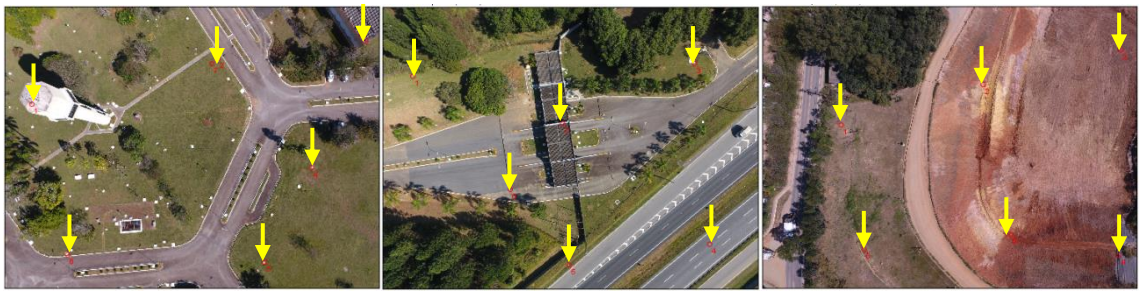
Figura 4.18 – Posição das fotos com altura média de 80 e 120 metros.



Fonte: Produzido pelo autor.

Três exemplos de fotografias escolhidas do voo a 80m de altura para o 3º caso são apresentados na Figura 4.19. Em cada fotografia os seis pontos utilizados para o cálculo da ressecção espacial foram sinalizados com setas amarelas. Para a escolha dos pontos foram considerados os seguintes critérios: utilizar pontos com baixo e alto desnível nas fotografias; selecionar pontos bem visíveis na fotografia e na ortoimagem; e distribuir os pontos de forma a não ficarem colineares ou agrupados entre si, distribuindo-os na fotografia para melhorar a solução da ressecção espacial.

Figura 4.19 – 3º Caso - Fotos verticais com altura média de voo de 80m.



Fonte: Produzido pelo autor.

Na Figura 4.20 são apresentados três exemplos de fotografias do voo a 120m de altura escolhidas para o 4º caso. As setas indicam em cada fotografia a posição dos seis pontos escolhidos para o cálculo da ressecção espacial. Da mesma forma que no 3º Caso, na escolha dos pontos foram seguidos os seguintes critérios: utilizar pontos com baixo e alto desnível nas fotografias; selecionar pontos bem visíveis na fotografia e na ortoimagem; e distribuir os pontos de forma a não ficarem colineares ou agrupados entre si, distribuindo-os na fotografia para melhorar a solução da ressecção espacial.

Figura 4.20 – 4º Caso - Fotos verticais com altura média de voo de 120m.

Fonte: Produzido pelo autor.

A partir das coordenadas de imagem e de terreno dos seis pontos para cada imagem foram calculados os centros perspectivos e as atitudes para as 30 fotografias do 3º e 4º casos. Foram calculados os seus erros em relação à referência, que são as coordenadas e atitudes ajustadas do BBA, fornecido pelo Pix4D Mapper Pro, para o voo a 80m e 120 m de altura, apresentados respectivamente nos Itens 4.1.2 e 4.1.3.

Também nestes casos foram analisados os erros da amostra para cada uma das 6 incógnitas, a saber: Centro Perspectivo em Este (ΔEo), Centro Perspectivo em Norte (ΔNo), Centro Perspectivo na altitude ortométrica (ΔHo), atitude em *Ômega* ($\Delta\omega$), atitude em *Phi* ($\Delta\phi$) e atitude em *Kappa* (ΔK).

No 3º e 4º casos foram realizadas análises estatísticas de acordo com as realizadas no PEC para os erros. Na Tabela 4.11 são apresentadas as médias, os desvios padrões e o RMS dos centros perspectivos e das atitudes dessas amostras. Nela também são apresentados os resultados de aceitação para os testes de hipóteses da Média Amostral ($\overline{\Delta X}$) e do Desvio Padrão Amostral (S), para o nível de significância (α) de 1% para o Erro Padrão de 0,30, ou seja, o Erro Padrão da Classe A do PEC para a escala 1:1.000, conforme Tabela 2.1.

Tabela 4.11 – Teste de hipótese para o 3º e 4º casos.

	ΔEo 3º Caso	**ΔNo 3º Caso**	**ΔHo 3º Caso**	**Δω 3º Caso**	**Δϕ 3º Caso**	**ΔK 3º Caso**
Média ($\overline{X}$)	-0,067	0,052	0,062	-0,030	-0,043	-0,005
Hipótese H_0 : $\mu = 0$	✓	✓	×	✓	✓	✓
Desvio Padrão (S)	0,148	0,234	0,077	0,176	0,105	0,039
Hipótese H_0 : $\sigma^2 = 0,30$	✓	✓	✓	✓	✓	✓
RMS	0,163	0,240	0,099	0,178	0,114	0,039

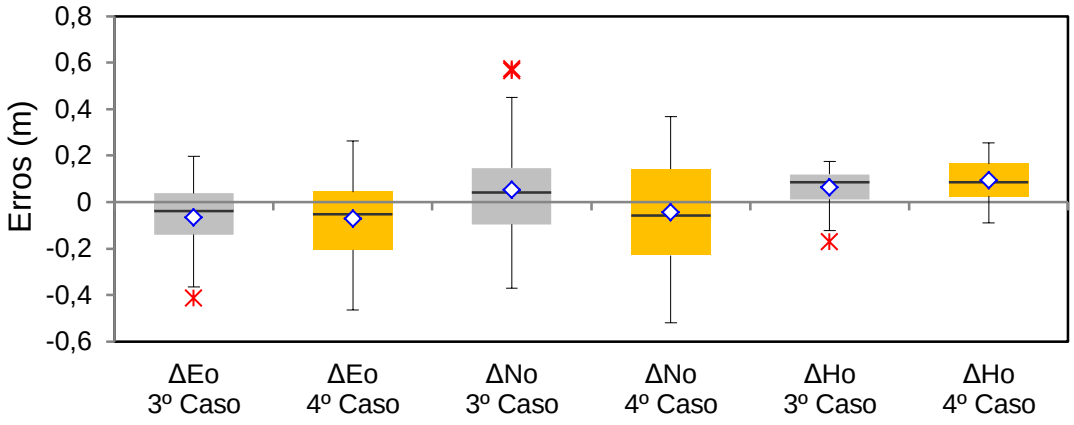
	ΔEo 4º Caso	**ΔNo 4º Caso**	**ΔHo 4º Caso**	**Δω 4º Caso**	**Δϕ 4º Caso**	**ΔK 4º Caso**
Média ($\overline{X}$)	-0,072	-0,046	0,092	0,013	-0,027	-0,001
Hipótese H_0 : $\mu = 0$	✓	✓	×	✓	✓	✓
Desvio Padrão (S)	0,158	0,230	0,086	0,110	0,071	0,015
Hipótese H_0 : $\sigma^2 = 0,30$	✓	✓	✓	✓	✓	✓
RMS	0,174	0,234	0,126	0,110	0,075	0,015

Fonte: Produzido pelo autor.

A hipótese da Média ($\overline{X}$) ser igual à zero foi rejeitada nos dois casos devido ao baixo Desvio Padrão (S) apresentado pelas amostras. Com a finalidade de melhor visualizar os resultados desses desvios foram confeccionados os diagramas de caixa. Na Figura 4.21 é apresentada a comparação entre os dois

casos para os três eixos do centro perspectivo e na Figura 4.22 é mostrada a comparação das três atitudes.

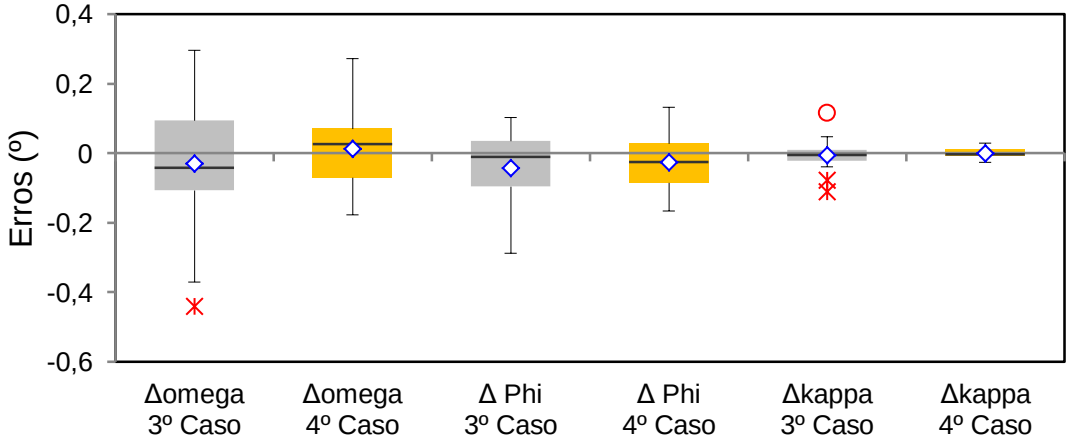
Figura 4.21 – Comparação entre os Centros Perspectivos do 3º e 4º Casos



Fonte: Produzido pelo autor.

Conforme se observa na Figura 4.21, o 4º caso apresentou um ligeiro aumento na dispersão dos desvios nos três eixos com relação ao 3º caso. Isso pode sugerir que ao aumentar a altitude de voo os erros de posicionamento tendem a aumentar. Isto é coerente, pois à medida que se aumenta a altitude de voo a resolução espacial diminui e as identificações das feições tendem a diminuir.

Figura 4.22 – Comparação entre as atitudes do 3º e 4º Casos



Fonte: Produzido pelo autor.

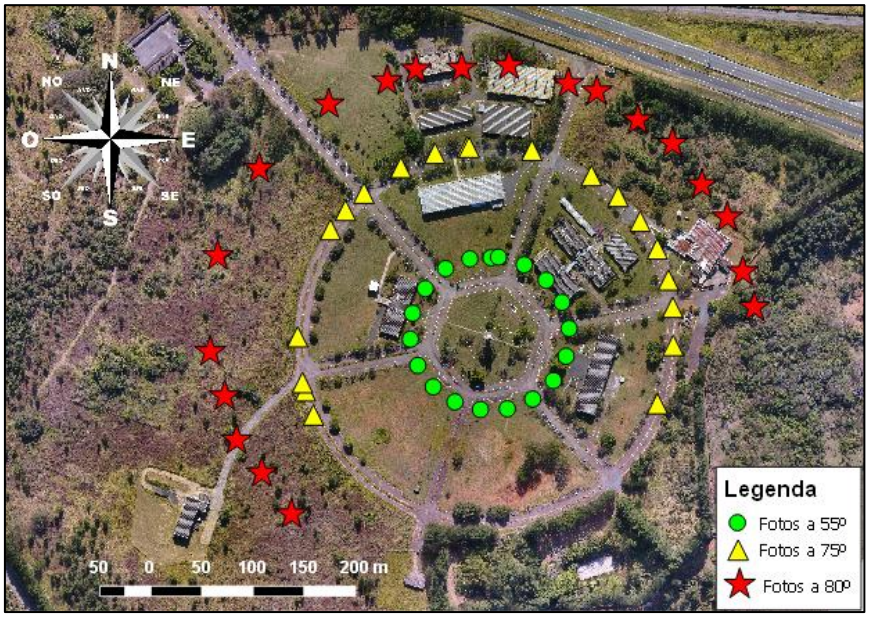
Na Figura 4.22 pode ser verificado que ao aumentar a altura de voo os ângulos de atitude ficaram mais precisos, ou seja, do caso 4 com altura de voo de 80

metros e para o caso 5 com altura de voo de 120m os erros diminuíram. Possivelmente isso ocorreu pelo fato de a fotografia do caso 5 ter uma maior área de cobertura, proporcionando pontos mais espaçados entre si o que possibilita uma melhor base para a ressecção espacial.

4.2.3. Influência da inclinação na posição e atitude da câmara

Para a análise da influência da inclinação da câmara na determinação da coordenadas do centro perspectivo e da atitude da câmara foram estudados outros três casos. No 5º caso foram escolhidas 19 fotografias com 55º de inclinação em relação ao Nadir, no 6º caso foram escolhidas 20 fotografias com 75º de inclinação em relação ao Nadir e no 7º caso foram escolhidas 20 fotografias com 80º de inclinação em relação ao Nadir. A disposição das fotografias para cada caso é visualizada na Figura 4.23.

Figura 4.23 – Posição das fotos inclinadas.



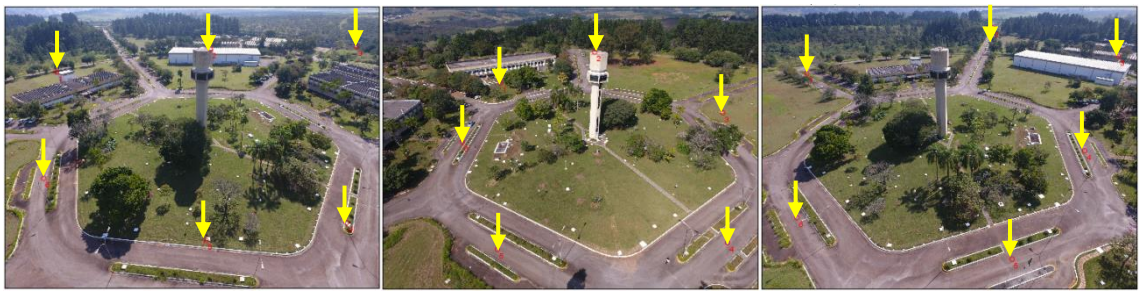
Fonte: Produzido pelo autor.

A partir das fotografias inclinadas foram processadas as imagens no Pix4D Mapper Pro, para geração das coordenadas e ângulos de atitude ajustadas destas fotografias, que serviram de referência para o cálculo dos desvios. As fotografias foram tomadas de forma obliqua e voltadas para a torre do IEAv, no

dia 24/05/2017. Elas foram obtidas em três círculos concêntricos de 75, 185 e 265 metros de diâmetro em relação à torre e com um desnível de aproximadamente 45 metros em relação ao nível do piso da torre.

Na Figura 4.24 há três exemplos das fotografias com 55º de inclinação escolhidas para o 5º caso. As setas demostram em cada fotografia a posição dos seis pontos escolhidos para o cálculo da ressecção espacial. Na escolha dos pontos foram seguidos os seguintes critérios: utilizar pontos com baixo e alto desnível nas fotografias; selecionar pontos bem visíveis na fotografia e na ortoimagem; e distribuir os pontos de forma a não ficarem colineares ou agrupados entre si.

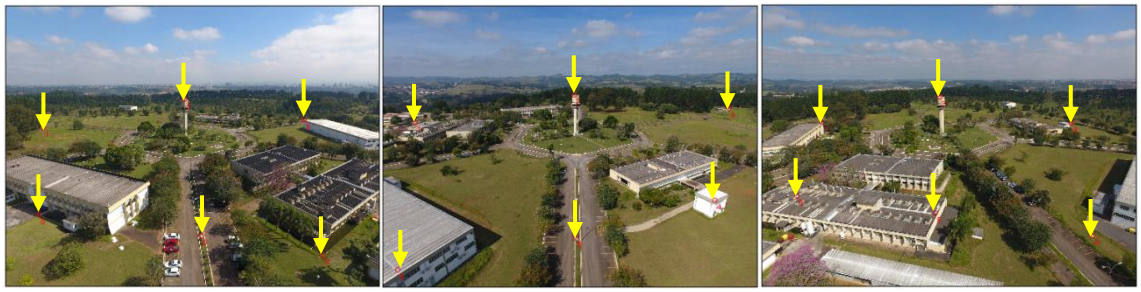
Figura 4.24 – 5º Caso - Fotos com aproximadamente 55º de inclinação.



Fonte: Produzido pelo autor.

A Figura 4.25 mostra três exemplos das fotografias com 75º de inclinação do 6º caso. As setas demostram em cada fotografia a posição dos seis pontos escolhidos para o cálculo da ressecção espacial.

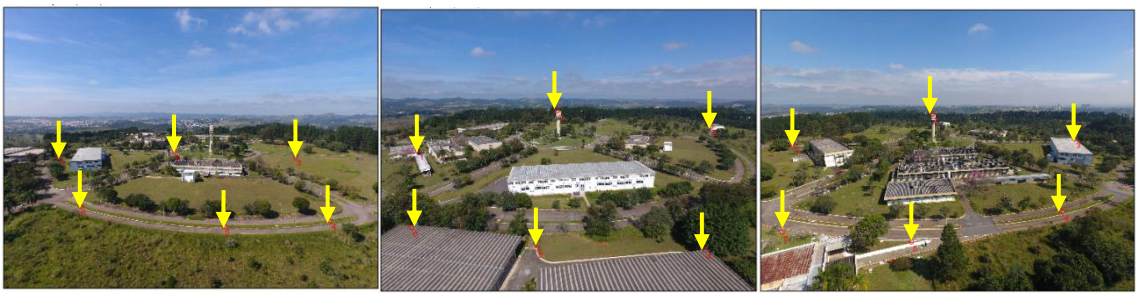
Figura 4.25 – 6º Caso - Fotos com aproximadamente 75º de inclinação.



Fonte: Produzido pelo autor.

Na Figura 4.26 são apresentados três exemplos das fotografias com 80º de inclinação escolhidas para o 7º caso. As setas demostram em cada fotografia a posição dos seis pontos mencionados para o cálculo da ressecção espacial. Observa-se nos casos 6º e 7º que o horizonte começa a aparecer e por isso os critérios de selecionar pontos bem distribuídos não pode ser mantido.

Figura 4.26 – 7º Caso - Fotos com aproximadamente 80º de inclinação.



Fonte: Produzido pelo autor.

A partir das coordenadas de imagem e de terreno dos seis pontos para cada imagem, foram calculados os centros perspectivos e as atitudes para as fotografias do 5º, 6º e 7º casos. Foram calculados os seus desvios em relação à referência, ou seja, as coordenadas e atitudes ajustadas do BBA, fornecido pelo Pix4D Mapper Pro.

Nos três casos foram realizadas as análises estatísticas do PEC para os erros conforme descrito no Item 2.14. A Tabela 4.12 apresenta as médias, os desvios padrão e o RMS dos centros perspectivos e das atitudes dessas amostras.

São apresentados também os resultados da aceitação para os testes de hipóteses da Média Amostral ($\overline{\Delta X}$) e do Desvio Padrão Amostral (S), para o nível de significância (α) de 1% para o Erro Padrão de 0,17 para o 5º caso e 0,30 para o 6º e 7º casos, ou seja, o Erro Padrão da Classe A do PEC-PCD para a escala 1:1.000 para o 5º caso e o Erro Padrão da Classe A do PEC para a escala 1:1.000 para os 6º e 7º casos, conforme Tabela 2.1.

Tabela 4.12 – Teste de hipótese para os 5º, 6º e 7º casos..

	ΔEo 5º Caso	ΔNo 5º Caso	ΔHo 5º Caso	Δω 5º Caso	Δϕ 5º Caso	ΔK 5º Caso
Média ($\bar{X}$)	-0,079	0,046	0,120	0,0787	-0,0250	0,0685
Hipótese H_0 : $\mu = 0$	✓	✓	×	✓	✓	✓
Desvio Padrão (S)	0,128	0,172	0,172	0,1951	0,0809	0,1024
Hipótese H_0 : $\sigma^2 = 0,17$	✓	✓	✓	✓	✓	✓
RMS	0,150	0,178	0,210	0,2104	0,0846	0,1232

	ΔEo 6º Caso	ΔNo 6º Caso	ΔHo 6º Caso	Δω 6º Caso	Δϕ 6º Caso	ΔK 6º Caso
Média ($\bar{X}$)	-0,019	0,088	-0,059	-0,0561	-0,0294	0,1911
Hipótese H_0 : $\mu = 0$	✓	✓	✓	✓	✓	×
Desvio Padrão (S)	0,201	0,237	0,189	0,3076	0,0877	0,2071
Hipótese H_0 : $\sigma^2 = 0,30$	✓	✓	✓	✓	✓	✓
RMS	0,202	0,252	0,198	0,3127	0,0925	0,2818

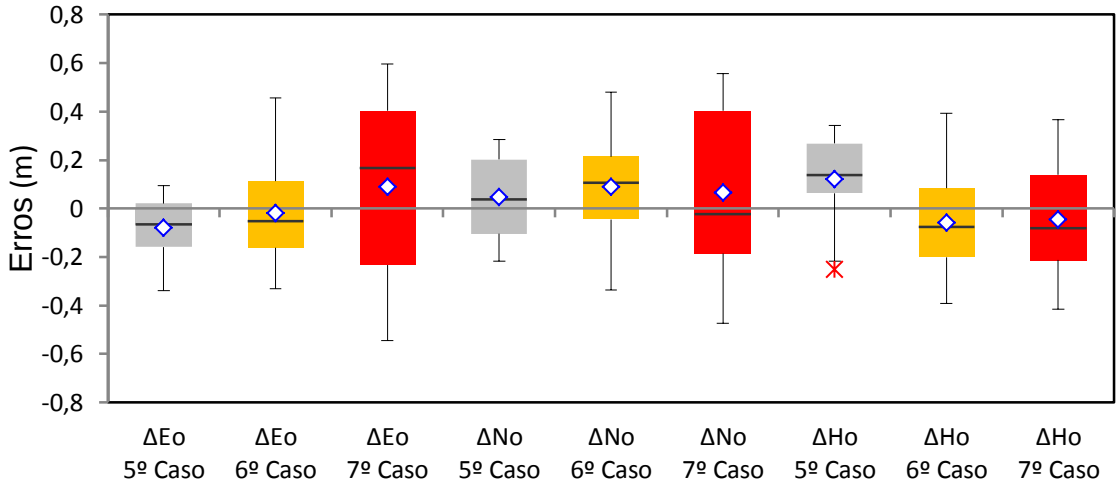
	ΔEo 7º Caso	ΔNo 7º Caso	ΔHo 7º Caso	Δω 7º Caso	Δϕ 7º Caso	ΔK 7º Caso
Média ($\bar{X}$)	0,088	0,065	-0,046	-0,0157	0,0039	0,1809
Hipótese H_0 : $\mu = 0$	✓	✓	✓	✓	✓	×
Desvio Padrão (S)	0,350	0,315	0,226	0,3237	0,0807	0,2068
Hipótese H_0 : $\sigma^2 = 0,30$	✓	✓	✓	✓	✓	✓
RMS	0,361	0,321	0,231	0,3241	0,0808	0,2748

Fonte: Produzido pelo autor.

As dispersões dos erros são visualizadas no diagrama de caixa da Figura 4.27, onde é apresentada uma comparação entre os três casos para os três eixos do centro perspectivo e na Figura 4.28 as três respectivas atitudes são mostradas. Através dos diagramas percebe-se que ao aumentar a inclinação ocorre um aumento na dispersão dos erros nos três eixos, tanto para a posição quanto para a atitude da câmara.

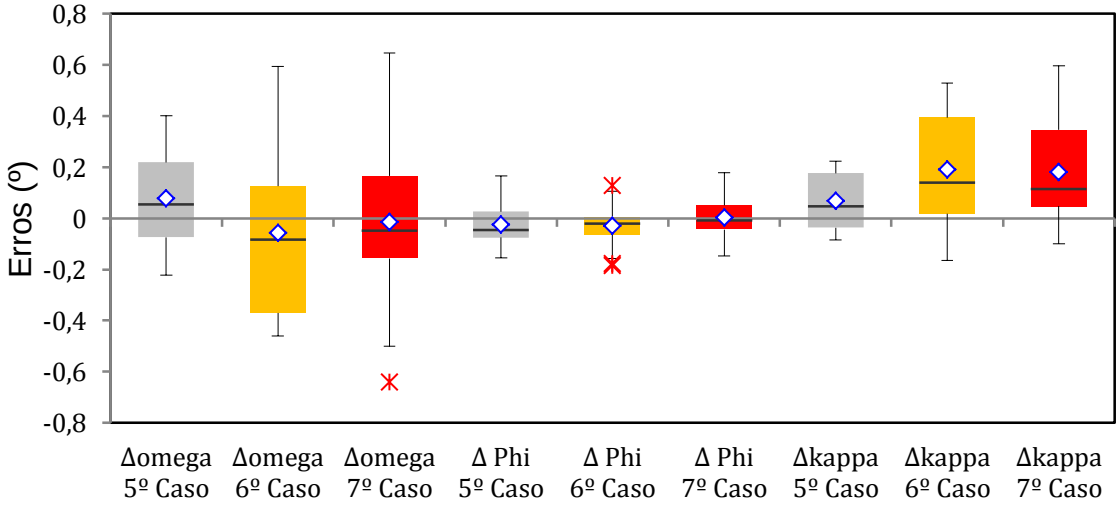
Possivelmente este aumento de dispersão ocorreu devido à dificuldade de identificar os pontos mais distantes, pois os pontos mais distantes do centro perspectivo possuem uma resolução espacial menor do que os pontos mais próximos. Outro possível fator que contribui para a disperção é o fato de que à medida que a inclinação aumenta os pontos vão se agrupando, pois o horizonte começa a aparecer.

Figura 4.27 – Comparação entre Centros Perspectivos do 5º, 6º e 7º Casos.



Fonte: Produzido pelo autor.

Figura 4.28 – Comparação entre atitudes do 5º, 6º e 7º Casos.



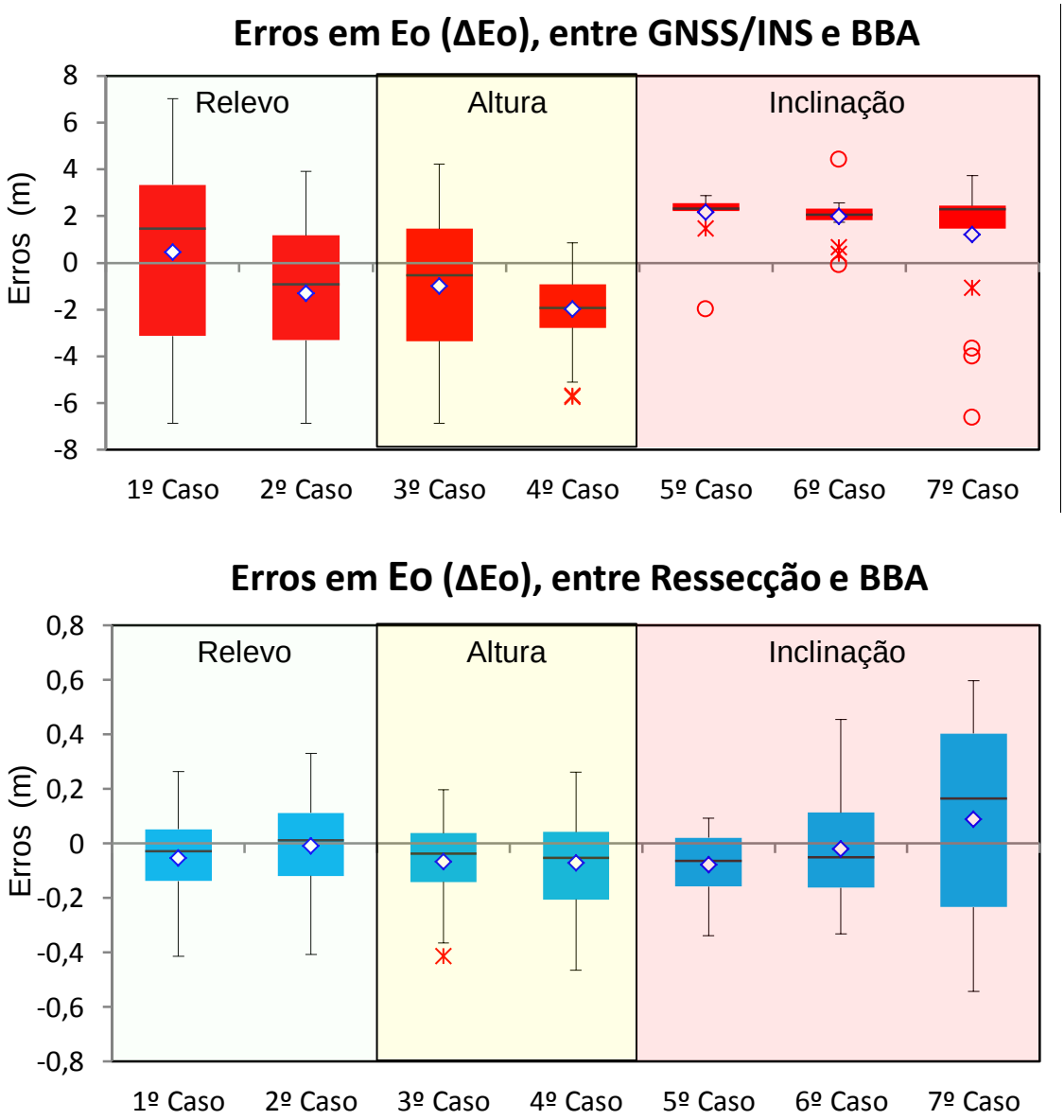
Fonte: Produzido pelo autor.

4.3. Comparação entre o posicionamento por GNSS/INS e a Ressecção

Para comparar as coordenadas e atitudes obtidas através do GNSS/INS do Phantom 4 com as obtidas pela ressecção espacial com correção das distorções, são apresentados os diagramas de caixa para cada caso, podendo ser visualizados os desvios entre esses métodos de posicionamento e as coordenadas e atitudes da referência do BBA. A Figura 4.29 mostra os erros do Centro Perspectivo no eixo Este, onde foi verificado que em relação ao

GNSS/INS estes erros variaram ±7,5 metros e no caso da Ressecção Espacial a variação foi ± 0,6 metros no pior caso.

Figura 4.29 – Erros do CP em Este para os 7 casos.

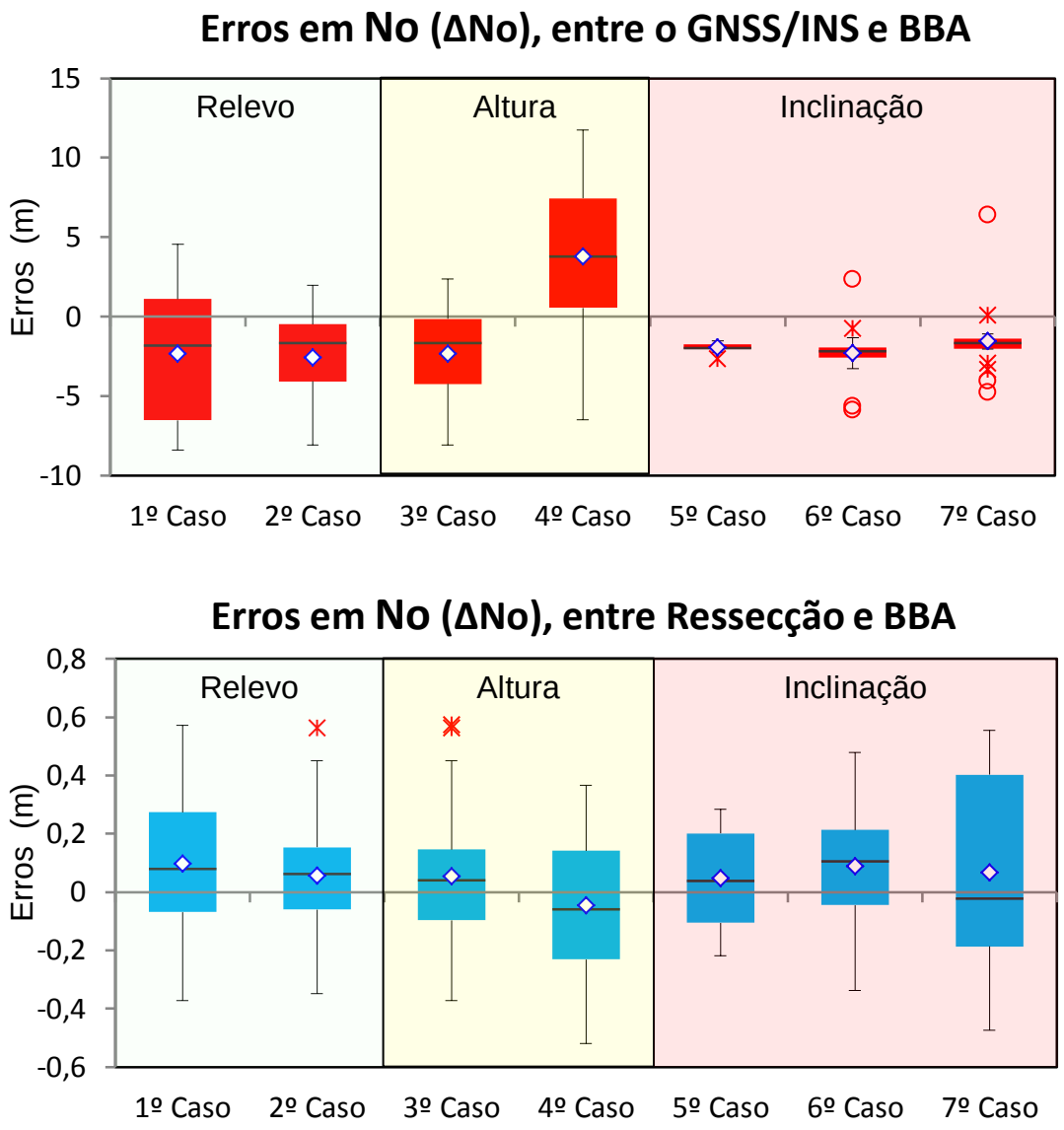


Fonte: Produzido pelo autor.

Os erros do centro perspectivo na direção Norte são visualizados na Figura 4.30. Esses erros em relação ao GNSS/INS variaram entre -7,5 a +12,5 metros e no caso da Ressecção Espacial, utilizando a correção da distorção radial os

erros mantiveram-se aproximadamente iguais aos desvios observados no eixo Este, variando entre ± 0,6 metros no pior caso.

Figura 4.30 – Erros do CP em Norte para os 7 casos.

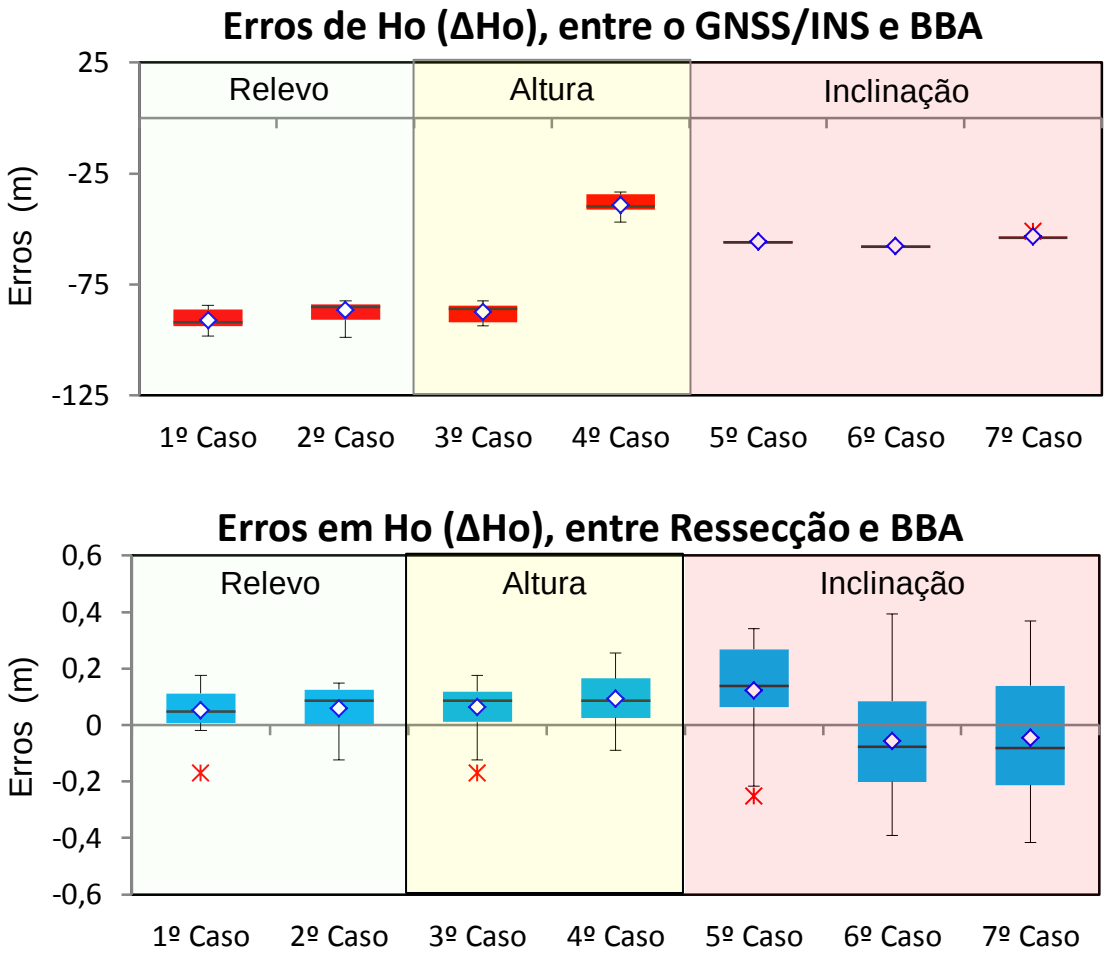


Fonte: Produzido pelo autor.

A Figura 4.31 apresenta os erros do centro perspectivo em Altitude. Esses erros para o GNSS/INS variaram aproximadamente entre -90 a -20 metros e no caso da Ressecção Espacial, utilizando a correção da distorção radial e

tangencial, mantiveram-se aproximadamente iguais aos desvios observados nos eixos Este e Norte, variando entre ± 0,4 metros no pior caso.

Figura 4.31 – Erros do CP em Altitude para os 7 casos.



Fonte: Produzido pelo autor.

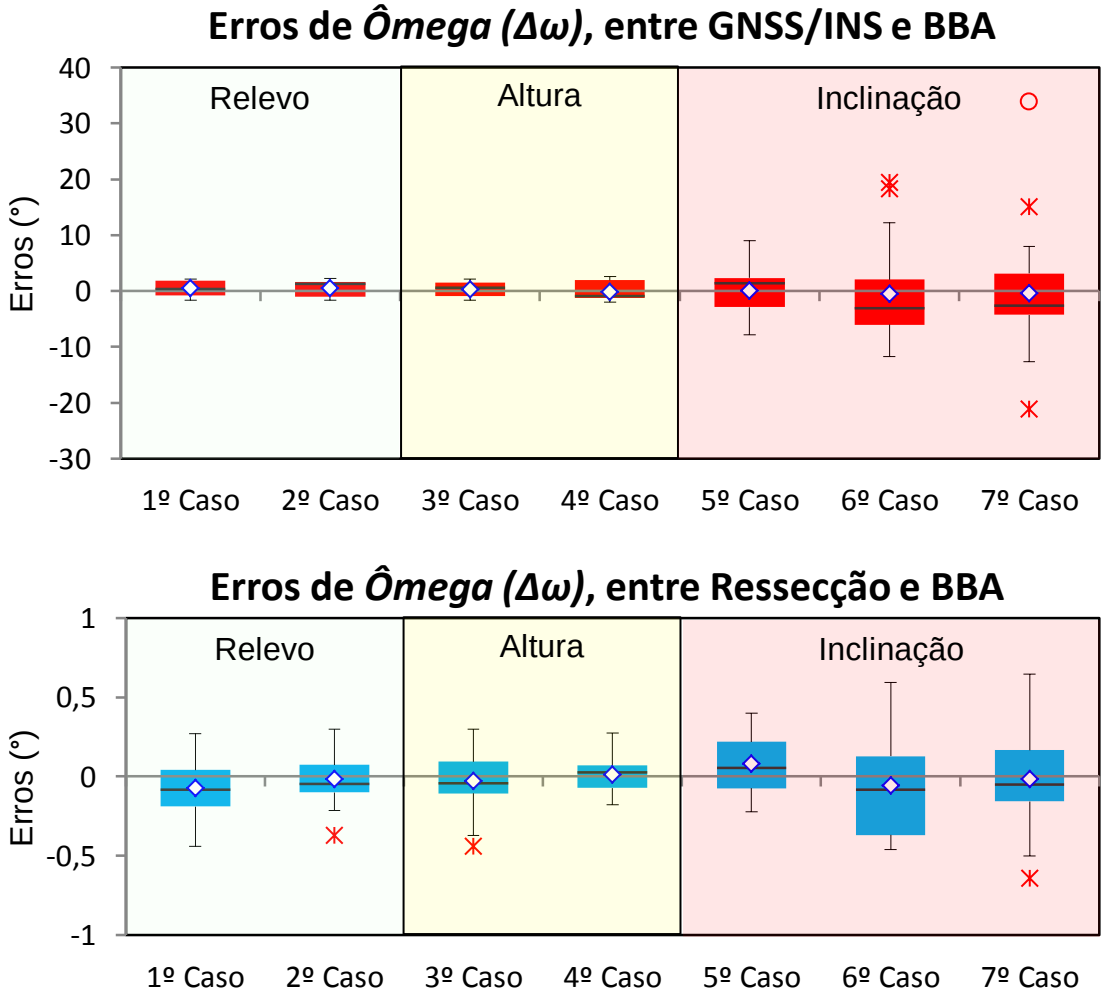
Nos casos 5 a 7 com relação à diferença altimétrica entre o GNSS/INS e a referência do BBA, apesar das variâncias terem sido razoavelmente pequenas em relação aos demais, não houve acurácia, pois as médias estavam deslocamentos em relação ao zero de aproximadamente -50m em altitude.

Esses erros são provenientes do GNSS/INS do Phantom 4, que não dispõe de correção diferencial para o GNSS, causando erros aleatórios e sistemáticos na determinação das coordenadas do ponto de partida do voo e durante todo o voo. As coordenadas das fotografias são o resultado do GNSS, INS e demais

sensores embarcados neste RPA. No entanto, no momento de obtenção das coordenadas do GNSS nos casos 5 e 7, possivelmente os dados do GNSS foram mais precisos que nos demais casos, possivelmente por uma boa disposição dos satélites no momento de obtenção das coordenadas do GNSS.

A Figura 4.32 mostra os erros do ângulo *Ômega* ($\Delta\omega$). Esses desvios do GNSS/INS variaram aproximadamente entre -2º a +2º para o caso 01 e -21º a +33º para o caso 07. Para os desvios em relação a Ressecção Espacial utilizando a correção da distorção radial e tangencial os desvios observados variaram entre ± 0,6º no pior caso.

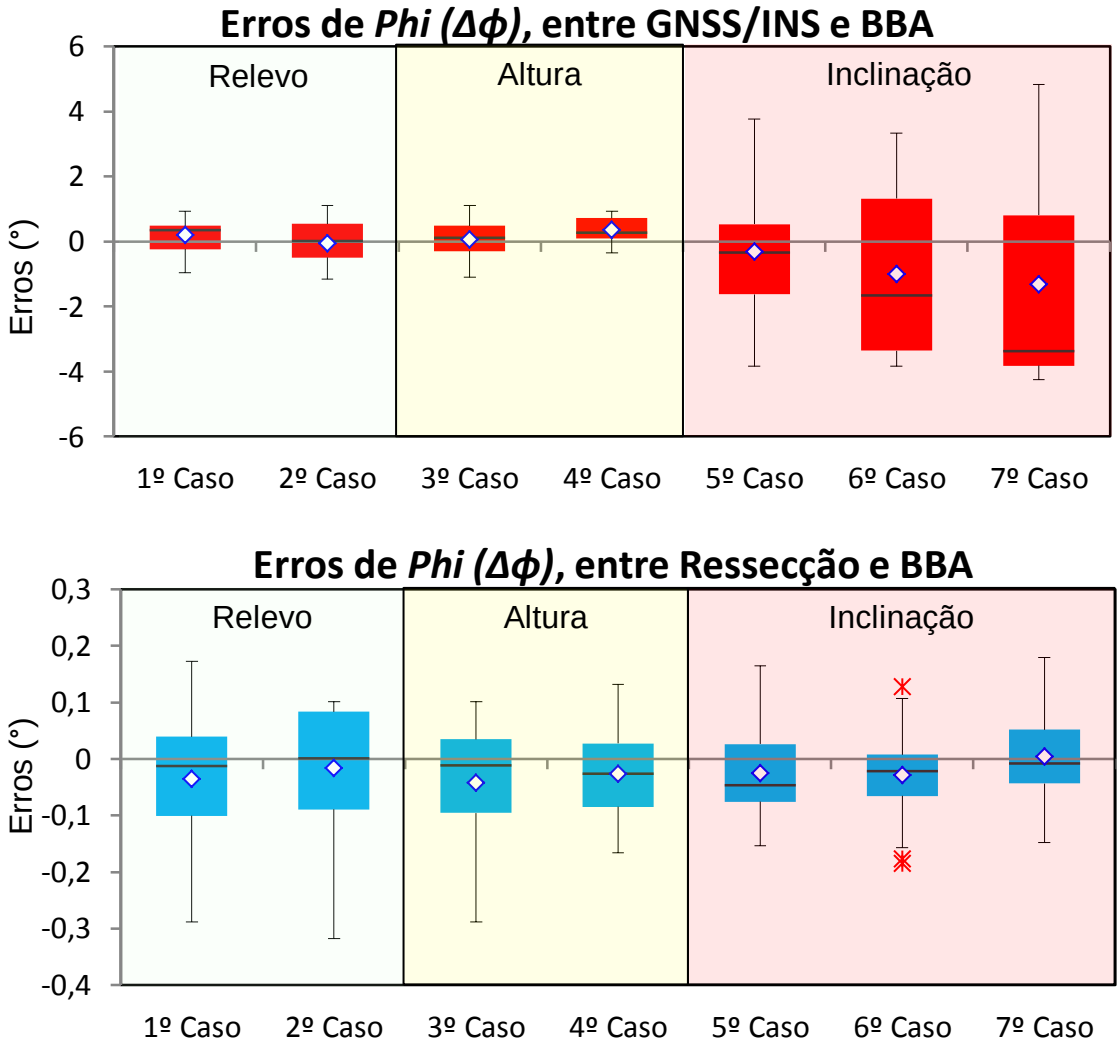
Figura 4.32 – Erros da atitude em *Ômega* ($\Delta\omega$) para os 7 casos.



Fonte: Produzido pelo autor.

A Figura 4.33 apresenta os desvios do ângulo *Phi* ($\Delta\phi$). Esses desvios para o GNSS/INS variaram aproximadamente entre -1º a +1º para o caso 01 e -4º a +5º para o caso 07. Em relação a Ressecção Espacial utilizando a correção da distorção radial e tangencial os desvios observados variaram entre -0,3º a +0,2º no pior caso.

Figura 4.33 – Erros da atitude em *Phi* ($\Delta\phi$) para os 7 casos.

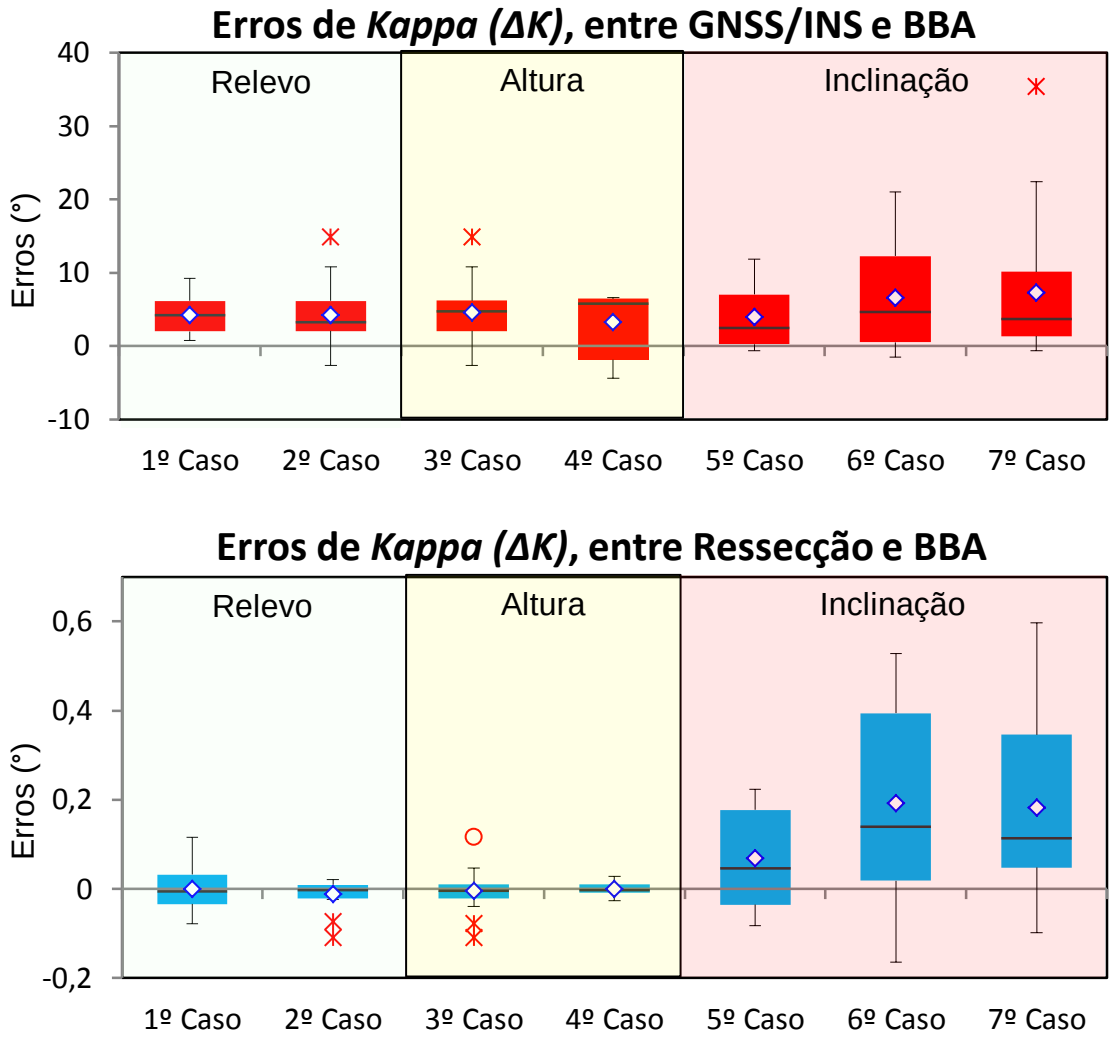


Fonte: Produzido pelo autor.

Na Figura 4.34 são apresentados os desvios do ângulo *Kappa* (ΔK). Esses erros para o GNSS/INS variaram aproximadamente entre -9º a +35º. Em

relação a Ressecção Espacial utilizando a correção da distorção radial e tangencial os desvios observados variaram entre -0,2º a +0,6º no pior caso.

Figura 4.34 – Erros da atitude em *Kappa* (ΔK) para os 7 casos.



Fonte: Produzido pelo autor.

Do exposto nos gráficos apresentados verifica-se que houve grande acréscimo na acurácia dos dados quando se calculou o posicionamento do ARP pelo método de ressecção espacial da fotogrametria, utilizando como base a ortoimagem e o MDS. Esses erros para o GNSS/INS variaram aproximadamente entre -5º a +20º em relação à Ressecção Espacial os erros observados variaram entre -0,2º a +0,6º no pior caso. Tais acurácias são muito superiores às disponibilizadas pelos INS e pelos receptores GNSS que não

possuem correção diferencial, usualmente utilizado na maioria dos ARP e se aproxima muito das precisões obtidas através dos receptores GNSS que possuem correção diferencial.

Os Erros encontrados no GNSS/INS deste ARP podem ser corrigidos embarcando-se receptores GNSS diferenciais, no entanto, a utilização do GNSS diferencial, que pode ser desabilitado ou sofrer ataques cibernéticos, é o problema primário abordado neste trabalho. Para tanto é necessário ter sistemas autônomos que auxiliem na navegação quando estes problemas vierem a ocorrer, por este motivo a técnica de navegação utilizando imagens para obter o posicionamento e ângulos de atitude da câmara no espaço se mostra uma metodologia promissora e viável para a navegação autônoma de RPA.

4.4. Comparação entre os Erros e os Desvios Padrão calculados

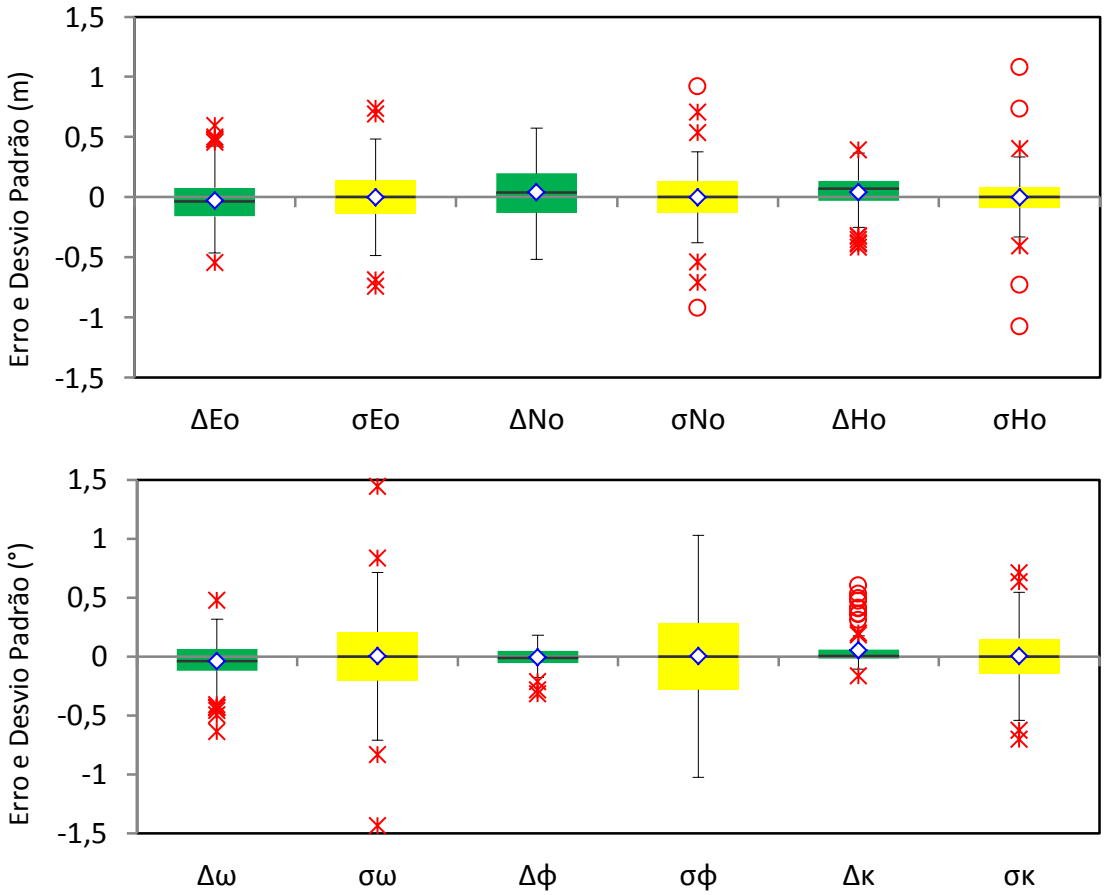
Os erros dos centros perspectivos e atitudes das fotografias nos sete casos apresentados anteriormente foram obtidos a partir da diferença entre a referência, que foram as coordenadas e atitudes advindas do *Bundle Block Adjustment* (BBA), e aquelas ajustadas pelo Método dos Mínimos quadrados (MMQ) no cálculo da ressecção espacial.

Na ressecção espacial, a cada 3 pontos é possível se calcular o valor das coordenadas e atitudes da câmara. No entanto, como apresentado anteriormente foram utilizados para cada fotografia 6 pontos. Assim o número combinado de 6 elementos agrupados 3 a 3 possibilita 20 soluções possíveis.

Por este motivo no ajustamento do MMQ o valor das coordenadas e das atitudes é representado pela média das possíveis soluções de cada grupo de 3 pontos homólogos, sendo possível calcular o desvio padrão amostral para essas coordenadas e atitudes do centro perspectivo de cada fotografia.

Visando comparar os erros das coordenadas (*ΔEo, ΔNo, ΔHo*) e atitudes (*Δω, Δϕ, Δκ*), que foram calculados pela diferença entre o BBA e as médias do MMQ, com os desvios padrões calculados para cada ressecção espacial (*σEo, σNo, σHo, σω, σϕ, σκ*), proveniente da Matriz Variância e Covariância, foram criados os gráficos *boxplot* apresentados na Figura 4.35 onde são comparados os erros e os desvios padrão para 98 fotografias dos 7 casos estudos anteriormente. Apesar dos desvios padrões terem apenas sinal positivo, eles foram espelhados no valor negativos para permitir uma melhor comparação com os erros na componente negativa.

Figura 4.35 – Comparação entre os Erros e os Desvios Padrões.



Fonte: Produzido pelo autor.

No gráfico da na Figura 4.35 verifica-se que o desvio padrão calculado é, em média, maior do que o erro medido pela diferença entre a referência do BBA e as coordenadas e atitudes obtidas pela ressecção espacial. No entanto, ao

calcular o percentual de vezes em que o erro ficou menor do que o desvio padrão verificou-se que a proporção apresentada é inferior a proporção prevista numa distribuição normal. Os resultados das proporções se encontram na Tabela 4.13.

Tabela 4.13 – Percentual de Erros menores que os Desvios Padrão.

	Eo (%)	No (%)	Ho (%)	ω (%)	ϕ (%)	κ (%)
μ ±1σ (68,3%)	52,0	44,9	50,0	37,8	74,5	62,2
μ ±2σ (95,5%)	79,6	77,6	75,5	65,3	89,8	84,7
μ ±3σ (99,7%)	92,9	87,8	89,8	79,6	93,9	91,8

Fonte: Produzido pelo autor.

Esta diferença ocorreu provavelmente devido a erros sistemáticos da ortoimagem e do MDS, pois a ortoimagem possui as incertezas apresentadas no Item 4.1.3, que são valores da mesma ordem de grandeza dos desvios padrão obtidos pela ressecção espacial. Assim ao calcular a ressecção a partir desta ortoimagem obtêm-se as incertezas da ortoimagem somadas às incertezas da medição dos pontos homólogos.

4.5. Comparação entre Erros Com e Sem Calibração Geométrica

Para comparar os erros dos centros perspectivos e atitudes das fotografias, foram calculadas as ressecções espaciais para 115 fotografias nos 7 casos estudados, inicialmente utilizando os parâmetros intrínsecos nominais da câmara e posteriormente com os parâmetros intrínsecos calibrados.

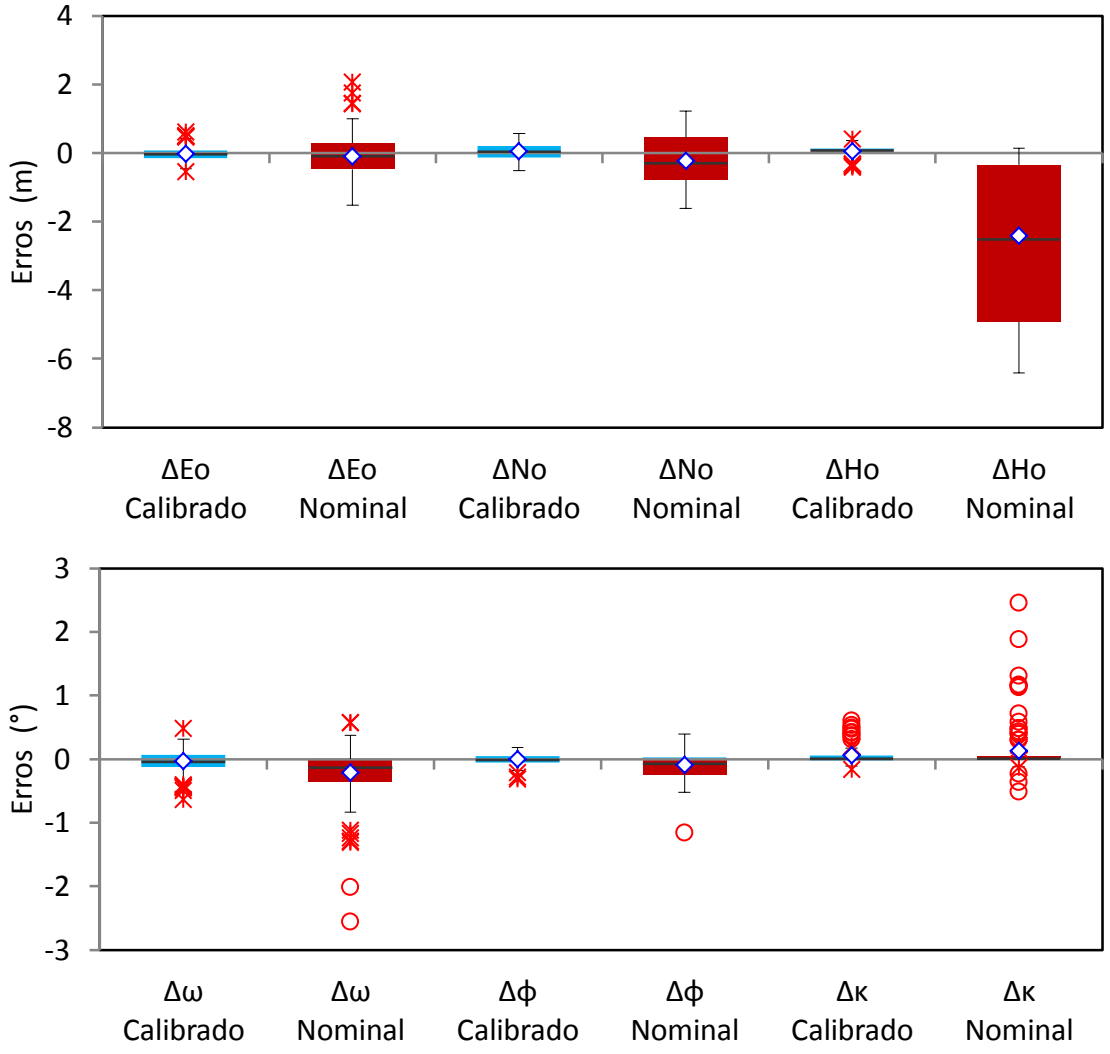
Os parâmetros nominais foram informados pelo fabricante e comparados com os erros de posição e atitudes obtidos quando se utilizou os parâmetros de calibração da câmara. Ambos os erros foram obtidos a partir da diferença entre a referência, que foram as coordenadas e atitudes advindas do BBA, e aquelas ajustadas por MMQ no cálculo da ressecção espacial para cada caso.

No cálculo da resseção espacial com a câmara calibrada foram utilizados os parâmetros intrínsecos da câmara ajustado pelo processo de calibração "*on the*

job" do Pix4D para cada caso. Para o cálculo da resseção espacial com uso dos parâmetros nominais da câmara foram utilizados a distância focal nominal de 3,16mm e as dimensões do sensor de 6,317mm x 4,738mm, sendo desconsideradas as distorções radiais, distorções tangenciais e o deslocamento do ponto principal.

Na Figura 4.36 é apresentada a comparação entre os erros encontrados com uso dos parâmetros de calibração da câmara e quando se desconsidera estes parâmetros por se dispor apenas dos parâmetros nominais da câmara.

Figura 4.36 – Comparação entre Erros Com e Sem Calibração Geométrica.



Fonte: Produzido pelo autor.

Na Figura 4.36 verifica-se que, tanto para as coordenadas do centro perspectivo, quanto para as atitudes, os erros aumentaram quando não foram utilizados os parâmetros de calibração da câmara. O gráfico mostra que a altitude foi o eixo que apresentou erros maiores, com dispersão 6 vezes do que a calibrada, pode se observar que a média ficou deslocada do zero, devido principalmente à influência do erro da distância focal, sendo que neste caso foi utilizada a distância focal nominal.

Esses erros ocorrem pelo fato das equações de colinearidade serem montadas utilizando relações entre a distância focal e a altura de voo, conforme apresentado no Item 2.8.2. Assim, o posicionamento no eixo vertical sofre a maior influência, quando as fotografias são tomadas na vertical. No entanto, quando as fotografias são inclinadas, este erro é distribuído nas demais componentes Norte e Este.

4.6. Influência da identificação errada dos pontos homólogos

Como mencionado anteriormente, até o momento a identificação de pontos homólogos foi realizada com o uso de identificação visual entre uma feição bem definida da fotografia e sua homóloga na ortoimagem. No entanto, esta identificação também pode ser realizada de forma automática, utilizando algoritmos de reconhecimento de padrões, que identificam de forma automática os pontos correlatos entre as duas imagens (SILVA FILHO, 2016).

As vantagens desses algoritmos são a identificação de grande quantidade de pontos homólogos, de forma automática, e a localização de pontos que não seriam facilmente identificados pela visão humana. No entanto, a sua desvantagem é que não conseguem identificar facilmente feições que apresentam mudança de forma, textura, contexto e luminosidade entre a fotografia e a ortoimagem. Isso pode gerar a identificação errônea dos pontos correlatos, causando erros na determinação das coordenadas e atitudes dos pontos homólogos.

Para testar estes erros na identificação dos pontos correlatos e seu impacto na determinação das coordenadas e ângulos de atitude do centro perspectivo da câmara foram realizados testes variando de forma aleatória as coordenadas dos pontos homólogos. Para tanto foram adicionados às coordenadas erros proporcionais a 1%, 5%, 50% e 100% da altura de voo. Estas variações foram realizadas para um ponto, dois pontos e assim sucessivamente até os seis pontos. Os resultados do aumento dos desvios padrão amostrais são apresentados na Tabela 4.14.

Tabela 4.14 – Percentual de Erros menores que os Desvios Padrão.

Nº de Pontos	Percentual da Altura de voo (%)	SEo	SNo	SHo	Sω	Sϕ	Sk
1	**1**	1,12	1,03	0,32	0,36	0,34	0,13
1	**5**	4,88	5,62	1,72	1,90	1,62	0,58
1	**50**	35,26	36,02	25,52	11,00	14,07	5,91
1	**100**	48,57	41,41	47,50	14,67	20,83	21,63
2	**5**	7,54	7,87	2,73	2,32	2,56	0,97
2	**50**	52,51	51,67	32,12	16,39	17,85	8,81
2	**100**	54,72	74,45	55,18	17,76	20,97	19,54
3	**5**	9,34	10,20	3,32	2,86	3,30	1,21
3	**50**	58,93	51,45	52,54	18,33	19,75	12,22
3	**100**	60,15	43,11	49,94	20,65	24,66	34,17
4	**5**	8,40	8,54	2,90	2,59	2,78	1,05
4	**50**	62,44	59,43	46,91	19,11	21,01	10,40
4	**100**	68,94	87,96	66,89	34,40	40,81	54,75
5	**5**	8,62	9,01	2,87	2,64	2,97	1,08
5	**50**	479,31	352,99	601,97	58,07	87,06	76,51
5	**100**	**Divergiu**	**Divergiu**	**Divergiu**	**Divergiu**	**Divergiu**	**Divergiu**
6	**5**	10,42	9,97	3,87	3,22	3,27	1,30
6	**50**	488,51	478,09	446,21	40,42	83,62	88,99
6	**100**	**Divergiu**	**Divergiu**	**Divergiu**	**Divergiu**	**Divergiu**	**Divergiu**

Fonte: Produzido pelo autor.

Na Tabela 4.14 pode-se verificar que, ao aumentar o número de pontos e o percentual em relação à altura de voo, o desvio padrão amostral, tanto para a posição, quanto para as atitudes da câmara no espaço, aumentam. Para o caso de 5 e 6 pontos com erros de 100% da altura de voo as soluções

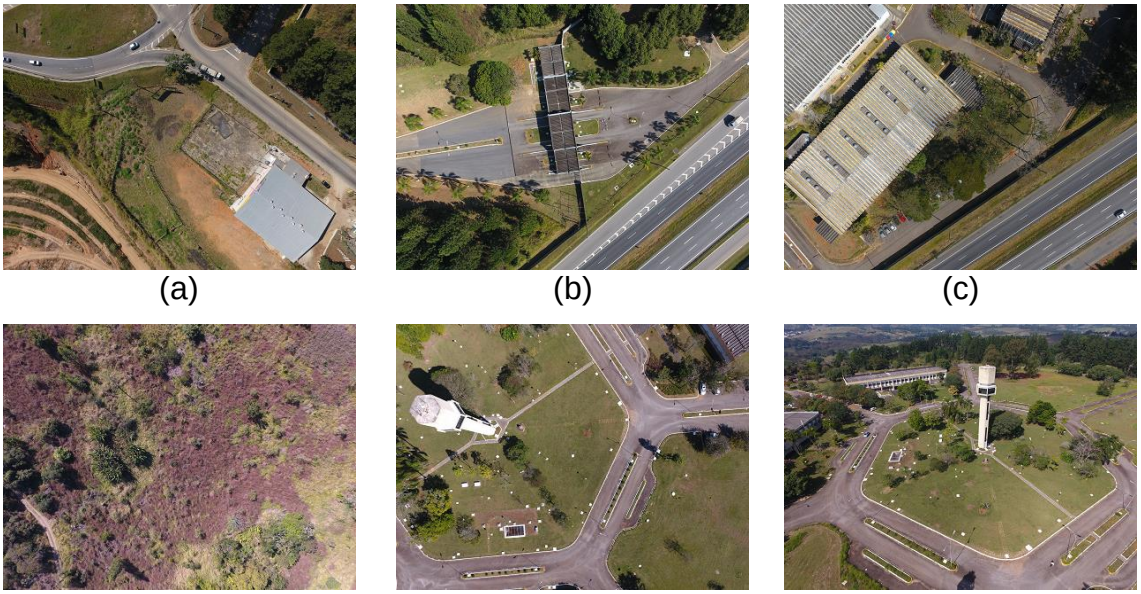
divergiram e não foi possível calcular uma solução para o sistema de equações não lineares.

4.7. Cálculo do erro utilizando os algoritmos SURF e RANSAC

Para testar o desempenho da estimação automática de posição e atitude da câmara no espaço, por intermédio da identificação automática de pontos homólogos a partir de algoritmos computacionais, foram utilizados os algoritmos *Speeded Up Robust Features (SURF)* e *RAndom SAmple Consensus (RANSAC)* (SILVA FILHO, 2016).

Para verificar o desempenho destes algoritmos em diversos cenários, foram escolhidas 39 fotografias, divididas nos seguintes grupos: 8 fotos na vertical do Aterro Sanitário e Centro de Tradições Gaúchas (CTG) (Figura 4.37a); 4 fotos na vertical da portaria do IEAv, Figura 4.37b; 6 fotos na vertical da Subdivisão Técnica do IEAv (Figura 4.37c); 9 fotos na vertical de uma área com apenas vegetação dentro do IEAv (Figura 4.37d); 6 fotos na vertical da torre do IEAv (Figura 4.37e); e 6 fotos oblíquas na direção da torre do IEAv (Figura 4.37f).

Figura 4.37 – Imagens utilizadas na identificação automática.



(a) (b) (c)

(d) (e) (f)

Fonte: Produzido pelo autor.

Estes testes foram realizados para simular a navegação autônoma, pois possibilitam o cálculo da posição da câmara no espaço, de forma automática. Isso é possível ao associar as técnicas de reconhecimento de pontos homólogos pelo SURF e RANSAC ao cálculo da ressecção espacial proveniente da fotogrametria. Assim é possível obter de forma automática o posicionamento e atitude apenas com a fotografia tomada no momento do voo e a ortoimagem/MDS (BRAGA et al., 2016; LIMA et al., 2017).

Após a identificação dos pontos com o uso do SURF e do RANSAC, os algoritmos retornam os 6 pontos que apresentaram a melhor correlação. Nestes pares de coordenadas no sistema de imagem (fotografia) e no sistema de terreno (ortoimagem e MDT) aplicam-se os cálculos da ressecção espacial, conforme os procedimentos apresentados anteriormente.

Inicialmente assumiu-se que ao selecionar os seis pontos de melhor correlação, o SURF seria capaz de identificar apenas pontos homólogos corretos. Por isso, optou-se inicialmente pela utilização apenas do SURF para identificar os seis pontos homólogos.

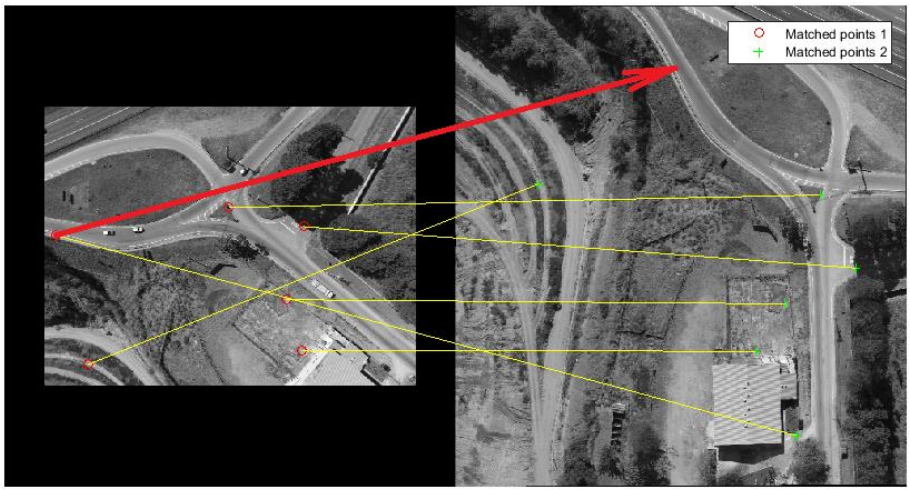
No entanto, os testes iniciais demostraram que das 39 fotografias escolhidas apenas 9 fotos tiveram a identificação acertada, nas demais fotografias um ou mais pontos eram *outliers*, até as fotografias inclinadas, nas quais o algoritmo não conseguiu identificar nenhum ponto homólogo.

A seta vermelha na Figura 4.38a apresenta o local correto entre o ponto homologo identificado na fotografia, a esquerda e na ortoimagem a direita. Este é um caso de identificação errônea de um dos seis pontos de maior correlação, selecionados pelo SURF para o cálculo da ressecção espacial. Aqui se verifica que o SURF identificou um ponto da fotografia na lateral da estrada como sendo um ponto da ortoimagem próximo a quina da edificação.

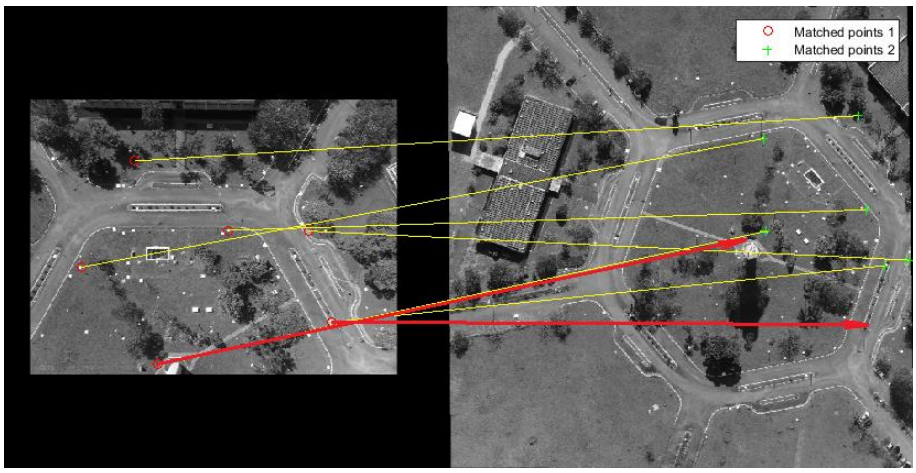
Outro caso de identificação errôneo de dois dos seis pontos de maior correlação é apresentado na Figura 4.38b. Nos dois casos pode se perceber o

erro sem a necessidade de verificar visualmente, pois isto pode ser identificado no aumento da variância do cálculo da ressecção espacial.

Figura 4.38 – Identificação de 6 pontos através do SURF



(a)



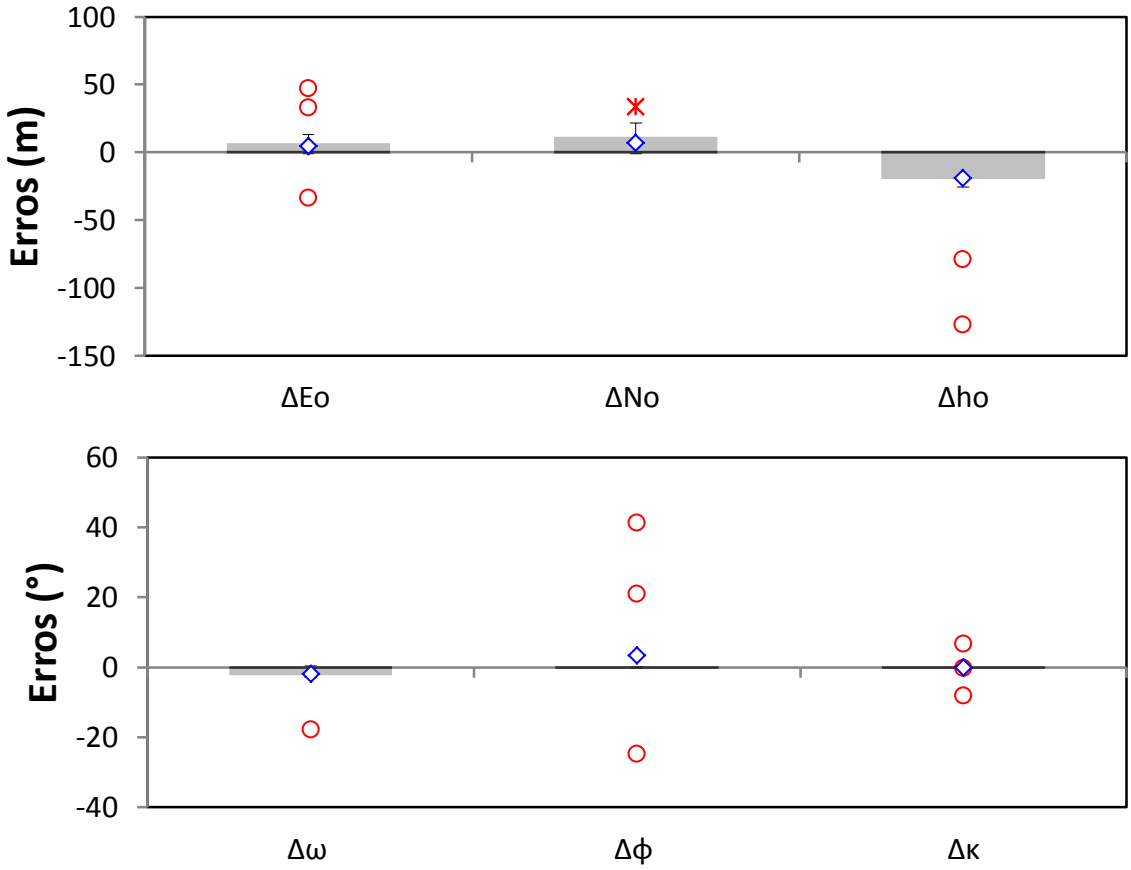
(b)

Fonte: Produzido pelo autor.

A identificação de erros entre pontos homólogos selecionados pelo SURF é verificada ao calcular a variância da ressecção espacial. Quando algum ponto é identificado erroneamente a variância do cálculo da posição e atitudes aumenta. Assim, pode-se definir um valor de referência para a aceitação do grupo de pontos, de acordo com o valor da variância.

A Figura 4.39 apresenta o diagrama de caixa dos erros de posicionamento e atitude das fotografias, que puderam ser calculados pela ressecção espacial a partir dos pontos homólogos identificados apenas com o SURF. Aqui são apresentados os resultados das 9 fotografias, nas quais o SURF conseguiu identificar os seis pontos corretamente, além das 5 fotografias que, apesar de conter identificações errôneas, permitiram calcular a ressecção espacial. Nas demais fotografias em que houve identificação errônea dos pontos homólogos a solução da ressecção espacial divergiu, portanto o diagrama apresenta um total de 14 fotografias que foi possível calcular a ressecção espacial.

Figura 4.39 – Distribuição de erros utilizando apenas o SURF .

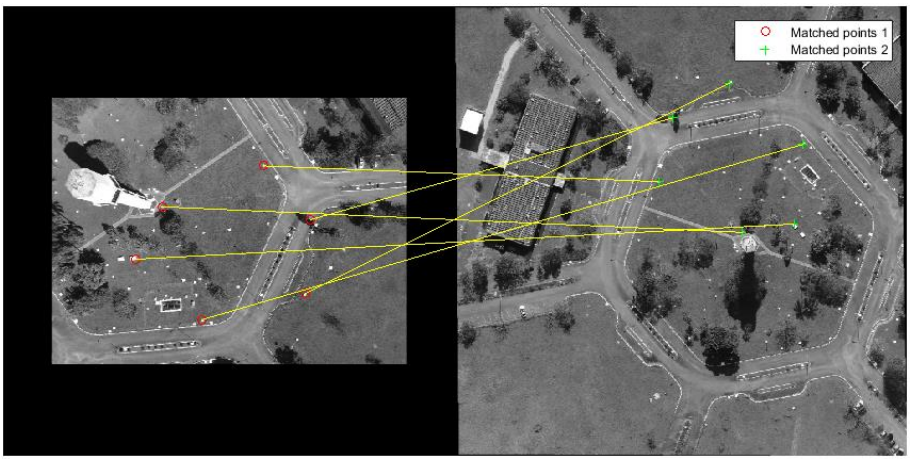


Fonte: Produzido pelo autor.

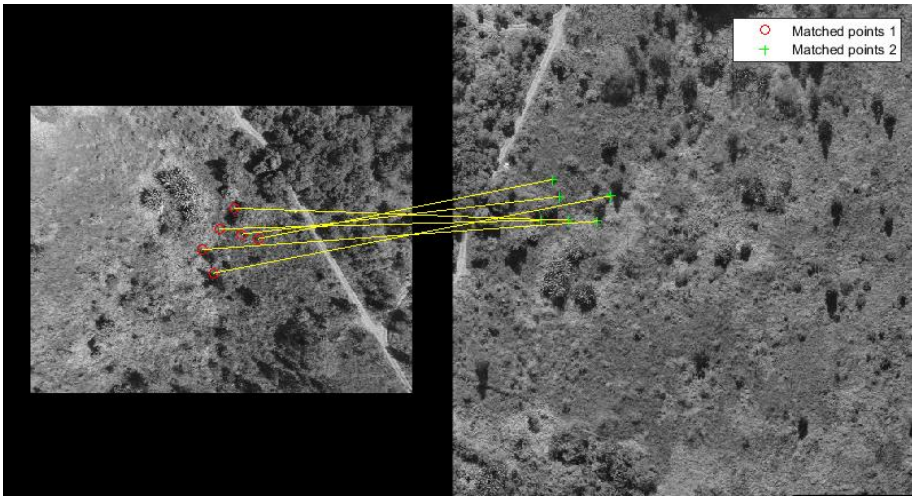
Foram realizados testes utilizando o SURF associado ao RANSAC, para a retirada dos *outliers*. Como consequência, das 39 fotografias, apenas em 6 fotografias não foi possível calcular a ressecção espacial, pois essas

fotografias eram obliquas, conforme apresentado na Figura 4.37f. Nesse caso o SURF não foi capaz de identificar nenhum dos pontos homólogos corretamente.

Figura 4.40 – Identificação de 6 ponto através do SURF e RANSAC



(a)



(b)

Fonte: Produzido pelo autor.

Inicialmente a fotografia foi dividida em 6 sub-imagens para melhor distribuir os pontos homólogos na mesma, pois assim melhora a geometria para a realização da recessão espacial. Um exemplo deste procedimento é ilustrado na Figura 4.40a.

No entanto, em algumas fotografias com o uso do SURF e do RANSAC não foi possível identificar pontos homólogos em algumas sub-imagens. Com a retirada da divisão por sub-imagens para a identificação dos pontos, houve melhora porque foram escolhidos os pontos de melhor correlação e o RANSAC já havia eliminado os *outliers*. No entanto, a retirada da divisão por sub-imagens acarretou em alguns casos a identificação de pontos homólogos agrupados em local da imagem, conforme apresentado na Figura 4.40b.

Outro recurso para identificar todos os pontos de forma acertada foi utilizar uma escolha aleatória dos pontos homólogos. Visto que mesmo após a retirada dos *outliers* pelo RANSAC alguns pontos homólogos podem ainda estar identificados erroneamente, mesmo que visualmente sejam pequenos os erros.

Assim, se dentre os seis pontos escolhidos, ainda houver alguns *outliers* é possível identificar, que o grupo de pontos possui *outliers* devido ao aumento da variância da ressecção espacial, podendo ser definido um valor de aceitação para a variância. Nesse caso, o algoritmo realiza uma nova busca por outro grupo de pontos até encontrar um grupo de pontos com variância aceitável no cálculo da resseção espacial.

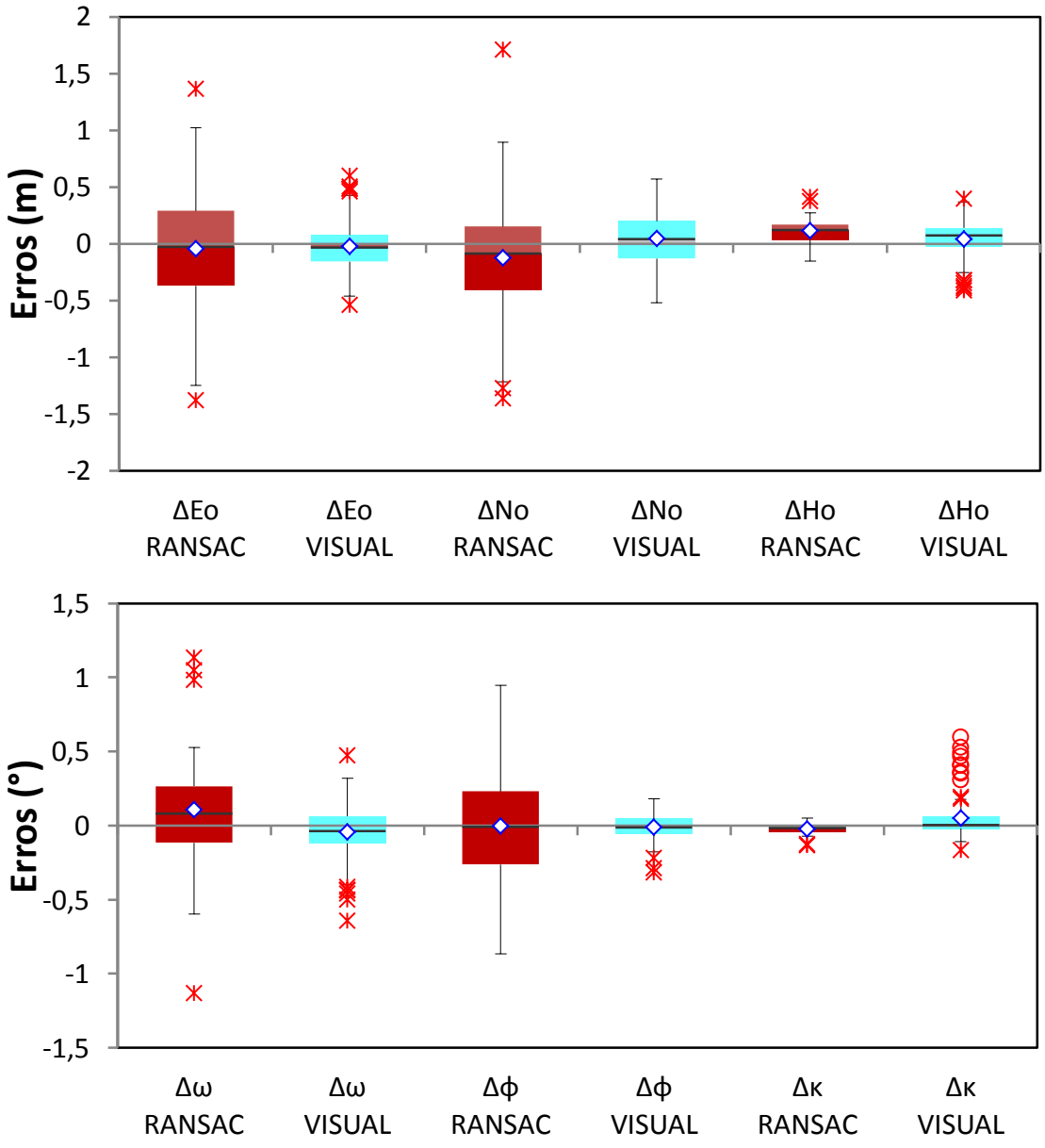
A Figura 4.41 apresenta o diagrama de caixa dos resultados da identificação dos pontos homólogos utilizando os algoritmos SURF e RANSAC associado a uma busca aleatória por grupos de pontos, que resultaram em uma baixa variância na determinação da posição e atitude da câmara no espaço.

Comparando estes resultados com os resultados da identificação visual verifica-se que em média as variâncias do posicionamento e atitudes, quando se utilizam os algoritmos SURF e RANSAC, ficam maiores do que as variâncias dos pontos identificados de forma visual.

Possivelmente as maiores variâncias ocorreram devido a erros de identificação de pontos homólogos realizados pelo SURF e que foram pequenos para serem identificados como *outliers* pelo RANSAC. Por este motivo, não foram retirados,

acarretando o aumento em média da variância. Outro fator que possivelmente influenciou no aumento da variância foi o agrupamento dos pontos homólogos em alguns casos conforme apresentado na Figura 4.40b.

Figura 4.41 – Distribuição de Erros utilizando o SURF e RANSAC



Fonte: Produzido pelo autor.

Do exposto nos gráficos apresentados acima se verifica que houve uma piora na acurácia em relação ao método de escolha de pontos de forma visual. No

entanto, ainda assim quando se comparado com o GNSS/INS disponibilizado pelo ARP Phantom 4 houve um grande acréscimo na acurácia dos dados.

Os erros máximos variaram entre -1,2 a +1,0 metros para a Planimetria; -0,2 a +0,3 metros para altimetria e -1,0º a +1,0º para os ângulos de atitude. Considerando a distribuição de erros da Figura 4.40 pode se verificar que para o posicionamento do centro perspectivo o intervalo interquartil não ultrapassou 0,5m e para os ângulos de atitude o intervalo interquartil não ultrapassou 0,5º. Tais acurácias são muito superiores às disponibilizadas pelo GNSS/INS que não possuem correção diferencial, usualmente utilizado na maioria dos ARP apresentadas no Item 4.3.

5 CONCLUSÃO E RECOMENDAÇÕES

Com base nos resultados apresentados na metodologia deste trabalho, constata-se que é possível e viável calcularas coordenadas e os ângulos de atitude de uma câmara no espaço, além de suas respectivas acurácias, através dos conceitos de fotogrametria.

Assim, caso se identifique, de forma automática e em tempo real, os pontos correlatos entre a imagem de referência e a fotografia durante o voo é possível navegar utilizando imagens com acurácia próxima ao GNSS. Para tanto deve-se configurar o sistema de navegação por imagem, com características e modelagem matemática compatíveis com a acurácia requerida no projeto de navegação por imagem.

Existem várias maneiras de se resolver sistemas de equações não lineares para o cálculo da ressecção espacial, sendo que, para o propósito de navegação, o método escolhido deve ser adequado para funcionar embarcado e em tempo real. Para a obtenção de informações métricas confiáveis a partir de imagens, nas diversas aplicações, é essencial que o sensor seja calibrado geometricamente, melhorando assim os resultados, conforme apontado neste trabalho.

O modelo matemático utilizado para o cálculo da posição também deve levar em consideração os parâmetros calibrados. Por isso foi realizada a calibração da câmara FC330 da Sony embarcada no Phantom 4 em laboratório e pelo método "*on the job*", sendo observada a melhoria da acurácia, quando utilizados os parâmetros calibrados, ao invés dos parâmetros nominais da câmara.

Verificou-se a melhoria da acurácia do posicionamento e atitude apresentado na metodologia, possibilitando uma análise mais segura quanto à possibilidade de substituição do sistema GNSS/INS, por um sistema de navegação baseado em imagem integrado a um INS. Isto foi objeto desta pesquisa, isto é, verificar

a acurácia da navegação por imagem utilizando um RPA, a fim de viabilizar a autonomia da navegação com acurácia conhecida. A acurácia do sistema é uma informação importante, pois serve de referência para tomada de decisão do momento em que deve ser substituída a coordenada do INS pela do sistema de navegação por imagem.

Como objetivo secundário a caracterização da resolução espacial da câmara FC330 do Phantom 4 foi realizada, visto que a determinação da posição e atitude da câmara no espaço estão diretamente relacionados com a feição do terreno identificada na imagem. Assim, devem-se conhecer os menores detalhes do terreno identificáveis na imagem, numa certa altura de voo, para se especificar a acurácia mínima necessária dos pontos de controle ou da resolução espacial das imagens de referência.

Para a determinação da posição é necessário o conhecimento dos parâmetros intrínsecos da câmara, das coordenadas dos pontos de controle, que no caso de uma navegação por imagem são extraídos da ortoimagem e do MDS. Assim, quanto mais acuradas forem estas informações de referência, melhor será o posicionamento do Centro Perspectivo e da atitude da Câmara no momento da tomada da fotografia.

Para trabalhos futuros sugere-se a implementação dos algoritmos de cálculo de posicionamento em tempo real, com linguagem de programação compatível com os processadores usualmente embarcados em RPA, utilizando a modelagem matemática de ressecção espacial apresentada neste trabalho.

Essa tarefa é um grande desafio tendo em vista o imenso volume de informação a ser processado, pois a alta resolução espacial das ortoimagens e MDS, gerados neste trabalho produzem grandes arquivos de imagens. Isso gera um grande esforço computacional para identificar uma feição da fotografia na ortoimagem, aumentando o tempo de processamento das técnicas de reconhecimento de padrões empregadas atualmente.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABDEL-HAKIM, A. E.; FARAG, A. A. Detection, categorization and recognition of road signs for autonomous navigation. **Advanced Concepts for Intelligent Vision Systems (Acivs 2004)**, v. 2004, p. 125–130, 2004.

AGÜERA-VEGA, F.; CARVAJAL-RAMÍREZ, F.; MARTÍNEZ-CARRICONDO, P. Accuracy of digital surface models and orthophotos derived from unmanned aerial vehicle photogrammetry. **Journal of Surveying**, v. 143, n. 2, p. 1–10, 2016.

AGÜERA-VEGA, F.; CARVAJAL-RAMÍREZ, F.; MARTÍNEZ-CARRICONDO, P. Assessment of photogrammetric mapping accuracy based on variation ground control points number using unmanned aerial vehicle. **Measurement: Journal of the International Measurement Confederation**, v. 98, p.221-227, 2017.

ALMEIDA, I. C. **Estudo sobre o uso de Veículo Aéreo Não Tripulado (VANT) para mapeamento aéreo com fins de elaboração de projetos viários**. 2014. 149 p. Trabalho (Conclusão de Curso em Engenharia Civil) - Universidade Católica de Pernambuco, Recife, 2014. Disponível em: <http://docplayer.com.br/storage/24/3058507/1513020617/TYcBM9pJoxiFOo2OMtk0Iw/3058507.pdf>.

AMBRÓSIO, F. V. **Uma ferramenta para a simulação e validação de sistemas de navegação inercial**. 2010. 234 p. Dissertação (Mestrado em Informática Industrial) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2010. Disponível em: <http://repositorio.utfpr.edu.br/jspui/handle/1/1046>.

ANAC/RBAC-E-94. **Requisitos gerais para Aeronaves Não tripuladas de uso civil - RBAC-E nº 94**. Brasil: SAR/SPO, 2017. Disponível em: < http://www.anac.gov.br/assuntos/legislacao/legislacao-1/rbha-e-rbac/rbac/rbac-e-94-emd-00/@@display-file/arquivo_norma/RBACE94EMD00.pdf>

ANATEL. **Como homologar Drones - declaração de conformidade para**

quadricóptero (DRONE). 2017. Disponível em: <http://www.anatel.gov.br/setorregulado/index.php?option=com_content&view=article&id=376>

ANDRADE, J. B. **Fotogrametria**. Curitiba: SBEE, 1998. 258 p. ISBN 85-86180-07-6.

ANDRADE, R. O. **O voo do falcão**. São Paulo: FAPESP, 2013.

BAKKER, M. P. R. **Cartografia noções básicas**. Rio de Janeiro: [S.n.]. 242 p.

BARATTO, A. C.; DAMASCENO, J. C.; FILHO, J. T.; OLIVEIRA, J. C. V. DE; COUTO, P. R. G. **Avaliação de dados de medição: uma introdução ao** "Guia para a expressão de incerteza de medição" e a documentos correlatos – INTROGUM 2009. Duque de Caxias: IMETRO, 2014. 122 p. ISBN 978-85-86920-14-1.

BENASSI, F.; DALL'ASTA, E.; DIOTRI, F.; FORLANI, G.; CELLA, U. M. DI; RONCELLA, R.; SANTISE, M. Testing accuracy and repeatability of UAV blocks oriented with gnss-supported aerial triangulation. **Remote Sensing**, v. 9, n. 2, p. 1–23, 2017.

BERVEGLIERI, A.; TOMMASELLI, A. M. G. Exterior orientation of hyperspectral frame images collected with UAV for forest applications. **International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences - ISPRS Archives**, v. 40, n. 3W4, p. 45–50, 2016.

BRAGA, J. R. G.; CAMPOS VELHO, H. F.; CONTE, G.; DOHERTY, P.; SHIGUEMORI, E. H. An image matching system for autonomous UAV navigation based on neural network. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON CONTROL AUTOMATION, ROBOTICS AND VISION, 14., 2016, Phuket, Thailand. **Proceedings...** IEEE, 2016. p.6.

BRASIL. MINISTÉRIO DA DEFESA. **PND:** Política Nacional de Defesa e **END:**

estratégia nacional de Defesa. Diário Oficial da União - Seção 1 - 26/9/2013, Brasília: 2012. Disponível em: http://www.defesa.gov.br/arquivos/estado_e_defesa/END-PND_Optimized.pdf>.

BRASIL. PRESIDÊNCIA DA REPÚBLICA. Decreto nº 89.817 de 20 de junho de 1984: estabelece as instruções reguladoras das normas técnicas da cartografia nacional. **IBGE**, 1984. Disponível em: <ftp://geoftp.ibge.gov.br/metodos_e_outros_documentos_de_referencia/normas/legislacao/decreto_89817_nova_redacao.pdf>.

BRITO, J. L. N. E S.; COELHO, L. C. T. C. F. **Fotogrametria digital**. Rio de Janeiro: EdUERJ, 2007. 196 p. ISBN 978-85-7511-114-7.

CASTRO, A. P. A.; SILVA, J. D. S.; MEDEIROS, F. L. L.; SHIGUEMORI, E. H. Restauração de Imagens e detecção automática de características aplicados à Navegação Aérea Autônoma. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO (SBSR), 14., 2009, Natal. **Anais...** Natal: 2009.

CHAVES, A. N. **Proposta de modelo de veículos aéreos não tripulados (VANTs) cooperativos aplicados à operação de busca**. 2013. 149 p. Dissertação (Mestrado em Sistemas Digitais) - Universidade de São Paulo, São Paulo, 2013.

CHO, J.; PARK, C.; YANG, S. H.; LEE, S. J. Phase based navigation algorithm design using carrier on the ASF correction age and error for effective eLORAN phase statistics in the weak signal environment data channel utilization in Korea. **JKGS - Journal of the Korean GNSS Society**. v. 1, n. 1, p. 109–114, 2013. Disponível em: < http://dx.doi.org/10.11003/JKGS.2012.1.1.007>

COLOMINA, I.; MOLINA, P. Unmanned aerial systems for photogrammetry and remote sensing: a review. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, v. 92, p. 79–97, 2014.

CONTE, G.; DOHERTY, P. A visual navigation system for UAS based on geo-

referenced imagery. **ISPRS - International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences**, v. 38-1, p. 1–6, n. Sept, 2011.

DANTAS, G. F. S. M. **Enxame de VANTs para a detecção de incêndios florestais.** 2014. 66 p. Trabalho (Conclusão de Curso em Engenharia da Computação) - Escola Politécnica de Pernambuco, Universidade de Pernambuco, Recife, 2014.

DASH, J. P.; WATT, M. S.; PEARSE, G. D.; HEAPHY, M.; DUNGEY, H. S. Assessing very high resolution UAV imagery for monitoring forest health during a simulated disease outbreak. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, v. 131, p. 1–14, 2017.

FORÇA AÉREA BRASILEIRA. DEPARTAMENTO DE CONTROLE DO ESPAÇO AÉREO. **AIC-N-23:** aeronaves remotamente pilotadas para uso em proveito dos órgãos ligados aos governos federal, estadual ou municipal. Brasil, 2018. Disponível em: https://publicacoes.decea.gov.br/?i=publicacao&id=4697.

FORÇA AÉREA BRASILEIRA. DEPARTAMENTO DE CONTROLE DO ESPAÇO AÉREO. **ICA 100-40**: sistemas de aeronaves remotamente pilotadas e o acesso ao espaço aéreo brasileiro. Brasil, 2016. Disponível em: https://publicacoes.decea.gov.br/?i= publicacao&id=4510.

FORÇA AÉREA BRASILEIRA. DEPARTAMENTO DE CONTROLE DO ESPAÇO AÉREO. **Orientações ao usuário**. Brasil, 2017. Disponível em:http://static.decea.gov.br/uploads/2016/ 12/SARPAS_usuario.pdf.

FORÇA AÉREA BRASILEIRA. DEPARTAMENTO DE CONTROLE DO ESPAÇO AÉREO. **Sistema SARPAS:** sistema de autorização de aeronaves remotamente pilotada. Brasil, 2017b. Disponível em: <http://servicos.decea. gov.br/sarpas/>.

FORÇA AÉREA BRASILEIRA. ESTADO MAIOR DA AERONÁUTICA. **PESE:**

Programa Estratégico de Sistemas Espaciais. Portaria EMAER Nº 31/3SC3, de 31 de Agosto de 2012. Publicado no BCA nº 175, de 12 de setembro de 2012. Brasil, 2012.

DJI. **Manual do Phantom 4:** v.1.2. Inglês. DJI, 2016a. Disponível em: <https://www.dji.com/phantom-4/info>

DJI. **Manual do Phantom 4:** V.1.2. Português. 2016b. Disponível em: <https://www.dji.com/phantom-4/info>

ELKAIM, G. H.; ADHIKA, F.; LIE, P. Principles of guidance, navigation, and control of UAVs. In: VALAVANIS, K.; VACHTSEVANOS, G. I. (Eds.). **Handbook of unmanned aerial vehicles.** Berlin: Springer, 2015. p.347-380.

EXÉRCITO BRASILEIRO. DEPARTAMENTO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA. **EB80-N-72.003**: norma da especificação técnica para aquisição de dados geoespaciais vetoriais de defesa da força terrestre (ET-ADVG DEFESA F Ter). 2.ed. Brasília, 2016.

FARIA, L. A.; SILVESTRE, C. A. DE M.; CORREIA, M. A. F. GPS-dependent systems: vulnerabilities to electromagnetic attacks. **Journal of Aerospace Technology and Management**, v. 8, n. 4, p. 423–430, 2016.

ERCOLIN FILHO, L. **Calibração de um sistema fotogramétrico multi-câmeras para uso em aplicações de mapeamento com georreferenciamento direto**. 2017. 171p. Tese (Doutorado em Ciências Geodésicas) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2017. Disponível em: <http://hdl.handle.net/1884/47451>. Acesso em:

GEMAEL, C. **Introdução ao ajustamento de observações**. Curitiba: 2.ed. UFPR, 1994. 319 p. ISBN 85-85132-92-2.

GHOLIZADEH, M. **Iran Hacked RQ-170 GPS**: fooled into autopilot landing in Iran. p. 2, 2011. Disponível em: https://www.uasvision.com/2011/12/16/iran-

hacked-rq-170-gps-fooled-into-autopilot-landing-in-iran/.

GONÇALVES, J. A.; HENRIQUES, R. UAV photogrammetry for topographic monitoring of coastal areas. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, v. 104, p. 101–111, 2015.

GROVES, P. D. **Principles of GNSS, inertial and multisensor integrated navigation systems**. 2.ed. Boston: Artech House, 2013. 759 p. ISBN 978-1-60-807-005-3.

GUIMARÃES, G. H. S. **Regularização de uma aeronave remotamente pilotada de pequeno porte para fins de pesquisa científica: custos, facilidades e entraves**. 2017. 157 p. Dissertação (Mestrado em Desenvolvimento Territorial e Meio Ambiente) - Universidade de Araraquara, Araraquara, 2017. Disponível em: http://www.uniara.com.br/arquivos/file/cursos/mestrado/desenvolvimento-territorial-meio-ambiente/dissertacoes/2017/guilherme-henrique-silva-guimaraes.pdf.

HOLST, G. C. Imaging system fundamentals. **Optical Engineering**, v. 50, n. 5, p. 52601, 2011.

INTERNATIONAL COMMITTEE ON GLOBAL NAVIGATION SATELLITE SYSTEMS. **Current and planned global and regional navigation satellite systems and satellite-based augmentations systems**. New York: United Nations, 2010. Disponível em: <http://www.unoosa.org/pdf/publications/icg_ebook.pdf>.

JAMES, M. R.; ROBSON, S.; D'OLEIRE-OLTMANNS, S.; NIETHAMMER, U. Optimising UAV topographic surveys processed with structure-from-motion: Ground control quality, quantity and bundle adjustment. **Geomorphology**, v. 280, p. 51–66, 2017.

JANSEN, J. R. **Sensoriamento remoto do ambiente: uma perspectiva em recursos terrestres**. 2.ed. São José dos Campos: Parênteses, 2009. 589 p.

ISBN 978-85-60507-06-1.

ALVES JÚNIOR, L. R.; CÔRTES, J. B. R.; FERREIRA, M. E. Validation of mosaics aerophotogrammetric using photographs obtained from digital camera not measure attached to a UAV. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CARTOGRAFIA, 26.,2014, Gramado, RS. **Anais...** 2014. p.1-15.

KEZHENG, L.; HUANZHOU, M.; LANG, W. Recognition algorithm of landmark for quadrotors aircraft based on image feature of corner points. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON INFORMATION AND AUTOMATION, 2015, Lijiang, China. **Proceedings...** IEEE, 2015.

KIOHARA, H. Avaliação da MTF da câmera do quadricóptero Phantom 4. In: SIMPÓSIO DE APLICAÇÕES OPERACIONAIS EM ÁREAS DE DEFESA, 19., 2017, São José dos Campos. **Proceedings...** 2017. p. 217-217.

KONG, W. Y.; EGAN, G. K.; CORNALL, T. Feature based navigation for UAVs. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON INTELLIGENT ROBOTS AND SYSTEMS, 2006, Beijing. **Proceedings...** IEEE, 2006.

LEACHTENAUER, J. C.; ASSOCIATES, J. M. L.; AVE, M. Resolution requirements and the Johnson criteria revisited. **Procceedings of SPIE** v. 5076, p. 1–15, 2003.

LEE, S. J. **GNSS vulnerability issues in Korea**. Chungnam: National GNSS Research Center Chungnam National University, 2013. Disponível em: <http://www.unoosa.org/pdf/icg/2013/wgB-subgroup/5.pdf>

LEMOS JUNIOR, A. DA S. **Implantação do programa estratégico dos sistemas espaciais brasileiro: uma proposta de investimento contínuo**. 2014. 67 p. Trabalho de Conclusão de Curso (Curso em Altos Estudos de Política e Estratégia) - Escola Superior de Guerra, Rio de Janeiro, 2014. Disponível em: <www.esg.br/images/Monografias/2014/LEMOSJUNIOR.pdf>.

LI, Y.; WANG, S.; TIAN, Q.; DING, X. Neurocomputing a survey of recent advances in visual feature detection. **Neurocomputing**, v. 149, p. 736–751, 2015.

LIMA, S. A.; KUX, H. J. H.; SHIGUEMORI, E. H. Accuracy of autonomy navigation of unmanned aircraft systems through Imagery. **International Journal of Mechanical and Mechatronics Engineering**, v. 12, n. 5, p. 406–410, 2018.

LIMA, S. A.; ROBERTO, L.; SHIGUEMORI, E. H.; KUX, H. J. H.; BRITO, J. L. N. E S. Determinação da posição e atitudes de VANT por fotogrametria. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 18., Santos, SP. **Anais...** São José dos Campos: INPE, 2017. p.5392-5399.

LIMA, S. A.; BRITO, J. L. N. E S. Estratégias para retificação de imagens digitais. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CADASTRO TÉCNICO MULTIFINALITÁRIO (COBRAC), 2006, Florianópolis. **Anais...** Florianópolis: UFSC, 2006.

LONGHITANO, G. A. VANTs para sensioramento remoto: aplicabilidade na avaliação e monitoramento de impactos ambientais causados por acidentes com carga perigosa. 2010. 163 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes, Geoprocessamento) - Universidade de São Paulo, São Paulo, 2010.

MCGLONE, J. C.; LEE, G. Y. G. **Manual of photogrammetry**. 6.ed. Bethesda: ASPSR, 2013. 1318 p. ISBN 1-57083-099-1.

MEDEIROS, F. L. L.; SHIGUEMORI, E. H.; MONTEIRO, M. V. T.; DOMICIANO, M. A. P.; MARTINS, M. P. Verificação automática de situações de colisão na navegação de veículos aéreos não tripulados. In: ENCONTRO DE COLISÃO NA NAVEGAÇÃO DE VEÍCULOS AÉREOS NÃO TRIPULADOS 6, 2007, Porto. **Anais...** Porto: 2007. Disponível em: <www.dcc.fc.up.pt/~ines/enia07_html/pdf/

27271.pdf>

MEDINA, I. A. Satélites táticos brasileiros. **Revista Defesa e Desenvolvimento ADESG.** v. 289. p. 36, 2015.

MIAN, O.; LUTES, J.; LIPA, G.; HUTTON, J. J.; GAVELLE, E.; BORGHINI, S. Direct georeferencing on small unmanned aerial platforms for improved reliability and accuracy of mapping without the need for ground control points. **The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences.** v. 40, p. 397–402, 2015.

MICHAELSEN, E.; MEIDOW, J. Stochastic reasoning for structural pattern recognition : an example from image-based UAV navigation. **Pattern Recognition**, v. 47, n. 8, p. 2732–2744, 2014.

MIKHAIL, E. M.; BETHEL, J. S.; MCGLONE, J. C. **Introduction to modern photogrammetry**. Hobeken: Wiley, 2001. 479 p. ISBN 978-81-265-3998-7.

MIKSIK, O.; MIKOLAJCZYK, K. Evaluation of Local Detectors and Descriptors for Fast Feature Matching. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON PATTERN RECOGNITION, 12., 2012. **Proceedings...** IEEE, 2012. p.2681-2684.

MITISHITA, E.; EDUARDO, J.; GRAÇA, N.; CENTENO, J.; MACHADO, A. O uso de veículos aéreos não tripulados (vants) em aplicações de mapeamento aerofotogramétrico. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CARTOGRAFIA, 26.,2014, Gramado, RS. **Anais...** 2014.

MONICO, J. F. G. **Posicionamento pelo GNSS descrição, fundamentos e aplicações**. 2.ed. São Paulo: UNESP, 2008. 476 p. ISBN 978-85-7139-788-0.

MONICO, J. F. G. **Do GPS e Glonass ao GNSS. Mundo Geo,** jun. 2013. Disponível em: http://mundogeo.com/blog/2013/06/05/do-gps-e-glonass-ao-gnss/.

MONICO, J. F. G.; PÓZ, A. P. D.; GALO, M.; SANTOS, M. C.; OLIVEIRA, L. C.

Acurácia e precisão: revendo os conceitos de forma acurada. **Boletim de Ciencias Geodesicas**, v. 15, n. 3, p. 469–483, 2009.

MORI, A. M. **O uso de sistema inercial para apoiar a navegação autônoma**. 2013. 180 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes) - Universidade de São Paulo, São Paulo, 2013. Disponível em: http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3138/tde-26062014-114414/pt-br.php.

MUNARETTO, L. **VANT e drones**. 2.ed. São Paulo: Independente, 2017. 176 p. ISBN 978-85-919729-0-6.

MUNEM, M. A.; FOULIS, D. J. **Cálculo**. Rio de Janeiro: LTC, 1982. p. 837 - 872.

NOGUEIRA, F. C.; ROBERTO, L. Accuracy analysis of orthomosaic and DSM produced from sensor aboard UAV. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 18., 2017, Santos, SP. **Anais...** São José dos Campos: INPE, 2017. p.4880-4887.

OLIVEIRA, P. A. S. **Fusão INS/GNSS com auxílio de medidas de baseline e ângulo GNSS**. 2014. 93 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Eletrônica e Computação) - Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos, 2014. Disponível em: http://www.bdita.bibl.ita.br/.

PIX4D SA. **Pix4Dmapper 4.1 use manual**. Lausanne: 2017a. Disponível em: <https://support.pix4d.com/hc/en-us/articles/204272989-Offline-Getting-Started-and-Manual-pdf-#gsc.tab=0>

PIX4D SA. **Pix4Dmapper 3.2 use manual**. Lausanne: 2017b. Disponível em: <https://support.pix4d.com/hc/en-us/articles/204272989-Offine-Getting-Started-and-Manual-pdf-#gsc.tab=0>

PULLEN, S.; PARK, Y. S.; ENGE, P. Impact and mitigation of ionospheric anomalies on ground-based augmentation of GNSS. **Radio Science**. v. 44, p.

1–10, 2009.

QUIST, E. B.; BEARD, R. Radar odometry on fixed-Wing small unmanned aircraft. **IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems**, v. 52, n. 1, p. 396–410, 2016.

RENNÓ, C. D.; BANON, G. P. R. **SER204 - Estatistica: aplicação ao sensoriamento remoto**. São José dos Campos: INPE, 2017. Disponível em: <http://www.dpi.inpe.br/~camilo/estatistica/aulas.html>

ROBERTO, L. **Acurácia do posicionamento e da orientação espacial de veículos aéreos a partir de imagens de câmera de pequeno formato embarcada**. 2017. 160 p. Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2017.

ROBERTO, L.; LIMA, S. A.; SANT'ANNA, S. J. S.; SHIGUEMORI, E. H. Correção de distorção projetiva em imagens obtidas com câmera a bordo de VANT. In; SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 18., 2017, Santos, SP. **Anais...** São José dos Campos: INPE, 2017. p.4880-4887.

SANTOS, D. R. Sistemas referenciais e transformações geométricas nos espaços 2D e 3D. In: **Fotogrametria**. v.2, p.31-84, 2008.

SCRATCHAPIXEL. **3D Viewing: the pinhole camera model**. Disponível em: <https://www.scratchapixel.com/lessons/3d-basic-rendering/3d-viewing-pinhole-camera/virtual-pinhole-camera-model>. Acesso em: 21 ago. 2018.

SHAHBAZI, M.; SOHN, G.; THÉAU, J.; MENARD, P. Development and evaluation of a UAV-photogrammetry system for precise 3D environmental modeling. **Sensors**, v. 15, n. 11, p. 27493–27524, 2015.

SHAW, A.; BARNES, D.; SUMMERS, P. Landmark recognition for localisation and navigation of aerial vehicles. In: WORKSHOP ON ADVANCED SPACE TECHNOLOGIES FOR ROBOTIC AND AUTOMATION, 7., 2002.

Proceedings... ESA, 2002. p.1-8.

SHIGUEMORI, E. H.; MARTINS, M. P.; MONTEIRO, M. V. T. Landmarks recognition for autonomous aerial navigation by neural networks and Gabor transform. In: annual symposium eletronic laging sience and technology 19., 2007, San Jose, CA, USA. **Proceedings...** Disponível em: <http://proceedings. spiedigitallibrary.org/proceeding.aspx?doi=10.1117/12.705138>

SILVA, W.; VIJAYKUMAR, N. L.; SHIGUEMORI, E. H. **Navegação autônoma de VANT em período noturno com imagens infravermelho termal**. 2016. 104 p. São José dos Campos: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 2016. Disponível em: <http://urlib.net/8JMKD3MGP3W34P/3M8CSN8>.

SILVA FILHO, P. F. F. **Automatic landmark recognition in aerial images for the autonomous navigation system of unmanned aerial vehicles**. 2016. 158 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Eletrônica e Computação) - Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos, 2016. Disponível em: <http://www.bdita.bibl.ita.br/tesesdigitais/71989.pdf>.

SILVEIRA, M. T.; FEITOSA, R. Q.; JACOBSEN, K.; BRITO, J. L. N. E S.; HECKEL, Y. Um método híbrido para localização automática de pontos homólogos em pares de imagens estereoscópicas. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE CIÊNCIAS GEODÉSICAS E TECNOLOGIAS DA GEOINFORMAÇÃO, 2., 2008, Recife, PE. **Anais...** 2008.

SUBRAMANYA, H. Monocular vision based simultaneous localization and mapping (slam) technique for uav platforms in gps-denied environments. **International Journal of Robotics and Mechatronics,** v. 2, n. 1, p. 37–43, 2016.

TITTERTON, D. H.; WESTON, J. L. **Strapdown inertial navigation technology**. 2.nd. Editio ed. [S.l.] The Institution of Engineering and Technology, 2004. 549 p. ISBN 978-0-86341-358-2.

WIKIPEDIA, CONTRIBUTORS. **Satellite navigation**. Disponível em: <https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Satellite_navigation&oldid=854035374>. Acesso em: 14 ago. 2018.

WOLF, P. R.; DEWITT, B. A.; WILKINSON, B. E. **Elements of photogrammetry with applications in GIS**. New York: Mc Graw Hill, 2014. 676 p. ISBN 978-0-07-176112-3.

ZARCO-TEJADA, P. J.; DIAZ-VARELA, R.; ANGILERI, V.; LOUDJANI, P. Tree height quantification using very high resolution imagery acquired from an unmanned aerial vehicle (UAV) and automatic 3D photo-reconstruction methods. **European Journal of Agronomy**, v. 55, p. 89–99, 2014.

APÊNDICE A – Rotina de Cálculo da Posição e Atitude da Câmara

Neste anexo são presentado as rotinas de cálculos que foram utilizados para o cálculo da Ressecção Espacial das fotografias escolhidas neste trabalho.

INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISA ESPACIAL - INPE
POS-GRADUAÇÃO EM SENSORIAMENTO REMOTO
DEPARTAMENTO DE SENSORIAMENTO REMOTO - SERE

Autor : Sidney Andrade de Lima
Orientador INPE: Hermann Johann Heinrich Kux
Orientador IEAv: Elcio Hideiti Shiguemori

TRANSFORMAÇÃO PROJETIVA
MODELO NÃO LINEAR - APROXIMAÇÃO POR SÉRIE DE TAYLOR
<<IMAGEM INCLINADA DA IEAv - 0406>>

1° PROCEDIMENTO - CARREGANDO AS COORDENADAS DOS PONTOS DE CONTROLE OBTIDAS DA ORTOIMAGEM E DO MDS.

$$Orto_DSM := \begin{pmatrix} 412388.238000 & 7428326.113000 & 714.467470 \\ 412346.970000 & 7428344.090000 & 679.627400 \\ 412315.320000 & 7428377.970000 & 684.530460 \\ 412358.075000 & 7428392.851000 & 679.043150 \\ 412393.940000 & 7428398.990000 & 679.956900 \\ 412431.680000 & 7428342.540000 & 680.712340 \end{pmatrix}$$

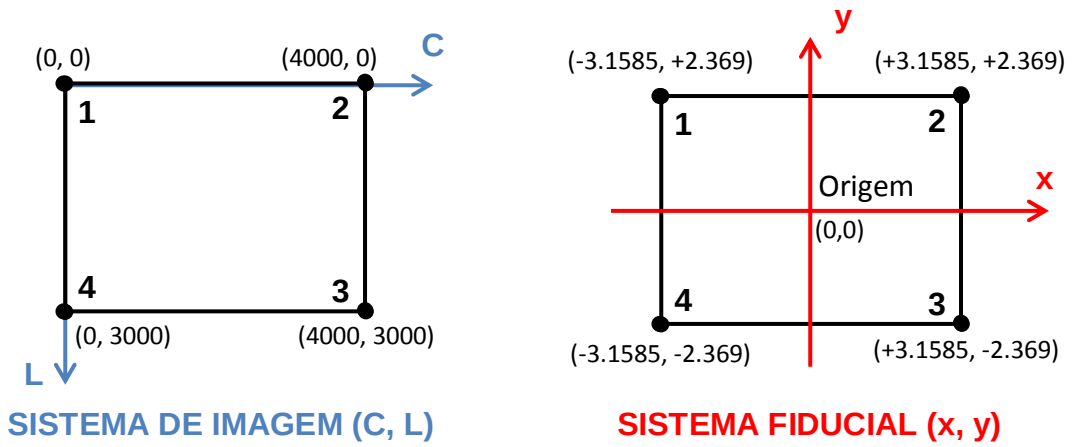
E	N	Z
$E1 := Orto_DSM_{0,0}$	$N1 := Orto_DSM_{0,1}$	$Z1 := Orto_DSM_{0,2}$
$E2 := Orto_DSM_{1,0}$	$N2 := Orto_DSM_{1,1}$	$Z2 := Orto_DSM_{1,2}$
$E3 := Orto_DSM_{2,0}$	$N3 := Orto_DSM_{2,1}$	$Z3 := Orto_DSM_{2,2}$
$E4 := Orto_DSM_{3,0}$	$N4 := Orto_DSM_{3,1}$	$Z4 := Orto_DSM_{3,2}$
$E5 := Orto_DSM_{4,0}$	$N5 := Orto_DSM_{4,1}$	$Z5 := Orto_DSM_{4,2}$
$E6 := Orto_DSM_{5,0}$	$N6 := Orto_DSM_{5,1}$	$Z6 := Orto_DSM_{5,2}$

2° PROCEDIMENTO - CARREGAR AS COORDENADAS DOS PONTOS DE CONTROLE DA IMAGEM (COLUNA, LINHA) PIXEL.

$$CL_img := \begin{pmatrix} 287.666700 & 1035.000000 \\ 2276.000000 & 544.000000 \\ 3829.500000 & 289.166700 \\ 3272.500000 & 1713.000000 \\ 2781.166700 & 2720.166700 \\ 671.500000 & 2642.166700 \end{pmatrix}$$

Coluna	Linha
$x1 := CL_img_{0,0}$	$y1 := CL_img_{0,1}$
$x2 := CL_img_{1,0}$	$y2 := CL_img_{1,1}$
$x3 := CL_img_{2,0}$	$y3 := CL_img_{2,1}$
$x4 := CL_img_{3,0}$	$y4 := CL_img_{3,1}$
$x5 := CL_img_{4,0}$	$y5 := CL_img_{4,1}$
$x6 := CL_img_{5,0}$	$y6 := CL_img_{5,1}$

3° PROCEDIMENTO - CARREGAR AS COORDENADAS DOS CANTOS DA IMAGEM PARA TRANSFORMAR AS COODENADAS DE IMAGEM (C, L) EM COORDENADAS FIDUCIAIS (x, y), USANDO AS DIMENSÕES DA IMAGEM EM PIXEL E DO SENSOR.



$Número_Coluna := 4000$

$Número_Linha := 3000$

$$Tamanho_do_sensor_x := \frac{0.00631748}{2}$$

$$Tamanho_do_sensor_x = 0.003159$$

$$Tamanho_do_sensor_y := \frac{0.00473811}{2}$$

$$Tamanho_do_sensor_y = 0.002369$$

$$xo := 0.003182 - Tamanho_do_sensor_x$$

$$xo = 0.000023$$

$$yo := Tamanho_do_sensor_y - 0.00239$$

$$yo = -0.000022$$

$SCF_C1 := 0$ $\quad SCF_x1 := -Tamanho_do_sensor_x$

$SCF_L1 := 0$ $\quad SCF_y1 := Tamanho_do_sensor_y$

$SCF_C2 := Número_Coluna$ $\quad SCF_x2 := Tamanho_do_sensor_x$ $\quad$ x nominal - 0.00616

$SCF_L2 := 0$ $\quad SCF_y2 := Tamanho_do_sensor_y$ $\quad$ y nominal - 0.00462

$SCF_C3 := Número_Coluna$ $\quad SCF_x3 := Tamanho_do_sensor_x$ $\quad$ x Pix4D - 0.00631748

$SCF_L3 := Número_Linha$ $\quad SCF_y3 := -Tamanho_do_sensor_y$ $\quad$ y Pix4D - 0.00473811

$SCF_C4 := 0$ $\quad SCF_x4 := -Tamanho_do_sensor_x$ $\quad$ xo calibrado Pix4D - 0.003182

$SCF_L4 := Número_Linha$ $\quad SCF_y4 := -Tamanho_do_sensor_y$ $\quad$ yo calibrado Pix4D - 0.002399

4° PROCEDIMENTO - TRANSFORMAR AS COORDENADAS DE IMAGEM (L, C) EM FIDUCIAL (x, y).

$$A := \begin{pmatrix} 1 & SCF_C1 & SCF_L1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & SCF_C1 & SCF_L1 \\ 1 & SCF_C2 & SCF_L2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & SCF_C2 & SCF_L2 \\ 1 & SCF_C3 & SCF_L3 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & SCF_C3 & SCF_L3 \\ 1 & SCF_C4 & SCF_L4 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & SCF_C4 & SCF_L4 \end{pmatrix}$$

Matriz Coeficientes

$$Lb := \begin{pmatrix} SCF_x1 \\ SCF_y1 \\ SCF_x2 \\ SCF_y2 \\ SCF_x3 \\ SCF_y3 \\ SCF_x4 \\ SCF_y4 \end{pmatrix}$$

Vetor das observações

$\sigma 02 := 1$ Variância de Referência (Valor arbitrário)

$\Sigma Lb := \text{identity}(8)$ MVC das observações: Como se supõe peso igual para as observações, ela será a matriz identidade.

$$P := \sigma 02 \cdot \Sigma Lb^{-1} \qquad P = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

Matriz Peso das observações

5° PROCEDIMENTO - CÁLCULO DOS PARÂMETROS AJUSTADOS DA TRANSFORMAÇÃO AFIM CASO GERAL:

Estimativa dos Parâmetros (Xchp):

$$Xchp := \left(A^T \cdot P \cdot A\right)^{-1} \cdot A^T \cdot P \cdot Lb$$

$$Xchp = \begin{pmatrix} -0.003159 \\ 0.000002 \\ 0.000000 \\ 0.002369 \\ 0.000000 \\ -0.000002 \end{pmatrix}$$

Resposta i:

$a0 := Xchp_{0,0}$ $\quad a0 = -0.003159$ $\quad b0 := Xchp_{3,0}$ $\quad b0 = 0.002369$

$a1 := Xchp_{1,0}$ $\quad a1 = 0.000002$ $\quad b1 := Xchp_{4,0}$ $\quad b1 = 0.000000$

$a2 := Xchp_{2,0}$ $\quad a2 = 0.000000$ $\quad b2 := Xchp_{5,0}$ $\quad b2 = -0.000002$

6° PROCEDIMENTO - CÁLCULO DA MVC DOS PARÂMETROS AJUSTADO E OBSERVAÇÕES AJUSTADAS

$V := A \cdot Xchp - Lb$

$V^T = (0.000\ \ 0.000\ \ 0.000\ \ 0.000\ \ 0.000\ \ 0.000\ \ 0.000\ \ 0.000)$ Vetor Resíduos

$n := 8$ número de observações

$u := 6$ número de parâmetros

$\sigma02chp := \dfrac{V^T P \cdot V}{n - u}$ Variância a posteriori

$\sigma02chp = 0.000000$ $quociente := \dfrac{\sigma02}{\sigma02chp}$ $quociente =$

$\Sigma Xchp := |\sigma02chp| \cdot (A^T P \cdot A)^{-1}$ MVC dos Parâmetros

$$\Sigma Xchp = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

Resposta i:

$\sigma a0 := \sqrt{\Sigma Xchp_{0,0}}$ $\sigma a0 = 0.000000$

$\sigma a1 := \sqrt{\Sigma Xchp_{1,1}}$ $\sigma a1 = 0.000000$

$\sigma a2 := \sqrt{\Sigma Xchp_{2,2}}$ $\sigma a2 = 0.000000$

$\sigma b0 := \sqrt{\Sigma Xchp_{3,3}}$ $\sigma b0 = 0.000000$

$\sigma b1 := \sqrt{\Sigma Xchp_{4,4}}$ $\sigma b1 = 0.000000$

$\sigma b2 := \sqrt{\Sigma Xchp_{5,5}}$ $\sigma b2 = 0.000000$

Solução ii:

$La := A \cdot Xchp$ Observações ajustadas

$La^T = (-0.003159\ \ 0.002369\ \ 0.003159\ \ 0.002369\ \ 0.003159\ \ -0.002369\ \ -0.003159\ \ -0.002369)$

$Lb^T = (-0.003159\ \ 0.002369\ \ 0.003159\ \ 0.002369\ \ 0.003159\ \ -0.002369\ \ -0.003159\ \ -0.002369)$

Resposta iii:

$\Sigma La := A \cdot \Sigma Xchp \cdot A^T$

MVC das observações ajustadas

$$\Sigma La = \begin{pmatrix} 0.000000 & 0.000000 & 0.000000 & 0.000000 & 0.000000 & 0.000000 & 0.000000 & 0.000000 \\ 0.000000 & 0.000000 & 0.000000 & 0.000000 & 0.000000 & 0.000000 & 0.000000 & 0.000000 \\ 0.000000 & 0.000000 & 0.000000 & 0.000000 & 0.000000 & 0.000000 & 0.000000 & 0.000000 \\ 0.000000 & 0.000000 & 0.000000 & 0.000000 & 0.000000 & 0.000000 & 0.000000 & 0.000000 \\ 0.000000 & 0.000000 & 0.000000 & 0.000000 & 0.000000 & 0.000000 & 0.000000 & 0.000000 \\ 0.000000 & 0.000000 & 0.000000 & 0.000000 & 0.000000 & 0.000000 & 0.000000 & 0.000000 \\ 0.000000 & 0.000000 & 0.000000 & 0.000000 & 0.000000 & 0.000000 & 0.000000 & 0.000000 \\ 0.000000 & 0.000000 & 0.000000 & 0.000000 & 0.000000 & 0.000000 & 0.000000 & 0.000000 \end{pmatrix}$$

7° PROCEDIMENTO - CÁLCULO DAS COORDENADAS NO SISTEMA DA FOTO

$$A1 := \begin{pmatrix} 1 & x1 & y1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & x1 & y1 \\ 1 & x2 & y2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & x2 & y2 \\ 1 & x3 & y3 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & x3 & y3 \\ 1 & x4 & y4 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & x4 & y4 \\ 1 & x5 & y5 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & x5 & y5 \\ 1 & x6 & y6 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & x6 & y6 \end{pmatrix} \qquad Lb1 := A1 \cdot Xchp \qquad Lb1 = \begin{pmatrix} -0.0027044 \\ 0.0007344 \\ 0.0004359 \\ 0.0015099 \\ 0.0028895 \\ 0.0019124 \\ 0.0020097 \\ -0.0003364 \\ 0.0012338 \\ -0.0019271 \\ -0.0020982 \\ -0.0018039 \end{pmatrix}$$

$u1 := Lb1_{0,0}$ $\quad u1 = -0.0027044$ $\qquad v1 := Lb1_{1,0}$ $\quad v1 = 0.0007344$

$u2 := Lb1_{2,0}$ $\quad u2 = 0.0004359$ $\qquad v2 := Lb1_{3,0}$ $\quad v2 = 0.0015099$

$u3 := Lb1_{4,0}$ $\quad u3 = 0.0028895$ $\qquad v3 := Lb1_{5,0}$ $\quad v3 = 0.0019124$

$u4 := Lb1_{6,0}$ $\quad u4 = 0.0020097$ $\qquad v4 := Lb1_{7,0}$ $\quad v4 = -0.0003364$

$u5 := Lb1_{8,0}$ $\quad u5 = 0.0012338$ $\qquad v5 := Lb1_{9,0}$ $\quad v5 = -0.0019271$

$u6 := Lb1_{10,0}$ $\quad u6 = -0.0020982$ $\qquad v6 := Lb1_{11,0}$ $\quad v6 = -0.0018039$

8° PROCEDIMENTO - CÁLCULO DOS PARÂMETROS AJUSTADOS DAS EQUAÇÕES PROJETIVAS NÃO-LINEARIZADAS UTILIZANDO APROXIMAÇÃO POR SÉRIES DE TAYLOR.

Solução iterativa na qual se deve:

i) Determinar a matriz dos parâmetros ajustados de transformação entre os sistema (X), a partir das coordenadas dos pontos de controle no sistema fiducial e de terreno e da matriz dos parâmetros dos valores iniciais (Xo);
ii) Realizar iterações até que o valor inicial seja igual ao valor calculado pela aproximação por Séries de Taylor; e
iii) Calcular a MVC para as observações ajustadas.

1° INTERAÇÃO UTILIZANDO APROXIMAÇÃO POR SÉRIES DE TAYLOR

i) Determinar a matriz dos parâmetros ajustados de transformação entre os sistema (X), a partir das coordenadas dos pontos de controle no sistema fiducial e de terreno e da matriz dos parâmetros dos valores iniciais (Xo);

Valores iniciais para a Transformação Projetiva (Xo):

$GPS_INS := (\text{"DJI_0406.JPG"}\ 412379.7891007428356.215000664.2260130.0000000.000000132.538000)$

Coeficientes de Distorção Radial --> $k1 := -0.00600$ $k2 := 0.00000$ $k3 := 0.01200$

Coeficientes de Distorção Tangencial --> $p1 := 0.00$ $p2 := 0.00$

Coordenadas calibradas do Ponto Principal --> $xo = 0.000023$ $yo = -0.000022$

Distancia Focal Calibrada --> $f := 0.00373$

$\omega := GPS_INS_{0,4} \cdot \frac{\pi}{180}$

$\omega = 0.000000$

$\phi := GPS_INS_{0,5} \cdot \frac{\pi}{180}$

$\phi = 0.000000$

$\kappa := GPS_INS_{0,6} \cdot \frac{\pi}{180}$

$\kappa = 2.313224$

$E0 := \frac{E1 + E2 + E3 + E4 + E5 + E6}{6}$

$E0 = 412372.37050$

$N0 := \frac{N1 + N2 + N3 + N4 + N5 + N6}{6}$

$N0 = 7428363.75900$

$Z0 := \frac{Z1 + Z2 + Z3 + Z4 + Z5 + Z6}{6} + 80$

$Z0 = 766.389620$

Observação: Neste caso a fotografia foi obtida na vertical do lugar. Para a aproximação inicial dos parâmetros foram utilizados os ângulos de atitude obtidos do inercial do ARP. Para as coordenadas foram utilizadas as médias das coordenadas dos seis pontos de controle e no caso da altitude deve ser acrescentada a média das altitudes a altura de voo do RPA, que foi de 80m.

$$F1(\omega,\phi,\kappa,E0,N0,Z0) := xo + \left[k1\cdot\left(\sqrt{u1^2+v1^2}\right)^2 + k2\cdot\left(\sqrt{u1^2+v1^2}\right)^4 + k3\cdot\left(\sqrt{u1^2+v1^2}\right)^6\right] + \left[p1\cdot\left[\left(\sqrt{u1^2+v1^2}\right)^2 + 2\cdot u1^2\right] + 2\cdot p2\cdot u1\cdot v1\right] - f\cdot\left[\frac{\left(\cos(\phi)\cdot\cos(\kappa)\right)\cdot(E1-E0) + \left(\cos(\omega)\cdot\sin(\kappa) + \sin(\omega)\cdot\sin(\phi)\cdot\cos(\kappa)\right)\cdot(N1-N0) + \left(\sin(\omega)\cdot\sin(\kappa) - \cos(\omega)\cdot\sin(\phi)\cdot\cos(\kappa)\right)\cdot(Z1-Z0)}{\left(\sin(\phi)\right)\cdot(E1-E0) + \left(-\sin(\omega)\cdot\cos(\phi)\right)\cdot(N1-N0) + \left(\cos(\omega)\cdot\cos(\phi)\right)\cdot(Z1-Z0)}\right]$$

$$G1(\omega,\phi,\kappa,E0,N0,Z0) := yo + \left[k1\cdot\left(\sqrt{u1^2+v1^2}\right)^2 + k2\cdot\left(\sqrt{u1^2+v1^2}\right)^4 + k3\cdot\left(\sqrt{u1^2+v1^2}\right)^6\right] + \left[p2\cdot\left[\left(\sqrt{u1^2+v1^2}\right)^2 + 2\cdot v1^2\right] + 2\cdot p1\cdot u1\cdot v1\right] - f\cdot\left[\frac{\left(-\cos(\phi)\cdot\sin(\kappa)\right)\cdot(E1-E0) + \left(\cos(\omega)\cdot\cos(\kappa) - \sin(\omega)\cdot\sin(\phi)\cdot\sin(\kappa)\right)\cdot(N1-N0) + \left(\sin(\omega)\cdot\cos(\kappa) + \cos(\omega)\cdot\sin(\phi)\cdot\sin(\kappa)\right)\cdot(Z1-Z0)}{\left(\sin(\phi)\right)\cdot(E1-E0) + \left(-\sin(\omega)\cdot\cos(\phi)\right)\cdot(N1-N0) + \left(\cos(\omega)\cdot\cos(\phi)\right)\cdot(Z1-Z0)}\right]$$

$$F2(\omega,\phi,\kappa,E0,N0,Z0) := xo + \left[k1\cdot\left(\sqrt{u2^2+v2^2}\right)^2 + k2\cdot\left(\sqrt{u2^2+v2^2}\right)^4 + k3\cdot\left(\sqrt{u2^2+v2^2}\right)^6\right] + \left[p1\cdot\left[\left(\sqrt{u2^2+v2^2}\right)^2 + 2\cdot u2^2\right] + 2\cdot p2\cdot u2\cdot v2\right] - f\cdot\left[\frac{\left(\cos(\phi)\cdot\cos(\kappa)\right)\cdot(E2-E0) + \left(\cos(\omega)\cdot\sin(\kappa) + \sin(\omega)\cdot\sin(\phi)\cdot\cos(\kappa)\right)\cdot(N2-N0) + \left(\sin(\omega)\cdot\sin(\kappa) - \cos(\omega)\cdot\sin(\phi)\cdot\cos(\kappa)\right)\cdot(Z2-Z0)}{\left(\sin(\phi)\right)\cdot(E2-E0) + \left(-\sin(\omega)\cdot\cos(\phi)\right)\cdot(N2-N0) + \left(\cos(\omega)\cdot\cos(\phi)\right)\cdot(Z2-Z0)}\right]$$

$$G2(\omega,\phi,\kappa,E0,N0,Z0) := yo + \left[k1\cdot\left(\sqrt{u2^2+v2^2}\right)^2 + k2\cdot\left(\sqrt{u2^2+v2^2}\right)^4 + k3\cdot\left(\sqrt{u2^2+v2^2}\right)^6\right] + \left[p2\cdot\left[\left(\sqrt{u2^2+v2^2}\right)^2 + 2\cdot v2^2\right] + 2\cdot p1\cdot u2\cdot v2\right] - f\cdot\left[\frac{\left(-\cos(\phi)\cdot\sin(\kappa)\right)\cdot(E2-E0) + \left(\cos(\omega)\cdot\cos(\kappa) - \sin(\omega)\cdot\sin(\phi)\cdot\sin(\kappa)\right)\cdot(N2-N0) + \left(\sin(\omega)\cdot\cos(\kappa) + \cos(\omega)\cdot\sin(\phi)\cdot\sin(\kappa)\right)\cdot(Z2-Z0)}{\left(\sin(\phi)\right)\cdot(E2-E0) + \left(-\sin(\omega)\cdot\cos(\phi)\right)\cdot(N2-N0) + \left(\cos(\omega)\cdot\cos(\phi)\right)\cdot(Z2-Z0)}\right]$$

$$F3(\omega,\phi,\kappa,E0,N0,Z0) := xo + \left[k1\cdot\left(\sqrt{u3^2+v3^2}\right)^2 + k2\cdot\left(\sqrt{u3^2+v3^2}\right)^4 + k3\cdot\left(\sqrt{u3^2+v3^2}\right)^6\right] + \left[p1\cdot\left[\left(\sqrt{u3^2+v3^2}\right)^2 + 2\cdot u3^2\right] + 2\cdot p2\cdot u3\cdot v3\right] - f\cdot\left[\frac{\left(\cos(\phi)\cdot\cos(\kappa)\right)\cdot(E3-E0) + \left(\cos(\omega)\cdot\sin(\kappa) + \sin(\omega)\cdot\sin(\phi)\cdot\cos(\kappa)\right)\cdot(N3-N0) + \left(\sin(\omega)\cdot\sin(\kappa) - \cos(\omega)\cdot\sin(\phi)\cdot\cos(\kappa)\right)\cdot(Z3-Z0)}{\left(\sin(\phi)\right)\cdot(E3-E0) + \left(-\sin(\omega)\cdot\cos(\phi)\right)\cdot(N3-N0) + \left(\cos(\omega)\cdot\cos(\phi)\right)\cdot(Z3-Z0)}\right]$$

$$G3(\omega,\phi,\kappa,E0,N0,Z0) := yo + \left[k1\cdot\left(\sqrt{u3^2+v3^2}\right)^2 + k2\cdot\left(\sqrt{u3^2+v3^2}\right)^4 + k3\cdot\left(\sqrt{u3^2+v3^2}\right)^6\right] + \left[p2\cdot\left[\left(\sqrt{u3^2+v3^2}\right)^2 + 2\cdot v3^2\right] + 2\cdot p1\cdot u3\cdot v3\right] - f\cdot\left[\frac{\left(-\cos(\phi)\cdot\sin(\kappa)\right)\cdot(E3-E0) + \left(\cos(\omega)\cdot\cos(\kappa) - \sin(\omega)\cdot\sin(\phi)\cdot\sin(\kappa)\right)\cdot(N3-N0) + \left(\sin(\omega)\cdot\cos(\kappa) + \cos(\omega)\cdot\sin(\phi)\cdot\sin(\kappa)\right)\cdot(Z3-Z0)}{\left(\sin(\phi)\right)\cdot(E3-E0) + \left(-\sin(\omega)\cdot\cos(\phi)\right)\cdot(N3-N0) + \left(\cos(\omega)\cdot\cos(\phi)\right)\cdot(Z3-Z0)}\right]$$

$$F4(\omega,\phi,\kappa,E0,N0,Z0) := xo + \left[k1\cdot\left(\sqrt{u4^2+v4^2}\right)^2 + k2\cdot\left(\sqrt{u4^2+v4^2}\right)^4 + k3\cdot\left(\sqrt{u4^2+v4^2}\right)^6\right] + \left[p1\cdot\left[\left(\sqrt{u4^2+v4^2}\right)^2 + 2\cdot u4^2\right] + 2\cdot p2\cdot u4\cdot v4\right] - f\cdot\left[\frac{\left(\cos(\phi)\cdot\cos(\kappa)\right)\cdot(E4-E0) + \left(\cos(\omega)\cdot\sin(\kappa) + \sin(\omega)\cdot\sin(\phi)\cdot\cos(\kappa)\right)\cdot(N4-N0) + \left(\sin(\omega)\cdot\sin(\kappa) - \cos(\omega)\cdot\sin(\phi)\cdot\cos(\kappa)\right)\cdot(Z4-Z0)}{\left(\sin(\phi)\right)\cdot(E4-E0) + \left(-\sin(\omega)\cdot\cos(\phi)\right)\cdot(N4-N0) + \left(\cos(\omega)\cdot\cos(\phi)\right)\cdot(Z4-Z0)}\right]$$

$$G4(\omega,\phi,\kappa,E0,N0,Z0) := yo + \left[k1\cdot\left(\sqrt{u4^2+v4^2}\right)^2 + k2\cdot\left(\sqrt{u4^2+v4^2}\right)^4 + k3\cdot\left(\sqrt{u4^2+v4^2}\right)^6\right] + \left[p2\cdot\left[\left(\sqrt{u4^2+v4^2}\right)^2 + 2\cdot v4^2\right] + 2\cdot p1\cdot u4\cdot v4\right] - f\cdot\left[\frac{\left(-\cos(\phi)\cdot\sin(\kappa)\right)\cdot(E4-E0) + \left(\cos(\omega)\cdot\cos(\kappa) - \sin(\omega)\cdot\sin(\phi)\cdot\sin(\kappa)\right)\cdot(N4-N0) + \left(\sin(\omega)\cdot\cos(\kappa) + \cos(\omega)\cdot\sin(\phi)\cdot\sin(\kappa)\right)\cdot(Z4-Z0)}{\left(\sin(\phi)\right)\cdot(E4-E0) + \left(-\sin(\omega)\cdot\cos(\phi)\right)\cdot(N4-N0) + \left(\cos(\omega)\cdot\cos(\phi)\right)\cdot(Z4-Z0)}\right]$$

$$F5(\omega,\phi,\kappa,E0,N0,Z0) := xo + \left[k1\cdot\left(\sqrt{u5^2+v5^2}\right)^2 + k2\cdot\left(\sqrt{u5^2+v5^2}\right)^4 + k3\cdot\left(\sqrt{u5^2+v5^2}\right)^6\right] + \left[p1\cdot\left[\left(\sqrt{u5^2+v5^2}\right)^2 + 2\cdot u5^2\right] + 2\cdot p2\cdot u5\cdot v5\right] - f\cdot\left[\frac{\left(\cos(\phi)\cdot\cos(\kappa)\right)\cdot(E5-E0) + \left(\cos(\omega)\cdot\sin(\kappa) + \sin(\omega)\cdot\sin(\phi)\cdot\cos(\kappa)\right)\cdot(N5-N0) + \left(\sin(\omega)\cdot\sin(\kappa) - \cos(\omega)\cdot\sin(\phi)\cdot\cos(\kappa)\right)\cdot(Z5-Z0)}{\left(\sin(\phi)\right)\cdot(E5-E0) + \left(-\sin(\omega)\cdot\cos(\phi)\right)\cdot(N5-N0) + \left(\cos(\omega)\cdot\cos(\phi)\right)\cdot(Z5-Z0)}\right]$$

$$G5(\omega,\phi,\kappa,E0,N0,Z0) := yo + \left[k1\cdot\left(\sqrt{u5^2+v5^2}\right)^2 + k2\cdot\left(\sqrt{u5^2+v5^2}\right)^4 + k3\cdot\left(\sqrt{u5^2+v5^2}\right)^6\right] + \left[p2\cdot\left[\left(\sqrt{u5^2+v5^2}\right)^2 + 2\cdot v5^2\right] + 2\cdot p1\cdot u5\cdot v5\right] - f\cdot\left[\frac{\left(-\cos(\phi)\cdot\sin(\kappa)\right)\cdot(E5-E0) + \left(\cos(\omega)\cdot\cos(\kappa) - \sin(\omega)\cdot\sin(\phi)\cdot\sin(\kappa)\right)\cdot(N5-N0) + \left(\sin(\omega)\cdot\cos(\kappa) + \cos(\omega)\cdot\sin(\phi)\cdot\sin(\kappa)\right)\cdot(Z5-Z0)}{\left(\sin(\phi)\right)\cdot(E5-E0) + \left(-\sin(\omega)\cdot\cos(\phi)\right)\cdot(N5-N0) + \left(\cos(\omega)\cdot\cos(\phi)\right)\cdot(Z5-Z0)}\right]$$

$$F6(\omega,\phi,\kappa,E0,N0,Z0) := xo + \left[k1\cdot\left(\sqrt{u6^2+v6^2}\right)^2 + k2\cdot\left(\sqrt{u6^2+v6^2}\right)^4 + k3\cdot\left(\sqrt{u6^2+v6^2}\right)^6\right] + \left[p1\cdot\left[\left(\sqrt{u6^2+v6^2}\right)^2 + 2\cdot u6^2\right] + 2\cdot p2\cdot u6\cdot v6\right] - f\cdot\left[\frac{\left(\cos(\phi)\cdot\cos(\kappa)\right)\cdot(E6-E0) + \left(\cos(\omega)\cdot\sin(\kappa) + \sin(\omega)\cdot\sin(\phi)\cdot\cos(\kappa)\right)\cdot(N6-N0) + \left(\sin(\omega)\cdot\sin(\kappa) - \cos(\omega)\cdot\sin(\phi)\cdot\cos(\kappa)\right)\cdot(Z6-Z0)}{\left(\sin(\phi)\right)\cdot(E6-E0) + \left(-\sin(\omega)\cdot\cos(\phi)\right)\cdot(N6-N0) + \left(\cos(\omega)\cdot\cos(\phi)\right)\cdot(Z6-Z0)}\right]$$

$$G6(\omega,\phi,\kappa,E0,N0,Z0) := yo + \left[k1\cdot\left(\sqrt{u6^2+v6^2}\right)^2 + k2\cdot\left(\sqrt{u6^2+v6^2}\right)^4 + k3\cdot\left(\sqrt{u6^2+v6^2}\right)^6\right] + \left[p2\cdot\left[\left(\sqrt{u6^2+v6^2}\right)^2 + 2\cdot v6^2\right] + 2\cdot p1\cdot u6\cdot v6\right] - f\cdot\left[\frac{\left(-\cos(\phi)\cdot\sin(\kappa)\right)\cdot(E6-E0) + \left(\cos(\omega)\cdot\cos(\kappa) - \sin(\omega)\cdot\sin(\phi)\cdot\sin(\kappa)\right)\cdot(N6-N0) + \left(\sin(\omega)\cdot\cos(\kappa) + \cos(\omega)\cdot\sin(\phi)\cdot\sin(\kappa)\right)\cdot(Z6-Z0)}{\left(\sin(\phi)\right)\cdot(E6-E0) + \left(-\sin(\omega)\cdot\cos(\phi)\right)\cdot(N6-N0) + \left(\cos(\omega)\cdot\cos(\phi)\right)\cdot(Z6-Z0)}\right]$$

Definição das matrizes para a determinação da matriz dos parâmetros ajustados (X):
Lb - Lo = J . (X - Xo) <---> $\Delta Y = J . \Delta X$;

X --> Matriz Vetor dos parâmetros ajustados;
Xo --> Matriz Vetor dos parâmetros aproximado inicial;
Lb --> Matriz Vetor das coordenadas no sistema fiducial;
Lo --> Matriz Vetor calculada a partir das coordenadas nos sistema fiducial, no sistema de terreno e dos parâmetros iniciais aproximados;
L --> Matriz Vetor dos desvios;
J --> Matriz Jacobiana; e
ΣLb --> Matriz das Variâncias e Covariâncias das Observações.

$$Xo := \begin{pmatrix} \omega \\ \phi \\ \kappa \\ E0 \\ N0 \\ Z0 \end{pmatrix} \qquad Xo = \begin{pmatrix} 0.000 \\ 0.000 \\ 2.313 \\ 412372.370 \\ 7428363.759 \\ 766.390 \end{pmatrix}$$

$$Lb := \begin{pmatrix} u1 \\ v1 \\ u2 \\ v2 \\ u3 \\ v3 \\ u4 \\ v4 \\ u5 \\ v5 \\ u6 \\ v6 \end{pmatrix} \qquad Lb = \begin{pmatrix} -0.00270441 \\ 0.00073441 \\ 0.00043591 \\ 0.00150988 \\ 0.00288946 \\ 0.00191235 \\ 0.00200975 \\ -0.00033641 \\ 0.00123375 \\ -0.00192709 \\ -0.00209819 \\ -0.00180390 \end{pmatrix}$$

$$Lo := \begin{pmatrix} F1(\omega,\phi,\kappa,E0,N0,Z0) \\ G1(\omega,\phi,\kappa,E0,N0,Z0) \\ F2(\omega,\phi,\kappa,E0,N0,Z0) \\ G2(\omega,\phi,\kappa,E0,N0,Z0) \\ F3(\omega,\phi,\kappa,E0,N0,Z0) \\ G3(\omega,\phi,\kappa,E0,N0,Z0) \\ F4(\omega,\phi,\kappa,E0,N0,Z0) \\ G4(\omega,\phi,\kappa,E0,N0,Z0) \\ F5(\omega,\phi,\kappa,E0,N0,Z0) \\ G5(\omega,\phi,\kappa,E0,N0,Z0) \\ F6(\omega,\phi,\kappa,E0,N0,Z0) \\ G6(\omega,\phi,\kappa,E0,N0,Z0) \end{pmatrix} \qquad Lo = \begin{pmatrix} -0.00274679 \\ 0.00096889 \\ 0.00013874 \\ 0.00135766 \\ 0.00226325 \\ 0.00145921 \\ 0.00135456 \\ -0.00041302 \\ 0.00051538 \\ -0.00173988 \\ -0.00240897 \\ -0.00130306 \end{pmatrix}$$

$$L := Lb - Lo \qquad L = \begin{pmatrix} 0.00004238 \\ -0.00023448 \\ 0.00029716 \\ 0.00015222 \\ 0.00062621 \\ 0.00045315 \\ 0.00065519 \\ 0.00007661 \\ 0.00071838 \\ -0.00018721 \\ 0.00031078 \\ -0.00050084 \end{pmatrix}$$

$$
J := \begin{pmatrix}
\frac{d}{d\omega}F1(\omega,\phi,\kappa,E0,N0,Z0) & \frac{d}{d\phi}F1(\omega,\phi,\kappa,E0,N0,Z0) & \frac{d}{d\kappa}F1(\omega,\phi,\kappa,E0,N0,Z0) & \frac{d}{dE0}F1(\omega,\phi,\kappa,E0,N0,Z0) & \frac{d}{dN0}F1(\omega,\phi,\kappa,E0,N0,Z0) & \frac{d}{dZ0}F1(\omega,\phi,\kappa,E0,N0,Z0) \\
\frac{d}{d\omega}G1(\omega,\phi,\kappa,E0,N0,Z0) & \frac{d}{d\phi}G1(\omega,\phi,\kappa,E0,N0,Z0) & \frac{d}{d\kappa}G1(\omega,\phi,\kappa,E0,N0,Z0) & \frac{d}{dE0}G1(\omega,\phi,\kappa,E0,N0,Z0) & \frac{d}{dN0}G1(\omega,\phi,\kappa,E0,N0,Z0) & \frac{d}{dZ0}G1(\omega,\phi,\kappa,E0,N0,Z0) \\
\frac{d}{d\omega}F2(\omega,\phi,\kappa,E0,N0,Z0) & \frac{d}{d\phi}F2(\omega,\phi,\kappa,E0,N0,Z0) & \frac{d}{d\kappa}F2(\omega,\phi,\kappa,E0,N0,Z0) & \frac{d}{dE0}F2(\omega,\phi,\kappa,E0,N0,Z0) & \frac{d}{dN0}F2(\omega,\phi,\kappa,E0,N0,Z0) & \frac{d}{dZ0}F2(\omega,\phi,\kappa,E0,N0,Z0) \\
\frac{d}{d\omega}G2(\omega,\phi,\kappa,E0,N0,Z0) & \frac{d}{d\phi}G2(\omega,\phi,\kappa,E0,N0,Z0) & \frac{d}{d\kappa}G2(\omega,\phi,\kappa,E0,N0,Z0) & \frac{d}{dE0}G2(\omega,\phi,\kappa,E0,N0,Z0) & \frac{d}{dN0}G2(\omega,\phi,\kappa,E0,N0,Z0) & \frac{d}{dZ0}G2(\omega,\phi,\kappa,E0,N0,Z0) \\
\frac{d}{d\omega}F3(\omega,\phi,\kappa,E0,N0,Z0) & \frac{d}{d\phi}F3(\omega,\phi,\kappa,E0,N0,Z0) & \frac{d}{d\kappa}F3(\omega,\phi,\kappa,E0,N0,Z0) & \frac{d}{dE0}F3(\omega,\phi,\kappa,E0,N0,Z0) & \frac{d}{dN0}F3(\omega,\phi,\kappa,E0,N0,Z0) & \frac{d}{dZ0}F3(\omega,\phi,\kappa,E0,N0,Z0) \\
\frac{d}{d\omega}G3(\omega,\phi,\kappa,E0,N0,Z0) & \frac{d}{d\phi}G3(\omega,\phi,\kappa,E0,N0,Z0) & \frac{d}{d\kappa}G3(\omega,\phi,\kappa,E0,N0,Z0) & \frac{d}{dE0}G3(\omega,\phi,\kappa,E0,N0,Z0) & \frac{d}{dN0}G3(\omega,\phi,\kappa,E0,N0,Z0) & \frac{d}{dZ0}G3(\omega,\phi,\kappa,E0,N0,Z0) \\
\frac{d}{d\omega}F4(\omega,\phi,\kappa,E0,N0,Z0) & \frac{d}{d\phi}F4(\omega,\phi,\kappa,E0,N0,Z0) & \frac{d}{d\kappa}F4(\omega,\phi,\kappa,E0,N0,Z0) & \frac{d}{dE0}F4(\omega,\phi,\kappa,E0,N0,Z0) & \frac{d}{dN0}F4(\omega,\phi,\kappa,E0,N0,Z0) & \frac{d}{dZ0}F4(\omega,\phi,\kappa,E0,N0,Z0) \\
\frac{d}{d\omega}G4(\omega,\phi,\kappa,E0,N0,Z0) & \frac{d}{d\phi}G4(\omega,\phi,\kappa,E0,N0,Z0) & \frac{d}{d\kappa}G4(\omega,\phi,\kappa,E0,N0,Z0) & \frac{d}{dE0}G4(\omega,\phi,\kappa,E0,N0,Z0) & \frac{d}{dN0}G4(\omega,\phi,\kappa,E0,N0,Z0) & \frac{d}{dZ0}G4(\omega,\phi,\kappa,E0,N0,Z0) \\
\frac{d}{d\omega}F5(\omega,\phi,\kappa,E0,N0,Z0) & \frac{d}{d\phi}F5(\omega,\phi,\kappa,E0,N0,Z0) & \frac{d}{d\kappa}F5(\omega,\phi,\kappa,E0,N0,Z0) & \frac{d}{dE0}F5(\omega,\phi,\kappa,E0,N0,Z0) & \frac{d}{dN0}F5(\omega,\phi,\kappa,E0,N0,Z0) & \frac{d}{dZ0}F5(\omega,\phi,\kappa,E0,N0,Z0) \\
\frac{d}{d\omega}G5(\omega,\phi,\kappa,E0,N0,Z0) & \frac{d}{d\phi}G5(\omega,\phi,\kappa,E0,N0,Z0) & \frac{d}{d\kappa}G5(\omega,\phi,\kappa,E0,N0,Z0) & \frac{d}{dE0}G5(\omega,\phi,\kappa,E0,N0,Z0) & \frac{d}{dN0}G5(\omega,\phi,\kappa,E0,N0,Z0) & \frac{d}{dZ0}G5(\omega,\phi,\kappa,E0,N0,Z0) \\
\frac{d}{d\omega}F6(\omega,\phi,\kappa,E0,N0,Z0) & \frac{d}{d\phi}F6(\omega,\phi,\kappa,E0,N0,Z0) & \frac{d}{d\kappa}F6(\omega,\phi,\kappa,E0,N0,Z0) & \frac{d}{dE0}F6(\omega,\phi,\kappa,E0,N0,Z0) & \frac{d}{dN0}F6(\omega,\phi,\kappa,E0,N0,Z0) & \frac{d}{dZ0}F6(\omega,\phi,\kappa,E0,N0,Z0) \\
\frac{d}{d\omega}G6(\omega,\phi,\kappa,E0,N0,Z0) & \frac{d}{d\phi}G6(\omega,\phi,\kappa,E0,N0,Z0) & \frac{d}{d\kappa}G6(\omega,\phi,\kappa,E0,N0,Z0) & \frac{d}{dE0}G6(\omega,\phi,\kappa,E0,N0,Z0) & \frac{d}{dN0}G6(\omega,\phi,\kappa,E0,N0,Z0) & \frac{d}{dZ0}G6(\omega,\phi,\kappa,E0,N0,Z0)
\end{pmatrix}
$$

$$
J = \begin{pmatrix}
-0.0047634 & -0.0033744 & 0.0009909 & 0.0000487 & -0.0000531 & 0.0000533 \\
0.0032463 & -0.0024522 & 0.0027700 & 0.0000531 & 0.0000487 & -0.0000191 \\
-0.0027288 & -0.0025617 & 0.0013796 & 0.0000291 & -0.0000318 & -0.0000013 \\
0.0028406 & -0.0031589 & -0.0001155 & 0.0000318 & 0.0000291 & -0.0000159 \\
-0.0031439 & -0.0040890 & 0.0014812 & 0.0000309 & -0.0000337 & -0.0000274 \\
0.0022707 & -0.0037873 & -0.0022400 & 0.0000337 & 0.0000309 & -0.0000181 \\
-0.0031984 & -0.0027457 & -0.0003910 & 0.0000289 & -0.0000315 & -0.0000152 \\
0.0026581 & -0.0026910 & -0.0013313 & 0.0000315 & 0.0000289 & 0.0000045 \\
-0.0029556 & -0.0024050 & -0.0017179 & 0.0000292 & -0.0000319 & -0.0000057 \\
0.0032281 & -0.0031837 & -0.0004921 & 0.0000319 & 0.0000292 & 0.0000199 \\
-0.0033574 & -0.0042115 & -0.0012811 & 0.0000295 & -0.0000322 & 0.0000284 \\
0.0022106 & -0.0036418 & 0.0024322 & 0.0000322 & 0.0000295 & 0.0000150
\end{pmatrix}
$$

$\sigma 02 := 1$ Variância de Referência (Valor arbitrário)

$\Sigma Lb := \text{identity}(12)$ MVC das observações: Como se supõe peso igual para as observações, ela será a matriz identidade.

$$P := \sigma 02 \cdot \Sigma Lb^{-1} \qquad P = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

Estimativa dos Parâmetros Ajustados (Xchp).

$$\Delta X := \left(J^T \cdot P \cdot J\right)^{-1} \cdot J^T \cdot P \cdot L$$

$$Xchp := Xo + \Delta X \qquad Xchp = \begin{pmatrix} 0.010968 \\ -0.012911 \\ 2.190508 \\ 412377.687496 \\ 7428354.441039 \\ 755.340370 \end{pmatrix}$$

2° ITERAÇÃO - UTILIZANDO APROXIMAÇÃO POR SÉRIES DE TAYLOR

ii) Realizar iterações até que o valor inicial seja igual ao valor calculado pela aproximação por Séries de Taylor. Substituem-se a matriz vetor inicial pela matriz vetor dos valores ajustados na 1º interação. As iterações são realizadas até que os dados de entrada sejam praticamente iguais aos dados calculados.

Valores estimados iniciais:

$E0 = 412372.370500$ $\omega = 0.000000$

$N0 = 7428363.759000$ $\phi = 0.000000$

$Z0 = 766.389620$ $\kappa = 2.313224$

Valores estimados a partir da 1° iteração:

$E0 := Xchp_{3,0}$ $E0 = 412377.687496$ $\omega := Xchp_{0,0}$ $\omega = 0.010968$

$N0 := Xchp_{4,0}$ $N0 = 7428354.441039$ $\phi := Xchp_{1,0}$ $\phi = -0.012911$

$Z0 := Xchp_{5,0}$ $Z0 = 755.340370$ $\kappa := Xchp_{2,0}$ $\kappa = 2.190508$

NA 7º ITERAÇÃO OS VALORES INICIAIS FICARAM PRATICAMENTE IGUIAIS AOS VALORES DE SAÍDA, NÃO SENDO MAIS NECESSÁRIO REALIZAR INTERAÇÃO, POIS OS

Valores estimados da 6° iteração:

$E0 = 412376.682222$ $\omega = 0.006949$

$N0 = 7428355.283829$ $\phi = -0.007463$

$Z0 = 756.160567$ $\kappa = 2.204796$

Valores estimados da 7° iteração:

$E0 := Xchp_{3,0}$ $E0 = 412376.682222$ $N0 := Xchp_{4,0}$ $N0 = 7428355.283829$ $Z0 := Xchp_{5,0}$ $Z0 = 756.160567$

Radianos

$\omega := Xchp_{0,0}$ $\omega = 0.006949$ $\phi := Xchp_{1,0}$ $\phi = -0.007463$ $\kappa := Xchp_{2,0}$ $\kappa = 2.204796$

Graus decimais

$\omega o := \omega \cdot \frac{180}{\pi}$ $\omega o = 0.398164$ $\phi o := \phi \cdot \frac{180}{\pi}$ $\phi o = -0.427623$ $\kappa o := \kappa \cdot \frac{180}{\pi}$ $\kappa o = 126.325477$

Valores das Observações Ajustadas

$$Lo = \begin{pmatrix} -0.002710 \\ 0.000733 \\ 0.000440 \\ 0.001515 \\ 0.002882 \\ 0.001903 \\ 0.002018 \\ -0.000336 \\ 0.001238 \\ -0.001926 \\ -0.002096 \\ -0.001798 \end{pmatrix} \quad Lb = \begin{pmatrix} -0.002704 \\ 0.000734 \\ 0.000436 \\ 0.001510 \\ 0.002889 \\ 0.001912 \\ 0.002010 \\ -0.000336 \\ 0.001234 \\ -0.001927 \\ -0.002098 \\ -0.001804 \end{pmatrix} \quad Lb - Lo = \begin{pmatrix} 0.000006 \\ 0.000002 \\ -0.000004 \\ -0.000006 \\ 0.000007 \\ 0.000009 \\ -0.000008 \\ -0.000001 \\ -0.000004 \\ -0.000001 \\ -0.000003 \\ -0.000006 \end{pmatrix} \quad L = \begin{pmatrix} 0.000006 \\ 0.000002 \\ -0.000004 \\ -0.000006 \\ 0.000007 \\ 0.000009 \\ -0.000008 \\ -0.000001 \\ -0.000004 \\ -0.000001 \\ -0.000003 \\ -0.000006 \end{pmatrix}$$

iii) Calcular a MVC para as observações ajustadas.

$V := Lb - Lo$

$$V = \begin{pmatrix} 0.000006 \\ 0.000002 \\ -0.000004 \\ -0.000006 \\ 0.000007 \\ 0.000009 \\ -0.000008 \\ -0.000001 \\ -0.000004 \\ -0.000001 \\ -0.000003 \\ -0.000006 \end{pmatrix}$$

Vetor Resíduo

$n := 12$ número de observações

$u := 6$ número de parâmetros

$$\sigma02chp := \frac{V^T P \cdot V}{n - u}$$

Variância a posteriori

$\sigma02chp = 0.00000000$

$$quociente := \frac{\sigma02}{\sigma02chp}$$

$quociente = 17494285969.92420$

$$\Sigma Xchp := |\sigma02chp| \cdot \left(J^T P \cdot J\right)^{-1}$$

MVC dos Parâmetros Ajustados

$$\Sigma Xchp = \begin{pmatrix} 0.00002204 & 0.00000156 & 0.00000097 & 0.00026994 & -0.00175001 & -0.00037805 \\ 0.00000156 & 0.00000349 & -0.00000066 & 0.00028412 & -0.00015210 & -0.00006601 \\ 0.00000097 & -0.00000066 & 0.00000166 & -0.00004838 & -0.00006878 & -0.00000741 \\ 0.00026994 & 0.00028412 & -0.00004838 & 0.02688876 & -0.02369505 & -0.00788624 \\ -0.00175001 & -0.00015210 & -0.00006878 & -0.02369505 & 0.14215694 & 0.03125206 \\ -0.00037805 & -0.00006601 & -0.00000741 & -0.00788624 & 0.03125206 & 0.01279134 \end{pmatrix}$$

Resposta iii:

$\sigma\phi := \sqrt{\Sigma Xchp_{0,0}}$ $\sigma\omega := \sqrt{\Sigma Xchp_{1,1}}$ $\sigma\kappa := \sqrt{\Sigma Xchp_{2,2}}$

$\sigma\phi = 0.004694$ $\sigma\omega = 0.001869$ $\sigma\kappa = 0.001288$

$\sigma E0 := \sqrt{\Sigma Xchp_{3,3}}$ $\sigma N0 := \sqrt{\Sigma Xchp_{4,4}}$ $\sigma Z0 := \sqrt{\Sigma Xchp_{5,5}}$

$\sigma E0 = 0.163978$ $\sigma N0 = 0.377037$ $\sigma Z0 = 0.113099$

9° PROCEDIMENTO - DIFERENÇA ENTRE OS PARÂMETROS AJUSTADOS DE POR FOTOGRAMETRIA E OS OBTIDOS TANTO PELO SISTEMA DE NAVEGAÇÃO (INS/GNSS) DO RPA PHANTOM 4, QUANTO PELO AJUSTAMENTO DE BLOCO FOTOGRAMÉTRICO REALIZADO NO PROCESSAMENTO DAS IMAGENS NO PIX4D.

GPS_Pix4D:= ("DJI_0406.JPG"; 412379.789100; 7428356.215000; 664.226013; 0.0000; 0.0000; 132.538000; 412376.723100; 7428355.126000; 756.217917; 0.519952; -0.338305; 126.308380)

Diferença entre as coordenadas da foto obtida do INS/GNSS do RPA Phantom4 e o calculada na Ressecção Espacial:

$\omega_P4 := GPS_Pix4D_{0,4}$ $\quad$ $\phi_P4 := GPS_Pix4D_{0,5}$ $\quad$ $\kappa_P4 := GPS_Pix4D_{0,6}$

$\Delta\omega := \omega o - \omega_P4$ $\quad$ $\Delta\phi := \phi o - \phi_P4$ $\quad$ $\Delta\kappa := \kappa o - \kappa_P4$

$\Delta\omega = 0.3982$ $\quad$ $\Delta\phi = -0.4276$ $\quad$ $\Delta\kappa = -6.2125$

$E_P4 := GPS_Pix4D_{0,1}$ $\quad$ $N_P4 := GPS_Pix4D_{0,2}$ $\quad$ $Z_P4 := GPS_Pix4D_{0,3}$

$\Delta E := E0 - E_P4$ $\quad$ $\Delta N := N0 - N_P4$ $\quad$ $\Delta Z := Z0 - Z_P4$

$\Delta E = -3.107$ $\quad$ $\Delta N = -0.931$ $\quad$ $\Delta Z = 91.935$

Diferença entre as coordenadas do ajustamento de bloco do Pix4D e a coordenada calculada na Ressecção Espacial:

$\omega_Pix4D := GPS_Pix4D_{0,10}$ $\quad$ $\phi_Pix4D := GPS_Pix4D_{0,11}$ $\quad$ $\kappa_Pix4D := GPS_Pix4D_{0,12}$

$\Delta\omega := \omega o - \omega_Pix4D$ $\quad$ $\Delta\phi := \phi o - \phi_Pix4D$ $\quad$ $\Delta\kappa := \kappa o - \kappa_Pix4D$

$\Delta\omega = -0.1218$ $\quad$ $\Delta\phi = -0.0893$ $\quad$ $\Delta\kappa = 0.0171$

$E_Pix4D := GPS_Pix4D_{0,7}$ $\quad$ $N_Pix4D := GPS_Pix4D_{0,8}$ $\quad$ $Z_Pix4D := GPS_Pix4D_{0,9}$

$\Delta E := E0 - E_Pix4D$ $\quad$ $\Delta N := N0 - N_Pix4D$ $\quad$ $\Delta Z := Z0 - Z_Pix4D$

$\Delta E = -0.041$ $\quad$ $\Delta N = 0.158$ $\quad$ $\Delta Z = -0.057$

$$Xchp^T = (0.006949\ -0.007463\ 2.204796\ 412376.682222\ 7428355.283829\ 756.160567)$$

$\sigma Parametros := (\sigma\omega\ \ \sigma\phi\ \ \sigma\kappa\ \ \sigma E0\ \ \sigma N0\ \ \sigma Z0)$

$$\sigma Parametros = (0.001869\ 0.004694\ 0.001288\ 0.163978\ 0.377037\ 0.113099)$$

APÊNDICE B – Relatório do Pix4D do IEAv com Altura de Voo de 80m

Neste anexo é apresentado o relatório de processamento das imagens, realizado no programa Pix4D Mapper Pro, obtidas sobre o IEAv no dia 13/07/2017, a uma altura de voo de 80m em relação ao nível do solo. As coordenações para o voo foram realizados diretamente com a Torre de Controle (TWR) do DTCEA-SJ, tendo sido autorizado pelo SRPV-SP as coordenações diretamente com a TWR.

Quality Report

Generated with Pix4Dmapper Pro version 3.2.23

Important: Click on the different icons for:

Help to analyze the results in the Quality Report

Additional information about the sections

Click here for additional tips to analyze the Quality Report

Summary

Project	IEAv_GPS_Phanton
Processed	2017-09-25 12:16:36
Camera Model Name(s)	FC330_3.6_4000x3000 (RGB)
Average Ground Sampling Distance (GSD)	3.57 cm / 1.4 in
Area Covered	1.2037 km^2 / 120.37 ha / 0.465 sq. mi. / 297.595 acres

Quality Check

Images	median of 51975 keypoints per image	✓
Dataset	989 out of 990 images calibrated (99%), all images enabled, 2 blocks	⚠
Camera Optimization	3.56% relative difference between initial and optimized internal camera parameters	✓
Matching	median of 5120.54 matches per calibrated image	✓
Georeferencing	yes, 14 GCPs (14 3D), mean RMS error = 0.032 m	✓

Preview

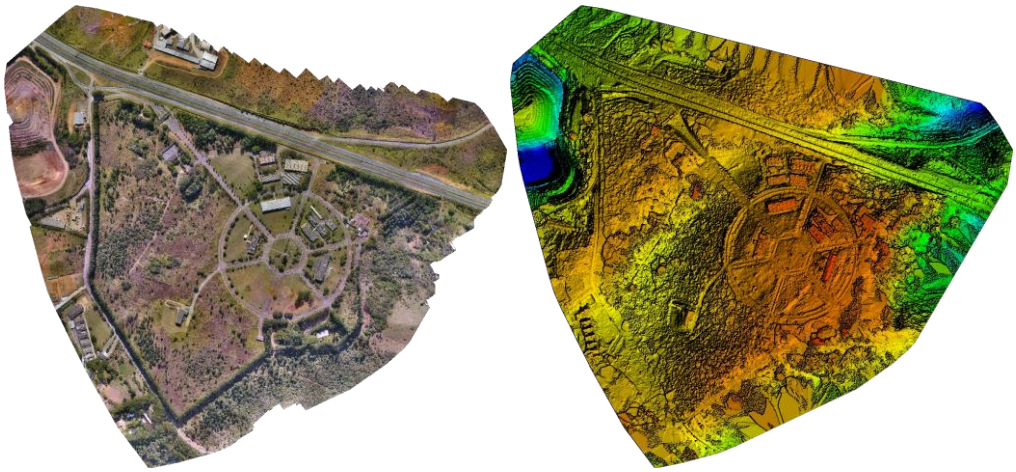


Figure 1: Orthomosaic and the corresponding sparse Digital Surface Model (DSM) before densification.

Calibration Details

Number of Calibrated Images	989 out of 990
Number of Geolocated Images	990 out of 990

Initial Image Positions

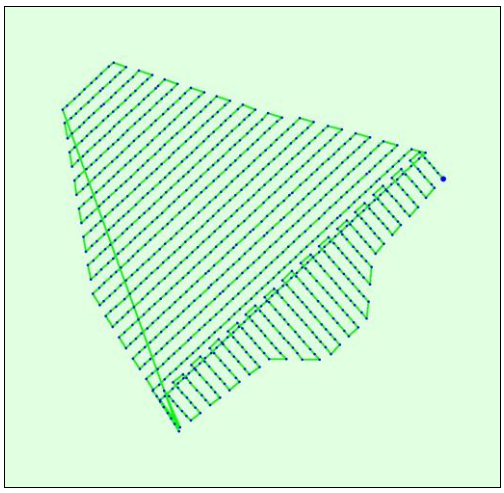


Figure 2: Top view of the initial image position. The green line follows the position of the images in time starting from the large blue dot.

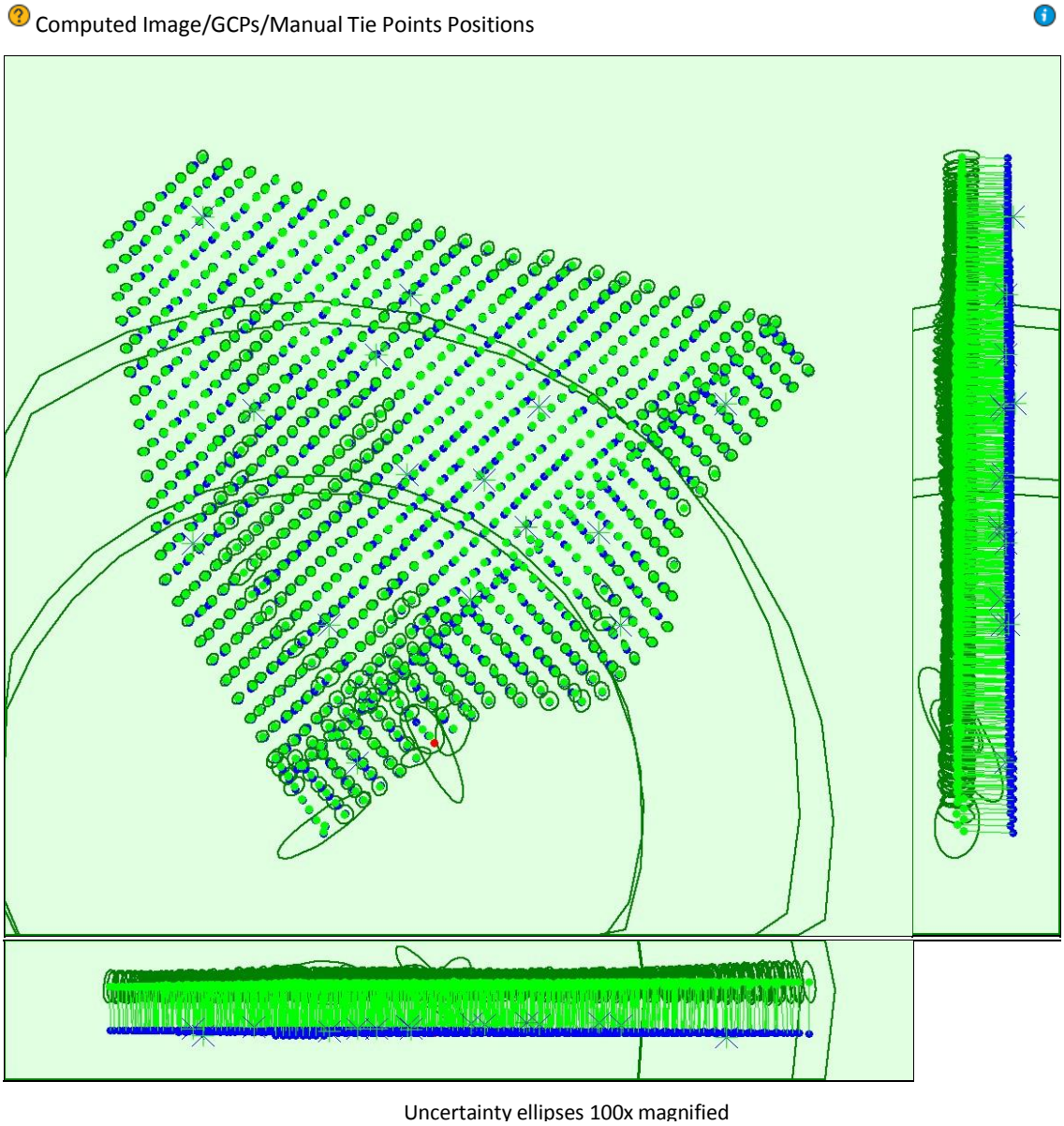


Figure 3: Offset between initial (blue dots) and computed (green dots) image positions as well as the offset between the GCPs initial positions (blue crosses) and their computed positions (green crosses) in the top-view (XY plane), front-view (XZ plane), and side-view (YZ plane). Red dots indicate disabled or uncalibrated images. Dark green ellipses indicate the absolute position uncertainty of the bundle block adjustment result.

Absolute camera position and orientation uncertainties

	X [m]	Y [m]	Z [m]	Omega [degree]	Phi [degree]	Kappa [degree]
Mean	0.119	0.120	0.330	0.135	0.107	0.077
Sigma	0.491	0.491	0.972	1.333	0.871	0.927

Overlap

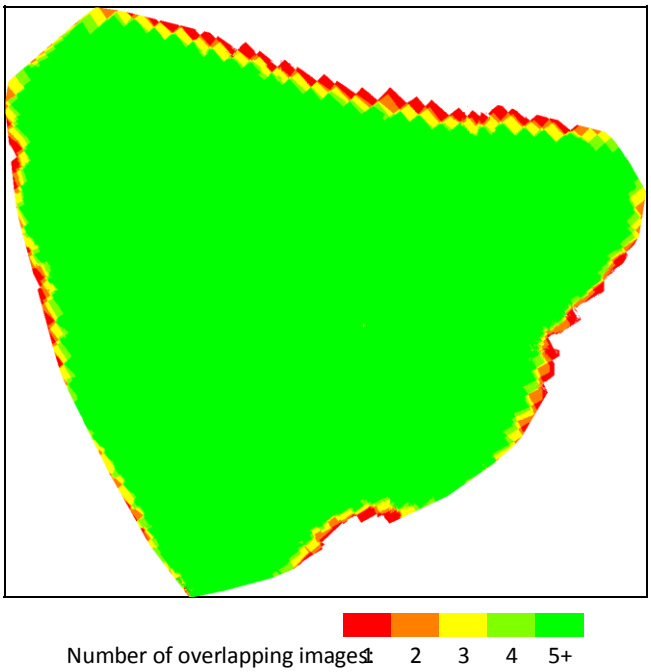


Figure 4: Number of overlapping images computed for each pixel of the orthomosaic. Red and yellow areas indicate low overlap for which poor results may be generated. Green areas indicate an overlap of over 5 images for every pixel. Good quality results will be generated as long as the number of keypoint matches is also sufficient for these areas (see Figure 5 for keypoint matches).

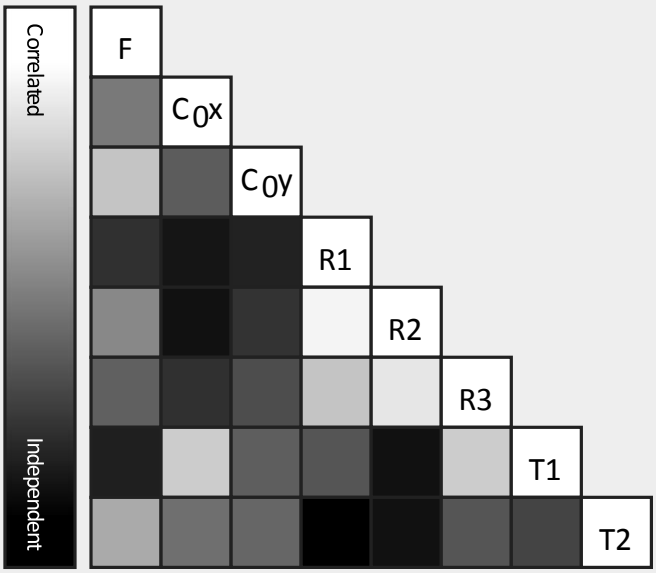
Bundle Block Adjustment Details

Number of 2D Keypoint Observations for Bundle Block Adjustment	5373196
Number of 3D Points for Bundle Block Adjustment	1816373
Mean Reprojection Error [pixels]	0.218

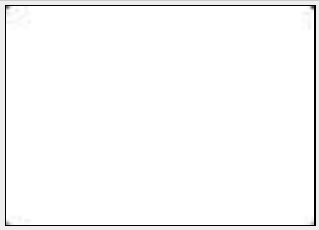
Internal Camera Parameters FC330_3.6_4000x3000 (RGB).
Sensor Dimensions: 6.317 [mm] x 4.738 [mm]

EXIF ID: FC330_3.6_4000x3000

	Focal Length	Principal Point x	Principal Point y	R1	R2	R3	T1	T2
Initial Values	2285.722 [pixel] 3.610 [mm]	2000.006 [pixel] 3.159 [mm]	1500.003 [pixel] 2.369 [mm]	-0.001	-0.002	0.000	-0.001	-0.001
Optimized Values	2367.123 [pixel] 3.739 [mm]	2014.486 [pixel] 3.182 [mm]	1513.996 [pixel] 2.391 [mm]	-0.006	-0.000	0.012	0.001	0.000
Uncertainties (Sigma)	7.284 [pixel] 0.012 [mm]	0.309 [pixel] 0.000 [mm]	0.370 [pixel] 0.001 [mm]	0.000	0.001	0.001	0.000	0.000



The correlation between camera internal parameters determined by the bundle adjustment. White indicates a full correlation between the parameters, ie. any change in one can be fully compensated by the other. Black indicates that the parameter is completely independent, and is not affected by other parameters.



The number of Automatic Tie Points (ATPs) per pixel, averaged over all images of the is color coded between black and white. White indicates that, on average, more than 16 ATPs have been extracted at the pixel location. Black indicates that, on average, 0 ATPs have been extracted at the pixel location. Click on the image to the see the average direction and magnitude of the re- projection error for each pixel. Note that the vectors are scaled for better visualization. The scale bar indicates the magnitude of 1 pixel error

2D Keypoints Table

	Number of 2D Keypoints per Image	Number of Matched 2D Keypoints per Image
Median	51975	5121
Min	24275	148
Max	70418	17800
Mean	50156	5433

3D Points from 2D Keypoint Matches

	Number of 3D Points Observed
In 2 Images	1148555
In 3 Images	318008
In 4 Images	134775
In 5 Images	70287
In 6 Images	43526
In 7 Images	29113
In 8 Images	19986
In 9 Images	14402
In 10 Images	10378
In 11 Images	7718
In 12 Images	5456
In 13 Images	3838
In 14 Images	2878
In 15 Images	2076
In 16 Images	1477
In 17 Images	1107
In 18 Images	767
In 19 Images	464
In 20 Images	332
In 21 Images	239
In 22 Images	202
In 23 Images	149
In 24 Images	161
In 25 Images	109
In 26 Images	89
In 27 Images	78
In 28 Images	65
In 29 Images	59
In 30 Images	34
In 31 Images	22
In 32 Images	14
In 33 Images	3
In 34 Images	4
In 35 Images	2

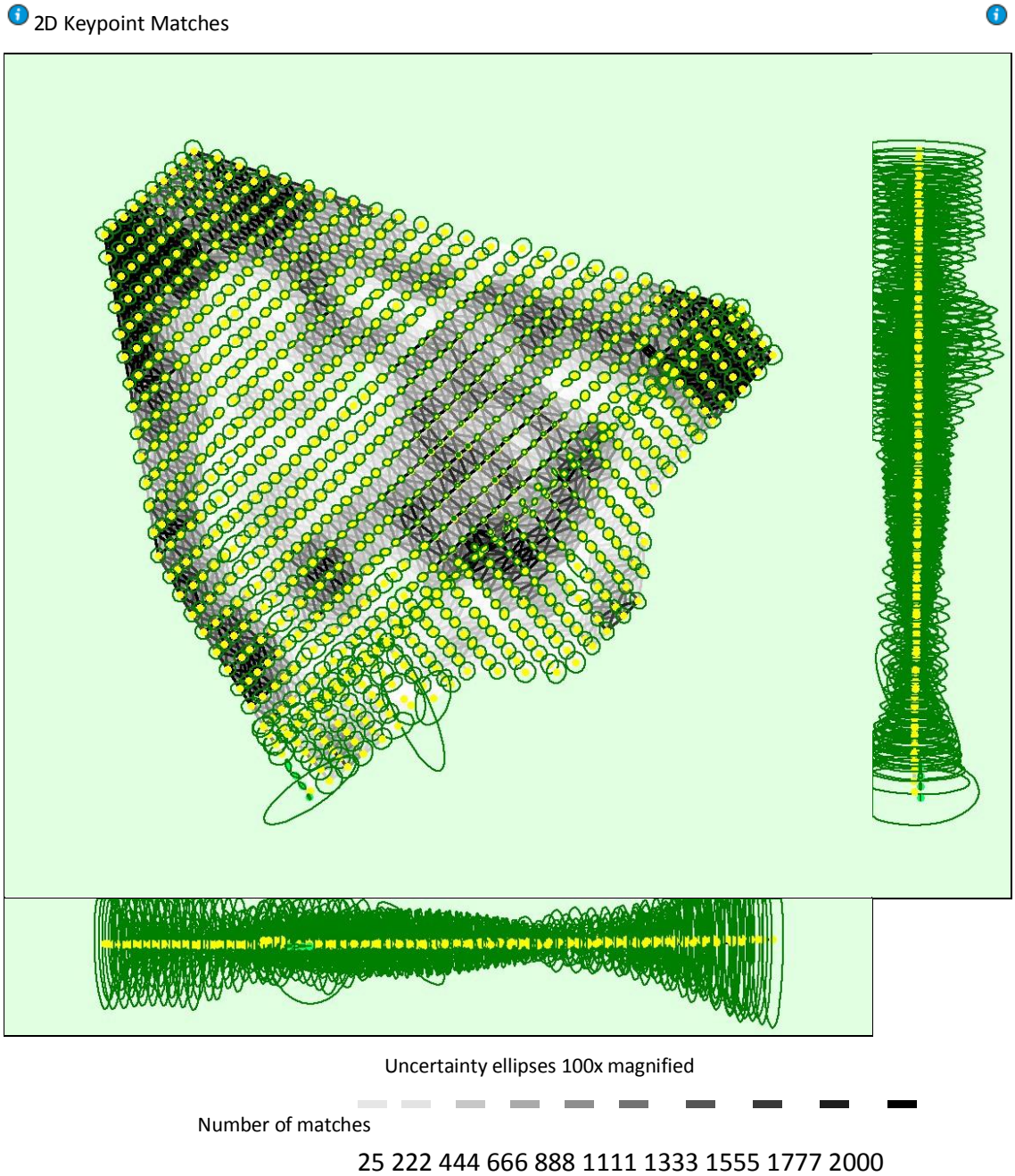


Figure 5: Computed image positions with links between matched images. The darkness of the links indicates the number of matched 2D keypoints between the images. Bright links indicate weak links and require manual tie points or more images. Dark green ellipses indicate the relative camera position uncertainty of the bundle block adjustment result.

Relative camera position and orientation uncertainties

	X [m]	Y [m]	Z [m]	Omega [degree]	Phi [degree]	Kappa [degree]
Mean	0.116	0.116	0.413	0.145	0.129	0.025
Sigma	0.050	0.058	0.281	0.070	0.065	0.011

Geolocation Details

Ground Control Points

GCP Name	Accuracy XY/Z [m]	Error X [m]	Error Y [m]	Error Z [m]	Projection Error [pixel]	Verified/ Marked
GCP07 (3D)	0.006/ 0.008	0.001	0.006	0.001	0.625	16 / 16
GCP09 (3D)	0.006/ 0.011	-0.009	-0.003	0.003	0.758	30 / 30
16 (3D)	0.006/ 0.011	0.007	-0.040	-0.001	0.546	16 / 16
19 (3D)	0.005/ 0.008	-0.002	0.074	-0.016	0.849	12 / 12
27 (3D)	0.006/ 0.009	-0.012	0.008	0.001	0.627	12 / 12
30 (3D)	0.006/ 0.009	-0.009	0.012	-0.006	0.528	19 / 19
33 (3D)	0.007/ 0.010	-0.056	-0.001	0.009	0.739	12 / 12
35 (3D)	0.004/ 0.011	0.002	0.001	-0.001	0.820	19 / 19
39 (3D)	0.004/ 0.007	-0.009	0.010	0.006	0.400	14 / 14
40 (3D)	0.006/ 0.012	0.013	0.018	-0.000	0.455	16 / 16
44 (3D)	0.006/ 0.010	0.026	0.023	0.002	0.386	11 / 11
47 (3D)	0.008/ 0.018	0.102	-0.111	-0.019	0.914	7 / 16
48 (3D)	0.007/ 0.016	0.001	0.006	0.000	0.710	11 / 11
49 (3D)	0.009/ 0.020	0.083	-0.032	0.014	0.786	16 / 16
52 (3D)	0.012/ 0.026	-0.198	-0.050	-0.026	0.763	12 / 12
Mean [m]		-0.011565	0.002238	-0.000915		
Sigma [m]		0.059053	0.029118	0.009630		
RMS Error [m]		0.060175	0.029204	0.009673		

0 out of 47 check points have been labeled as inaccurate.

Check Point Name	Accuracy XY/Z [m]	Error X [m]	Error Y [m]	Error Z [m]	Projection Error [pixel]	Verified/Marked
G0	0.0070/0.0170	0.2251	0.0654	0.1055	0.8459	11 / 11
GCP01	0.0060/0.0110	0.0008	0.0213	0.1848	0.4670	11 / 11
GCP02	0.0050/0.0090	-0.0253	-0.5065	-0.3558	0.9425	16 / 16

GCP03	0.0060/0.0090	-0.4849	0.2323	-0.1958	0.6732	13 / 13
GCP04	0.0060/0.0080	-0.1842	0.2816	-0.0752	0.8179	12 / 12
GCP05	0.0060/0.0100	0.2777	-0.0514	0.1767	0.5502	12 / 12
GCP06	0.0060/0.0110	-0.1311	0.0495	0.1750	0.5070	17 / 17
GCP08	0.0050/0.0100	0.1217	0.0747	0.0862	0.8027	15 / 15
2	0.0040/0.0110	0.0921	-0.1185	-0.0104	0.5933	8 / 8
3	0.0040/0.0110	0.0966	-0.2178	-0.0609	1.2097	14 / 14
4	0.0040/0.0110	0.1499	-0.1462	0.0560	1.2610	13 / 13
5	0.0050/0.0110	0.1234	-0.0386	0.0903	0.9120	11 / 11
6	0.0050/0.0120	0.0497	0.0222	0.0052	0.5043	10 / 10
7	0.0050/0.0120	-0.0337	-0.0478	-0.0245	0.6096	10 / 10
8	0.0050/0.0120	0.0088	-0.1884	-0.0419	0.8077	12 / 12
9	0.0060/0.0130	0.1388	-0.3414	-0.1415	1.4744	15 / 15
10	0.0060/0.0120	0.1655	-0.1775	0.1974	0.9283	17 / 17
11	0.0060/0.0120	0.2040	-0.0721	0.0818	1.2806	15 / 15
12	0.0050/0.0110	0.1797	0.1121	0.0241	0.9512	11 / 11
13	0.0050/0.0100	-0.1033	0.1160	0.0112	0.7610	11 / 11
14	0.0060/0.0120	-0.0900	-0.0744	-0.0067	0.8519	11 / 11
15	0.0050/0.0100	-0.1122	-0.2587	-0.1078	0.7234	12 / 12
17	0.0090/0.0090	-0.0004	-0.0678	0.1513	0.5549	17 / 17
18	0.0060/0.0100	0.5040	0.2668	0.2205	0.7391	11 / 11
20	0.0060/0.0100	-0.2675	0.0950	0.0029	0.6974	11 / 11
21	0.0060/0.0100	-0.5265	-0.0299	0.0053	0.3736	15 / 15
22	0.0060/0.0110	-0.5410	0.1000	-0.0754	0.7807	9 / 9
23	0.0060/0.0100	-0.0063	-0.3662	-0.2344	0.7800	17 / 17
24	0.0050/0.0080	-0.1358	0.0669	0.0325	0.3045	14 / 14
25	0.0060/0.0100	0.0140	-0.0188	-0.0936	0.8151	17 / 17
26	0.0050/0.0090	0.3696	0.1975	0.0928	0.5737	15 / 15
28	0.0060/0.0090	-0.1908	-0.0198	0.1709	0.7324	16 / 16
29	0.0050/0.0090	0.0420	0.0084	0.0912	0.7683	12 / 12
31	0.0050/0.0080	0.1233	0.4129	0.0441	0.5425	12 / 12
32	0.0060/0.0090	0.0016	-0.2399	0.3568	0.5907	13 / 13
34	0.0080/0.0140	-0.2235	-0.1132	0.1390	0.6970	16 / 16
36	0.0070/0.0100	-0.2318	-0.0162	-0.5066	0.2536	11 / 11
37	0.0090/0.0140	-0.2046	0.0980	0.0254	0.4001	13 / 13
38	0.0070/0.0090	-0.1925	0.0515	0.0843	0.3811	13 / 13
41	0.0060/0.0090	0.4992	0.7562	-0.0520	0.4313	18 / 18
42	0.0060/0.0090	0.2314	0.2298	0.0742	0.2990	18 / 18

43	0.0060/0.0090	0.0111	-0.1319	0.2277	0.4894	14 / 14
45	0.0060/0.0120	0.0528	0.1216	0.1483	0.4307	11 / 11
46	0.0100/0.0220	0.1232	-0.3617	-0.2112	0.8955	16 / 16
50	0.0090/0.0210	0.2633	0.2282	0.0183	0.6435	12 / 12
51	0.0120/0.0250	-0.2050	0.4075	-0.0362	0.7097	14 / 14
1	0.0040/0.0110	0.0643	-0.0363	-0.0022	0.8108	10 / 10
Mean [m]		0.005173	0.007971	0.018031		
Sigma [m]		0.224189	0.221752	0.152621		
RMS Error [m]		0.224249	0.221895	0.153682		

Localisation accuracy per GCP and mean errors in the three coordinate directions. The last column counts the number of calibrated images where the GCP has been automatically verified vs. manually marked.

Absolute Geolocation Variance

Min Error [m]	Max Error [m]	Geolocation Error X [%]	Geolocation Error Y [%]	Geolocation Error Z [%]
-	-15.00	0.00	0.00	0.00
-15.00	-12.00	0.00	0.00	0.30
-12.00	-9.00	0.10	0.00	2.22
-9.00	-6.00	4.45	2.83	19.51
-6.00	-3.00	16.08	17.39	8.39
-3.00	0.00	27.91	30.03	17.49
0.00	3.00	31.45	29.93	12.34
3.00	6.00	15.87	15.47	27.00
6.00	9.00	4.15	4.25	12.74
9.00	12.00	0.00	0.00	0.00
12.00	15.00	0.00	0.10	0.00
15.00	-	0.00	0.00	0.00
Mean [m]		-0.108777	-1.764555	-89.635588
Sigma [m]		3.429133	3.381250	5.313552
RMS Error [m]		3.430857	3.813988	89.792943

Min Error and Max Error represent geolocation error intervalsbetween -1.5 and 1.5 times the maximum accuracy of all the images. Columns X, Y, Z show the percentage of images with geolocation errors within the predefined error intervals. The geolocation

error is the difference between the intial and computed image positions. Note that the image geolocation errors do not correspond to the accuracy of the observed 3D points.

Geolocation Bias	X	Y	Z
Translation [m]	-0.108777	-1.764555	-89.635588

Bias between image initial and computed geolocation given in output coordinate system.

Relative Geolocation Variance

Relative Geolocation Error	Images X [%]	Images Y [%]	Images Z [%]
[-1.00, 1.00]	81.09	82.10	99.60
[-2.00, 2.00]	99.90	99.90	100.00
[-3.00, 3.00]	100.00	100.00	100.00
Mean of Geolocation Accuracy [m]	5.000000	5.000000	10.000000
Sigma of Geolocation Accuracy [m]	0.000000	0.000000	0.000000

Images X, Y, Z represent the percentage of images with a relative geolocation error in X, Y, Z.

Geolocation Orientational Variance	RMS [degree]
Omega	1.459
Phi	1.005
Kappa	6.467

Geolocation RMS error of the orientation angles given by the difference between the initial and computed image orientation angles.

Initial Processing Details

System Information

Hardware	CPU: Intel(R) Xeon(R) CPU E5-2698 v4 @ 2.20GHz RAM: 256GB GPU: RDPUDD Chained DD (Driver: unknown)
Operating System	Windows 8.1 Pro, 64-bit

Coordinate Systems

Image Coordinate System	WGS84 (egm96)
Ground Control Point (GCP) Coordinate System	WGS84 / UTM zone 23S (egm96)
Output Coordinate System	WGS84 / UTM zone 23S (egm96)

Processing Options

Detected Template	No Template Available
Keypoints Image Scale	Full, Image Scale: 1
Advanced: Matching Image Pairs	Aerial Grid or Corridor
Advanced: Matching Strategy	Use Geometrically Verified Matching: no
Advanced: Keypoint Extraction	Targeted Number of Keypoints: Automatic
Advanced: Calibration	Calibration Method: Standard Internal Parameters Optimization: All External Parameters Optimization: All Lever-Arm Parameters Optimization: None Rematch: Auto, no Bundle Adjustment: Classic

Point Cloud Densification details

Processing Options

Image Scale	multiscale, 1 (Original image size, Slow)
Point Density	Optimal
Minimum Number of Matches	3
3D Textured Mesh Generation	yes
3D Textured Mesh Settings:	Resolution: Medium Resolution (default) Color Balancing: no
Advanced: 3D Textured Mesh Settings	Sample Density Divider: 1
Advanced: Matching Window Size	7x7 pixels
Advanced: Image Groups	group1
Advanced: Use Processing Area	yes
Advanced: Use Annotations	yes
Advanced: Limit Camera Depth Automatically	no

Results

Number of Generated Tiles	22
Number of 3D Densified Points	283529853
Average Density (per m^3)	211.63

DSM, Orthomosaic and Index Details

Processing Options

DSM and Orthomosaic Resolution	1 x GSD (3.58 [cm/pixel])
DSM Filters	Noise Filtering: no Surface Smoothing: no
Raster DSM	Generated: yes Method: Inverse Distance Weighting Merge Tiles: yes
Orthomosaic	Generated: yes Merge Tiles: yes GeoTIFF Without Transparency: no Google Maps Tiles and KML: no
Raster DTM	Generated: yes Merge Tiles: yes
DTM Resolution	5 x GSD (3.58 [cm/pixel])
Contour Lines Generation	Generated: yes Contour Base [m]: 1 Elevation Interval [m]: 1 Resolution [cm]: 100 Minimum Line Size [vertices]: 20
Time for DSM Generation	20h:07m:42s
Time for Orthomosaic Generation	01h:13m:
Time for DTM Generation	30m:22s
Time for Contour Lines Generation	08s