



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

sid.inpe.br/mtc-m21b/2017/11.03.11.55-TDI

**ACURÁCIA DO POSICIONAMENTO E DA
ORIENTAÇÃO ESPACIAL DE VEÍCULOS AÉREOS A
PARTIR DE IMAGENS DE CÂMERAS DE PEQUENO
FORMATO EMBARCADAS**

Leandro Roberto

Dissertação de Mestrado do
Curso de Pós-Graduação em
Sensoriamento Remoto, orientada
pelo Dr. Sidnei João Siqueira
Sant'Anna, aprovada em 23 de
novembro de 2017.

URL do documento original:

<<http://urlib.net/8JMKD3MGP3W34P/3PTQDCS>>

INPE
São José dos Campos
2017

PUBLICADO POR:

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE

Gabinete do Diretor (GB)

Serviço de Informação e Documentação (SID)

Caixa Postal 515 - CEP 12.245-970

São José dos Campos - SP - Brasil

Tel.:(012) 3208-6923/6921

E-mail: pubtc@inpe.br

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

Presidente:

Maria do Carmo de Andrade Nono - Conselho de Pós-Graduação (CPG)

Membros:

Dr. Plínio Carlos Alvalá - Centro de Ciência do Sistema Terrestre (CST)

Dr. André de Castro Milone - Coordenação de Ciências Espaciais e Atmosféricas (CEA)

Dra. Carina de Barros Melo - Coordenação de Laboratórios Associados (CTE)

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

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

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

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

BIBLIOTECA DIGITAL:

Dr. Gerald Jean Francis Banon

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

REVISÃO E NORMALIZAÇÃO DOCUMENTÁRIA:

Simone Angélica Del Duca Barbedo - Serviço de Informação e Documentação (SID)

Yolanda Ribeiro da Silva Souza - Serviço de Informação e Documentação (SID)

EDITORAÇÃO ELETRÔNICA:

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

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



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

sid.inpe.br/mtc-m21b/2017/11.03.11.55-TDI

**ACURÁCIA DO POSICIONAMENTO E DA
ORIENTAÇÃO ESPACIAL DE VEÍCULOS AÉREOS A
PARTIR DE IMAGENS DE CÂMERAS DE PEQUENO
FORMATO EMBARCADAS**

Leandro Roberto

Dissertação de Mestrado do
Curso de Pós-Graduação em
Sensoriamento Remoto, orientada
pelo Dr. Sidnei João Siqueira
Sant'Anna, aprovada em 23 de
novembro de 2017.

URL do documento original:

<<http://urlib.net/8JMKD3MGP3W34P/3PTQDCS>>

INPE
São José dos Campos
2017

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

Roberto, Leandro.

R54a Acurácia do posicionamento e da orientação espacial de veículos aéreos a partir de imagens de câmeras de pequeno formato embarcadas / Leandro Roberto. – São José dos Campos : INPE, 2017.

xxx + 308 p. ; (sid.inpe.br/mtc-m21b/2017/11.03.11.55-TDI)

Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2017.

Orientador : Dr. Sidnei João Siqueira Sant'Anna.

1. Sensoriamento remoto. 2. Fotogrametria. 3. Navegação. 4. Ressecção espacial. 5. Distorção geométrica. I.Título.

CDU 528.8.041:629.7



Esta obra foi licenciada sob uma Licença [Creative Commons Atribuição-NãoComercial 3.0 Não Adaptada](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/).

This work is licensed under a [Creative Commons Attribution-NonCommercial 3.0 Unported License](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/).

Aluno (a): **Leandro Roberto**

Título: "ACURÁCIA DO POSICIONAMENTO E DA ORIENTAÇÃO ESPACIAL DE VEÍCULOS AÉREOS A PARTIR DE IMAGENS DE CÂMERAS DE PEQUENO FORMATO EMBARCADAS"

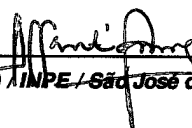
Aprovado (a) pela Banca Examinadora
em cumprimento ao requisito exigido para
obtenção do Título de **Mestre** em
Sensoriamento Remoto

Dr. Flávio Jorge Ponzoni



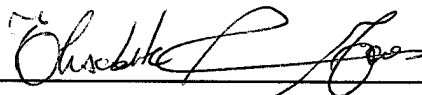
Presidente / INPE / SJCampos - SP

Dr. Sidnei João Siqueira Sant'Anna



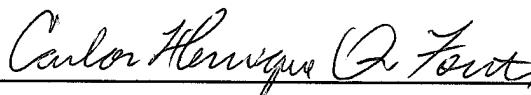
Orientador(a) / INPE / São José dos Campos - SP

Dra. Elisabete Caria Moraes



Membro da Banca / INPE / São José dos Campos - SP

Dr. Carlos Henrique Quartucci Forster



Convidado(a) / IEC/ITA / São José dos Campos - SP

Este trabalho foi aprovado por:

() maioria simples

(x) unanimidade

São José dos Campos, 23 de novembro de 2017

“No que diz respeito ao empenho, ao compromisso, ao esforço e à dedicação, não existe meio termo. Ou você faz uma coisa bem feita ou não faz.”

Ayrton Senna

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, pela onipresença em nossas vidas, o que nos proporciona fé, a chama que mantém acesa nossa vontade de lutar.

A meus pais, Vinício e Eunice, pelo exemplo de superação e pela formação do meu caráter, essenciais para minhas conquistas.

A minha esposa, Maiza, pelo carinho, companheirismo, paciência e compreensão do meu grande envolvimento neste curso, principalmente na fase final deste trabalho. E ao meu filho, Leonel, por me mostrar mais uma razão de viver com seu entusiasmo ao ganhar seus meses e anos de vida.

À Força Aérea Brasileira – FAB, pela graduação em Engenharia no Instituto Tecnológico de Aeronáutica – ITA, onde incorporei os valores da disciplina consciente e onde aprendi a aprender, quesitos fundamentais para superar os desafios na vida profissional.

Aos professores do programa de pós-graduação em Sensoriamento Remoto do INPE, pela atenção, orientação e conhecimentos transmitidos. Especialmente ao meu orientador, Dr. Sidnei Sant’Anna, pelas sugestões, experiências, conhecimentos compartilhados e pela confiança transmitida, favorecendo o desenvolvimento de todo o trabalho. E, principalmente, pela cuidadosa revisão desta Dissertação.

Aos colegas de turma no INPE, pela pluralidade de suas áreas de graduação, cujos conhecimentos enriqueceram minha formação em Sensoriamento Remoto.

Ao Instituto de Pesquisas e Ensaios em Voo – IPEV, por providenciar a aeronave A-29 Supertucano e pessoal especializado para execução dos voos de coleta das imagens. Especialmente ao Eng^o Anderson de Souza, pela pró-atividade na coordenação dos trabalhos de preparação e compatibilização do Sistema de Aquisição de Dados – SAD.

Ao Dr. Élcio Shiguemori do IEAv, por ceder a câmera GoPRO para os voos e pelo voluntário acompanhamento das etapas do trabalho e auxílio na revisão desta Dissertação.

Ao Dr. Ricardo Teixeira do IEAv, pela valiosa assessoria no projeto do circuito eletrônico de sincronismo das câmeras.

Ao Eng^o Roberto Salles do IEAv, pelas importantes dicas de programação e pelo auxílio na impressão deste documento.

Ao Tenente Eng^o Sidney do IEAv, pelo aprendizado com seus conhecimentos e experiência em fotogrametria.

Ao Técnico Luís Bernabé do IEAv, pela assessoria no projeto das peças do suporte para fixação das câmeras na aeronave e na confecção dos circuitos eletrônicos.

Ao 1^o Sargento Alex Rigaud do IEAv, pelo profissionalismo no desenho 3D das peças do suporte de fixação das câmeras. E aos Técnicos da oficina mecânica do IEAv, pela qualidade na confecção dessas peças.

Ao Técnico Salatiel do Instituto de Aeronáutica e Espaço – IAE, pelo empenho na confecção e rebitagem da chapa em alumínio aeronáutico para o suporte das câmeras.

A todas as pessoas que colaboraram para a realização deste trabalho.

RESUMO

Este trabalho teve como objetivo avaliar a acurácia do processo de determinação de posição geográfica e de ângulos de atitude para um veículo aéreo a partir de imagens geradas por câmera embarcada, visando a aplicação em navegação aérea. Esse processo pode ser uma alternativa ou um complemento aos sistemas de orientação e de posicionamento atualmente em uso nas aeronaves e em VANTs (unidades inerciais e receptores GNSS), sobretudo pelo fato dos GNSS serem suscetíveis a interferências intencionais que inviabilizam navegação. O foco da avaliação foi sobre a influência das distorções geométricas da câmera na acurácia destes parâmetros de navegação, tendo sido avaliadas tanto imagens sem correção das distorções quanto com. Foram utilizadas duas câmeras, uma com alta distorção geométrica (GoPRO) e outra com baixa (Nikon), as quais foram embarcadas em uma aeronave A-29 Supertucano da Força Aérea Brasileira. Esta aeronave estava equipada com instrumentação especial de ensaios em voo, isto é, sensores extras de alta acurácia e gravadores para registrar todos os parâmetros de voo, inclusive a posição e os ângulos de orientação, que consistiram na base de referência para avaliação da acurácia do processo por imagem. Para a correção geométrica das imagens foi necessária a determinação dos parâmetros de distorção das câmeras por meio de um procedimento de calibração. Para isso, foi construído um campo de calibração bem como desenvolvidos *softwares* e modelos matemáticos próprios. O voo foi realizado na cidade de São José dos Campos explorando três alturas diferentes tanto em condições de visada nadir quanto fora do nadir, a fim de possibilitar a análise da influência destes fatores. Os parâmetros de navegação foram determinados a partir de cada imagem usando um procedimento consagrado na área de fotogrametria, denominado ressecção espacial, que exige o conhecimento das coordenadas de pontos extraídos da imagem e das coordenadas correspondentes no solo, sendo necessária a resolução de um sistema de equações não-lineares por método numérico. As coordenadas dos cerca de 160 pontos no solo foram levantadas em campo com receptores GNSS geodésicos de alta acurácia. Foram utilizadas mais de 400 fotos, o que garantiu amostras de tamanho suficiente para abordagem estatística em cada condição analisada. Dessa forma, os resultados obtidos permitiram alcançar os objetivos propostos, sendo confrontados com os requisitos de acurácia existentes para navegação aérea. Foi observado que a dispersão dos parâmetros aumenta com a altura de voo e que não tem relação de dependência com a inclinação lateral da aeronave. Foi constatado que a câmera GoPRO, de menor custo, apresenta resultados melhores que a Nikon, quando calibrada, devido ao FOV maior. A maioria dos requisitos de acurácia para navegação foram cumpridos pela Nikon, mesmo sem calibração, e também pela GoPRO com calibração. Os métodos utilizados neste trabalho, bem como as técnicas desenvolvidas e os resultados alcançados, não são restritos à questão da navegação de veículos aéreos, podendo beneficiar outras aplicações, principalmente na área de Sensoriamento Remoto. Por exemplo, nos processos de mapeamento com VANTs ou com aeronaves, estes métodos podem melhorar a qualidade geométrica dos produtos gerados, fazendo-os alcançar níveis mais elevados do Padrão de Exatidão Cartográfica (PEC).

Palavras-chave: Sensoriamento Remoto. Fotogrametria. Navegação. Ressecção Espacial. Distorção Geométrica. Calibração.

ACCURACY OF POSITIONING AND SPATIAL ORIENTATION OF AERIAL VEHICLES USING IMAGENS FROM SMALL FORMAT CAMERA ONBOARD

ABSTRACT

This study aimed to evaluate the accuracy of the process of determining geographic position and attitude angles for an aerial vehicle from images generated by a camera onboard, aiming to application in aerial navigation. This process can be an alternative or a complement to the orientation and positioning systems currently used in aircraft and in UAVs (inertial units and GNSS receivers), mainly because GNSS are susceptible to intentional interference that makes navigation impossible. The focus of the evaluation was on the influence of the camera geometric distortions on the accuracy of these navigational parameters. We evaluated images both with and without correction of distortions. Two cameras, one with high (GoPRO) and other with low geometric distortion (Nikon) were used. They were loaded onto an A-29 Supertucano aircraft of the Brazilian Air Force. This aircraft was equipped with special in-flight test instrumentation (i.e., extra high-accuracy sensors and recorders to register all flight parameters, including position and orientation angles). These flight parameters were the baseline for assessing the accuracy of the process by image. For the geometric correction of the images, it was necessary to determine the distortion parameters of the cameras by a calibration procedure. For this, a calibration field was built, and softwares and mathematical models were developed. The flight was carried out in the city of São José dos Campos, exploring three different heights, both in nadir and off-nadir, in order to allow the analysis of the influence of these factors. The navigation parameters were determined from each image using a procedure established in photogrammetry called spatial resection. It requires the knowledge of the coordinates of points extracted from the image and the corresponding coordinates on the ground, being necessary the resolution of a system of nonlinear equations by numerical method. The coordinates of about 160 ground points were surveyed with highly accurate geodesic GNSS receivers. More than 400 photos were used to make the resection, which assured samples of sufficient size for statistical approach in each condition analyzed. In this way, the obtained results allowed to reach the proposed objectives and to check the existing accuracy requirements for aerial navigation. It was observed that the dispersion of the parameters increases with flight height and that there is no dependence to the lateral inclination of the aircraft. It was found that the lower-cost GoPRO camera when calibrated performs better than Nikon, due to the higher FOV. Most accuracy requirements for navigation were met by Nikon, even without calibration, and also by GoPRO with calibration. The methods used in this work, as well as the techniques developed and the results achieved, are not restricted to the issue of navigation of aerial vehicles and may benefit other applications, especially in Remote Sensing. For example, in the mapping processes with VANTs or with aircrafts, these methods can improve the geometric quality of the generated products, making them reach higher Cartographic Accuracy Standard (PEC) levels.

Keywords: Remote Sensing. Photogrammetry. Navigation. Spatial Resection. Geometric Distortion. Calibration.

LISTA DE FIGURAS

	<u>Pág.</u>
Figura 2.1 – Formação da imagem em uma câmera escura de orifício, representada pelo modelo denominado <i>pinhole</i>	10
Figura 2.2 – Elementos de um sensor óptico.....	10
Figura 2.3 – Sistemas de referência: (a) tridimensional da câmera com origem no CP e (b) bidimensional da imagem com origem no pixel superior esquerdo e no pixel central.	12
Figura 2.4 – Sistema de referência da aeronave.....	12
Figura 2.5 – Sistemas de referência terrestres: ECEF, Geodésico e ENU.	13
Figura 2.6 – Orientação externa da câmera em relação ao sistema terrestre ENU.....	17
Figura 2.7 – Orientação externa da aeronave em relação ao sistema terrestre ENU.....	19
Figura 2.8 – Eixos do sistema de referência da câmera em relação aos eixos do sistema da aeronave, quando instalada sem <i>offsets</i> angulares.	21
Figura 2.9 – Mudança de referencial do sistema do objeto para o da imagem.	24
Figura 2.10 – Pontos no terreno e pontos correspondentes na imagem, utilizados para a ressecção espacial.	26
Figura 2.11 – Ilustração da distorção radial de uma câmera: (a) imagem sem distorção, com pontos uniformemente distribuídos; (b) distorção negativa, com compressão nas extremidades; e (c) distorção positiva, com expansão nas extremidades.	29
Figura 2.12 – Curva de distorção radial simétrica.....	30
Figura 2.13 – Falta de paralelismo da lente com o sensor da câmera, que causa a distorção tangente.....	31
Figura 2.14 – Diagrama com os parâmetros da distorção descentrada.	31
Figura 2.15 – Ilustração da distorção tangente de uma câmera: (a) imagem sem distorção e pontos uniformemente distribuídos; (b) imagem com distorção tangente e pontos com compressão em uma extremidade e expansão na extremidade diagonalmente oposta.....	32
Figura 2.16 – Ilustração da distorção de afinidade de uma câmera: (a) Pixel quadrado <i>versus</i> retangular, (b) imagem sem distorção, (c) imagem com distorção de afinidade. .	33
Figura 2.17 – Ilustração da distorção por cisalhamento (<i>skew</i>) em uma câmera: (a) ângulo α de cisalhamento do pixel; (b) imagem sem distorção; e (c) imagem com distorção de cisalhamento.	34
Figura 2.18 – Ilustração da defasagem do ponto principal em uma câmera.	35

Figura 2.19 – Ilustração da relação geométrica da homografia entre a imagem e o objeto correspondente: (a) representação 3D e (b) representação 2D.	36
Figura 2.20 – Curvas de distorção radial: [1] obtida com distância focal gaussiana equivalente e [2] curva balanceada para se determinar a focal calibrada.	37
Figura 2.21 – Sistemas de referência do campo de calibração, da câmera e da imagem.	39
Figura 2.22 – Definição dos ângulos de apontamento do eixo óptico da câmera em relação ao sistema de referência do campo de calibração.	44
Figura 2.23 – Sistemas de referência e parâmetros na representação da imagem de uma câmera.	45
Figura 2.24 – Conceitos exatidão, precisão e acurácia.	48
Figura 2.25 – Conceito de erro circular para parâmetros bidimensionais como o erro planimétrico, resultante das componentes leste e norte.	49
Figura 2.26 – Limites teóricos da região de aceitação na distribuição <i>t-student</i> com $n-1$ graus de liberdade, para nível de significância α	51
Figura 3.1 – Fluxograma com os passos da metodologia empregada no trabalho.	53
Figura 3.2 – Rota de voo e áreas abrangidas no sobrevoo para coleta das imagens utilizadas para ressecção espacial neste trabalho.	55
Figura 3.3 – Aeronave A-29 Supertucano da FAB.	56
Figura 3.4 – Alguns dos componentes do Sistema de Aquisição de Dados (SAD) da aeronave A-29: (a) <i>boom</i> anemométrico, instalado na ponta da asa esquerda, (b) IMU e sistema de gravação, localizados no compartimento eletrônico central, e (c) receptor GNSS geodésico, instalado no bagageiro.	57
Figura 3.5 – Localização da antena do receptor GNSS DL-V3 Novatel na aeronave.	59
Figura 3.6 – Receptor GNSS Novatel DL-V3 posicionado com tripé no pátio do IPEV sobre um ponto geodésico, usado como base para correção diferencial do receptor embarcado na aeronave.	60
Figura 3.7 – Câmeras que foram embarcadas na aeronave A-29: (a) Nikon Coolpix A e (b) GoPRO Hero4 Black.	61
Figura 3.8 – Local de fixação das câmeras Nikon e GoPRO na aeronave A-29.	61
Figura 3.9 – Desenho 3D com vista explodida e descrição das peças do suporte projetado para fixação das câmeras na aeronave A-29.	63
Figura 3.10 – Desenho com vista agrupada das peças do suporte projetado para fixação das câmeras na aeronave.	63
Figura 3.11 – Montagem final do suporte para fixação das câmeras na aeronave: (a) vista da face externa e (b) vista da face interna.	64

Figura 3.12 – Detalhes do suporte de fixação das câmeras, montado na aeronave e pronto para o voo.	65
Figura 3.13 – Campo de calibração geométrica construído no IEAv. Detalhe para os marcos codificados fixados nas paredes, no piso e no teto, e para a régua no piso com posições identificadas para estacionar a câmera.....	68
Figura 3.14 – Simulação das imagens horizontal e vertical de uma câmera genérica, posicionada no campo de calibração do IEAv. Método usado para definir a localização 3D onde seriam fixados os marcos no campo a partir da disposição homogênea dos marcos no quadro da foto.	68
Figura 3.15 – Estação Total topográfica Topcon GPT-3105W, usada para levantamento das coordenadas dos marcos de referência do campo de calibração do IEAv.	69
Figura 3.16 – Representação da vista em perspectiva (a) e da vista em planta (3) do <i>as built</i> do campo de calibração do IEAv.....	70
Figura 3.17 – Dispositivos previstos para fazer a orientação externa da câmera no campo de calibração do IEAv.	71
Figura 3.18 – Posicionamento das câmeras Nikon e GoPRO com visor de acrílico no campo de calibração do IEAv para adquirir as imagens usadas no processo de identificação dos parâmetros de distorção geométrica.....	72
Figura 3.19 – Imagem obtida no campo de calibração pela câmera Nikon, com indicação dos marcos capturados.	73
Figura 3.20 – Imagens obtidas no campo de calibração pela câmera GoPRO, com indicação dos marcos capturados: (a) modo FOV <i>Medium</i> e (b) modo FOV <i>Wide</i>	73
Figura 3.21 – Janela do algoritmo CALIBRA com opção para escolha do tipo do modelo a utilizar na identificação dos parâmetros de distorção geométrica.	74
Figura 3.22 – Circuito de sincronismo projetado para fazer interconexão elétrica entre a câmera Nikon e os sistemas da aeronave.	76
Figura 3.23 – Diagrama esquemático do planejamento do procedimento de sincronismo das bases de tempo das câmeras com a base de tempo do SAD.	77
Figura 3.24 – Medição dos atrasos de acionamento dos relés de estado sólido do circuito de sincronismo: (a) osciloscópio digital e (b) montagem do relé em <i>protoboard</i>	78
Figura 3.25 – Disposição dos equipamentos durante a realização do sincronismo completo das bases de tempo das câmeras e dos sistemas da aeronave.	79
Figura 3.26 – Fotos obtidas pelas câmeras no procedimento de sincronismo completo: (1) foto da câmera de alta velocidade, (b) foto da Nikon e (c) foto da GoPRO.	80
Figura 3.27 – Ilustração do procedimento de nivelamento da aeronave sobre macacos hidráulicos e descrição da localização da posição dos pontos de interesse.	82
Figura 3.28 – Equipamentos utilizados para o nivelamento da aeronave: (1) Teodolito TOKIO TM20C e (b) Estação Total Nikon NPL-632.	83

Figura 3.29 – Marcas de referência na aeronave para nivelamento longitudinal e lateral.	83
Figura 3.30 – Poligonal topográfica estabelecida para basear as irradiações a fim de medir as coordenadas dos pontos de interesse.	84
Figura 3.31 – Levantamento da poligonal topográfica com Estação Total Topcon GPT-3105W estacionada no ponto P3 e prismas posicionados nos pontos P1 e P2.	85
Figura 3.32 – Levantamento de pontos de interesse por irradiação com Estação Total: (a) vértices da placa de referência, (b) centro de perspectiva das câmeras com alvo em linha de prumo e (c) centro da antena do receptor GNSS com alvo em minitripé.	86
Figura 3.33 – Nivelamento da placa de referência sob a aeronave dentro do campo de visão das câmeras.	87
Figura 3.34 – Fotos da placa de referência nivelada sob a aeronave com pontos capturados para fazer a ressecção espacial a fim de determinar o apontamento angular e a posição acurada do CP das câmeras: (a) foto da Nikon e (b) foto da GoPRO.	87
Figura 3.35 – Sistema de referência da aeronave (X_a, Y_a, Z_a) e sistema local (E, N, U), definidos para representação dos ângulos e coordenadas das câmeras e dos sistemas da aeronave.	88
Figura 3.36 – Algumas feições do terreno escolhidas para levantamento em campo.	90
Figura 3.37 – Setores da imagem considerados no critério de distribuição geométrica dos pontos capturados para a ressecção espacial.	91
Figura 3.38 – Imagens da câmera Nikon em visadas nadir e off-nadir para três alturas diferentes, com indicação dos pontos capturados para a ressecção espacial.	92
Figura 3.39 – Imagens da câmera GoPRO em visadas nadir e off-nadir para três alturas diferentes, com indicação dos pontos capturados para a ressecção espacial.	93
Figura 3.40 – Ponto G0 base, no interior do Campus do IEAv, utilizado como referência para o processamento relativo dos pontos levantados.	95
Figura 3.41 – Disposição dos pontos levantados em campo para serem utilizados na ressecção espacial a partir das fotos das câmeras embarcadas.	96
Figura 3.42 – Posição em que foi estacionado o GNSS no levantamento das coordenadas de alguns pontos.	97
Figura 3.43 – Ilustração do <i>offset</i> da posição da aeronave em relação ao pixel central da imagem, que ocorre em condição off-nadir.	98
Figura 3.44 – Ilustração das coordenadas dos três pontos capturados na imagem para ressecção espacial e as coordenadas correspondentes no solo, segundo sistema ENU.	99
Figura 4.1 – Curva de distorção radial obtida na calibração da câmera Nikon no campo do IEAv.	104

Figura 4.2 – Curva de distorção radial obtida na calibração da câmera GoPRO no campo do IEAv para os modo (a) FOV <i>Medium</i> e (b) FOV <i>Wide</i>	105
Figura 4.3 – Análise dos erros do modelo de distorção da câmera Nikon: (a) reprojeção dos marcos segundo o modelo identificado, em comparação com os pontos reais capturados, (b) erro circular da reprojeção de todos os marcos e (c) representação do histograma.	107
Figura 4.4 – Análise dos erros do modelo de distorção da câmera GoPRO no modo FOV <i>Medium</i> : (a) reprojeção dos marcos segundo o modelo identificado, em comparação com os pontos reais capturados, (b) erro circular da reprojeção de todos os marcos e (c) representação do histograma.....	109
Figura 4.5 – Análise dos erros do modelo de distorção da câmera GoPRO no modo FOV <i>Wide</i> : (a) reprojeção dos marcos segundo o modelo identificado, em comparação com os pontos reais capturados, (b) erro circular da reprojeção de todos os marcos e (c) representação do histograma.	111
Figura 4.6 – Comparação da representação do histograma dos erros de reprojeção da calibração das câmeras.....	112
Figura 4.7 – Imagem da câmera Nikon obtida no campo de calibração do IEAv: (a) sem correção e (b) com correção das distorções geométricas, imperceptíveis.	115
Figura 4.8 – Imagem da câmera GoPRO com FOV <i>Medium</i> obtida no campo de calibração do IEAv: (a) sem correção e (b) com correção das distorções geométricas.	116
Figura 4.9 – Imagem da câmera GoPRO com FOV <i>Wide</i> obtida no campo de calibração do IEAv: (a) sem correção e (b) com correção das distorções geométricas.....	117
Figura 4.10 – Erros da posição e da orientação angular obtidos por ressecção espacial a partir de imagens da câmera Nikon com correção das distorções geométricas, alturas em torno de 340m e visada nadir.....	124
Figura 4.11 – Erros da posição e da orientação angular obtidos por ressecção espacial a partir de imagens da câmera GoPRO com correção das distorções geométricas, alturas em torno de 350m e visada nadir.....	125
Figura 4.12 – Erros dos resultados da ressecção espacial em função da altura para a câmera Nikon com correção das distorções e visada nadir.....	129
Figura 4.13 – Erros dos resultados da ressecção espacial em função da altura para a câmera Nikon com correção das distorções e visada off-nadir.....	130
Figura 4.14 – Erros dos resultados da ressecção espacial em função da altura para a câmera GoPRO com correção das distorções e visada nadir.	131
Figura 4.15 – Erros dos resultados da ressecção espacial em função da altura para a câmera GoPRO com correção das distorções e visada off-nadir.	132
Figura 4.16 – Erros dos resultados da ressecção espacial em função da inclinação da aeronave para a câmera Nikon com correção das distorções para alturas em torno de 390m.	133

Figura 4.17 – Erros dos resultados da ressecção espacial em função da inclinação da aeronave para a câmara GoPRO com correção das distorções para alturas em torno de 390m.	134
Figura 4.18 – Erros dos resultados da ressecção espacial para a câmara Nikon nas condições de visada nadir em comparação com as condições off-nadir, em função da altura.	135
Figura 4.19 – Erros dos resultados da ressecção espacial para a câmara GoPRO nas condições de visada nadir em comparação com as condições off-nadir, em função da altura.	136
Figura 4.20 – Erros dos resultados da ressecção espacial para a câmara GoPRO em comparação com a Nikon, ambas com correção das distorções e em visada nadir, em função da altura.	137
Figura 4.21 – Erros dos resultados da ressecção espacial para a câmara GoPRO em comparação com a Nikon, ambas com correção das distorções e em visada off-nadir, em função da altura.	138
Figura 4.22 – Erros dos resultados da ressecção espacial para a câmara Nikon com visada nadir na condição sem correção das distorções em comparação com correção, em função da altura.	140
Figura 4.23 – Erros dos resultados da ressecção espacial para a câmara Nikon com visada off-nadir na condição sem correção das distorções em comparação com correção, em função da altura.....	141
Figura 4.24 – Erros dos resultados da ressecção espacial para a câmara GoPRO com visada nadir na condição sem correção das distorções em comparação com correção, em função da altura.	142
Figura 4.25 – Erros dos resultados da ressecção espacial para a câmara GoPRO com visada off-nadir na condição sem correção das distorções em comparação com correção, em função da altura.....	143
Figura 4.26 – Critério de acurácia horizontal e vertical para as diversas fase de voo na navegação aérea.	144
Figura 4.27 – Enquadramento dos resultados da ressecção espacial de cada condição em relação aos requisitos de acurácia horizontal (H) e vertical (V) em cada fase de voo. ...	146

LISTA DE TABELAS

	<u>Pág.</u>
Tabela 2.1 – Parâmetros de distorção geométrica utilizados nos modelos implementados em diversos <i>softwares</i> de calibração de câmeras.....	42
Tabela 3.1 – Condições planejadas para a tomada das imagens no voo.	56
Tabela 3.2 – Especificações técnicas da IMU H-764 utilizada na aeronave A-29 quando operando no modo inercial puro.	58
Tabela 3.3 – Especificações técnicas do receptor GNSS Novatel DL-V3 instalado na aeronave A-29.....	59
Tabela 3.4 – Especificações técnicas nominais das câmeras Nikon e GoPRO embarcadas na aeronave A-29.....	62
Tabela 3.5 – Erro de calibração em função do <i>software</i> , do método e do modelo utilizado.....	66
Tabela 3.6 – Especificações técnicas de resolução e acurácia da Estação Total Topcon GPT-3105W utilizada na medição dos marcos do campo de calibração.....	69
Tabela 3.7 – Especificações técnicas do receptor GNSS TechGEO GTR-G2, utilizado nos levantamentos de campo.....	94
Tabela 3.8 – Coordenadas da estação SJSP da RBMC e do ponto base G0 levantado.....	95
Tabela 3.9 – Valores de <i>offset</i> horizontal em metros no solo devido à condição off-nadir, em função da altura.	98
Tabela 4.1 – Valores dos parâmetros de distorção geométrica identificados no processo de calibração da câmara Nikon no campo do IEAv.	102
Tabela 4.2 – Valores dos parâmetros de distorção geométrica identificados no processo de calibração da câmara GoPRO no campo do IEAv.....	103
Tabela 4.3 – Influência individual dos parâmetros de distorção geométrica da câmera Nikon, com visada nadir, no erro em solo para diversas alturas.	113
Tabela 4.4 – Influência individual dos parâmetros de distorção geométrica da câmera GoPRO, com FOV <i>Wide</i> e visada nadir, no erro em solo para diversas alturas.....	114
Tabela 4.5 – Defasagem e deriva no início do voo das bases de tempo das câmeras Nikon e GoPRO e do SAD da aeronave em relação à base de tempo UTC do receptor GNSS geodésico embarcado, obtidas a partir do procedimento de sincronismo.	119
Tabela 4.6 – <i>Offsets</i> angulares das câmeras e da IMU em relação aos eixos de referência da aeronave.....	119
Tabela 4.7 – <i>Offsets</i> lineares das câmeras e dos sistemas da aeronave, em relação ao sistema de referência terrestre e ao sistema de referência da aeronave.....	120

Tabela 4.8 – Número de imagens das câmeras Nikon e GoPRO utilizadas na ressecção espacial para cada condição de altura, visada e distorção geométrica.	122
Tabela 4.9 – Médias e desvios-padrão dos erros da posição e orientação da aeronave obtidos por ressecção espacial com as imagens da câmera Nikon, com e sem correção das distorções.	122
Tabela 4.10 – Médias e desvios-padrão dos erros da posição e orientação da aeronave obtidos por ressecção espacial com as imagens da câmera GoPRO, com e sem correção das distorções.	123
Tabela 4.11 – Resultado do teste de hipóteses para cada amostra de erros em cada condição analisada. O p-valor aparece entre parênteses. As que passaram no teste estão isentas de erro sistemático. As que não passaram trazem o valor do erro sistemático em metros.	127
Tabela 4.12 – Gradiente de variação da dispersão da posição horizontal e vertical em função da altura para condições de visada nadir e off-nadir, com correção das distorções.	128
Tabela 4.13 – Parâmetros dos intervalos de confiança da dispersão de posição horizontal (DRMS) e vertical (RMS), para cada câmera em cada altura com condições de visada nadir e off-nadir.	145
Tabela 4.14 – Critérios de acurácia dos ângulos de atitude e proa para navegação aérea.	147
Tabela 4.15 – Parâmetros dos intervalos de confiança das orientações angulares, para cada câmera em cada altura com condições de visada nadir e off-nadir.	147
Tabela 4.16 – Enquadramento dos resultados da ressecção espacial de cada condição em relação aos requisitos de acurácia para ângulos de atitude e de proa.	148

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AME	Divisão de Mecânica do IAE
ARP	Aeronave Remotamente Pilotada
ASA	Divisão de Sistemas Aeronáuticos do IAE
BEIDOU	Primeira geração do sistema GNSS chinês
CCD	<i>Charge-Coupled Device</i>
CEP	<i>Circular Error Probable</i>
CG	Centro de Gravidade da aeronave
CMOS	<i>Complementary Metal-Oxide Semiconductor</i>
COMPASS	Segunda geração do sistema GNSS chinês
CP	Centro de Perspectiva da câmera
CPA	Divisão de Certificação de Produto Aeroespacial do IFI
CrF	<i>Crop Factor</i>
DCTA	Departamento de Ciência e Tecnologia Aeroespacial
DRMS	<i>Distance Root Mean Square</i>
$E_a N_a U_a$	Posição da aeronave no sistema de referência terrestre ENU
$E_c N_c U_c$	Posição da câmera no sistema de referência terrestre ENU
ECEF	Sistema de referência terrestre <i>Earth-Centered Earth-Fixed</i>
EGI	Divisão de Geointeligência do IEAv
EGI-S	Subdivisão de Sensoriamento Remoto da EGI
EMBRAER	Empresa Brasileira de Aeronáutica
ENU	Sistema de referência terrestre local <i>East-North-Up</i>
EST	Divisão de Suporte Técnico do IEAv
FAA	<i>Federal Aviation Administration</i>

FAB	Força Aérea Brasileira
FOV	<i>Field Of View</i> da câmera
fps	<i>frames per second</i>
ft	<i>feet</i> , unidade para altitude, utilizada em aeronáutica
GALILEO	Sistema GNSS europeu
GBAS	<i>Ground-Based Augmentation System</i>
GCP	<i>Ground Control Point</i>
GLONASS	Sistema GNSS russo
GNSS	<i>Global Navigation Satellite System</i>
GPS	<i>Global Positioning System</i>
GSD	<i>Ground Sample Distance</i>
IAE	Instituto de Aeronáutica e Espaço
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
ICAO	<i>International Civil Aviation Organization</i>
IEAv	Instituto de Estudos Avançados
IFI	Instituto de Fomento e Coordenação Industrial
IFR	<i>Instrument Flight Rules</i>
IMU	<i>Inertial Measurement Unit</i>
INPE	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
IPEV	Instituto de Pesquisas e Ensaios em Voo
KIAS	<i>Knots Indicated Air Speed</i>
KTAS	<i>Knots True Air Speed</i>
Lat	Latitude
LIDAR	<i>Light Detection And Ranging</i>
Long	Longitude

MDS	Modelo Digital de Superfície
MP	<i>MegaPixels</i>
NDB	<i>Non-Directional Beacon</i>
NGA	<i>National Geospatial-Intelligence Agency</i>
NM	<i>Nautical Miles</i>
NOAA	<i>National Oceanic and Atmospheric Administration</i>
PBN	<i>Performance-Based Navigation</i>
PEC	Padrão de Exatidão Cartográfica
PEV	Permissão Especial de Voo
PP	Ponto Principal
RBMC	Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo
RGB	Sistema de cores <i>Red-Green-Blue</i>
RMS	<i>Root Mean Square</i>
SAD	Sistema de Aquisição de Dados
SAR	<i>Synthetic Aperture Radar</i>
SIG	Sistema de Informação Geográfica
SIRGAS	Sistema de Referência Geocêntrico para as Américas
UFMG	Universidade Federal de Minas Gerais
UTC	<i>Universal Time Coordinated</i>
VANT	Veículo Aéreo Não Tripulado
VHF	<i>Very-High Frequency</i>
VOR	<i>VHF Omnidirectional Range</i>
WMM	<i>World Magnetic Model</i>
$X_a Y_a Z_a$	Sistema de referência do corpo da aeronave
$X_c Y_c Z_c$	Sistema de referência da câmera

LISTA DE SÍMBOLOS

α	Ângulo de azimute da câmera no campo de calibração, definido neste trabalho
β	Ângulo de elevação da câmera no campo de calibração, definido neste trabalho
γ	Ângulo de rotação da câmera no campo de calibração, definido neste trabalho
θ	Ângulo de arfagem, definido no sistema aeronáutico
ϕ	Ângulo de rolamento ou inclinação lateral, definido no sistema aeronáutico
ω	Ângulo de orientação externa da câmera, definido no sistema fotogramétrico
φ	Ângulo de orientação externa da câmera, definido no sistema fotogramétrico
κ	Ângulo de orientação externa da câmera, definido no sistema fotogramétrico
ψ	Ângulo de proa, definido no sistema aeronáutico

SUMÁRIO

	<u>Pág.</u>
1	INTRODUÇÃO..... 1
1.1	Objetivos..... 6
2	REFERENCIAL TEÓRICO..... 9
2.1	Princípio da colinearidade 9
2.2	Sistemas de referência 11
2.2.1	Sistemas da câmera e da imagem 11
2.2.2	Sistema da aeronave 12
2.2.3	Sistemas terrestres ECEF, Geodésico e ENU..... 13
2.2.3.1	Transformações entre o sistema Geodésico e o ENU..... 14
2.3	Orientação externa da câmera..... 16
2.3.1	Transformação do ENU para o sistema da câmera..... 17
2.4	Orientação externa da aeronave..... 18
2.4.1	Transformação do ENU para o sistema da aeronave..... 19
2.5	Integração da câmera à aeronave..... 20
2.5.1	Compatibilização do sistema da câmera com o da aeronave..... 21
2.5.2	Conversão entre os ângulos (ψ, θ, ϕ) e $(\omega, \varphi, \kappa)$ 22
2.6	Equações de colinearidade..... 23
2.7	Ressecção espacial..... 25
2.7.1	Fontes de erro da ressecção espacial 27
2.8	Distorções geométricas da câmera 28
2.8.1	Distorção radial simétrica..... 29
2.8.2	Distorção tangente descentrada 31
2.8.3	Distorção de afinidade 33
2.8.4	Cisalhamento (<i>skew</i>)..... 34

2.8.5	Defasagem do ponto principal.....	34
2.8.6	Distância focal.....	35
2.8.6.1	Focal calibrada.....	37
2.9	Calibração da câmera.....	38
2.9.1	Modelo analítico.....	43
2.9.1.1	Modelo de câmera <i>pinhole</i>	43
2.9.1.2	Modelo completo.....	45
2.10	Acurácia e precisão.....	47
2.11	Teste de hipóteses.....	50
3	MATERIAIS E MÉTODOS.....	53
3.1	Área de voo.....	55
3.2	Aeronave e equipamentos embarcados.....	56
3.2.1	IMU.....	57
3.2.2	Receptor GNSS.....	58
3.2.3	Câmeras.....	60
3.2.3.1	Projeto de instalação das câmeras na aeronave.....	62
3.3	Calibração das câmeras.....	65
3.3.1	Construção do campo de calibração.....	67
3.3.2	Posicionamento das câmeras para foto no campo.....	71
3.3.3	Identificação dos parâmetros de distorção geométrica.....	74
3.4	Sincronismo de tempo.....	75
3.5	Determinação de <i>offsets</i>	81
3.5.1	Nivelamento.....	82
3.5.2	Levantamento de coordenadas na aeronave.....	84
3.5.3	Ressecção espacial a partir da placa nivelada.....	86
3.5.4	Correção da declinação magnética.....	89
3.6	Extração dos pontos nas imagens aéreas.....	89

3.7	Levantamento de campo	94
3.7.1	Ponto base.....	94
3.7.2	Pontos de interesse	96
3.8	Ressecção espacial.....	97
4	RESULTADOS	101
4.1	Parâmetros de distorção identificados na calibração das câmeras	101
4.1.1	Influência das distorções no erro em solo	113
4.1.2	Correção das distorções geométricas da imagem	114
4.1.3	Aplicação do método de calibração em Sensoriamento Remoto	118
4.2	Defasagens de tempo	118
4.3	<i>Offsets</i> encontrados.....	119
4.4	Aplicação do sincronismo e de <i>offsets</i> em Sensoriamento Remoto	120
4.5	Posição e orientação da aeronave obtidos por ressecção espacial.....	121
4.5.1	Erros sistemáticos	126
4.5.2	Influência da altura nos erros	127
4.5.3	Influência da inclinação nos erros	133
4.5.4	Nadir vs off-nadir.....	135
4.5.5	GoPRO vs Nikon	137
4.5.6	Com vs sem correção das distorções	139
4.6	Aceitabilidade dos resultados para navegação aérea.....	144
4.6.1	Posição.....	144
4.6.2	Orientação angular.....	147
5	CONCLUSÕES	149
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	153
	APÊNDICE A – PLANEJAMENTO DOS VOOS DE IMAGEAMENTO REALIZADOS NA REGIÃO DO VALE DO PARAÍBA	161

APÊNDICE B – PROJETO DE INSTALAÇÃO DAS CÂMERAS NA AERONAVE	177
APÊNDICE C – CALIBRAÇÃO DA CÂMERA NIKON	193
APÊNDICE D – CALIBRAÇÃO DA CÂMERA GOPRO	203
APÊNDICE E – ILUSTRAÇÃO DA CORREÇÃO GEOMÉTRICA DE IMAGENS AÉREAS E TERRESTRES DA CÂMERA GOPRO	217
APÊNDICE F – CALIBRAÇÃO DA CÂMERA FC330 DO VANT PHANTOM4 NO SOFTWARE PIX4D EM COMPARAÇÃO COM O SOFTWARE CALIBRA	225
APÊNDICE G – DETALHES DO PROCEDIMENTO DE SINCRONISMO.....	243
APÊNDICE H – DETALHES DO AJUSTAMENTO DA POLIGONAL TOPOGRÁFICA	251
APÊNDICE I – RELATÓRIO DA ESTAÇÃO RBMC SJSP, FOTOS E COORDENADAS DOS PONTOS LEVANTADOS EM CAMPO	255
APÊNDICE J – PARÂMETROS DE VOO PARA AS CÂMERAS NIKON E GOPRO	275
APÊNDICE K – GRÁFICOS COM OS ERROS DA RESSECÇÃO ESPACIAL PARA CADA CONDIÇÃO ANALISADA	291
APÊNDICE L – GRÁFICOS COM OS ERROS DA RESSECÇÃO ESPACIAL EM FUNÇÃO DA INCLINAÇÃO LATERAL.....	305

1 INTRODUÇÃO

Veículos aéreos são concebidos em vários tipos para atender diversas finalidades, como transporte, vigilância, resgate, imageamento, combate a incêndio, pulverização agrícola, treinamento, acrobacia, sendo algumas finalidades exclusivamente militares como combate aéreo, ataque, reconhecimento, patrulha, dentre outros (JACKSON, 2015). Com a evolução da tecnologia dos materiais e dos sistemas aviônicos, um novo tipo de veículo surgiu, o Veículo Aéreo Não Tripulado (VANT), também designado por Aeronave Remotamente Pilotada (ARP). Em razão do baixo custo e da capacidade de operação autônoma, os VANTs estão substituindo as aeronaves tripuladas em diversas aplicações e abrindo novas possibilidades de emprego (CASTRO, 2015).

Com a capacidade de embarcar sensores de diversos tipos, as principais aplicações civis dos VANTs são na área de Sensoriamento Remoto, sendo crescente seu uso para mapeamento, suprimindo uma série de necessidades do Sensoriamento Remoto. O voo à baixa altura permite gerar produtos de alta resolução espacial e com baixa influência atmosférica. O baixo custo de operação e a alta disponibilidade permitem voos repetidos com curtos períodos de reposicionamento, possibilitando uma grande resolução temporal das imagens. Ainda, o desenvolvimento exponencial da tecnologia em sensores miniaturizados permite empregar sensores ópticos multiespectrais e hiperespectrais, bem como SAR (*Synthetic Aperture Radar*) e LIDAR (*Light Detection And Ranging*).

As aplicações do mapeamento são diversas, como: monitoramento de culturas agrícolas para identificação de falhas de plantio, pragas e deficiências nutricionais; inventário ambiental e florestal; quantificação de áreas de desmatamento e de queimadas; geração de modelo digital de elevação e curvas de nível; mensuração de corpos de água; cadastro urbano e rural. Outras aplicações que merecem destaque são: inspeção de dutos de petróleo e gás, inspeção de linhas de transmissão de energia elétrica, segurança privada, construção civil, fiscalização ambiental, dentre outras.

Os sensores ópticos geralmente utilizados nos VANTs são câmeras de pequeno formato. As câmeras são classificadas em pequeno, médio e grande formato em função do tamanho do sensor digital ou filme que utilizam. Câmeras com sensores de dimensão até 24x36mm, que

é o padrão *full frame* de 35mm, são classificadas na categoria de pequeno formato. As câmeras com tamanho de sensor entre 24x36mm e 102x107mm são classificadas como médio formato. Acima de 102x107mm são de grande formato (MEISTER, 2015).

Para todas as aeronaves, tripuladas ou não-tripuladas, a determinação da posição geográfica e dos ângulos de atitude é fundamental para sua navegação, sendo utilizados como parâmetros primários na pilotagem e guiamento. Atualmente, a navegação é essencialmente baseada em sensores inerciais *Inertial Measurement Unit* (IMU) integrados a receptores *Global Navigation Satellite System* (GNSS), cuja combinação fornece acurácia suficiente para o posicionamento em tempo real (GREWAL *et al.*, 2007).

As IMUs são constituídas de acelerômetros e girômetros autocontidos e solidários à estrutura da aeronave, possuindo integridade, alta cadência de aquisição e grande taxa de resposta. Os receptores GNSS computam posição e velocidade com base em sinais de micro-ondas que recebem de uma constelação de satélites em órbita terrestre. Existem vários sistemas GNSS, cada qual com segmento espacial administrado por determinado país ou bloco como, por exemplo, o GPS dos EUA, o GLONASS da Rússia, o GALILEO da União Europeia e o BEIDOU/COMPASS da China, dentre outros. O Brasil não possui sistema GNSS próprio (MONICO, 2008).

Os sistemas GNSS são afetados por diversos erros intrínsecos que são conhecidos e podem ser contornados. O problema é que, além desses erros, tais sistemas estão sujeitos a interferências intencionais de terceiros do tipo *jamming* e *spoofing* (MISRA; ENGE, 2011), ou então a indisponibilidades por políticas estratégicas ou de defesa dos países administradores, que podem degradar significativamente ou até inibir o posicionamento.

A interferência do tipo *jamming* é o ato de direcionar intencionalmente energia eletromagnética a um sistema de rádio-frequência para interromper ou desintegrar seu sinal. Os *jammers* de GNSS emitem interferência na mesma banda de frequência utilizada pelos satélites GNSS, mas com uma potência muito maior, de modo a degradar a relação sinal-ruído no receptor, o que impede a decodificação da informação. Desta forma, o sistema de navegação fica impossibilitado de computar o posicionamento (RÜGAMER; KOWALEWSKI, 2015).

Já a interferência do tipo *spoofing* é a transmissão deliberada de sinais GNSS falsos com a intenção de induzir um receptor GNSS a computar informações erradas de posição, velocidade e tempo. Com isso, o sistema de navegação de um veículo pode ser enganado direcionando-o para uma localização ou rota diferente da planejada (RÜGAMER; KOWALEWSKI, 2015).

Um incidente notório de *spoofing* ocorreu em 4 de dezembro de 2011, quando um VANT norte-americano *Lockheed Martin RQ-170 Sentinel* sofreu interferência em voo de uma unidade de guerra eletrônica das forças iranianas, que conduziu a aeronave para pouso no nordeste do Irã. O governo iraniano assumiu publicamente a captura realizada em segurança, embora relatórios iniciais de fontes de notícias ocidentais anunciaram que ele tinha sido "derrubado". O governo dos Estados Unidos inicialmente negou a captura, mas depois o presidente Obama reconheceu que se tratava de um VANT dos EUA e que havia sido capturado, pedindo que o Irã o devolvesse (PETERSON; FARAMARZI, 2011).

A preocupação com esse tipo de interferência é atual e cada vez maior, pois deixa vulnerável qualquer tipo de veículo, inclusive os civis. Em junho de 2017 a Administração Marítima dos EUA apresentou um relatório de segurança anunciando que, pelo menos, 20 embarcações no mar negro tiveram problemas com os receptores GPS, que fizeram a navegação desviar mais de 30 km, sugerindo que foram causados por interferência do tipo *spoofing* (HAMBLING, 2017). Ainda, a conceituada revista *Inside GNSS*, da comunidade norte-americana de engenharia na área de GNSS, trouxe na edição de maio/junho de 2017 matéria de capa sobre *spoofing*, discutindo possíveis meios de detecção e mitigação desse tipo de interferência (DAMPF *et al.*, 2017).

A navegação baseada apenas nos sistemas inerciais usuais sofre grande degradação de acurácia ao longo do tempo, por acumular erros nos processos de integração das acelerações (FARREL; BARTH, 1999). A utilização de inerciais com maior acurácia implicaria em altos custos, sendo inviável para veículos de médio e pequeno porte. Há necessidade, portanto, de uma fonte de informação confiável que possa ser integrada ao inercial para o posicionamento, sobretudo em veículos destinados ao cumprimento de missões estratégicas, as quais não podem ser vulneráveis a tais interferências.

Neste contexto, o posicionamento de aeronaves por meio de imagens do terreno, obtidas com câmeras embarcadas, é uma alternativa viável ao GNSS nos sistemas de navegação. Conhecendo-se as coordenadas de, pelo menos, três pontos no solo, identificados na imagem, é possível determinar a posição e a orientação espacial da aeronave. Este processo de determinação é denominado ressecção espacial e é baseado nas equações de colinearidade, já consagradas na área de fotogrametria (MCGLONE *et al.*, 2004). Para fins de navegação, esses pontos têm de ser identificados em tempo real nas imagens aéreas, utilizando técnicas computacionais de reconhecimento automático.

As câmeras geralmente são fixadas solidárias aos eixos da aeronave, ou seja, nem sempre é utilizada plataforma com sistema gimbal giroestabilizado para manter a câmera sempre apontada com visada nadir. O gimbal é um conjunto de suportes articulados, montados um internamente ao outro com eixos ortogonais, que permite a rotação de uma estrutura externa sem movimentar a interna (RAJESH; KAVITHA, 2015).

Nas situações sem gimbal como, por exemplo, dos VANTs Echar 20B da fabricante Xrobots e do eBee da Sensefly, a posição horizontal da aeronave a partir imagem não pode ser obtida simplesmente tomando-se a coordenada do ponto que aparece no pixel central da imagem. Isso porque a aeronave, nos trechos de subida, descida e em curvas, apresenta ângulos de arfagem (*pitch*) e de rolamento (*roll*) significativos, fazendo a câmera capturar imagem de uma região afastada da vertical, ou seja, fora do nadir. O mesmo se aplica aos trechos de cruzeiro em que a aeronave é susceptível a rajadas de vento e turbulências. Assim, a determinação da posição da aeronave tem que ser feita, obrigatoriamente, por ressecção espacial.

No Brasil, a Estratégia Nacional de Defesa (MD, 2012) prevê independência tecnológica no setor aeroespacial e, alinhadas com tal política nesse tema, existem linhas de pesquisa em várias instituições para a prova de conceito da navegação de veículos aéreos usando técnicas de reconhecimento automático de feições do terreno em imagens para gerar informações de posicionamento. Algumas das instituições são: o Instituto de Estudos Avançados (IEAv), o Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) e a Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG).

Diversas abordagens já foram desenvolvidas e testadas, como o reconhecimento automático de marcos (FILHO, 2016) e o casamento de padrões por detecção de bordas ou identificação de pontos característicos (SILVA, 2016; SILVA, 2015). Estas técnicas dependem da definição de marcos-padrão de interesse ou do conhecimento prévio de uma imagem georreferenciada para comparação. Se estes não estiverem disponíveis, a técnica que pode ser utilizada é a odometria visual, em que a navegação é realizada por casamento de imagens sucessivas, bastando ser conhecida a posição e orientação da imagem inicial (CANHOTO, 2009). Vale ressaltar, no entanto, que a odometria visual está sujeita a uma considerável propagação de erros.

Este trabalho está inserido na linha de pesquisa do IEAv e tem foco na avaliação da acurácia do posicionamento e da orientação espacial, fundamental em qualquer sistema de navegação, ciente de que diversos são os fatores que causam erros no processo de ressecção espacial. Neste trabalho é abordada essencialmente a influência das distorções geométricas de câmeras de pequeno formato nos resultados da ressecção, empregando tanto imagens sem correção quanto com correção dos parâmetros de distorção, determinados na calibração da câmera.

A calibração é um procedimento experimental complexo, realizado em locais especializados, que só se justifica em aplicações que exigem qualidade geométrica das imagens como, por exemplo, em aerolevantamentos para mapeamento, em que geralmente são utilizadas câmeras de médio e grande formato, sendo mandatória a calibração (ANDRADE, 2003), devendo ser repetida periodicamente devido às vibrações a que as câmeras estão sujeitas no voo (SANTOS *et al*, 2004). No entanto, as câmeras de pequeno formato embarcadas nos VANTs para mapeamento, em crescente uso, raramente passam por uma calibração prévia. Isso porque os *softwares* fotogramétricos fazem, durante a geração do ortofotomosaico e do modelo digital de elevação, a determinação dos parâmetros de distorção da câmera, processo conhecido como *on the job calibration*, resultando em um produto cartográfico que atende ao requisito de acurácia da maioria das aplicações (SILVA *et al.*, 2014; ANTUNES; HOLLATZ, 2015).

Para aplicação em navegação, a calibração da câmera é uma etapa importante. No entanto, durante a navegação, o processamento em tempo real deve ocorrer com alto desempenho, sendo desejável o mínimo de operações. Os parâmetros para correção das distorções acrescentam mais cálculos nos algoritmos de posicionamento, sem contar o trabalho prévio da calibração. Nesse contexto, a utilização de uma câmera sem calibração pode ser viável desde que a acurácia na determinação de posição possa ser conhecida e que esteja dentro da tolerância aceitável para a navegação. Este é um tópico objeto de investigação deste trabalho.

Os requisitos de acurácia posicional para navegação aérea são definidos pela ICAO (*International Civil Aviation Organization*) em função das regras de tráfego aéreo. Quando uma aeronave navega por instrumentos – IFR (*Instrument Flight Rules*) e sem fazer uso da infraestrutura convencional de auxílios em solo, como o NDB (*Non-Directional Beacon*) e o VOR (*Very high frequency Omnidirectional Range*), dentre outros, trata-se de uma navegação baseada unicamente em equipamentos embarcados, denominada PBN (*Performance Based Navigation*) (ICAO, 2008).

Em uma navegação PBN os equipamentos de navegação da aeronave devem atender não só aos critérios de acurácia, mas também de integridade, continuidade e confiabilidade. Os valores de acurácia posicional dependem da fase do voo, sendo mais restritivos nas fases terminais, principalmente nos pousos de precisão. Os requisitos de acurácia para os ângulos de atitude são definidos na Norma DO-334 (RTCA, 2012), adotada pela *Federal Aviation Administration* (FAA). Todos estes requisitos de acurácia, posicional e angular, são utilizados neste trabalho como referência para avaliação da aplicabilidade dos resultados da ressecção espacial na navegação aérea.

1.1 Objetivos

O objetivo principal neste trabalho foi avaliar a acurácia dos parâmetros de navegação (posição e orientação espacial) de uma aeronave, determinados por meio de imagens obtidas com câmeras de pequeno formato embarcadas. Em outras palavras, consistiu na avaliação dos erros do processo de ressecção espacial, utilizado na determinação destes parâmetros de navegação, erros estes medidos com base em uma referência acurada.

Além do objetivo principal, foi analisada ainda a influência de diversos fatores nos erros dos parâmetros de navegação e feitas algumas avaliações, que consistiram os objetivos secundários, detalhados nos tópicos a seguir.

- Computar a contribuição dos vários fatores de distorção geométrica das câmeras no erro por pixel em metros no solo, considerando uma imagem obtida em condição de visada nadir a uma determinada altura. Através desta análise de contribuição, acredita-se ser possível a identificação do fator mais crítico.
- Verificar se a altura de voo influencia os erros dos parâmetros de navegação obtidos por ressecção e se há relação de dependência desses erros com a altura.
- Analisar a influência da condição de visada off-nadir das câmeras nos erros dos parâmetros e verificar se existe relação de dependência destes erros com o ângulo. A condição off-nadir ocorre quando a aeronave realiza curvas ou adquire atitudes em subida ou descida.
- Verificar se a câmera com FOV (*Field Of View*) grande têm algum diferencial de acurácia na determinação dos parâmetros de navegação em relação à câmera de FOV pequeno, quando ambas têm suas distorções corrigidas. Câmeras de FOV grande são preferíveis para navegação, pois registram uma cena maior, oferecendo maior possibilidade de identificação de pontos no solo.
- Verificar o quanto a calibração das câmeras, isto é, a correção das distorções geométricas na imagem melhora os erros dos parâmetros de navegação.
- Verificar se os requisitos de acurácia existentes para navegação aérea são cumpridos nas diversas fases de voo. Os resultados desta verificação permitem julgar a aceitabilidade das câmeras e do método utilizado na obtenção dos parâmetros de navegação.
- Avaliar se a câmera sem calibração permite obter parâmetros de navegação com erros aceitáveis. Uma câmera sem calibração, além de poupar o trabalho prévio da determinação dos parâmetros de distorção, reduz os cálculos nos algoritmos de posicionamento, favorecendo o desempenho nos processamentos em tempo real.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

Para o cômputo dos parâmetros de navegação da aeronave, ou seja, da sua posição e da orientação espacial angular, a partir de cada imagem gerada em voo, foi utilizado o procedimento já consagrado na área de fotogrametria, chamado de ressecção espacial (MCGLONE *et al.*, 2004). A ressecção espacial consiste na resolução de um sistema de equações não-lineares, as conhecidas equações de colinearidade, que representam o modelo que relaciona os pontos no terreno com os correspondentes na imagem. São necessários pelo menos 3 pontos no terreno para constituir um sistema de 6 equações a 6 incógnitas.

A resolução do sistema de equações é feita usando-se métodos numéricos, tais como o de Gauss-Newton e o de Levenberg-Marquardt, dentre vários outros existentes. Nestes casos, é realizada uma otimização, também denominada de ajustamento, pelo critério dos mínimos quadrados. Isso deve ser feito principalmente quando o sistema de equações for redundante, ou seja, se tiver mais equações que incógnitas, situação que ocorre quando existe mais de três pontos do terreno, (GHILANI; WOLF, 2006; CRISTINA; CUNHA, 2000).

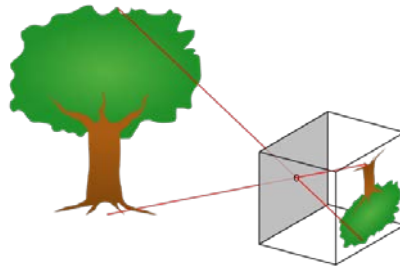
Os modelos de distorção geométrica das câmeras também já são conhecidos na área de Visão Computacional. Contêm os parâmetros de distorção e são utilizados no procedimento de calibração. A determinação destes parâmetros também é feita por meio da resolução de um sistema de equações não-lineares, utilizando-se superabundância de pontos para se fazer uma otimização ou ajustamento (CLARKE; FRYER, 1998). A base teórica para todos estes modelos, métodos e procedimentos está detalhada nas Seções a seguir.

2.1 Princípio da colinearidade

O princípio da colinearidade dos raios de luz, ao adentrarem uma câmera, explica o processo de formação da imagem. Este princípio advém do modelo mais simples de câmera, também conhecido como *pinhole*, isento de distorções, sendo representativo da câmera escura com pequeno orifício, ilustrada na Figura 2.1 (MIKHAIL *et al.*, 2001).

Nesta figura pode-se notar a colinearidade dos pontos do objeto com os correspondentes na imagem que se forma no plano focal, através do orifício, também chamado de centro de perspectiva (CP).

Figura 2.1 – Formação da imagem em uma câmera escura de orifício, representada pelo modelo denominado *pinhole*.

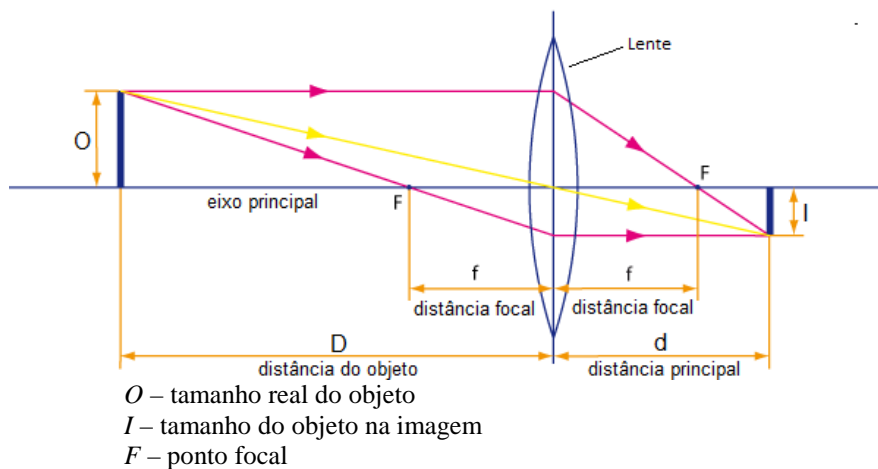


Fonte: Produção do Autor.

Em uma câmera real, utilizam-se lentes no centro de perspectiva e os raios de luz passam a obedecer à equação da lente, conforme a Equação 2.1 (ANDRADE, 2003), com os parâmetros ilustrados na Figura 2.2, 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”.

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{D} + \frac{1}{d} \quad (2.1)$$

Figura 2.2 – Elementos de um sensor óptico.



Fonte: Adaptado de Andrade (2003).

Segundo este modelo, quando os objetos estão próximos, situação que ocorre nas câmeras denominadas *close range*, a distância principal é maior que a distância focal e é necessário ajuste de foco para a imagem se formar no plano focal. Já quando os objetos estão suficientemente distantes ($D \gg d$), mais especificamente acima da distância hiperfocal, situação que ocorre para as câmeras aéreas, a imagem forma-se praticamente na distância focal. A distância hiperfocal é a mínima distância que uma câmera com foco no infinito pode ser aproximada do objeto mantendo-se a nitidez de sua imagem (KINGSLAKE, 1951). Depende de vários parâmetros da câmera, sendo da ordem de grandeza de 100 vezes a distância focal. Acima desta distância hiperfocal, a distância principal é considerada igual à distância focal ($d \cong f$), sendo por este motivo também denominada de “constante da câmera” (MIKHAIL *et al.* 2001). Portanto, o modelo da câmera *pinhole* pode ser usado nestas situações.

2.2 Sistemas de referência

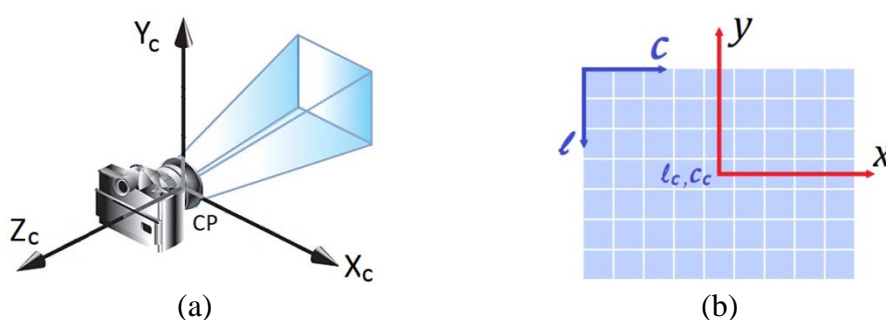
As equações de colinearidade constituem o modelo matemático em que se baseia a ressecção espacial. Relacionam as coordenadas tridimensionais do espaço-objeto com as correspondentes bidimensionais do espaço-imagem, levando em conta a orientação externa da câmera. Não considera a orientação interna, uma vez que esta é definida no processo de calibração da câmera. Desta forma, antes de apresentar as equações de colinearidade, faz-se necessária a definição dos vários sistemas de referência envolvidos bem como as transformações entre eles.

2.2.1 Sistemas da câmera e da imagem

O sistema de referência tridimensional da câmera, Figura 2.3a, tem origem no CP, definido na Seção 2.1. Possui eixo X_c na direção do lado maior do sensor, geralmente retangular, com sentido para direita de quem olha por trás da câmera. Possui eixo Y_c na direção do lado menor do sensor com sentido para cima e eixo Z_c completando um sistema destrógiro, ficando alinhado com o eixo óptico, conforme definido na seção 2.1 (WOLF, 1985).

O sistema de referência bidimensional da imagem, Figura 2.3b, tem origem no pixel extremo superior esquerdo. Possui eixo c na direção das colunas, com sentido para a direita e eixo l na direção das linhas, com sentido para baixo. Outro sistema também utilizado tem origem no pixel central (l_c, c_c) sendo o eixo x na direção da colunas, com sentido para direita e o eixo y na direção das linhas, com sentido para cima, também mostrado na Figura 2.3b.

Figura 2.3 – Sistemas de referência: (a) tridimensional da câmera com origem no CP e (b) bidimensional da imagem com origem no pixel superior esquerdo e no pixel central.

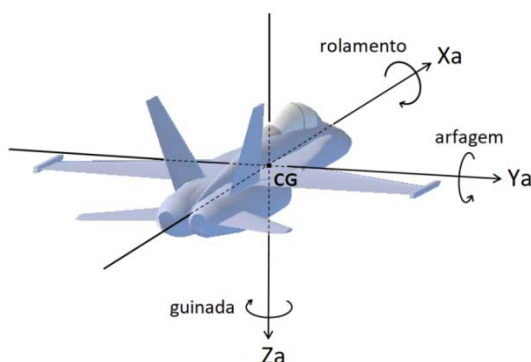


Fonte: Produção do Autor.

2.2.2 Sistema da aeronave

O sistema de referência da aeronave, adotado pelos sistemas de navegação, Figura 2.4, tem origem no Centro de Gravidade (CG). Possui eixo X_a na direção longitudinal, coincidindo com a linha de referência de nivelamento da fuselagem, com sentido para frente. Possui eixo Y_a na direção lateral, paralelo ao plano das asas, com sentido para a asa direita e eixo Z_a completando um sistema destrógiro (FARRELL; BARTH, 1999).

Figura 2.4 – Sistema de referência da aeronave.



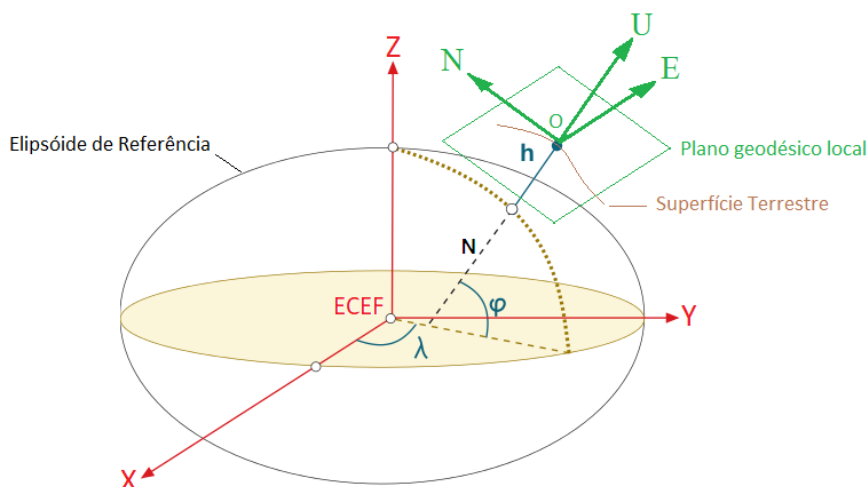
Fonte: Produção do Autor.

Os movimentos da aeronave em torno dos eixos X_a , Y_a e Z_a são denominados, respectivamente, rolamento (*roll*), arfagem (*pitch*) e guinada (*yaw*). A representação destes movimentos também está ilustrada na Figura 2.4.

2.2.3 Sistemas terrestres ECEF, Geodésico e ENU

A representação das coordenadas de um ponto na superfície terrestre pode ser feita por diversos sistemas de referência, dentre eles o ECEF (*Earth-Centered, Earth-Fixed*), o Geodésico e o ENU (*East-North-Up*). O sistema ECEF tem origem no centro de massa da terra. O eixo X localiza-se sobre o plano do equador (latitude 0°) na direção do primeiro meridiano em Greenwich (longitude 0°). O eixo Y também localiza-se sobre o plano do equador, mas com direção para o meridiano com longitude 90° e o eixo Z completando um sistema destrógiro, de forma a apontar para o polo norte (SILVA; SEGANTINE, 2015).

Figura 2.5 – Sistemas de referência terrestres: ECEF, Geodésico e ENU.



X, Y, Z – eixos do sistema ECEF (*Earth-Centered, Earth Fixed*)
 E, N, U – eixos do sistema ENU (*East-North-Up*)
 φ - latitude, λ - longitude
 h – altitude elipsoidal
 N – grande normal

Fonte: Produção do Autor.

O sistema geodésico é baseado em um elipsóide de referência e fornece coordenadas planimétricas angulares para pontos terrestres. A altitude elipsoidal h é a distância do ponto considerado até o elipsóide, segundo a direção normal à superfície. A grande

normal N é a distância da superfície do elipsóide até o plano do equador. A latitude φ é o ângulo entre a direção normal e sua projeção no plano do equador, sendo positivo no hemisfério norte e negativo no sul. A longitude λ é o ângulo medido a partir do primeiro meridiano (Greenwich) à projeção da normal no equador, sendo positivo para leste e negativo para oeste.

O sistema ENU é definido sobre o plano geodésico local, que é perpendicular à direção normal ao elipsóide. Tem origem no ponto considerado da superfície terrestre e possui eixo E na direção leste, eixo N na direção do norte geográfico e eixo U na direção perpendicular ao plano geodésico local, completando um sistema destrógiro (DAL'FORNO *et al.*, 2010). A definição desse plano difere da definição do plano topográfico local feita na Norma Técnica NBR 14166 (ABNT, 1998), pois o topográfico é perpendicular à vertical, coincidente com a direção da gravidade.

2.2.3.1 Transformações entre o sistema Geodésico e o ENU

A transformação das coordenadas geodésicas (λ, φ e h) para as correspondentes no ENU pode ser feita pelo método das translações e rotações na forma direta (DAL'FORNO *et al.*, 2010). Neste método, primeiro são obtidas as coordenadas cartesianas no sistema ECEF, a partir de um *datum* definido, neste caso o SIRGAS2000 (IBGE, 2005), pela Equação 2.2. A transformação da coordenada da origem do sistema ENU é feita por essa mesma Equação.

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (N + h) \cos \varphi \cos \lambda \\ (N + h) \cos \varphi \sin \lambda \\ [N(1 - e^2) + h] \sin \varphi \end{bmatrix} \quad (2.2)$$

onde:

$$N = \frac{a}{\sqrt{1 - e^2 \sin^2 \varphi}}$$

$$e = \sqrt{f \cdot (2 - f)}$$

- a semi-eixo maior do elipsóide do *datum* SIRGAS2000 ($a=6378137\text{m}$)
- f achatamento do elipsóide do *datum* SIRGAS2000 ($f=1/298,257222101$)
- e excentricidade do elipsóide do *datum* SIRGAS2000
- N grande normal

Em seguida, de posse das coordenadas cartesianas no ECEF, são calculadas as coordenadas cartesianas no sistema ENU, conforme Equação 2.3, que consiste de translações e de rotações.

$$\begin{bmatrix} E \\ N \\ U \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\text{sen}\lambda_0 & \text{cos}\lambda_0 & 0 \\ -\text{cos}\lambda_0 \text{sen}\varphi_0 & -\text{sen}\lambda_0 \text{sen}\varphi_0 & \text{cos}\varphi_0 \\ \text{cos}\lambda_0 \text{cos}\varphi_0 & \text{sen}\lambda_0 \text{cos}\varphi_0 & \text{sen}\varphi_0 \end{bmatrix} \left(\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} X_0 \\ Y_0 \\ Z_0 \end{bmatrix} \right) \quad (2.3)$$

onde:

φ_0, λ_0 coordenadas geodésicas planimétricas da origem do sistema ENU
 X_0, Y_0, Z_0 coordenadas cartesianas da origem do sistema ENU no ECEF

Já a obtenção das coordenadas geodésicas a partir das correspondentes no ENU é feita pelo método as translações e rotações na forma inversa (SILVA; SEGANTINE, 2015). Primeiro são determinadas as coordenadas cartesianas do ponto de interesse no sistema ECEF, a partir de suas coordenadas no sistema ENU, conforme Equação 2.4.

$$\left(\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} X_0 \\ Y_0 \\ Z_0 \end{bmatrix} \right) = \begin{bmatrix} -\text{sen}\lambda_0 & -\text{cos}\lambda_0 \text{sen}\varphi_0 & \text{cos}\lambda_0 \text{cos}\varphi_0 \\ \text{cos}\lambda_0 & -\text{sen}\lambda_0 \text{sen}\varphi_0 & \text{sen}\lambda_0 \text{cos}\varphi_0 \\ 0 & \text{cos}\varphi_0 & \text{sen}\varphi_0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E \\ N \\ U \end{bmatrix} \quad (2.4)$$

Em seguida calcula-se o parâmetro θ para cada ponto do terreno, necessário para a determinação da latitude φ e da longitude λ , conforme Equação 2.5. As altitudes são calculadas pela Equação 2.6.

$$\theta = \operatorname{arctg} \left[\frac{Z \cdot a}{(\sqrt{X^2 + Y^2}) \cdot b} \right]$$

$$\varphi = \operatorname{arctg} \left[\frac{Z + e'^2 b \operatorname{sen}^3 \theta}{\sqrt{X^2 + Y^2} - (e^2 a \operatorname{cos}^3 \theta)} \right] \quad (2.5)$$

$$\lambda = \operatorname{arctg} \left[\frac{Y}{X} \right]$$

$$h = \frac{\sqrt{X^2 + Y^2}}{\operatorname{cos} \varphi} - N \quad (2.6)$$

onde:

$$b = a\sqrt{1 - e^2}$$

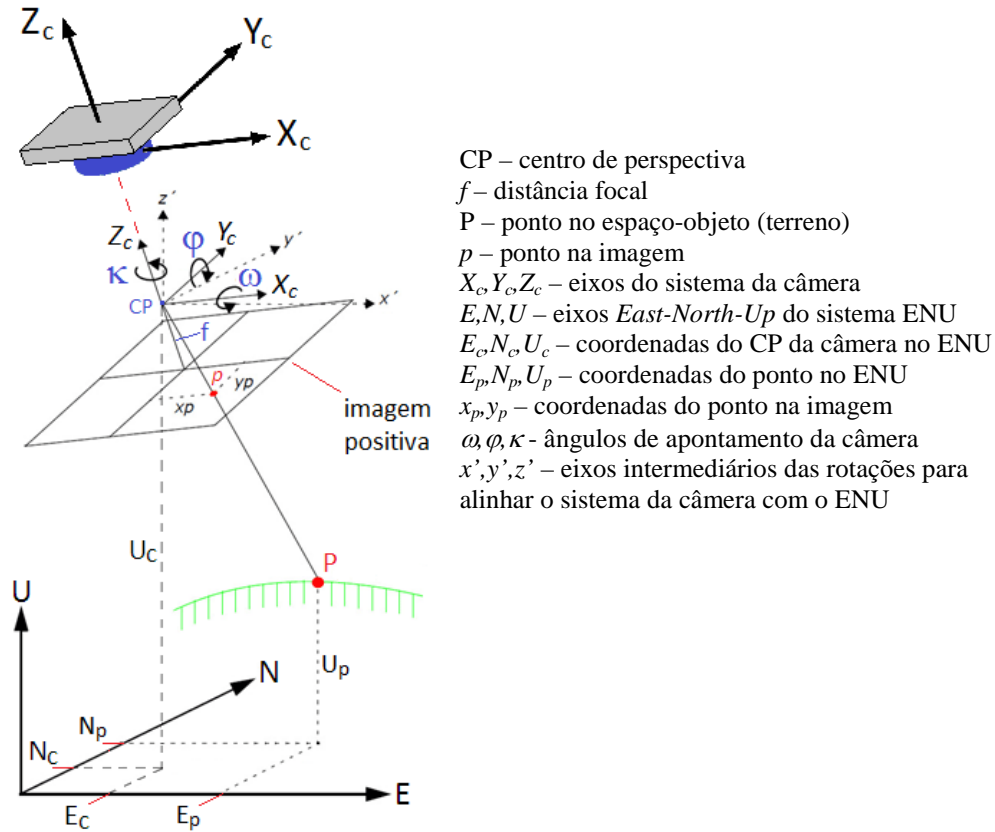
$$e'^2 = \frac{a^2 - b^2}{b^2}$$

- a semi-eixo maior do elipsóide do *datum* SIRGAS2000 (a=6378137m)
- b semi-eixo menor do elipsóide do *datum* SIRGAS2000 (b=6356752,3m)
- e excentricidade do elipsóide do *datum* SIRGAS2000
- e' segunda excentricidade do elipsóide do *datum* SIRGAS2000
- N grande normal

2.3 Orientação externa da câmera

A orientação externa da câmera, com relação ao sistema terrestre ENU, é definida por sua posição (E_c, N_c, U_c) e pelos ângulos de apontamento *omega* (ω), *phi* (φ) e *kappa* (κ), sendo definidos como rotações positivas em torno dos eixos X_c , Y_c e Z_c , respectivamente, conforme convenção utilizada na fotogrametria (WOLF, 1985) e mostrada na Figura 2.6. Nesta figura estão representados o corpo da câmera, com os eixos do seu sistema de referência, e o plano da imagem positiva, em que é mostrada a localização do ponto p correspondente ao ponto P no terreno.

Figura 2.6 – Orientação externa da câmera em relação ao sistema terrestre ENU.



Fonte: Adaptado pelo Autor de Wolf (1985).

2.3.1 Transformação do ENU para o sistema da câmera

A transformação de coordenadas de pontos representados no sistema de referência terrestre ENU para o sistema tridimensional da câmera é feita por meio dos seus parâmetros de orientação externa. Basicamente, trata-se de uma mudança de referencial por meio de translações (matriz T) e de rotações (matriz R), conforme a Equação 2.7. A Equação 2.8 é equivalente à Equação 2.7.

$$\begin{bmatrix} X_c \\ Y_c \\ Z_c \end{bmatrix} = [R_{3 \times 3} \quad T_{3 \times 1}] \begin{bmatrix} E \\ N \\ U \\ 1 \end{bmatrix}, \text{ onde } T = -R \begin{bmatrix} E_c \\ N_c \\ U_c \end{bmatrix} \quad (2.7)$$

$$\begin{bmatrix} X_c \\ Y_c \\ Z_c \end{bmatrix} = R \begin{bmatrix} E - E_c \\ N - N_c \\ U - U_c \end{bmatrix} \quad (2.8)$$

Para efetuar corretamente a mudança de referencial, as rotações devem ser realizadas numa dada sequência. Isto é, efetua-se primeiro a rotação *omega*, depois *phi* e por último *kappa*, conforme Equação 2.9, resultando na matriz de rotação aqui designada por *C* (MIKHAIL *et al.*, 2001). A transformação inversa, ou seja, para se obter no ENU as coordenadas representadas no sistema da câmera, pode ser feita pela transposta da matriz de rotação (C^T), pois ela tem a propriedade de ser ortonormal, ou seja, $C^{-1} = C^T$.

$$C = R_\kappa R_\phi R_\omega = \begin{bmatrix} \cos\phi \cos\kappa & \cos\omega \operatorname{sen}\kappa + \operatorname{sen}\omega \operatorname{sen}\phi \cos\kappa & \operatorname{sen}\omega \operatorname{sen}\kappa - \cos\omega \operatorname{sen}\phi \cos\kappa \\ -\cos\phi \operatorname{sen}\kappa & \cos\omega \cos\kappa - \operatorname{sen}\omega \operatorname{sen}\phi \operatorname{sen}\kappa & \operatorname{sen}\omega \cos\kappa + \cos\omega \operatorname{sen}\phi \operatorname{sen}\kappa \\ \operatorname{sen}\phi & -\operatorname{sen}\omega \cos\phi & \cos\omega \cos\phi \end{bmatrix} \quad (2.9)$$

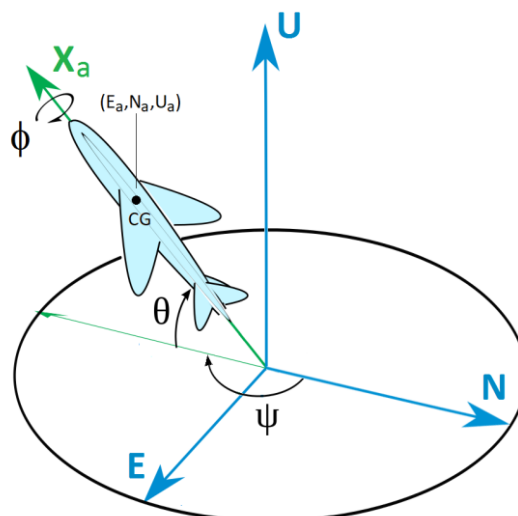
onde:

$$R_\omega = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\omega & \operatorname{sen}\omega \\ 0 & -\operatorname{sen}\omega & \cos\omega \end{bmatrix} \quad R_\phi = \begin{bmatrix} \cos\phi & 0 & -\operatorname{sen}\phi \\ 0 & 1 & 0 \\ \operatorname{sen}\phi & 0 & \cos\phi \end{bmatrix} \quad R_\kappa = \begin{bmatrix} \cos\kappa & \operatorname{sen}\kappa & 0 \\ -\operatorname{sen}\kappa & \cos\kappa & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

2.4 Orientação externa da aeronave

A orientação externa da aeronave, com relação ao sistema terrestre ENU, é definida por sua posição (E_a, N_a, U_a) e pelos ângulos de rolamento ϕ , arfagem θ e proa ψ . Estes ângulos são definidos como rotações positivas em torno dos eixos X_a , Y_a e Z_a , respectivamente, conforme convenção utilizada em aeronáutica (ETKIN; REID, 1996) e mostrada na Figura 2.7. O ângulo ψ frequentemente é chamado de guinada (*yaw*) referindo-se ao movimento em torno do eixo Z_a , mas conceitualmente trata-se da proa ou azimute, ângulo que a projeção do eixo longitudinal da aeronave no plano topográfico local faz em relação ao norte geográfico. Ainda, quando a determinação de proa na aeronave é feita por magnetômetro ou bússola, deve ser corrigida pela declinação magnética.

Figura 2.7 – Orientação externa da aeronave em relação ao sistema terrestre ENU.



ϕ - ângulo de rolamento (*roll angle*)
 θ - ângulo de argafem (*pitch angle*)
 ψ - proa (*heading*) ou azimute geográfico
 X_a - eixo longitudinal do sistema da aeronave
 E, N, U - eixos *East-North-Up* do sistema ENU
 E_a, N_a, U_a - coordenadas do CG da aeronave no sistema ENU

Fonte: Produção do Autor.

2.4.1 Transformação do ENU para o sistema da aeronave

A transformação de coordenadas de pontos representados no sistema de referência terrestre ENU para o sistema do corpo da aeronave é feita por meio dos seus parâmetros de orientação externa. Analogamente à transformação da câmera, Seção 2.3.1, trata-se de uma mudança de referencial por meio de translações e rotações, de acordo com a Equação 2.10.

$$\begin{bmatrix} X_a \\ Y_a \\ Z_a \end{bmatrix} = R \begin{bmatrix} E - E_a \\ N - N_a \\ U - U_a \end{bmatrix} \quad (2.10)$$

Para efetuar corretamente a transformação, as rotações devem ser realizadas numa dada sequência. Isto é, efetua-se primeiro a rotação ψ , depois θ e por último ϕ , conforme Equação 2.11, resultando na matriz de rotação aqui designada por A (FARREL; BARTH, 1998). A transformação inversa, geralmente usada em navegação, pode ser feita pela matriz transposta (A^T), por ela ser ortonormal.

$$A = R_\phi R_\theta R_\psi = \begin{bmatrix} \sin\psi \cos\theta & \cos\psi \cos\theta & \sin\theta \\ \sin\psi \sin\theta \sin\phi + \cos\psi \cos\phi & \cos\psi \sin\theta \sin\phi - \sin\psi \cos\phi & -\cos\theta \sin\phi \\ \sin\psi \sin\theta \cos\phi - \cos\psi \sin\phi & \cos\psi \sin\theta \cos\phi + \sin\psi \sin\phi & -\cos\theta \cos\phi \end{bmatrix} \quad (2.11)$$

onde:

$$R_\psi = \begin{bmatrix} -\sin\psi & -\cos\psi & 0 \\ \cos\psi & -\sin\psi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad R_\theta = \begin{bmatrix} -\cos\theta & 0 & \sin\theta \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin\theta & 0 & -\cos\theta \end{bmatrix} \quad R_\phi = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\phi & \sin\phi \\ 0 & -\sin\phi & \cos\phi \end{bmatrix}$$

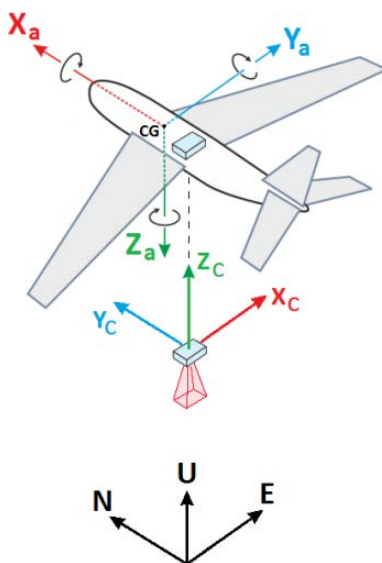
2.5 Integração da câmera à aeronave

Os dados de navegação fornecidos pela IMU de uma aeronave ou VANT são medidos em relação ao sistema de referência do corpo da aeronave, segundo a convenção aeronáutica, apresentada na Seção 2.4. No entanto, os modelos que representam a imagem utilizam os dados no sistema de referência da câmera, segundo a convenção de fotogrametria, apresentada na Seção 2.3.

Mesmo instalando a câmera sem *offsets* angulares em relação aos eixos da aeronave, os eixos da câmera não ficam correspondentes, como pode ser visto na Figura 2.8. Assim, a orientação externa da câmera não pode ser feita utilizando-se diretamente os ângulos da aeronave (ψ, θ, ϕ) no lugar dos ângulos $(\omega, \varphi, \kappa)$ da câmera, pois são completamente distintos, já que o sentido e a sequência das rotações são diferentes. Portanto, os ângulos devem ser compatibilizados. Ainda, há *offsets* angulares da câmera em relação aos eixos da aeronave que inevitavelmente ocorrem na hora de sua instalação.

Para uma perfeita compatibilização entre os ângulos (ψ, θ, ϕ) e $(\omega, \varphi, \kappa)$, as defasagens angulares da câmera relativas à aeronave, que são decorrentes do seu processo de instalação, devem ser determinadas. Um procedimento que pode ser utilizado nesta determinação é o baseado em um método que exige o nivelamento da aeronave e de uma placa de referência inserida no campo de visão da câmera. Este método está descrito na Seção 3.5.

Figura 2.8 – Eixos do sistema de referência da câmera em relação aos eixos do sistema da aeronave, quando instalada sem *offsets* angulares.



Fonte: Produção do Autor.

2.5.1 Compatibilização do sistema da câmera com o da aeronave

A transformação de coordenadas do sistema terrestre ENU para o sistema da câmera, utilizando diretamente os ângulos da aeronave para orientação externa da câmera, pode ser feita alterando-se a matriz de rotação C , apresentada na Seção 2.3.1. Esta nova matriz contém os ângulos da aeronave ao invés dos da câmera, passando a ser denominada C_a , de acordo com a Equação 2.12.

$$\begin{bmatrix} X_c \\ Y_c \\ Z_c \end{bmatrix} = C_a \begin{bmatrix} E - E_c \\ N - N_c \\ U - U_c \end{bmatrix} \quad (2.12)$$

onde:

$$C_a = \begin{bmatrix} \text{sen} \psi \text{sen} \theta \text{sen} \phi + \text{cos} \psi \text{cos} \phi & \text{cos} \psi \text{sen} \theta \text{sen} \phi - \text{sen} \psi \text{cos} \phi & -\text{cos} \theta \text{sen} \phi \\ \text{sen} \psi \text{cos} \theta & \text{cos} \psi \text{cos} \theta & \text{sen} \theta \\ -\text{sen} \psi \text{sen} \theta \text{cos} \phi + \text{cos} \psi \text{sen} \phi & -\text{cos} \psi \text{sen} \theta \text{cos} \phi - \text{sen} \psi \text{sen} \phi & \text{cos} \theta \text{cos} \phi \end{bmatrix}$$

Os elementos c_{aij} da matriz C_a , onde i é a linha e j a coluna ($1 \leq i, j \leq 3$), foram escritos em função dos elementos da matriz de rotação A do sistema aeronáutico, apresentada na Seção 2.4.1, onde a_{ij} é o elemento da linha i e coluna j ($1 \leq i, j \leq 3$). A correspondência

dos elementos da matriz C_a com os da matriz A foi feita com base nos sentidos dos eixos definidos em cada sistema e está mostrada na Equação 2.13.

$$\begin{bmatrix} c_{a11} & c_{a12} & c_{a13} \\ c_{a21} & c_{a22} & c_{a23} \\ c_{a31} & c_{a32} & c_{a33} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ -a_{31} & -a_{32} & -a_{33} \end{bmatrix} \quad (2.13)$$

2.5.2 Conversão entre os ângulos (ψ, θ, ϕ) e $(\omega, \varphi, \kappa)$

A compatibilização mostrada na Seção 2.5.1 não atende, por exemplo, a exigência de *softwares* que geram ortofotomosaico e modelo digital de elevação a partir de imagens aéreas. Nestes *softwares*, a orientação externa da câmera deve ser fornecida segundo a convenção da fotogrametria, ou seja, os ângulos $(\omega, \varphi, \kappa)$. Neste caso, é necessário fazer a conversão dos ângulos da aeronave para os da convenção fotogramétrica. Os ângulos são completamente diferentes, pois têm sentidos e sequências de rotação distintas. Assim, não basta trocar os sinais, como alguns usuários sugerem

O desenvolvimento matemático para a conversão é feita considerando a correspondência entre os eixos dos sistemas como mostrado na Equação 2.14. Dessa forma, a correspondência entre os elementos c_{ij} da matriz de rotação C , definida na Seção 2.3.1, e os elementos a_{ij} da matriz A , definida na Seção 2.4.1, fica como mostrada na Equação 2.15.

$$\begin{bmatrix} X_c \\ Y_c \\ Z_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_a \\ Y_a \\ -Z_a \end{bmatrix} \quad (2.14)$$

$$\begin{bmatrix} c_{11} & c_{12} & c_{13} \\ c_{21} & c_{22} & c_{23} \\ c_{31} & c_{32} & c_{33} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ -a_{31} & -a_{32} & -a_{33} \end{bmatrix} \quad (2.15)$$

Os elementos a_{ij} possuem implícitos os ângulos (ψ, θ, ϕ) da aeronave e, quando empregados na Equação 2.16, fornecem os ângulos da convenção da fotogrametria $(\omega, \varphi, \kappa)$. Da forma inversa, uma vez conhecidos estes ângulos da convenção fotogramétrica, é possível convertê-los para os ângulos da convenção aeronáutica, utilizando a Equação 2.17.

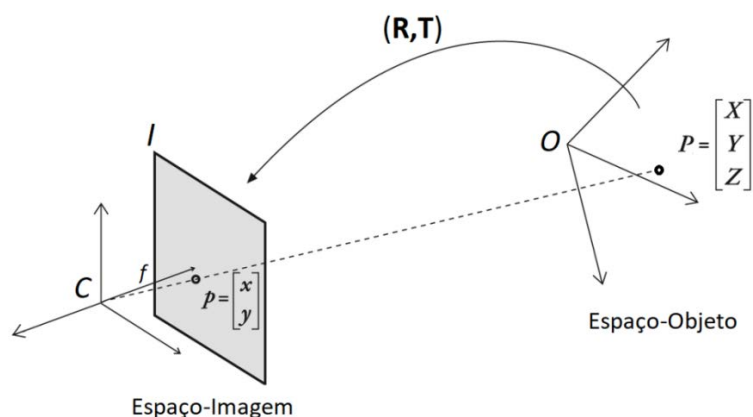
$$\left\{ \begin{array}{l} \varphi = \arctg \left(-a_{31} / \sqrt{a_{32}^2 + a_{33}^2} \right) \\ \omega = \arctg \left(\frac{a_{32}}{\cos \varphi} / \frac{-a_{33}}{\cos \varphi} \right) \\ \kappa = \arctg \left(\frac{-a_{11}}{\cos \varphi} / \frac{a_{21}}{\cos \varphi} \right) \end{array} \right. \quad (2.16)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \theta = \arctg \left(c_{23} / \sqrt{c_{13}^2 + c_{33}^2} \right) \\ \phi = \arctg \left(\frac{-c_{13}}{\cos \theta} / \frac{c_{33}}{\cos \theta} \right) \\ \psi = \arctg \left(\frac{c_{21}}{\cos \theta} / \frac{c_{22}}{\cos \theta} \right) \end{array} \right. \quad (2.17)$$

2.6 Equações de colinearidade

As equações de colinearidade relacionam as coordenadas tridimensionais do espaço-objeto com as correspondentes bidimensionais do espaço-imagem, pelo princípio da colinearidade, apresentado na Seção 2.1. Para fazer este relacionamento, estas equações consideram a localização da câmera e seus ângulos de apontamento, bem como a distância focal, não considerando as distorções geométricas internas da câmera, conforme ilustrado na Figura 2.9. Para se chegar às equações de colinearidade, deve ser realizada, além da mudança de referencial com translações T e rotações R apresentada na Seção 2.3.1, uma transformação homográfica com fator de escala (MCGLONE *et al.*, 2004).

Figura 2.9 – Mudança de referencial do sistema do objeto para o da imagem.



- C – sistema de referência da câmera
 I – sistema de referência da imagem
 O – sistema de referência do objeto que, para a superfície terrestre, é o ENU
 f – distância focal
 R – matriz de rotação
 T – matriz de translação
 P – ponto no espaço objeto
 X, Y, Z – coordenadas do ponto P no sistema do objeto
 p – ponto correspondente a P no espaço-imagem
 x, y – coordenadas do ponto p no sistema da imagem

Fonte: Produção do Autor.

Todos os pontos representados no sistema de referência do objeto, que neste estudo é o sistema terrestre ENU, podem ser representados no sistema bidimensional da imagem, pelo princípio da colinearidade. Para objetos suficientemente distantes da câmera, conforme discutido na Seção 2.1, a imagem forma-se no plano focal, ou seja, a coordenada Z_c de todos os pontos no sistema da câmera é igual à distância focal f . Nesta correspondência, o modelo considerado ainda é o da câmera *pinhole*, ou seja, sem distorções geométricas. Estas distorções são incluídas após processo de calibração, cujo embasamento matemático está apresentado na Seção 2.9.1.

Desta maneira, a Equação 2.8 pode ser reescrita na forma da Equação 2.18, onde o parâmetro λ é um fator de proporcionalidade, relacionado à escala homográfica.

$$\lambda \begin{bmatrix} x \\ y \\ -f \end{bmatrix} = R \begin{bmatrix} E - E_c \\ N - N_c \\ U - U_c \end{bmatrix} \quad (2.18)$$

Dividindo-se a primeira e a segunda linha da Equação 2.18 pela terceira linha, obtêm-se as chamadas equações de colinearidade na forma clássica, Equações 2.19, (MIKHAIL *et al.*, 2001), que permitem obter as coordenadas x e y na imagem correspondentes às coordenadas no sistema ENU de cada ponto do terreno. Os parâmetros r_{ij} ($1 \leq i, j \leq 3$) são os elementos da matriz de rotação R , onde estão implícitos os ângulos de apontamento da câmera. Os termos E_c, N_c e U_c são as coordenadas da câmera e f a distância focal.

$$\begin{aligned} x &= -f \frac{r_{11}(E - E_c) + r_{12}(N - N_c) + r_{13}(U - U_c)}{r_{31}(E - E_c) + r_{32}(N - N_c) + r_{33}(U - U_c)} \\ y &= -f \frac{r_{21}(E - E_c) + r_{22}(N - N_c) + r_{23}(U - U_c)}{r_{31}(E - E_c) + r_{32}(N - N_c) + r_{33}(U - U_c)} \end{aligned} \quad (2.19)$$

Outra maneira de apresentar estas equações é na forma inversa, a partir da Equação 2.18 invertida, em que, onde a matriz transposta é igual à inversa ($R^T = R^{-1}$) pela propriedade de ela ser ortogonal, Equação 2.20.

$$\begin{bmatrix} E - E_c \\ N - N_c \\ U - U_c \end{bmatrix} = \lambda R^T \begin{bmatrix} x \\ y \\ -f \end{bmatrix} \quad (2.20)$$

Da mesma forma, dividindo-se a primeira e segunda linha da Equação 2.20 pela terceira linha, obtêm-se as Equações 2.21 de colinearidade inversa (MIKHAIL *et al.*, 2001).

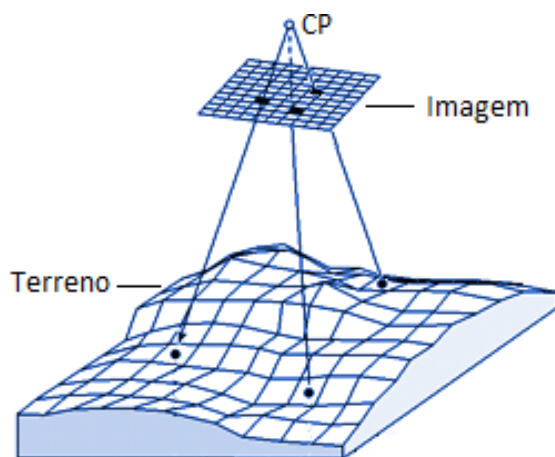
$$\begin{aligned} E - E_c &= (U - U_c) \frac{r_{11} \cdot x + r_{21} \cdot y + r_{31} \cdot (-f)}{r_{13} \cdot x + r_{23} \cdot y + r_{33} \cdot (-f)} \\ N - N_c &= (U - U_c) \frac{r_{12} \cdot x + r_{22} \cdot y + r_{32} \cdot (-f)}{r_{13} \cdot x + r_{23} \cdot y + r_{33} \cdot (-f)} \end{aligned} \quad (2.21)$$

2.7 Ressecção espacial

A ressecção espacial é um processo, já consagrado na área de fotogrametria, utilizado para se obter a posição (E_c, N_c, U_c) e o apontamento $(\omega, \varphi, \kappa)$ da câmera, uma vez conhecidas as coordenadas de M pontos no solo (E_m, N_m, U_m) , $m \in \{1, \dots, M\}$, e as

coordenadas correspondentes na imagem (x_m, y_m) . Esta correspondência entre as coordenadas ocorre pelo princípio da colinearidade e está mostrada na Figura 2.10. Dessa forma, as Equações 2.19 podem ser reescritas na forma apresentada nas Equações 2.22.

Figura 2.10 – Pontos no terreno e pontos correspondentes na imagem, utilizados para a ressecção espacial.



CP – centro de perspectiva da câmera.

Fonte: Produção do Autor.

$$x_m[r_{31}(E_m - E_c) + r_{32}(N_m - N_c) + r_{33}(U_m - U_c)] + f[r_{11}(E_m - E_c) + r_{12}(N_m - N_c) + r_{13}(U_m - U_c)] = 0 \quad (2.22)$$

$$y_m[r_{31}(E_m - E_c) + r_{32}(N_m - N_c) + r_{33}(U_m - U_c)] + f[r_{21}(E_m - E_c) + r_{22}(N_m - N_c) + r_{23}(U_m - U_c)] = 0$$

Para cada ponto m , as Equações 2.22 assumem valores diferentes para os coeficientes, mas têm variáveis em comum como incógnitas $(E_c, N_c, U_c, \omega, \varphi, \kappa)$. Chamando o lado esquerdo da primeira linha de função F e da segunda linha de G , pode-se simplificá-la para as Equações 2.23, onde ω , φ e κ estão implícitos nos elementos r_{ij} da matriz de rotação R .

$$\begin{aligned} F_m(E_c, N_c, U_c, \omega, \varphi, \kappa) &= 0 \\ G_m(E_c, N_c, U_c, \omega, \varphi, \kappa) &= 0 \end{aligned} \quad (2.23)$$

A ressecção consiste em resolver estas equações. Há vários métodos para diferentes abordagens como solução fechada, linearização, iterações numéricas, dentre outras (MIKHAIL *et al.*, 2001). Para o propósito de navegação em tempo real, em que é necessária disponibilidade imediata dos dados, deve ser avaliado o método mais adequado para funcionar embarcado. Neste trabalho foi empregada abordagem numérica, sem foco em avaliação de desempenho.

Para três pontos conhecidos, as Equações 2.23 tornam-se um sistema não-linear de seis equações a seis incógnitas, para o qual há vários métodos de resolução (CRISTINA; CUNHA, 2000). No entanto, pode-se usar na ressecção um número de pontos maior que 3 ($M > 3$) e, dessa forma, serão $2M$ equações a 6 incógnitas, ou seja, um sistema não-linear superdeterminado, devendo ser resolvido por otimização (GHILANI; WOLF, 2006). Como exemplo de métodos usados na solução deste tipo de problema pode-se citar o de Gauss-Newton e o de Levenberg-Marquardt, que utilizam a abordagem por mínimos quadrados.

Portanto, fica evidente que a determinação da posição e da orientação espacial de um veículo aéreo, objeto deste trabalho, pode ser feita a partir de ressecção da imagem obtida por uma câmera nele embarcado, desde que sejam conhecidas as coordenadas de, pelo menos, três pontos do terreno presentes na imagem.

2.7.1 Fontes de erro da ressecção espacial

O processo de ressecção em imagens de câmeras embarcadas está sujeito a diferentes tipos de erro, alguns deles listados abaixo (MCGLONE *et al.*, 2004):

- Distorções geométricas da imagem devido a parâmetros intrínsecos da câmera;
- Distorções geométricas da imagem devido a fatores externos como atmosfera, campo de pressões no entorno da aeronave, dentre outros;
- Instabilidade ou divergência do método numérico para resolução das equações não-lineares, em que pode ser atingido um mínimo local;
- Amostragem e resolução espacial da imagem para extração dos pontos. O erro aumenta com a diminuição da resolução;

- Distribuição relativa dos pontos escolhidos na imagem para apoiar a ressecção. Pontos muito agrupados diluem a precisão do processo. O ideal são pontos uniformemente afastados, formando um “tripé” bem apoiado;
- Quantidade de pontos para a ressecção. Quanto maior, geralmente melhor será o ajustamento.
- Acurácia das coordenadas dos pontos do terreno. Está relacionada ao método de obtenção dos dados, podendo ser levantadas em campo com GNSS geodésico ou extraídas de ortofoto; e
- Acurácia da extração das coordenadas (pixels) dos pontos na imagem, que pode ser feita por método automático ou por designação manual.

O foco deste trabalho é a avaliação da magnitude do erro de posicionamento e da orientação espacial da aeronave a partir de imagem, essencialmente devido às distorções geométricas causadas pela câmera, separando dos demais fatores. Aliás, a metodologia adotada nessa avaliação, apresentada no Capítulo 3, minimiza a influência dos demais fatores.

2.8 Distorções geométricas da câmera

Diversos são os fatores que afetam a distorção geométrica das imagens registradas por uma câmera, em maior ou menor grau dependendo de sua arquitetura interna e em qual plataforma está inserida. Há aberrações geométricas que afetam a qualidade da imagem, mas não a posição dos objetos na imagem, como aberração de esfericidade, coma, astigmatismo e curvatura de campo (BRITO; COELHO, 2007), mas não serão abordados aqui porque não ocasionam distorção nas imagens, ou seja, não alteram a posição dos pixels dos objetos.

Os fatores são subdivididos em internos e externos. Os internos estão relacionados com a arquitetura da câmera, sendo as distorções corrigidas no processo de orientação interna da imagem, em que são utilizados os chamados parâmetros intrínsecos, determinados no processo de calibração. Os externos estão relacionados ao meio em que a câmera está imersa e à sua posição e apontamento em relação ao objeto de interesse como, por exemplo: a distorção projetiva (BRITO; COELHO, 2007), a distorção de refração atmosférica (MIKHAIL *et al.*, 2001), a distorção de refração em campo de pressões no entorno de aeronave (ANDRADE, 1977) e a distorção devido à rotação e à curvatura da

Terra (RICHARDS; JIA, 2006). Com exceção da distorção projetiva, os fatores externos não serão considerados neste trabalho por terem sido julgados pouco significativos.

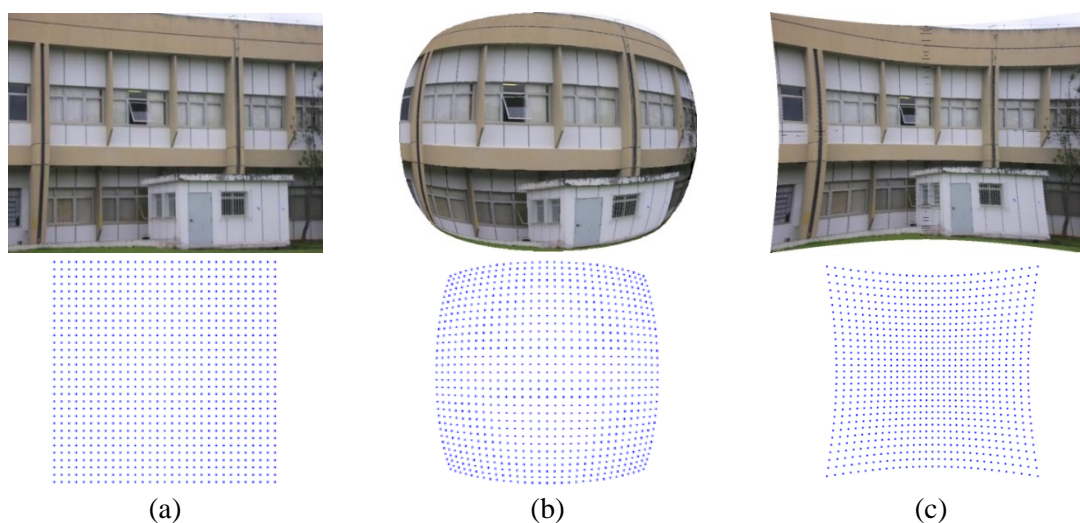
2.8.1 Distorção radial simétrica

A distorção radial ocorre devido à refração sofrida pelos raios de luz ao atravessar uma ou mais lentes do conjunto óptico da câmera até atingir o sensor CCD (*Charge-Coupled Device*) ou CMOS (*Complementary Metal-Oxide Semiconductor*) para formar a imagem (BRITO; COELHO, 2007).

Essa distorção é simétrica em relação ao ponto principal, onde o eixo óptico intercepta o sensor CCD ou CMOS. Os efeitos na imagem foram simulados e estão ilustrados de forma exagerada na Figura 2.11, que apresenta também uma grade de pontos para evidenciar onde ocorre expansão e onde ocorre compressão da imagem.

A distorção radial pode ser negativa, ocasionando na imagem um efeito barril, conforme ilustrado na Figura 2.11b, ou positiva, ocasionando um efeito almofada, conforme Figura 2.11c.

Figura 2.11 – Ilustração da distorção radial de uma câmera: (a) imagem sem distorção, com pontos uniformemente distribuídos; (b) distorção negativa, com compressão nas extremidades; e (c) distorção positiva, com expansão nas extremidades.



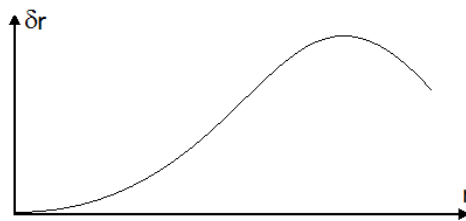
Fonte: Produção do Autor.

A distorção radial simétrica é modelada através de uma função polinomial com tantos coeficientes quanto a acurácia exigir (MERCHANT, 1979). Podem ser usados dois coeficientes para câmeras de baixa distorção, sendo mais comum a utilização de quatro. Mas câmeras que apresentam alta distorção exigem mais de quatro coeficientes.

O modelo exprime diretamente o erro radial δ_r em função da distância radial normalizada r ao eixo principal (centro de simetria) e dos parâmetros de calibração k_n , conforme Equação 2.24 e Figura 2.12. Os termos u e v são as coordenadas sem distorção nas direções x e y , respectivamente, em relação ao eixo principal, normalizadas pela distância focal, ou seja, com unidade em “distâncias focais”.

$$\delta_r = k_1 \cdot r^3 + k_2 \cdot r^5 + k_3 \cdot r^7 + k_4 \cdot r^9, \quad r = \sqrt{u^2 + v^2} \quad (2.24)$$

Figura 2.12 – Curva de distorção radial simétrica.



Fonte: Produção do Autor.

A forma mais utilizada do modelo é a da Equação 2.26, que exprime o erro já decomposto nas componentes x e y das coordenadas (HEIKKILA, 2000). As coordenadas normalizadas com distorção radial (u_{dr}, v_{dr}) são obtidas substituindo-se a Equação 2.24 na Equação 2.25.

$$u_{dr} = u \left(\frac{r + \delta_r}{r} \right) \quad (2.25)$$

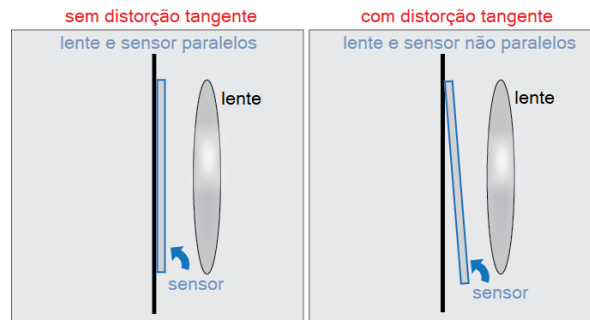
$$v_{dr} = v \left(\frac{r + \delta_r}{r} \right)$$

$$\begin{aligned} u_{dr} &= u(1 + k_1 r^2 + k_2 r^4 + k_3 r^6 + k_4 r^8) \\ v_{dr} &= v(1 + k_1 r^2 + k_2 r^4 + k_3 r^6 + k_4 r^8) \end{aligned} \quad (2.26)$$

2.8.2 Distorção tangente descentrada

A distorção tangente, também denominada apenas de descentrada, é causada pela falta de paralelismo da lente em relação ao sensor CCD ou CMOS no processo de construção do conjunto óptico da câmera, conforme ilustrado na Figura 2.13.

Figura 2.13 – Falta de paralelismo da lente com o sensor da câmera, que causa a distorção tangente.

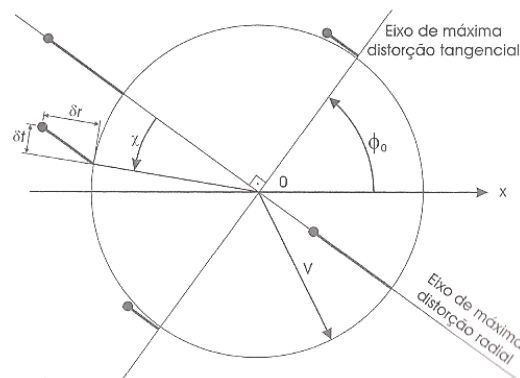


Fonte: Produção do Autor.

Este tipo de distorção foi abordada por Alexander Eugen Conrady (CONRADY, 1919), sendo modelada por meio de componentes tangencial e radial, em função de parâmetros de calibração J_1, J_2, \dots, J_n , da distância radial r e da direção ϕ do ponto de interesse na imagem em relação à direção ϕ_0 de máxima distorção tangente (MIKHAIL *et al.*, 2001), conforme Equação 2.27 e Figura 2.14.

$$\begin{aligned} \delta_r &= 3(J_1 r^2 + J_2 r^4 + \dots) \cdot \text{sen}(\phi - \phi_0) \\ \delta_t &= (J_1 r^2 + J_2 r^4 + \dots) \cdot \text{cos}(\phi - \phi_0) \end{aligned} \quad (2.27)$$

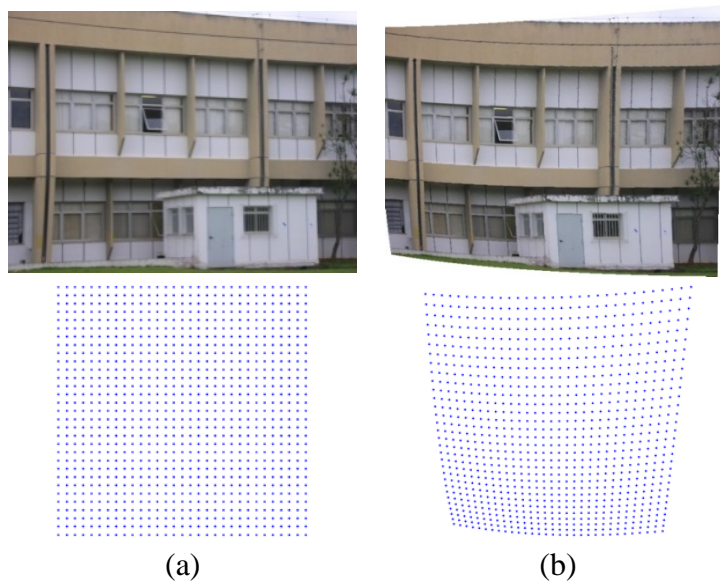
Figura 2.14 – Diagrama com os parâmetros da distorção descentrada.



Fonte: Andrade (2003)

O efeito na imagem foi simulado e está ilustrado de forma exagerada na Figura 2.15, que apresenta também uma grade de pontos para evidenciar onde ocorre expansão e onde ocorre compressão da imagem.

Figura 2.15 – Ilustração da distorção tangente de uma câmera: (a) imagem sem distorção e pontos uniformemente distribuídos; (b) imagem com distorção tangente e pontos com compressão em uma extremidade e expansão na extremidade diagonalmente oposta.



Fonte: Produção do Autor.

O modelo de Brown-Conrady (BROWN, 1965), mais utilizado, exprime os erros $(\Delta u, \Delta v)$ já nas componentes x e y , respectivamente, em função das coordenadas (u, v) do ponto considerado na imagem e dos parâmetros intrínsecos p_1, p_2, \dots, p_n , conforme Equação 2.28.

$$\begin{aligned} \Delta_u &= [p_1(r^2 + 2u^2) + 2p_2uv][1 + p_3r^2 + p_4r^4 + \dots] \\ \Delta_v &= [p_2(r^2 + 2v^2) + 2p_1uv][1 + p_3r^2 + p_4r^4 + \dots] \end{aligned} \quad (2.28)$$

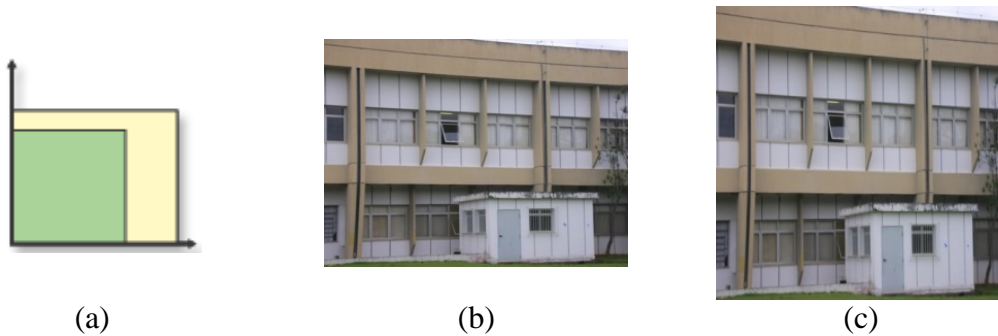
Na maioria dos casos onde não se requer alta acurácia, os termos de maior ordem (p_3, p_4, \dots) são desprezados, tornando o modelo linear. Assim, a forma mais utilizada do modelo Brown-Conrady é a simplificada (BROWN, 1965), que exprime as coordenadas com distorção (u_{dt}, v_{dt}) em função das coordenadas sem distorção (u, v) da maneira mostrada na Equação 2.29.

$$\begin{aligned}
 u_{dt} &= u + [p_1(r^2 + 2u^2) + 2p_2uv] \\
 v_{dt} &= v + [p_2(r^2 + 2v^2) + 2p_1uv]
 \end{aligned}
 \tag{2.29}$$

2.8.3 Distorção de afinidade

A distorção de afinidade ocorre quando o pixel do sensor CCD ou CMOS não é perfeitamente quadrado, ou seja, tamanho do pixel na direção horizontal diferente da vertical, conforme Figura 2.16. O efeito na imagem é uma falta de proporcionalidade nas direções ortogonais, conforme simulado e ilustrado de forma exagerada na Figura 2.16c.

Figura 2.16 – Ilustração da distorção de afinidade de uma câmera: (a) Pixel quadrado *versus* retangular, (b) imagem sem distorção, (c) imagem com distorção de afinidade.



Fonte: Produção do Autor.

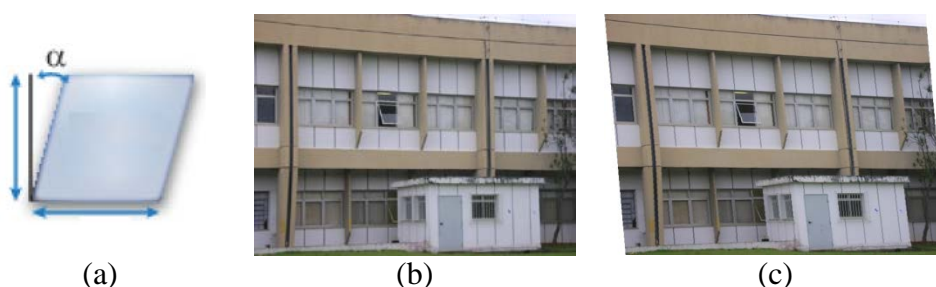
A afinidade é representada pelos parâmetros a_x e a_y nas direções horizontal e vertical, respectivamente, conforme Equação 2.30, onde f é a distância focal e μ o tamanho do pixel na direção correspondente (AGISOFT, 2016). Quando $a_x \neq a_y$ significa que há diferença de escala entre os eixos do quadro do sensor. Estes termos podem ser entendidos também como distâncias focais em pixels medidos naquelas direções.

$$\begin{aligned}
 a_x &= \frac{f}{\mu_x} \\
 a_y &= \frac{f}{\mu_y}
 \end{aligned}
 \tag{2.30}$$

2.8.4 Cisalhamento (*skew*)

Este tipo de distorção, mais conhecida como *skew*, ocorre quando as direções horizontal e vertical do sensor CCD ou CMOS da câmera não tem perfeita ortogonalidade, dando um aspecto de paralelogramo a cada pixel, conforme Figura 2.17a. O efeito na imagem é uma inclinação, conforme simulado e ilustrado de forma exagerada na Figura 2.17c.

Figura 2.17 – Ilustração da distorção por cisalhamento (*skew*) em uma câmera: (a) ângulo α de cisalhamento do pixel; (b) imagem sem distorção; e (c) imagem com distorção de cisalhamento.



Fonte: Produção do Autor.

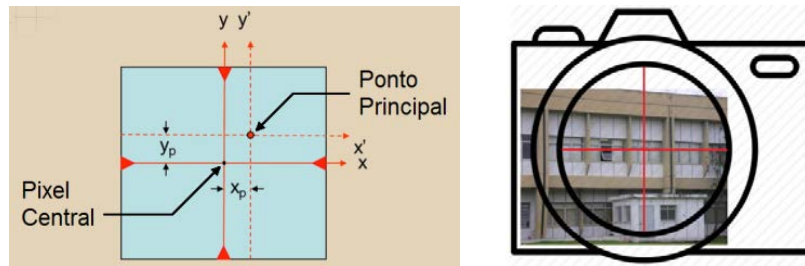
O *skew*, representado pelo parâmetro s é modelado em função da inclinação α do paralelogramo (MATLAB, 2014), conforme Equação 2.31, onde a_y é o termo de afinidade na direção vertical, definido na Equação 2.30.

$$s = a_y \cdot \tan \alpha \quad (2.31)$$

2.8.5 Defasagem do ponto principal

O eixo óptico de uma câmera passa através do centro de perspectiva e intercepta o plano da imagem no chamado “ponto principal de colimação”, também conhecido como “ponto nodal” (MIKHAIL *et al.*, 2001). No plano da imagem, o ponto central (pixel central na imagem digital) é chamado de “centro fiducial”. Rigorosamente, o ponto principal nem sempre é coincidente com o centro fiducial, devido à imperfeição na montagem e alinhamento das lentes em relação ao sensor CCD ou CMOS, conforme ilustrado na Figura 2.18.

Figura 2.18 – Ilustração da defasagem do ponto principal em uma câmera.



x_p – defasagem do ponto principal na direção horizontal, em relação ao pixel central
 y_p – defasagem do ponto principal na direção vertical, em relação ao pixel central
 x', y' – eixos do sistema de referência da imagem com origem no ponto principal

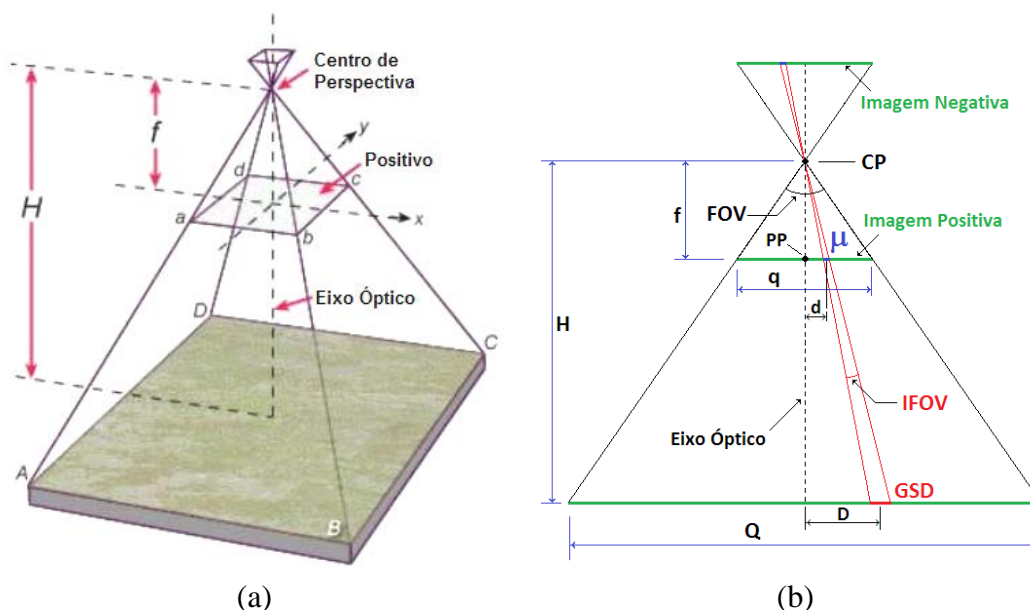
Fonte: Adaptado de Mikhail *et al.* (2001).

A defasagem geralmente é representada por parâmetros c_x e c_y nas direções horizontal e vertical, respectivamente, em pixels, com relação à origem do sistema de coordenadas linha-coluna, extremidade superior esquerda da imagem (HARTLEY; ZISSERMAN, 2000). Estes termos são determinados no processo de calibração da câmera com goniômetros ou multicolimadores, ou então conjuntamente no processo de correção das distorções radial e descentrada (MIKHAIL *et al.*, 2001), pois estas são referenciadas ao ponto nodal.

2.8.6 Distância focal

A distância focal da câmera é um dos parâmetros que relaciona o tamanho do objeto real com o seu tamanho na imagem, conforme ilustrado na Figura 2.19 e mostrado na Equação 2.32. Assim, o conhecimento do seu valor correto, que difere do valor exato nominal informado na especificação da câmera, é fundamental para se extrair informações métricas com acurácia da imagem e também para se realizar as correções das demais distorções.

Figura 2.19 – Ilustração da relação geométrica da homografia entre a imagem e o objeto correspondente: (a) representação 3D e (b) representação 2D.



- CP – centro de perspectiva, ponto onde concentram os raios de luz que saem do objeto e atingem a imagem.
 PP – ponto principal de colimação, interceptação do eixo óptico com o plano da imagem.
 FOV (*Field of View*) – ângulo de abertura do quadro da foto na direção analisada.
 IFOV (*Instantaneous Field of View*) – ângulo de abertura relativo a um pixel.
 f – distância focal.
 H – altura projetada do CP no solo.
 μ – tamanho do pixel do sensor na direção analisada.
 GSD (*Ground Sample Distance*) - tamanho do pixel projetado no solo.
 d – dimensão na imagem correspondente a uma dimensão D no objeto real.
 D – dimensão do objeto correspondente a uma dimensão d na imagem.
 q – tamanho do quadro do sensor na direção analisada.
 Q – tamanho do quadro da imagem projetado no solo na direção analisada.
 a-b-c-d – imagem positiva correspondente ao objeto A-B-C-D.
 A-B-C-D – objeto correspondente à imagem a-b-c-d.

Fonte: Produção do Autor.

$$GSD = \frac{\mu \cdot H}{f} \quad (2.32)$$

Uma abordagem para a obtenção da distância focal é através de colimadores em laboratório. Obtêm-se as distâncias radiais dos quatro pontos mais próximos do ponto principal na imagem, onde a distorção radial é praticamente zero, e compara-se com a angulação dos colimadores correspondentes, encontrando-se a chamada “distância focal gaussiana equivalente” (ANDRADE, 2003). Mas pode-se encontrar um valor para a distância focal no resultado da calibração juntamente com outros parâmetros.

2.8.6.1 Focal calibrada

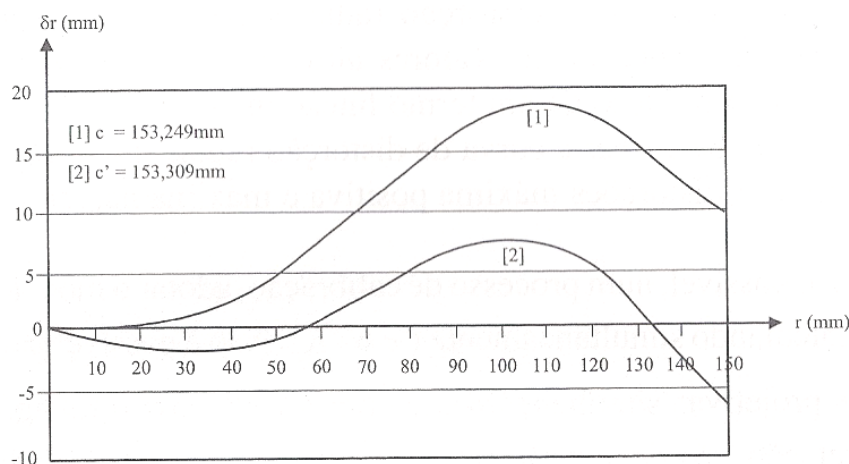
Um ponto no cenário observado pela câmera forma um ângulo α com o eixo óptico e registra um ponto correspondente na distância radial r do ponto principal. A relação entre estes valores envolve a distância focal f da forma mostrada na Equação 2.33.

$$\tan \alpha = \frac{r}{f} \quad (2.33)$$

Quando se faz a correção da distorção radial simétrica, apresentada na Seção 2.8.1, usa-se a “distância focal gaussiana equivalente” para relacionar as coordenadas dos pontos na cena com os pontos correspondentes na imagem. A partir da Equação 2.33 pode-se inferir que a distorção radial que é calculada pode assumir qualquer magnitude, dependendo do valor utilizado para a distância focal (MIKHAIL *et al.*, 2001).

Assim, para minimizar os valores da curva de distorção, pode-se fazer um “balanceamento” por mínimos quadrados, conforme mostrado na Figura 2.20, encontrando-se um novo valor de distância focal, que passa a ser chamada de “focal calibrada”, também denominada “constante da câmera” (ANDRADE, 2003). A curva balanceada contém máximos e mínimos de baixa amplitude, o que contribui para erros menores na extração de informações métricas da imagem, caso não seja feita a correção.

Figura 2.20 – Curvas de distorção radial: [1] obtida com distância focal gaussiana equivalente e [2] curva balanceada para se determinar a focal calibrada.



Fonte: Andrade (2003).

2.9 Calibração da câmera

Toda imagem contém distorções geométricas decorrentes da influência de diversos fatores intrínsecos da câmera, conforme visto na Seção 2.8. Assim, para obtenção de informações métricas confiáveis a partir de imagens, nas diversas aplicações, é essencial que a câmera seja calibrada (GRUEN; HUANG, 2001).

Além do problema de posicionamento para navegação aérea, abordado neste trabalho, outros produtos que demandam calibração das câmeras são os mapas cartográficos gerados por plataformas aéreas e utilizados em diversas aplicações no Sensoriamento Remoto, já apresentadas no Capítulo 1, como: monitoramento de culturas agrícolas para identificação e quantificação de falhas de plantio, pragas e deficiências nutricionais; inventário ambiental e florestal; quantificação de áreas de desmatamento e de queimadas; geração de modelo digital de elevação e curvas de nível; mensuração de corpos de água; cadastro urbano e rural, dentre outras.

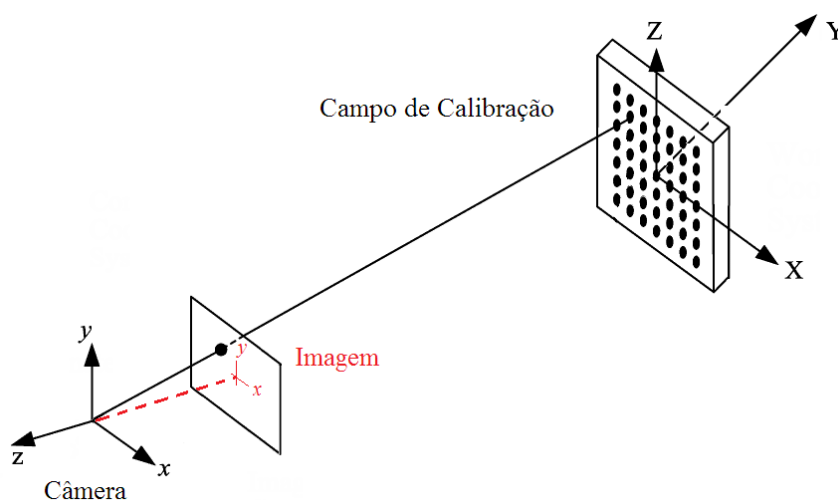
Outras aplicações que envolvem fotogrametria, ou seja, obtenção de informações geométricas de objetos a partir de imagem, também demandam a calibração das câmeras, como: restituição de fachadas arquitetônicas, mapeamento arqueológico e geológico, diagnósticos médicos, perícias forenses, investigação de acidentes, metrologia, visão robótica para montagens industriais, trajetografia de veículos e aeronaves, dentre outras.

A calibração consiste de um procedimento experimental para determinação de uma série de parâmetros que descrevem o processo de formação da imagem na câmera, segundo um modelo analítico, que relaciona as coordenadas conhecidas de uma grade de referência, também denominada campo de calibração, com as correspondentes na imagem (SWAPNA *et al.*, 2009), conforme mostrado na Figura 3.17.

Neste contexto, a calibração pode ser entendida como um processo de otimização, onde a discrepância entre a imagem observada e as correspondentes coordenadas do objeto é minimizada com relação aos parâmetros do modelo de distorção. De posse destes parâmetros, a função de transformação geométrica das coordenadas da imagem distorcida para a corrigida pode ser conhecida e, então, a imagem pode ser reamostrada.

A qualidade da calibração pode ser conhecida, bastando fazer a reprojeção dos marcos do campo de calibração por meio do modelo determinado, comparando-a com a extração dos marcos feita diretamente da imagem. A dispersão dos erros da reprojeção representa quantitativamente a qualidade da calibração, ou seja, quanto o modelo identificado aproxima-se da realidade da câmera.

Figura 2.21 – Sistemas de referência do campo de calibração, da câmera e da imagem.



Fonte: Produção do Autor.

Existem diversos métodos de calibração que, essencialmente, diferem quanto ao tipo e à geometria do campo, ao número de fotografias necessárias, ao método de posicionamento da câmera no campo, à quantidade e disposição dos parâmetros de distorção no modelo matemático, à metodologia de ajustamento do modelo para identificação dos parâmetros, dentre outros. Alguns trabalhos abordam estudos comparativos dos diversos métodos de calibração (CLARKE; FRYER, 1998; REMONDINO; FRASER, 2006; HIERONYMUS, 2012).

Com o advento das câmeras digitais, a calibração tornou-se um tópico relevante de pesquisa e atingiu maturidade no final dos anos 90 com o desenvolvimento de metrologia automatizada por visão computacional, baseada principalmente em marcos. Na última década, com o enorme uso de câmeras digitais em muitas aplicações de medição, houve um renovado interesse em abordagens de calibração autônomas, especialmente nos procedimentos *on the job* totalmente automáticos (BARAZZETTI *et al.*, 2011),

comentado adiante. Hoje, o estado da arte baseia-se no uso de alvos codificados que são capturados automaticamente das imagens, formando um bloco de geometria adequada para estimar todos os parâmetros de distorção geométrica (CRONK *et al.*, 2006).

A identificação dos parâmetros de distorção se dá por meio da resolução de um sistema de equações não-lineares com otimização (também denominado ajustamento) por mínimos quadrados e linearização por série de Taylor. Este sistema é extremamente sensível a instabilidades, tornando sua solução rigorosa no sentido funcional e estocástico, devendo ser tomada uma série de cuidados no planejamento e desenvolvimento da calibração (GRUEN; HUANG, 2001). As causas das instabilidades e as estratégias para minimizá-las são comentadas a seguir.

Existe um forte acoplamento projetivo dos parâmetros de distorção tangente ($p_1, p_2...$) com os pontos principais (c_x e c_y). Também há dependência linear dos parâmetros de orientação interna com os de orientação externa da câmera (BARAZZETTI *et al.*, 2011). Para quebrar estas dependências, os marcos do campo devem ser bem condicionados e a câmera posicionada com geometria favorável, isto é, em diferentes poses convergentes, inclusive com rotações ortogonais. Ou então, se não for possível múltiplas fotos, a disposição dos marcos deve ser tridimensional, abrangendo vários planos em profundidade. Em ambas as situações, os marcos devem preencher homoganeamente o quadro das fotos.

Ainda, são necessárias boas estimativas iniciais das incógnitas para o processo iterativo de linearização por Taylor, caso contrário pode ocorrer divergência para um mínimo local. É recomendável o uso de injunções de alguns parâmetros por meio de medidas externas, funcionando como pseudo-observações. Estabelecendo-se pesos adequados, é possível dar mais ou menos ênfase aos valores observados de cada parâmetro desconhecido e auxiliar na convergência (BARAZZETTI *et al.*, 2011).

Muitos trabalhos empregam o método de calibração que utiliza como campo um alvo coplanar com marcos igualmente espaçados, também conhecido como *chessboard* (ZHANG, 2000; BORLIN; GRUSSENMEYER, 2014; ZHANG; WONG, 2014). Este método exige diversas poses convergentes para compensar o fato de o campo não ser condicionado (não-tridimensional), mas tem a vantagem de não exigir um local fixo

para a calibração nem o conhecimento das coordenadas dos marcos. O *camera calibration toolbox* do *software* MATLAB e o algoritmo de calibração do OpenCV têm este método implementado (MATLAB, 2014; OPENCV, 2016).

Uma variação deste método emprega como campo um alvo com marcos dispostos em dois planos ortogonais, uma espécie de quina (HEIKKILA, 2000). Outro usa um sistema dual de câmeras convergentes (BAZAN *et al.*, 2007). Uma abordagem também muito utilizada, principalmente para câmeras de alta distância focal, é a disposição dos marcos em fachadas externas de edificações (BAZAN *et al.*, 2007; BÖRLIN; GRUSSENMEYER, 2014). Calibrações que exigem maior acurácia geralmente são feitas em ambientes de laboratório ou controlados, onde as coordenadas dos marcos são precisamente conhecidas (LADSTÄDTER; GRUBER, 2008; BORLIN; GRUSSENMEYER, 2014).

Nos processos em que a calibração é feita simultaneamente ao levantamento fotográfico das feições do objeto para fins de compor um mosaico, é denominada de calibração *on the job* (BARAZZETTI *et al.*, 2011; DEBIASI *et al.*, 2012). Este método tem a vantagem de ser automático e não exigir um campo específico, mas a acurácia depende do grau de recobrimento entre as fotos e do levantamento das coordenadas de alguns pontos do objeto. Os *softwares* de fotogrametria, como o Pix4D *Mapper* e o Agisoft *Photoscan* utilizam este método para estimar os parâmetros de distorção da câmera na mesma ocasião em que fazem o ajustamento para geração do Ortofotomosaico e do Modelo Digital de Superfície, mas permitem a entrada prévia dos parâmetros, caso estes forem conhecidos (PIX4D, 2015; AGISOFT, 2016).

Quanto ao modelo matemático empregado na calibração, a maioria dos trabalhos e dos *softwares* tem implementadas as equações conforme apresentadas na Seção 2.8. O que varia de um para outro é a consideração ou não de determinados parâmetros e a quantidade de coeficientes para um determinado tipo de distorção, como pode ser visto na Tabela 2.1. O Agisoft tem uma formulação diferente da apresentada na Seção 2.8 para o cisalhamento e afinidade. O CALIBRA foi o algoritmo desenvolvido neste trabalho.

Algumas câmeras exigem modelos específicos, como as 360° em que é utilizado o modelo *fisheye* (PIX4D, 2016; AGISOFT, 2016). As câmeras com objetiva grande-angular, que

geralmente apresentam alta distorção radial, exigem mais que quatro coeficientes no modelo desta distorção. Foi o caso da câmera GoPRO neste trabalho, para a qual foi desenvolvido um modelo com seis coeficientes, conforme discutido na Seção 3.3. Para câmeras com arquitetura complexa, que não aderem adequadamente a nenhum destes modelos, uma opção é a modelagem com polinômios de Lagrange (TANG, 2013).

Tabela 2.1 – Parâmetros de distorção geométrica utilizados nos modelos implementados em diversos *softwares* de calibração de câmeras.

	CALIBRA ¹		MATLAB	PIX4D	AGISOFT	OpenCV
	Completo 4K	Completo 6K	<i>camera calibration toolbox</i>	<i>Mapper</i>	<i>Photoscan</i>	
Distorção Radial	k1	k1	k1	R1	K1	k1
	k2	k2	k2	R2	K2	k2
	k3	k3	k3	R3	K3	k3
	k4	k4	-	-	K4	-
	-	k5	-	-	-	-
	-	k6	-	-	-	-
Distorção Tangente	p1	p1	p1	T1	P1	p1
	p2	p2	p2	T2	P2	p2
	p3	p3	-	-	P3	-
	p4	p4	-	-	P4	-
Cisalhamento (<i>skew</i>)	s	s	s	-	B1	-
Distorção de Afinidade	ax	ax	fx	f	B2	fx
	ay	ay	fy	-	f	fy
Ponto Principal	cx	cx	cx	cx	cx	cx
	cy	cy	cy	cy	cy	cy

¹CALIBRA foi o algoritmo desenvolvido para calibração, onde foi implementado um modelo completo com 4 parâmetros de distorção radial (Completo 4K) e outro completo com 6 parâmetros (Completo 6K).

Fonte: Produção do Autor com base nos manuais dos *softwares* de calibração: Matlab (2014), Pix4D (2016), Agisoft (2016) e OpenCV (2016).

Para atender aos objetivos deste trabalho, foram avaliados alguns *softwares* prontos que possibilitam a calibração de câmeras, mas nenhum foi plenamente aceitável, consideradas a adequação do modelo e a acurácia, conforme discutido na Seção 3.3 e apresentado no APÊNDICE C e APÊNDICE D. Assim, optou-se por desenvolver um método e um algoritmo próprio de calibração.

2.9.1 Modelo analítico

2.9.1.1 Modelo de câmera *pinhole*

Este modelo simplificado não contém os parâmetros de distorção radial nem tangente (HARTLEY; ZISSERMAN, 2000), mas possui alguns parâmetros internos da câmera e serve como base para entender o modelo completo.

A Equação 2.34 representa esse modelo simplificado. Deriva da Equação 2.18 apresentada na Seção 2.6, fazendo a normalização de alguns parâmetros pela distância focal e transformando as coordenadas da imagem x e y em pixels. Incorpora a matriz K , chamada de matriz intrínseca, que contém alguns dos parâmetros de orientação interna da câmera. Os eixos do sistema de referência do espaço-objeto, neste caso o campo de calibração, passam aqui a ser denominados de X , Y e Z .

$$\lambda \begin{bmatrix} x \\ y \\ 1 \end{bmatrix} = K R \begin{bmatrix} X - X_c \\ Y - Y_c \\ Z - Z_c \end{bmatrix} \quad (2.34)$$

onde:

$$K = \begin{bmatrix} a_x & s & (c_x - c_c) \\ 0 & a_y & -(c_y - l_c) \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$c_c = (C + 1)/2$$

$$l_c = (L + 1)/2$$

X, Y, Z são os eixos do sistema de referência do campo de calibração.

X_c, Y_c, Z_c são as coordenadas do CP da câmera no sistema de referência do campo.

x e y são as coordenadas no sistema da imagem com origem no pixel central, em pixels.

λ é do fator de escala homográfica.

R é a matriz de rotação.

K é a matriz intrínseca.

s é o parâmetro de *skew*, conforme definido na Seção 2.8.4.

a_x e a_y são os termos de afinidade, conforme definido na Seção 2.8.3.

c_x e c_y são as defasagens do ponto principal, em pixels, conforme definido na Seção 2.8.5.

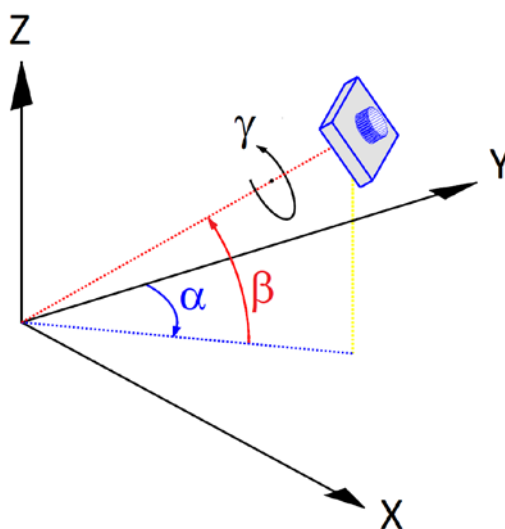
c_c e l_c são a coluna e linha do pixel central.

C e L são o número de colunas e linhas da imagem.

A matriz de rotação R transforma as coordenadas do sistema de referência XYZ do campo de calibração para o sistema $x-y$ da imagem, conforme Figura 2.21. É estruturada de acordo com a Equação 2.35 em função dos ângulos de apontamento definidos como o azimute α_c , a elevação β_c e a rotação γ_c do eixo óptico da câmera, sendo rotações positivas em torno dos eixos $-Z$, Y e X do campo de calibração, respectivamente, conforme Figura 2.22. Estes ângulos fazem parte dos parâmetros obtidos como resultados da calibração.

$$R = \begin{bmatrix} -\text{sen}\alpha \text{sen}\beta \text{sen}\gamma - \text{coss}\alpha \text{cos}\gamma & -\text{coss}\alpha \text{sen}\beta \text{sen}\gamma + \text{sen}\alpha \text{cos}\gamma & \text{cos}\beta \text{sen}\gamma \\ \text{sen}\alpha \text{sen}\beta \text{cos}\gamma - \text{coss}\alpha \text{sen}\gamma & \text{coss}\alpha \text{sen}\beta \text{cos}\gamma + \text{sen}\alpha \text{sen}\gamma & -\text{cos}\beta \text{cos}\gamma \\ -\text{sen}\alpha \text{cos}\beta & -\text{coss}\alpha \text{cos}\beta & -\text{sen}\beta \end{bmatrix} \quad (2.35)$$

Figura 2.22 – Definição dos ângulos de apontamento do eixo óptico da câmera em relação ao sistema de referência do campo de calibração.



α – azimute
 β – elevação
 γ – rotação

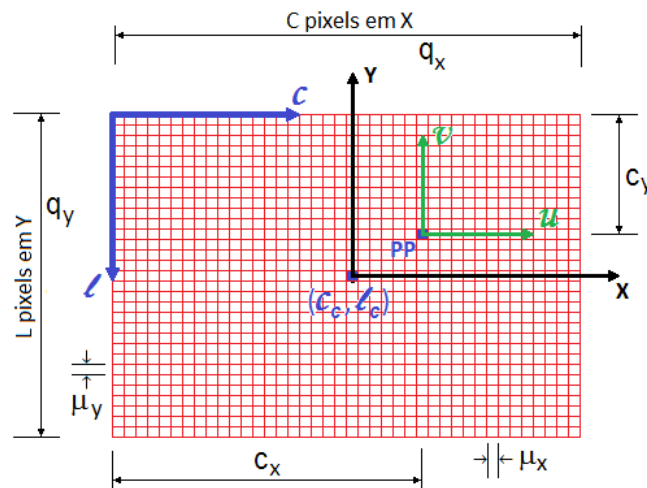
Fonte: Produção do Autor.

2.9.1.2 Modelo completo

Este modelo é o resultado da inclusão no modelo da câmera *pinhole* dos efeitos de distorção radial e distorção tangente, que ocorrem quando os raios de luz atravessam as lentes antes de atingir o sensor, ou seja, estes parâmetros de distorção atuam nas coordenadas (u,v) , conforme definidas na Seção 2.8.1, as quais não têm influência dos parâmetros da matriz intrínseca K , definida na Seção 2.9.1.1.

Assim, a construção do modelo começa com a representação isolada dos efeitos das distorções radiais e tangentes, conforme mostrado na Equação 2.36. Para o entendimento, faz-se necessária a apresentação da Figura 2.23, uma representação de imagem, onde está ilustrada a definição dos sistemas de referência e de alguns parâmetros da câmera.

Figura 2.23 – Sistemas de referência e parâmetros na representação da imagem de uma câmera.



x e y são as coordenadas no sistema da imagem com origem no pixel central, em pixels.

c_c e l_c são a coluna e a linha do pixel central.

u e v são as coordenadas no sistema da imagem com origem no ponto principal, em pixels.

PP é o ponto principal de colimação, ponto de intersecção do eixo óptico com o sensor.

c e l são os eixos do sistema de referência coluna-linha da imagem, com origem no pixel superior esquerdo.

c_x e c_y são as defasagens do ponto principal, em pixels, medidas nas direções x e y em relação ao pixel superior esquerdo.

μ_x e μ_y são as dimensões do pixel nas direções x e y .

q_x e q_y são as dimensões do sensor nas direções x e y .

C e L são o número de colunas e linhas da imagem.

$$\lambda \begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = M \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{bmatrix} \quad (2.36)$$

onde:

$$M = [R \quad T]$$

$$T = -R \begin{bmatrix} X_C \\ Y_C \\ Z_C \end{bmatrix}$$

X, Y, Z são os eixos do sistema de referência do campo de calibração.

X_C, Y_C, Z_C são as coordenadas do CP da câmera no sistema de referência do campo.

λ é do fator de escala homográfica.

M é a matriz de mudança de referencial.

R é a matriz de rotação

T é a matriz de translação

Desenvolvendo a Equação 2.36 chega-se nas Equações 2.37 onde percebe-se que as coordenadas (u, v) podem ser entendidas como sendo normalizadas pela distância focal do respectivo eixo, ou seja, suas unidades são “distâncias focais”.

$$u = \frac{r_{11}(X - X_C) + r_{12}(Y - Y_C) + r_{13}(Z - Z_C)}{r_{31}(X - X_C) + r_{32}(Y - Y_C) + r_{33}(Z - Z_C)} \quad (2.37)$$

$$v = \frac{r_{21}(X - X_C) + r_{22}(Y - Y_C) + r_{23}(Z - Z_C)}{r_{31}(X - X_C) + r_{32}(Y - Y_C) + r_{33}(Z - Z_C)}$$

A combinação dos modelos das distorções radial e tangente, apresentados nas Seções 2.8.1 e 2.8.2, resulta nas Equações 2.38 que relacionam as coordenadas normalizadas distorcidas (u_d, v_d) com as normalizadas sem distorção (u, v) , considerando quatro parâmetros de distorção radial (k_1, k_2, k_3, k_4) e quatro de tangente (p_1, p_2, p_3, p_4) .

$$u_d = u(1 + k_1 r^2 + k_2 r^4 + k_3 r^6 + k_4 r^8) + [p_1(r^2 + 2u^2) + 2p_2 uv][1 + p_3 r^2 + p_4 r^4] \quad (2.38)$$

$$v_d = v(1 + k_1 r^2 + k_2 r^4 + k_3 r^6 + k_4 r^8) + [p_2(r^2 + 2v^2) + 2p_1 uv][1 + p_3 r^2 + p_4 r^4]$$

A segunda parte da construção do modelo consiste na aplicação da matriz intrínseca K nas coordenadas normalizadas para imprimir os efeitos de afinidade, de cisalhamento, de defasagem do ponto principal e para desnormalizar as coordenadas (u_d, v_d) , a fim de se obter as coordenadas com distorção (x_d, y_d) em pixels, cuja origem é o pixel central, conforme Equação 2.39.

$$\begin{bmatrix} x_d \\ y_d \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_x & s & (c_x - c_c) \\ 0 & a_y & -(c_y - l_c) \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_d \\ v_d \\ 1 \end{bmatrix} \quad (2.39)$$

Para representar o modelo em coordenadas do sistema linha-coluna, deve-se aplicar a transformação afim dada pela Equação 2.40, onde c_d e l_d são, respectivamente, as coordenadas coluna e linha da imagem distorcida.

$$\begin{bmatrix} c_d \\ l_d \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & c_c \\ 0 & -1 & l_c \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_d \\ y_d \\ 1 \end{bmatrix} \quad (2.40)$$

Com isso, o modelo analítico completo de todas as distorções internas da câmera é representado pela Equação 2.41.

$$\begin{bmatrix} c \\ l \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_x & s & c_x \\ 0 & -a_y & c_y \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_d \\ v_d \\ 1 \end{bmatrix} \quad (2.41)$$

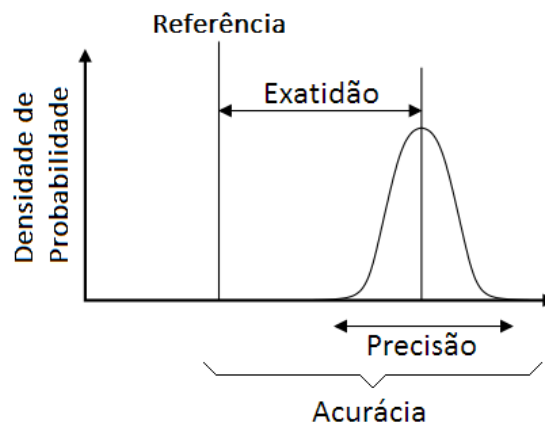
2.10 Acurácia e precisão

Acurácia, exatidão e precisão são termos comumente utilizados para descrever o quão boa é a estimativa de um parâmetro medido. Portanto, é importante definir o significado de cada termo.

A exatidão representa o grau de proximidade da média de um parâmetro para seu valor verdadeiro (referência), que geralmente é desconhecido. Já a precisão representa o grau de dispersão das estimativas em relação à sua média (MONICO *et al.*, 2009). A Figura 2.24 ilustra a diferença entre estes conceitos. A exatidão está relacionada com erros determinísticos enquanto que a precisão com erros aleatórios.

A acurácia leva em conta tanto a exatidão quanto a dispersão, ou seja, não faz sentido falar em boa acurácia quando a precisão é alta, se existe erro sistemático. Da mesma forma, não faz sentido falar em boa acurácia quando a média é próxima da referência, se a dispersão é alta (MONICO *et al.*, 2009). A acurácia frequentemente é confundida com exatidão, pois a terminologia equivalente para exatidão no inglês é *relative accuracy*, enquanto que a equivalente para acurácia é *absolute accuracy* ou simplesmente *accuracy* (ASPRS, 2014).

Figura 2.24 – Conceitos exatidão, precisão e acurácia.



Fonte: Produção do autor.

Numericamente, a média está associada com a exatidão, Equação 2.42, o desvio padrão com a precisão, Equação 2.43, e o erro médio quadrático RMS (*Root Mean Square*) com a acurácia, Equação 2.44, onde x é o parâmetro analisado e n o tamanho da população. Assim, a acurácia será numericamente igual à precisão quando a média for zero.

$$\mu = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} \quad (2.42)$$

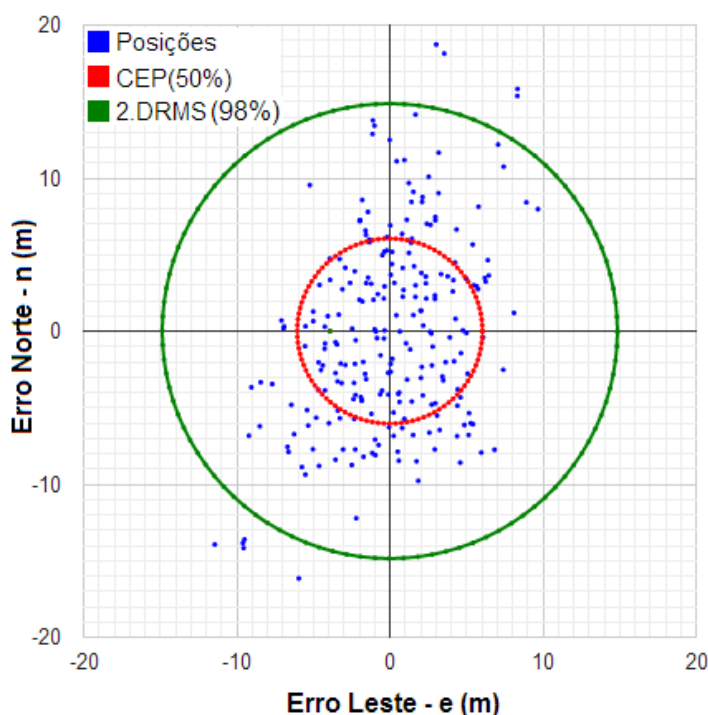
$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \mu)^2}{n}} \quad (2.43)$$

$$RMS = \sqrt{\mu^2 + \sigma^2} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i^2} \quad (2.44)$$

Para parâmetros bidimensionais como a distância planimétrica, que é a resultante das componentes leste e norte, a distribuição de probabilidade representativa é a de Rayleigh, derivada da distribuição de Weibull (WALPOLE *et al.*, 2009). Para análise dos erros, a forma mais adequada é por meio do conceito de erro circular. Graficamente, o círculo em torno da origem define uma área de probabilidade, cujo raio quantifica estatisticamente a acurácia, constituindo uma região de confiança.

Há várias metodologias para se definir a região de confiança, conforme ilustrado na Figura 2.25. Uma delas é pelo conceito de CEP (*Circular Error Probable*), definido como o raio do círculo com 50% de probabilidade, ou seja, numericamente igual à mediana do erro de distância horizontal, denominada CEP50. Para o percentil 95% é denominada CEP95. Outra metodologia é pelo valor RMS que, para a distância horizontal, é denominada DRMS (*Distance Root Mean Square*) e representa probabilidade de 63,2%. É comum também utilizar o termo 2DRMS, que significa duas vezes o DRMS, com probabilidade de 98,2% (NOVATEL, 2003).

Figura 2.25 – Conceito de erro circular para parâmetros bidimensionais como o erro planimétrico, resultante das componentes leste e norte.



Fonte: Produção do Autor.

O valor DRMS no caso de distância planimétrica pode ser calculado diretamente pelos erros de distância d ou pelas componentes do erro leste e e do erro norte n , de acordo com a Equação 2.45, ou então pelos parâmetros estatísticos, conforme Equação 2.46.

$$DRMS = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n d_i^2} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (e_i^2 + n_i^2)} \quad (2.45)$$

$$DRMS = \sqrt{\mu_e^2 + \sigma_e^2 + \mu_n^2 + \sigma_n^2} \quad (2.46)$$

Para grandezas angulares, a distribuição de probabilidade mais adequada é a de Von Mises (FISHER, 1993). Mas para valores menores que 18 graus, o seno do ângulo é considerado numericamente igual ao ângulo e, assim, a distribuição normal pode ser utilizada no lugar da de Von Mises, que foi o caso deste trabalho.

2.11 Teste de hipóteses

Dentro do objetivo deste trabalho, que foi verificar os erros do posicionamento e da orientação de uma aeronave por ressecção espacial, a realização do teste de hipóteses é fundamental para afirmar se os resultados encontrados podem ser considerados estatisticamente iguais aos valores da referência adotada, neste caso os sensores acurados da aeronave. Dessa forma, trata-se de um teste de hipóteses bidirecional da média dos erros de cada parâmetro, onde a hipótese nula H_0 é de a média populacional μ ser igual a zero e a hipótese alternativa H_1 dela ser diferente de zero, conforme Equação 2.47.

$$H_0: \mu = 0 \quad (2.47)$$

$$H_1: \mu \neq 0$$

O teste consiste na comparação de uma estatística, calculada a partir dos parâmetros amostrais, com valores padrão tabelados de uma distribuição de probabilidade. Quando a variância populacional não é conhecida, deve-se usar como referência a distribuição *t-student* (WALPOLE *et al.*, 2009). A estatística calculada t_c é obtida pela Equação 2.48.

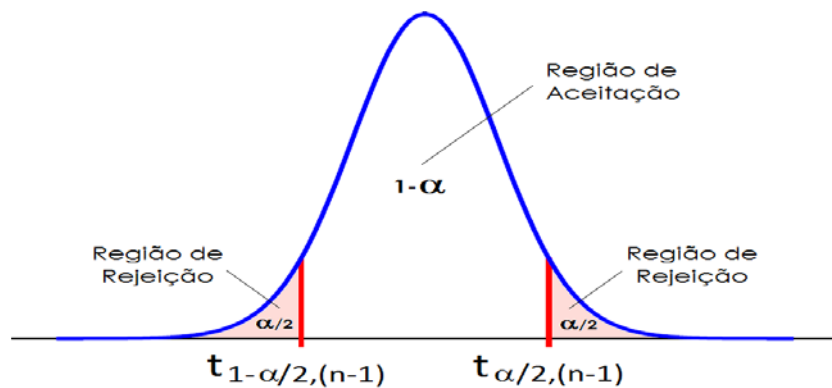
$$t_c = \frac{\bar{x} - 0}{s_x / \sqrt{n}} \sim t_{n-1} \quad (2.48)$$

onde:

- \bar{x} é a média amostral do parâmetro
- s_x é o desvio padrão amostral do parâmetro
- n é o tamanho da amostra
- t_{n-1} é a distribuição *t-student* com $n-1$ graus de liberdade

Os valores padrão críticos, ou seja, os limites teóricos da região de não-rejeição, são obtidos teoricamente a partir da distribuição *t-student* em função do nível de significância α adotado. O limite inferior é designado $t_{1-\alpha/2,(n-1)}$ e o superior $t_{\alpha/2,(n-1)}$, conforme mostrado na Figura 2.26. Da comparação desses limites com a estatística calculada t_c , a hipótese nula H_0 deve ser rejeitada quando $t_c > t_{1-\alpha/2,(n-1)}$ ou $t_c < t_{\alpha/2,(n-1)}$ e não pode ser rejeitada caso contrário.

Figura 2.26 – Limites teóricos da região de aceitação na distribuição *t-student* com $n-1$ graus de liberdade, para nível de significância α .



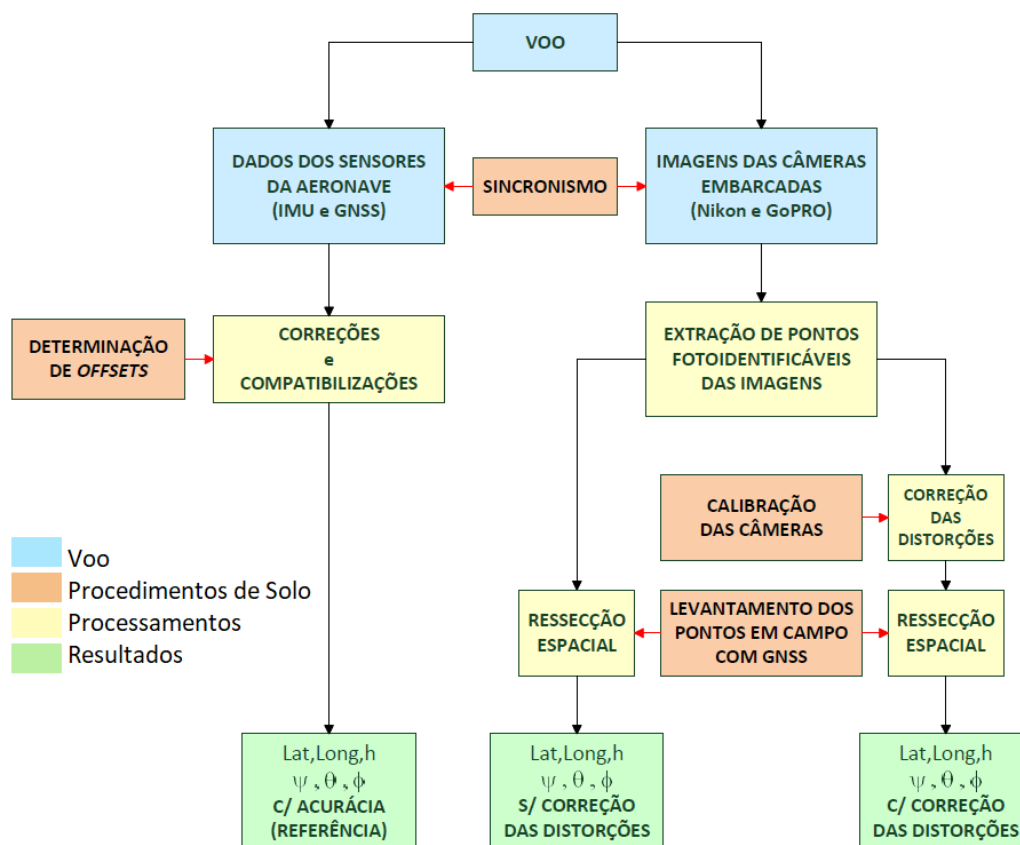
Fonte: Produção do Autor.

Portanto, quando a hipótese nula é rejeitada, significa que há erro sistemático no parâmetro testado. Quando não é rejeitada, significa que não há evidências suficientes de que a média “populacional” dos erros do parâmetro são diferentes de zero, portanto, podem ser considerados estatisticamente iguais a zero.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

A metodologia empregada neste trabalho para atingir os objetivos propostos foi desenvolvida de acordo com o fluxograma apresentado na Figura 3.1 cujos passos estão detalhados nas Seções 3.1 a 3.8. Basicamente consistiu em se obter, por meio de ressecção espacial, a partir das imagens das câmeras embarcadas, os dados de posição (componentes leste, norte e vertical) e orientação (ψ , θ e ϕ) da aeronave e comparar com os dados gravados por sensores de alta acurácia a bordo (IMU e GNSS). A teoria da ressecção espacial está apresentada na Seção 0 e a descrição metodológica do procedimento na Seção 3.8.

Figura 3.1 – Fluxograma com os passos da metodologia empregada no trabalho.



Fonte: Produção do Autor.

A avaliação da acurácia absoluta de um processo, objetivo principal deste trabalho, só é possível quando se dispõe de uma referência com grande exatidão e precisão para servir

como base de comparação. Por isso, a utilização dos VANTs que se tem acesso, como plataforma para as câmeras, apesar da praticidade e do baixo custo, foi descartada neste trabalho por não possuir sistemas de navegação com o nível de acurácia necessário para os parâmetros de posição e orientação.

Foi realizado um procedimento de solo para sincronismo entre as bases de tempo dos sensores da aeronave e das câmeras, conforme apresentado na Seção 3.4. Outro procedimento de solo envolveu o nivelamento da aeronave para se determinar os *offsets* angulares e lineares das câmeras em relação aos eixos de referência da aeronave, conforme Seção 3.5. Com isso, os dados gravados pelos sensores de alta acurácia da aeronave (IMU e GNSS) passaram por um processamento que consistiu de correções e compatibilizações para gerar os parâmetros de posição e de orientação angular. Estes parâmetros foram utilizados como referências acuradas na comparação com os parâmetros obtidos por ressecção espacial.

A ressecção espacial foi realizada tanto com imagens brutas, ou seja, sem correção das distorções geométricas das câmeras, quanto com as imagens correspondentes corrigidas. Para a correção foi necessário um procedimento de solo de calibração das câmeras em que foram identificados matematicamente seus parâmetros de distorção. Foram exploradas três alturas diferentes tanto em situações de visada nadir quanto off-nadir, chegando até 45 graus de inclinação lateral da aeronave.

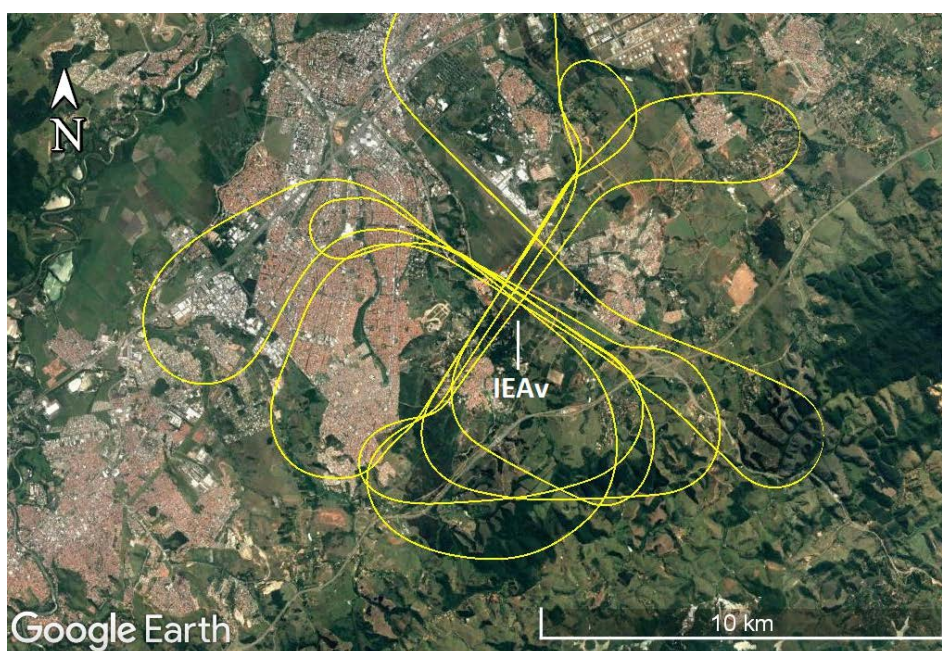
As coordenadas linha-coluna dos pontos foto-identificáveis foram extraídas das imagens. Já as coordenadas geodésicas correspondentes no solo foram levantadas em campo com receptores GNSS por posicionamento estático rápido e posterior processamento diferencial.

Os erros de posição e orientação, em todas as condições, foram obtidos por comparação dos resultados das ressecções espaciais com os parâmetros de referência oriundos dos sensores acurados da aeronave. Tais erros foram analisados com abordagem estatística, buscando verificar a existência de tendência (erros sistemáticos) e quantificar as dispersões. Com isso, foi possível tirar conclusões a respeito da influência de cada parâmetro (altura, tipo de câmera, distorção e visada) na acurácia do posicionamento e orientação da aeronave por meio de ressecção espacial.

3.1 Área de voo

O sobrevoo para coleta das imagens utilizadas nas ressecções espaciais foi realizado na cidade de São José dos Campos-SP, com passagens concentradas sobre a região do Campus do IEAv e abrangência de trechos com loteamentos urbanos e de trechos das rodovias Tamoios e Carvalho Pinto, conforme mostrado na Figura 3.2. Este voo fez parte de uma campanha com uma série de voos de imageamento realizados na região do Vale do Paraíba, planejados na Subdivisão de Sensoriamento Remoto (EGI-S) da Divisão de Geointeligência (EGI) do IEAv e executados pelo Instituto de Pesquisas e Ensaios em Voo (IPEV), conforme APÊNDICE A. Ambos os Institutos pertencem ao DCTA, o qual tem autorização do Ministério da Defesa para realizar aerolevantamentos (MD, 2014).

Figura 3.2 – Rota de voo e áreas abrangidas no sobrevoo para coleta das imagens utilizadas para ressecção espacial neste trabalho.



Fonte: Produção do Autor.

Estas áreas foram escolhidas por possuírem grande densidade de pontos foto-identificáveis para a ressecção espacial e por serem locais seguros e próximos para os levantamentos das coordenadas dos pontos em campo. Além disso, são próximos do aeródromo de São José dos Campos, ponto de partida da aeronave empregada, o que facilitou a logística do voo a fim de maximizar o tempo útil de imageamento.

O voo foi planejado para empregar simultaneamente duas câmeras de pequeno formato com características distintas de distorção e para abranger três altitudes diferentes. Como a elevação do terreno na região é cerca de 2000 pés, as alturas médias previstas foram as mostradas na Tabela 3.1. Ainda, para cada altitude, foi planejada a variação da inclinação lateral ϕ da aeronave para abranger diversos ângulos de apontamento da câmera em relação ao solo.

Tabela 3.1 – Condições planejadas para a tomada das imagens no voo.

Parâmetro	Condições
Câmera / Distorção Geométrica	Nikon / Baixa distorção GoPRO / Alta distorção
Apontamento da Câmera	Nadir ($\phi < 3^\circ$) Off-nadir ($\phi = 3$ a 45°)
Altitudes /Alturas médias ¹	3.500ft / 400m 5.000ft / 900m 8.000ft / 1900m

¹Para elevação média do terreno de 2000 ft.

3.2 Aeronave e equipamentos embarcados

O voo foi realizado com a aeronave A-29 Supertucano da Força Aérea Brasileira (FAB), produzida pela EMBRAER, Figura 3.3. Esta aeronave é operada pelo Instituto de Pesquisas e Ensaios em Voo (IPEV), subordinado ao Departamento de Ciência e Tecnologia Aeroespacial (DCTA) em São José dos Campos-SP.

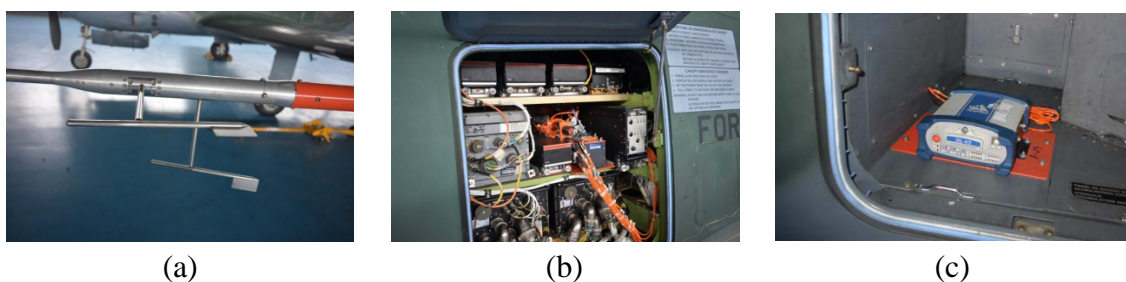
Figura 3.3 – Aeronave A-29 Supertucano da FAB.



Fonte: Produção do Autor.

A aeronave estava equipada com instrumentação especial de ensaios em voo, isto é, um Sistema de Aquisição de Dados (SAD) dotado de sensores extras com grande acurácia e gravadores para registrar todos os parâmetros de voo, conforme Relatório IPEV-130438-RI-03613 (SOUZA *et al.*, 2016). Alguns dos elementos que compõe o SAD são: um *boom* anemométrico, Figura 3.4a, que possui tomadas para medir pressões estática e dinâmica do escoamento não-perturbado e aletas para medir ângulos de ataque e de derrapagem; uma Unidade de Medida Inercial - *Inertial Measurement Unit* (IMU), Figura 3.4b, para fornecer os ângulos de orientação espacial da aeronave (ψ - proa, θ - arfagem e ϕ - rolamento ou inclinação lateral); e um receptor GNSS geodésico de dupla frequência com capacidade de pós-processamento diferencial, Figura 3.4c.

Figura 3.4 – Alguns dos componentes do Sistema de Aquisição de Dados (SAD) da aeronave A-29: (a) *boom* anemométrico, instalado na ponta da asa esquerda, (b) IMU e sistema de gravação, localizados no compartimento eletrônico central, e (c) receptor GNSS geodésico, instalado no bagageiro.



Fonte: Produção do Autor.

3.2.1 IMU

A Unidade de Medida Inercial da aeronave A-29 é o modelo H-764 da fabricante Honeywell. Algumas de suas especificações técnicas foram extraídas do Manual da Aeronave OTFN 1A-29 A/B-1-1 (EMBRAER, 2016) e do catálogo da fabricante (HONEYWELL, 2015), sendo apresentadas na Tabela 3.2.

A IMU é composta de acelerômetros, girômetros e magnetômetro. Os acelerômetros fornecem como medida primária dados das acelerações lineares nas direções dos três eixos ortogonais da aeronave. A partir da integração das acelerações, a IMU fornece dados de velocidade e, por dupla integração das acelerações, fornece dados de posição.

Os girômetros fornecem como medida primária dados das velocidades angulares em torno dos três eixos da aeronave. Por simples integração a IMU fornece dados dos ângulos como o de arfagem θ e o de rolamento ϕ , conforme definição apresentada na Seção 2.4.

O magnetômetro mede diretamente proa magnética, ou seja, azimute da aeronave em relação ao norte magnético. A proa verdadeira ψ , definida em relação ao norte geográfico, pode ser obtida descontando-se a declinação magnética.

A IMU depende da informação das condições iniciais de posição e ângulos para realizar as integrações. Por isso, é necessário um alinhamento do sistema inercial da aeronave antes do voo, o que é executado em 12s pelo piloto antes de iniciar o táxi. Além disso, para o cálculo das posições geográficas, a IMU depende dos próprios ângulos fornecidos pelos girômetros para fazer a transformação do sistema de referência da aeronave para o sistema terrestre, conforme definição apresentada na Seção 2.4.1. Dessa forma, a IMU acumula erros de posição consideráveis em função do tempo de voo e da dinâmica da aeronave (FARREL; BARTH, 1999). No entanto, a acurácia angular é satisfatória, conforme mostrada na Tabela 3.2.

Tabela 3.2 – Especificações técnicas da IMU H-764 utilizada na aeronave A-29 quando operando no modo inercial puro.

Taxa de aquisição	50 Hz
Acurácia	Posição : 0,8 NM/h CEP ¹ Velocidade: 0,8 m/s Proa (ψ): 0,1° Arfagem (θ) : 0,05° Rolamento (ϕ): 0,05°

¹ *Circular Error Probable* (CEP) – Probabilidade do erro circular.

Fonte: Catálogo do fabricante, Honeywell (2015).

3.2.2 Receptor GNSS

O receptor GNSS geodésico que estava instalado na aeronave era o modelo DL-V3 da fabricante Novatel. Algumas de suas especificações técnicas foram extraídas do Manual do Usuário (NOVATEL, 2009) e estão apresentadas na Tabela 3.3.

No modo de posicionamento cinemático com correção diferencial, o receptor alcança acurácia subdecimétrica para linhas de base até 50km. Linha de base é a distância do receptor móvel ao receptor base no solo, sendo um dos parâmetros que influenciam a acurácia do posicionamento GNSS com correção diferencial (MONICO, 2008).

Tabela 3.3 – Especificações técnicas do receptor GNSS Novatel DL-V3 instalado na aeronave A-29.

Número de canais	72
Frequências	L1 e L2
Constelações	GPS e GLONASS
Taxa de aquisição	10Hz
Modos de posicionamento	Estático e cinemático, com correção diferencial pós-processada
Acurácia	Estático Horizontal: 3mm + 0,5ppm Vertical: 5mm + 0,5ppm Cinemático Horizontal: 10mm + 1ppm Vertical: 20mm + 1ppm

Fonte: Novatel (2009).

O receptor estava conectado a uma antena específica para uso aeronáutico, adaptada no extradorso da aeronave A-29, conforme mostrado na Figura 3.5. Durante o voo outro receptor geodésico DL-V3 Novatel ficou posicionado em um ponto geodésico no pátio do IPEV, como mostra a Figura 3.6, para possibilitar a correção diferencial pós-processada dos dados GNSS gravados em voo.

Figura 3.5 – Localização da antena do receptor GNSS DL-V3 Novatel na aeronave.



Fonte: Produção do Autor.

Figura 3.6 – Receptor GNSS Novatel DL-V3 posicionado com tripé no pátio do IPEV sobre um ponto geodésico, usado como base para correção diferencial do receptor embarcado na aeronave.



Fonte: Produção do Autor.

3.2.3 Câmeras

Foram utilizados dois modelos de câmera fotográfica de pequeno formato, uma Nikon Coolpix A e uma GoPRO Hero4 Black, mostradas na Figura 3.7. Ambas foram instaladas em um suporte adaptado a uma janela do intradorso da fuselagem da aeronave A-29, conforme Figura 3.8. Funcionaram em modo *standalone*, ou seja, sem conexão elétrica ou de rádio com os sistemas da aeronave durante o voo, realizando disparo no modo intervalado programado. Algumas especificações técnicas das câmeras foram colhidas nos respectivos Manuais (NIKON, 2013; GOPRO, 2016) e estão apresentadas na Tabela 3.4.

Figura 3.7 – Câmeras que foram embarcadas na aeronave A-29: (a) Nikon Coolpix A e (b) GoPRO Hero4 Black.



Fonte: Manuais dos fabricantes: Nikon (2013) e GoPRO (2016).

Figura 3.8 – Local de fixação das câmeras Nikon e GoPRO na aeronave A-29.



Fonte: Produção do Autor.

Tabela 3.4 – Especificações técnicas nominais das câmeras Nikon e GoPRO embarcadas na aeronave A-29.

Parâmetro		Nikon	GoPro
Modelo		Coolpix A	Hero4 Black
Faixas espectrais		RGB	RGB
Máxima resolução espacial	Foto	16MP (4928x3264)	12MP (4000x3000) (W) 7MP (3000x2250) (M)
	Vídeo	2MP	8MP (4K)
Distância focal nominal		18,5 mm	2,66 mm
Tamanho do sensor CMOS ¹		23,6 x 15,6 mm	6,17 x 4,55 mm
FOV ²		65,1° x 45,7°	122,6° x 94,4° (W) 94,4° x 72,2° (M)
Zoom e foco utilizado		Fixo	Fixo
Modo de disparo utilizado		Intervalado 2s	Intervalado 1s
Dimensões		11 x 7 x 4 cm	7,5 x 7,5 x 3,7 cm
Peso		0,3 kgf	0,2 kgf

¹Complementary Metal-Oxide Semiconductor (CMOS) – tecnologia empregada nos transdutores fotossensíveis do sensor de uma câmera.

²Field Of View (FOV) – Abertura angular do campo de visão de uma câmera. Câmera GoPRO tem modos M – Medium e W – Wide.

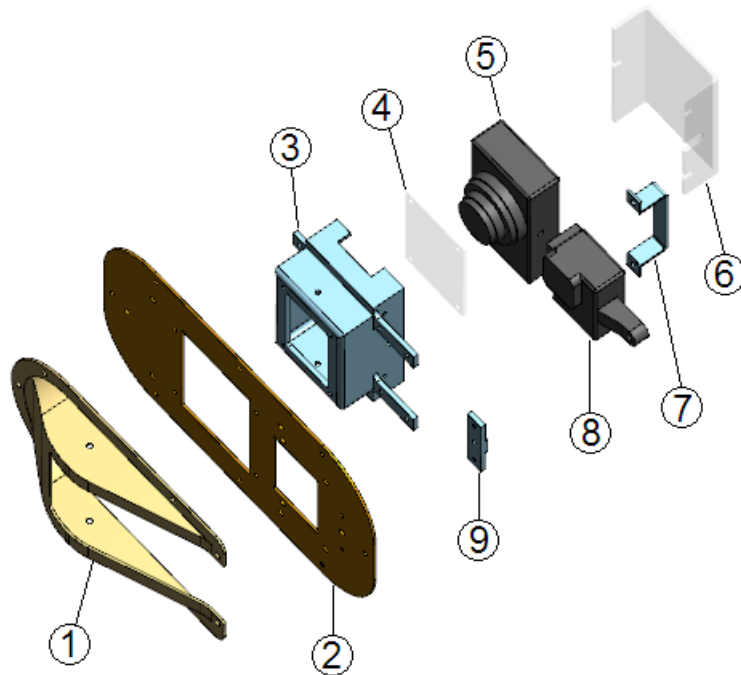
Fonte: Manuais dos fabricantes das câmeras: Nikon (2013) e GoPRO (2016).

O modo de disparo utilizado na câmera Nikon foi o intervalado a cada 2s, pois tinha um limite de 1000 fotos. Dessa forma, para garantir um tempo útil de mais de 20 minutos de gravação, não foi utilizado a cada 1s como na GoPRO. A câmera Nikon, quando em máxima resolução, tem nominalmente um tamanho de pixel representado no solo *Ground Sample Distance* (GSD) de 12,5 cm a 500m de altura e de 25cm a 1000m. A GoPRO no modo de fotografia de máxima resolução com FOV *Wide* tem um GSD de 29cm a 500m e 58cm a 1000m. O GSD tem uma relação linear com a altura.

3.2.3.1 Projeto de instalação das câmeras na aeronave

O projeto de instalação das câmeras na aeronave A-29 foi desenvolvido na Subdivisão de Sensoriamento Remoto (EGI-S) do IEAv tendo como objetivo garantir fixação rígida na aeronave, resistência à vibração e proteção a impacto de partículas. Ao mesmo tempo teve como cuidado a não interferir nas características de voo da aeronave tampouco em sua resistência estrutural a fim de garantir uma operação segura. O suporte foi construído com peças de alumínio, fibra de vidro e acrílico, conforme mostrado na Figura 3.9 e Figura 3.10. Os detalhes do projeto estão apresentados no APÊNDICE B.

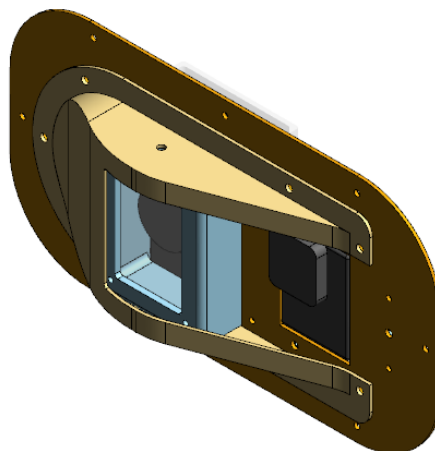
Figura 3.9 – Desenho 3D com vista explodida e descrição das peças do suporte projetado para fixação das câmeras na aeronave A-29.



- 1 – Carenagem de fibra de vidro.
- 2 – Chapa de alumínio com janelas e furos de fixação.
- 3 – Caixa da câmera Nikon em alumínio.
- 4 – Janela de acrílico cristal da caixa da Nikon.
- 5 – Câmera Nikon
- 6 – Tampa de acrílico da caixa da Nikon
- 7 – Abraçadeira de fixação da GoPRO em alumínio.
- 8 – Câmera GoPRO
- 9 – Calço da fixação da GoPRO em alumínio.

Fonte: Produção do Autor a partir do desenho 3D gerado no *Solidworks* pela EST do IEAv.

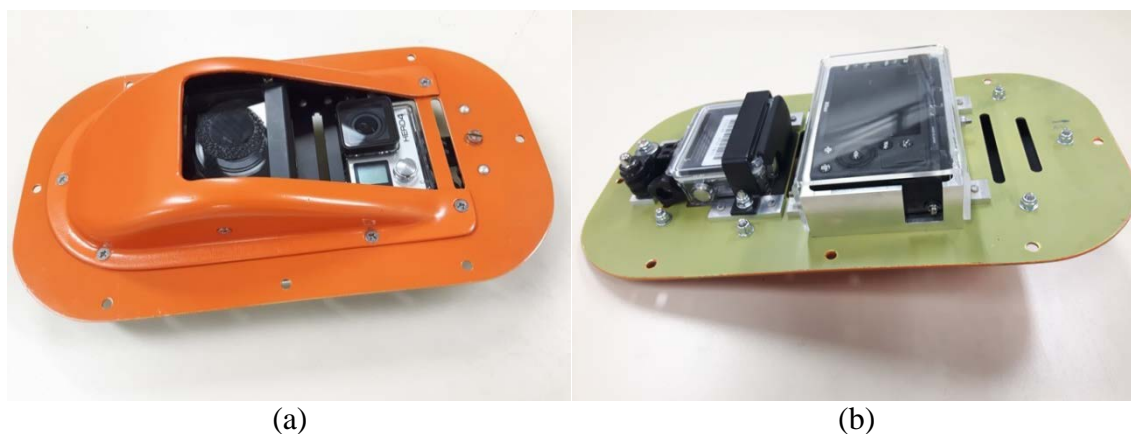
Figura 3.10 – Desenho com vista agrupada das peças do suporte projetado para fixação das câmeras na aeronave.



Fonte: Produção da EST do IEAv no *Solidworks*.

O desenho técnico das peças foi produzido na Seção de desenho da Divisão de Suporte Técnico (EST) do IEAv. A usinagem das peças de alumínio foi realizada na oficina da EST. A carenagem de fibra de vidro foi feita na Divisão de Mecânica (AME) do Instituto de Aeronáutica e Espaço (IAE) do DCTA, a partir de molde confeccionado em madeira. O conjunto pronto e montado está mostrado na Figura 3.11.

Figura 3.11 – Montagem final do suporte para fixação das câmeras na aeronave: (a) vista da face externa e (b) vista da face interna.



Fonte: Produção do Autor.

Para realizar o voo com o suporte das câmeras foi necessário obter uma Permissão Especial de Voo (PEV) junto à Divisão de Certificação de Produto Aeroespacial (CPA) do Instituto de Fomento e Coordenação Industrial (IFI) no DCTA. Para emitir PEV, o IFI exige a comprovação de uma série de requisitos por meio de documentos contendo análise de compatibilidade física, análise aerodinâmica, análise estrutural, análise de compatibilidade eletromagnética, análise de impacto no peso e balanceamento, dentre outros.

As análises aerodinâmica e estrutural foram realizadas pela Divisão de Sistemas Aeronáuticos (ASA) do IAE e apresentadas no Relatório Técnico RT 001/ASA-D (COSTA, 2017). As demais análises foram feitas na EGI-S e apresentadas no Relatório de Análise RA nº 01/EGI-S (ROBERTO, 2017). Assim, o suporte pôde ser instalado na aeronave para realização dos voos, conforme mostrado na Figura 3.12. A PEV emitida pelo IFI está apresentada no APÊNDICE B.

Figura 3.12 – Detalhes do suporte de fixação das câmeras, montado na aeronave e pronto para o voo.



Fonte: Produção do Autor.

3.3 Calibração das câmeras

A calibração foi um procedimento realizado em solo com o objetivo de identificar os parâmetros de distorção geométrica das câmeras, a fim de corrigir a posição dos pixels dos pontos extraídos das imagens utilizadas na ressecção espacial. Para isso, foi projetado e construído um campo de calibração no IEAv, com marcos de coordenadas conhecidas, onde foram tiradas as fotos usadas na identificação dos parâmetros. Foram desenvolvidas algoritmos no *software* MATLAB para todos os passos da calibração: captura dos pontos, construção e ajustamento do modelo de distorção, análise dos erros, e correção da imagem, totalizando cerca de 2700 mil linhas em códigos de programação, tendo sido denominado de CALIBRA.

Esse desenvolvimento próprio foi necessário porque o *software* de calibração que se tinha disponível, o *camera calibration toolbox* do MATLAB, não se mostrou adequado, já que os métodos e os modelos que utiliza não permitem atingir acurácia satisfatória, conforme apresentado no APÊNDICE C e APÊNDICE D e sintetizado na Tabela 3.5.

Tabela 3.5 – Erro de calibração em função do *software*, do método e do modelo utilizado.

Câmera	Software de Calibração	Método de Calibração	Modelo de Calibração	Erro DRMS (pixels)
GoPRO Hero4 Black (modo <i>wide</i>)	<i>Camera Calibration</i> (<i>Toolbox</i> MATLAB)	Campo 2D ¹	MATLAB	841
	CALIBRA	Campo 3D ²	MATLAB	23,4
	CALIBRA	Campo 3D	Completo 6K	4,1
Nikon Coolpix A	<i>Camera Calibration</i> (<i>Toolbox</i> MATLAB)	Campo 2D	MATLAB	53,8
	CALIBRA	Campo 3D	MATLAB	2,6
	CALIBRA	Campo 3D	Completo 4K	1,4

¹Campo 2D – método em que o campo é uma placa de referência com marcos de espaçamento conhecidos (*chessboard*). São necessárias múltiplas poses com apontamentos distintos.
²Campo 3D – método em que as posições tridimensionais de todos os marcos do campo são conhecidas com acurácia, bem como a orientação externa da câmera (posição e apontamento angular). Apenas uma pose é necessária.

Fonte: Produção do Autor.

O *camera calibration toolbox* do *software* MATLAB exige cerca de 20 poses com diferentes apontamentos convergentes em relação a um campo bidimensional (*chessboard*), conforme APÊNDICE C e APÊNDICE D. Possui implementado um modelo de apenas três coeficientes para a distorção radial, conforme mostrado na Tabela 2.1 na Seção 2.9.

Tanto o método com campo bidimensional quanto o modelo do MATLAB não são adequados para a calibração da câmera GoPRO, que possui alta distorção radial no modo *wide*. O erro médio quadrático bidimensional (DRMS) é excessivo, de 841 pixels. No CALIBRA, com campo tridimensional, o erro com o modelo do MATABL é bem menor, de 23 pixels, mas ainda insatisfatório. Com o modelo Completo 6K, o erro cai para os aceitáveis 4 pixels.

Mesmo para uma câmera de baixa distorção radial como a Nikon, o método com campo 2D no MATABL apresenta erro maior que 53 pixels, embora o modelo seja adequado para campo 3D, pois apresenta erro de apenas 2,6 pixels no CALIBRA e menos de 2 pixels com o modelo Completo 4K.

Outra constatação da alta acurácia do CALIBRA foi feita comparando-se a calibração *on the job* realizada no *software* de mapeamento Pix4D para a câmera FC330 do VANT

Phantom4, com a calibração no campo tridimensional feita pelo CALIBRA. O Pix4D apresentou erro DRMS de 46 pixels na reprojeção do modelo, enquanto que no CALIBRA foi dez vezes menor para o mesmo modelo do Pix4D e menor ainda para o modelo próprio Completo 4K, conforme estudo apresentado no APÊNDICE F.

3.3.1 Construção do campo de calibração

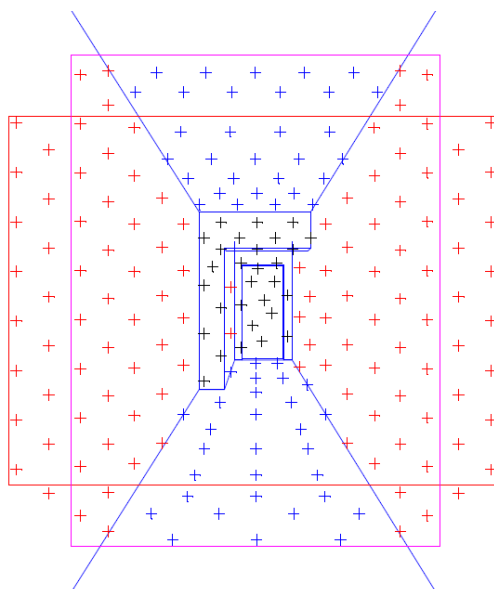
O campo de calibração geométrica, montado em um corredor no subsolo do prédio da Direção do IEAv, consistiu de um espaço tridimensional onde foram fixados cerca de 200 marcos em forma de cruzeta nas cores preta e branca, conforme Figura 3.13. Os marcos foram construídos com pedaços de 5cm de cantoneira de alumínio e adesivados com vinil, cada qual contendo a cruzeta e seu código.

Foi planejada a disposição dos marcos em camadas de várias profundidades a fim de quebrar a dependência linear que ocorre entre alguns parâmetros do modelo de distorção, conforme discutido na Seção 2.9. Além disso, o espaçamento entre os marcos foi projetado de modo que ficassem homoganeamente distribuídas na imagem e cobrindo todo o quadro da foto, seja com orientação horizontal ou vertical. Para isso, foi simulada a imagem de uma câmera genérica no campo e definidas no quadro as coordenadas linha-coluna para os marcos, conforme mostrado na Figura 3.14. Assim, as coordenadas 3D onde seriam fixados os marcos no campo foram obtidas pelo modelo de projeção *pinhole* da câmera.

Figura 3.13 – Campo de calibração geométrica construído no IEAv. Detalhe para os marcos codificados fixados nas paredes, no teto, e para a régua no piso com posições identificadas para estacionar a câmara.



Figura 3.14 – Simulação das imagens horizontal e vertical de uma câmara genérica, posicionada no campo de calibração do IEAv. Método usado para definir a localização 3D onde seriam fixados os marcos no campo a partir da disposição homogênea dos marcos no quadro da foto.



Fonte: Produção em algoritmo desenvolvido pelo Autor no *software* MATLAB.

No processo de calibração, as coordenadas 3D exatas dos marcos no campo devem ser conhecidas. Assim, foi utilizada uma Estação Total topográfica para determinar as coordenadas cartesianas tridimensionais dos cerca de 200 marcos, conforme mostrado na Figura 3.15. Na Tabela 3.6 estão apresentadas as características técnicas de acurácia da Estação Total e a Figura 3.16 mostra as vistas em perspectiva e em planta do *as built* do projeto do campo de calibração geométrica do IEAv.

Figura 3.15 – Estação Total topográfica Topcon GPT-3105W, usada para levantamento das coordenadas dos marcos de referência do campo de calibração do IEAv.



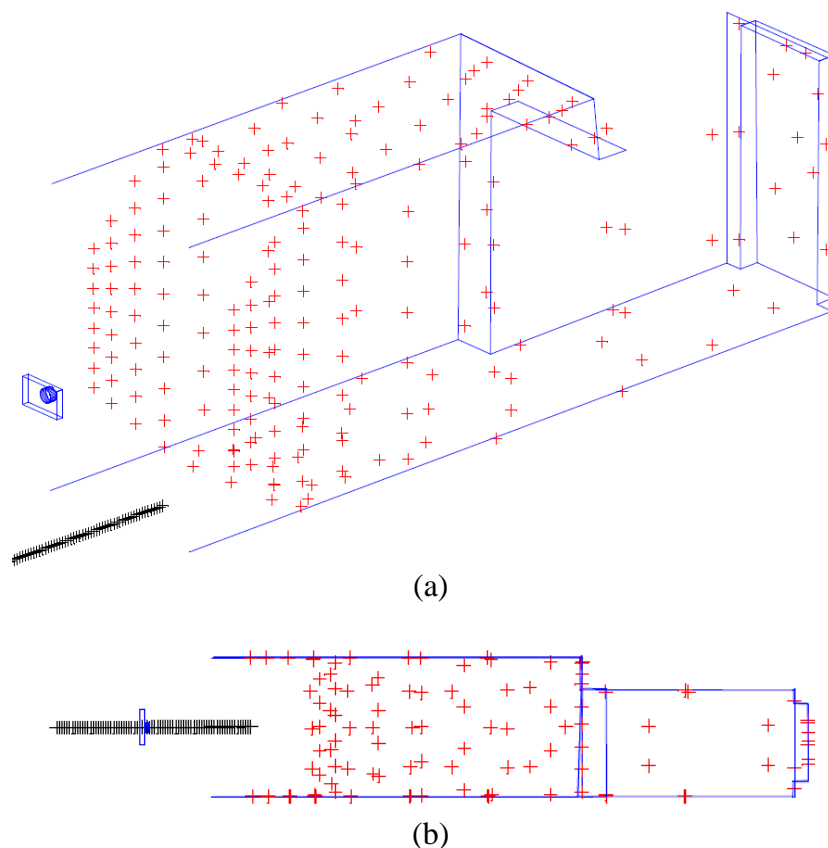
Tabela 3.6 – Especificações técnicas de resolução e acurácia da Estação Total Topcon GPT-3105W utilizada na medição dos marcos do campo de calibração.

Resolução de medida angular eletrônica: 5"
Acurácia de medida angular eletrônica: 5"
Resolução Linear no Modo Fine
Com Prisma: 0,2mm
Sem Prisma: 0,2mm
Acurácia Linear no modo Fine
Com Prisma: $\pm 2\text{mm} + 2\text{ppm} \times D^1$
Sem Prisma: $\pm 3\text{mm} + 2\text{ppm} \times D$

¹Distância de medida

Fonte: Manual da Estação Total – Topcon (2001).

Figura 3.16 – Representação da vista em perspectiva (a) e da vista em planta (3) do *as built* do campo de calibração do IEAv.



Fonte: Produção do Autor no *software* MATLAB.

A metodologia desenvolvida para a calibração neste campo prevê o conhecimento da orientação externa da câmera, ou seja, sua posição em relação aos marcos e seus ângulos de apontamento. Isso favorece a convergência no ajustamento do modelo de distorção e a quebra da dependência linear entre alguns parâmetros, conforme discutido na Seção 2.9. Foi planejada, então, a orientação externa da câmera no campo por meio de uma cabeça de foto panorâmica, adaptada sobre uma mesa niveladora de topografia, conforme mostrado na Figura 3.17. A cabeça possui controle de azimute e elevação, enquanto que a mesa niveladora possui prumo óptico e base móvel sobre tripé para fazer o posicionamento exato na vertical do ponto conhecido no piso.

Figura 3.17 – Dispositivos previstos para fazer a orientação externa da câmera no campo de calibração do IEAv.



- 1 – Tripé de topografia.
- 2 – Mesa niveladora de topografia com prumo óptico.
- 3 – Cabeça de foto panorâmica com controle de azimute e elevação.
- 5 – Câmera.

3.3.2 Posicionamento das câmeras para foto no campo

As fotos utilizadas na identificação dos parâmetros de distorção foram tomadas no campo com as câmeras dentro do suporte de fixação na aeronave a fim de incluir o efeito das janelas de acrílico, conforme mostrado na Figura 3.18. Dessa forma, não foi possível utilizar a cabeça panorâmica como mostrado na Figura 3.17.

O posicionamento foi, então, realizado por meio de uma garra com liberdade para ajuste de azimute, elevação e rotação, adaptada sobre uma mesa niveladora que possuía prumo óptico e liberdade para ajuste de posição horizontal, como mostrado na Figura 3.18. O apontamento foi feito em função da simetria dos marcos no quadro da foto. E a posição longitudinal foi escolhida de forma a preencher o quadro da foto com as marcas, principalmente nas exterminadas, onde a distorção radial é maior.

Figura 3.18 – Posicionamento das câmeras Nikon e GoPRO com visor de acrílico no campo de calibração do IEAv para adquirir as imagens usadas no processo de identificação dos parâmetros de distorção geométrica.

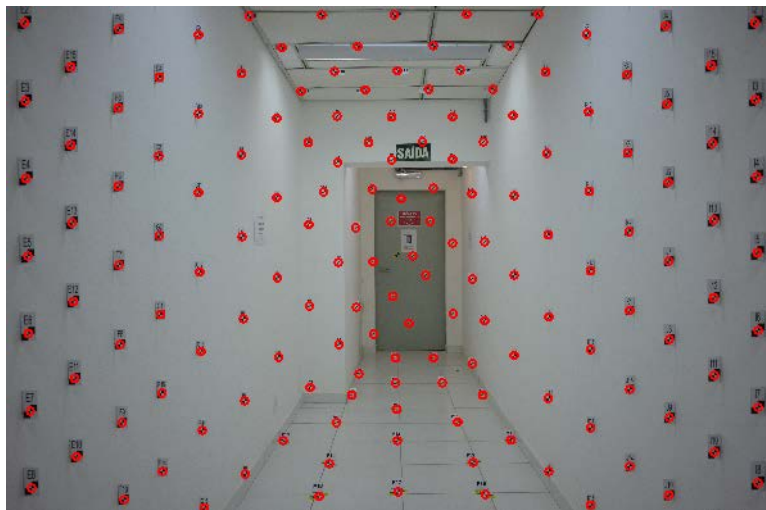


Fonte: Produção do Autor.

As fotos obtidas por cada câmera tiveram as coordenadas linha-coluna dos marcos capturadas por um algoritmo desenvolvido no MATLAB, denominado CALIBRA. Neste algoritmo o ponto era designado manualmente, mas o processo de montagem das matrizes das coordenadas era automatizado, associando às coordenadas correspondentes no campo levantadas com Estação Total, além de gerar uma imagem com a indicação da localização dos marcos capturados, conforme mostrado na Figura 3.19 e Figura 3.20.

Não foi realizado estudo para verificar o número mínimo de pontos que garante a acurácia desejada na calibração, tendo sido utilizados todos os pontos extraídos da imagem.

Figura 3.19 – Imagem obtida no campo de calibração pela câmera Nikon, com indicação dos marcos capturados.



Fonte: Produção com o algoritmo CALIBRA.

Figura 3.20 – Imagens obtidas no campo de calibração pela câmera GoPRO, com indicação dos marcos capturados: (a) modo FOV *Medium* e (b) modo FOV *Wide*.

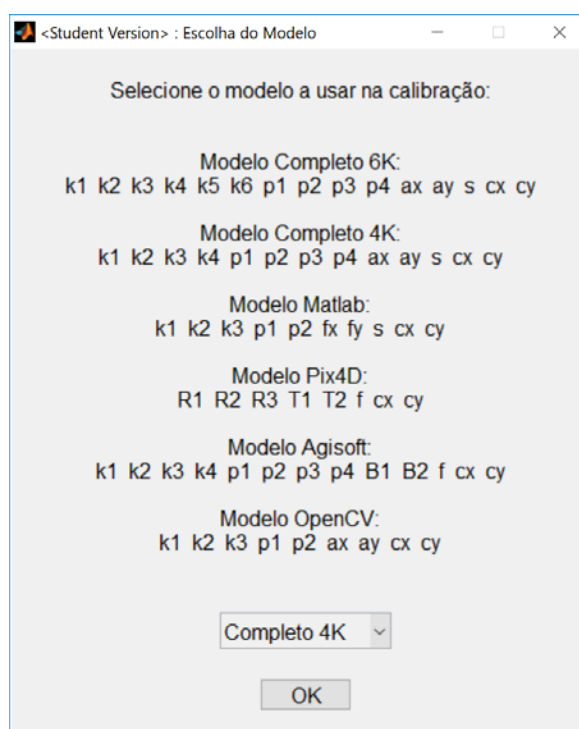


Fonte: Produção com o algoritmo CALIBRA.

3.3.3 Identificação dos parâmetros de distorção geométrica

A etapa final do processo de calibração da câmera é a identificação dos parâmetros de distorção geométrica. Para isso, é necessário definir um modelo de distorção que especifica tais parâmetros e seu equacionamento. Conforme já apresentado na Seção 2.9, há diversos modelos, cada um com suas peculiaridades, possuindo maior ou menor número de parâmetros e maneira particular de equacionamento, devendo o interessado escolher o mais adequado para a câmera que pretende calibrar. O algoritmo CALIBRA, desenvolvido *software* MATLAB para identificar os parâmetros de distorção, apresenta opção de escolha dentre vários tipos de modelo, conforme mostrado na Figura 3.21.

Figura 3.21 – Janela do algoritmo CALIBRA com opção para escolha do tipo do modelo a utilizar na identificação dos parâmetros de distorção geométrica.



Fonte: Produção com o algoritmo CALIBRA.

Para a calibração da câmera Nikon e da GoPRO no modo de FOV *Medium*, foi utilizado o modelo denominado “Completo 4K”, conforme apresentado Tabela 2.1 da Seção 2.9. Este modelo possui todos os parâmetros previstos, sendo quatro coeficientes para a distorção radial. Já para a câmera GoPRO no modo FOV *Wide*, teve de ser utilizado o

modelo “Completo 6K”, com seis coeficientes para distorção radial, o único que se mostrou adequado, devido ao alto grau desse tipo de distorção neste modo.

Com o modelo definido e de posse das coordenadas linha-coluna capturadas na imagem feita no campo de calibração, junto das correspondentes coordenadas cartesianas tridimensionais dos marcos, a identificação dos parâmetros foi realizada por meio da resolução de um sistema não-linear de $2n$ equações a m incógnitas, onde n é igual ao número de marcos capturados e m a soma do número de parâmetros de distorção com os seis parâmetros de orientação externa da câmera (três ângulos e três posições), totalizando 21 incógnitas para o modelo “Completo 6K” e 19 incógnitas para o “Completo 4K”.

Para a resolução desses sistemas não-lineares foi realizado um ajustamento utilizando-se a função “lsqnonlin” implementada no MATLAB, com opção para o algoritmo de Levenberg-Marquardt, um método matricial iterativo baseado no conceito dos mínimos quadrados. Neste ajustamento, há necessidade de se fornecer uma estimativa inicial dos parâmetros. O fornecimento dos limites máximo e mínimo de injuncionamento dos parâmetros é opcional.

Para análise dos erros envolvidos na determinação dos parâmetros, foi realizada uma reprojeção dos marcos do campo, segundo o modelo ajustado, sendo comparada com os pontos reais capturados. Essa comparação fornece um quantitativo do erro final em pixels.

3.4 Sincronismo de tempo

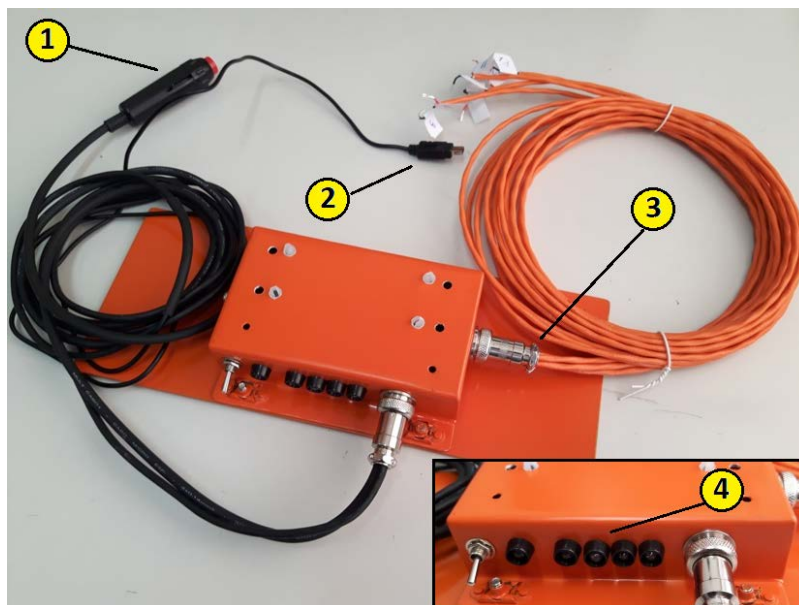
O sincronismo foi um procedimento de solo realizado com o objetivo de determinar as defasagens entre a base de tempo das câmeras e a base de tempo do Sistema de Aquisição de Dados (SAD) da aeronave, especificamente a do receptor GNSS geodésico, que é vinculado ao tempo UTC. O sincronismo de tempo garante a correspondência de cada foto com os parâmetros de voo gravados, no exato instante que ocorreu.

Este procedimento foi mandatório em função da alta dinâmica da aeronave. A mínima velocidade permitida para esse voo foi 140 KIAS – *Knots Indicated Air Speed*, que corresponde a cerca de 150 KTAS – *Knots True Air Speed*, ou seja, uma velocidade em

relação ao solo de quase 80m/s. Dessa forma, uma defasagem de tempo de 1 décimo de segundo já acarreta um erro de 8m no posicionamento. Portanto, para garantir erros na mesma ordem de grandeza do pixel representado no solo (GSD), de 10cm, o sincronismo foi planejado com critério para ficar abaixo da casa dos milissegundos.

Para este procedimento foi projetado um circuito de sincronismo, conforme esquema elétrico apresentado no APÊNDICE G. Este circuito basicamente possui relés de estado sólido e faz interconexão elétrica da câmera Nikon com o SAD, através do circuito condicionador, apresentado no Relatório IPEV-130438-RI-03613 (SOUZA *et al.*, 2016). O painel do circuito de sincronismo também possui diodos emissores de luz - *Light Emitting Diode* (LED) para acusar o acionamento dos dispositivos, conforme Figura 3.22. Assim, este circuito permite o acionamento simultâneo da câmera e dos sistemas da aeronave.

Figura 3.22 – Circuito de sincronismo projetado para fazer interconexão elétrica entre a câmera Nikon e os sistemas da aeronave.

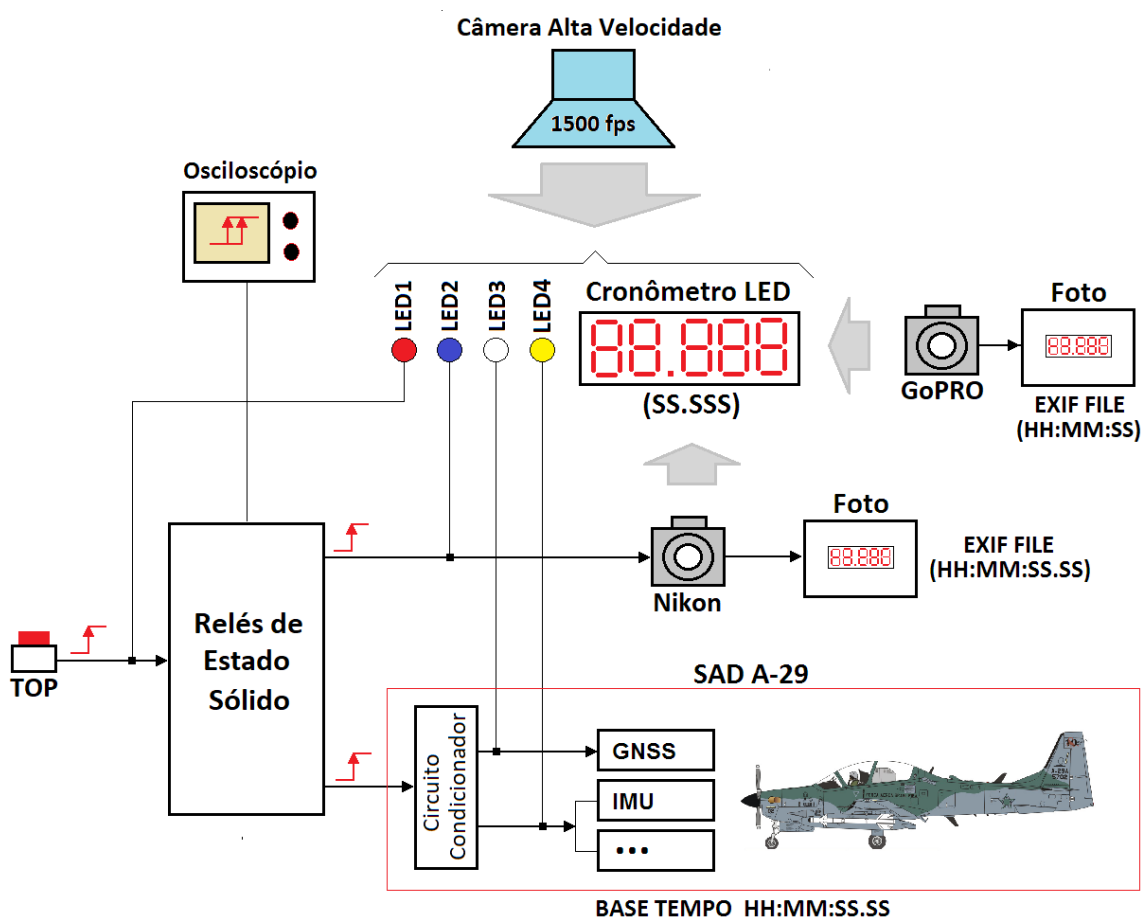


- 1 – Botão TOP de acionamento do sincronismo.
- 2 – Conexão para a câmera Nikon.
- 3 – Conexão para o circuito condicionador da aeronave, onde está ligado o SAD, inclusive o receptor GNSS.
- 4 – Painel de LEDs.

Fonte: Produção do Autor.

No procedimento de sincronismo, a câmera Nikon foi disparada através do botão “TOP” do circuito de sincronismo que simultaneamente comandou a marcação de um evento no SAD e no receptor GNSS, o qual possuía base de tempo independente. A câmera GoPRO foi acionada manualmente para disparar um conjunto contínuo de 20 fotos intervaladas de 1/10 s. Ambas registraram a imagem de um cronômetro com resolução de milissegundos. O instante de disparo efetivo nas câmeras foi registrado no arquivo de metadados “Exif” das imagens, segundo suas bases de tempo, conforme Figura 3.23.

Figura 3.23 – Diagrama esquemático do planejamento do procedimento de sincronismo das bases de tempo das câmeras com a base de tempo do SAD.

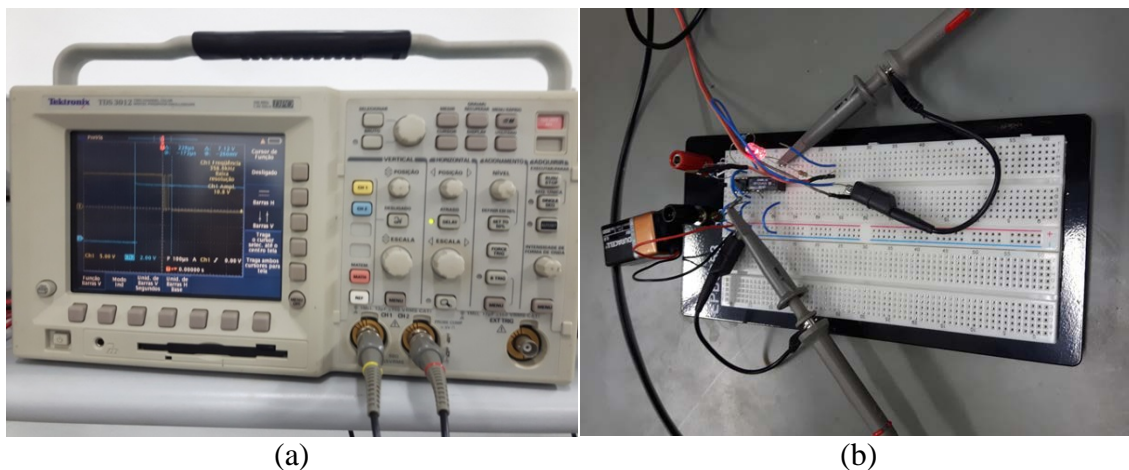


Fonte: Produção do Autor.

Os atrasos de acionamento dos relés de estado sólido, utilizados no circuito de sincronismo, foram medidos isoladamente em laboratório com um osciloscópio digital,

conforme Figura 3.24, apresentando valores da ordem de 240 μ s, tendo sido considerados no cômputo do sincronismo.

Figura 3.24 – Medição dos atrasos de acionamento dos relés de estado sólido do circuito de sincronismo: (a) osciloscópio digital e (b) montagem do relé em *protoboard*.



Fonte: Produção do Autor.

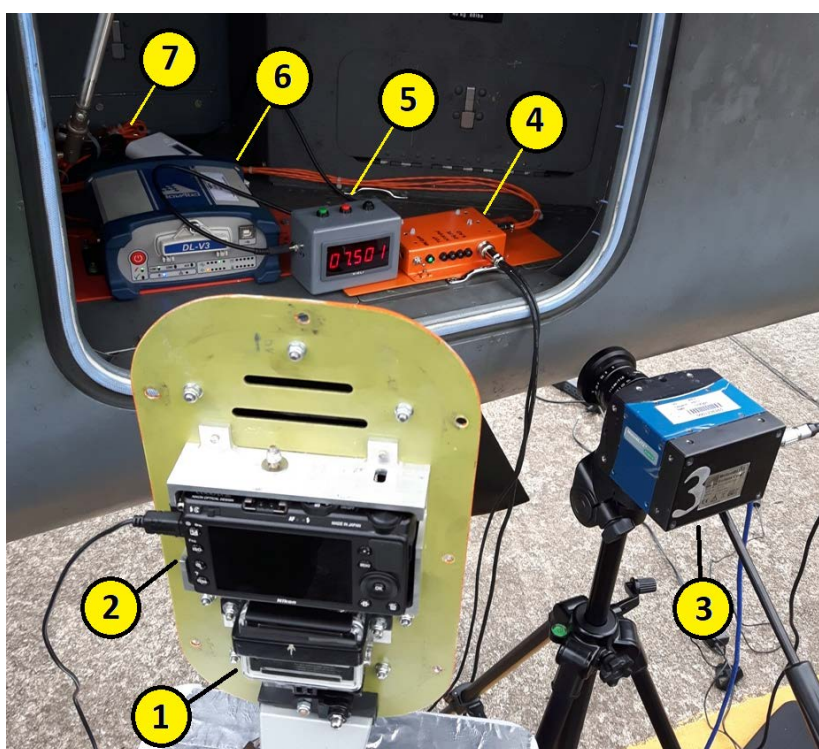
Também foram utilizados diodos emissores de luz - *Light Emitting Diode* (LED) para indicar o exato momento do acionamento “TOP” do sincronismo e da chegada dos sinais para disparo da Nikon e para marcação de evento no SAD e no GNSS. O LED possui um atraso nominal no acendimento de 1 μ s (BROADCOM, 2017), que foi levado em conta no cômputo do sincronismo.

Uma câmera digital MotionBLITZ Cube7 de alta velocidade foi configurada para capturar 1500 quadros por segundo – *frames per second* (fps) a fim de detectar a diferença de tempo entre o acendimento dos LEDs, pois o intervalo de tempo entre cada frame era conhecido (664 μ s). Também teve a finalidade de medir a diferença de tempo entre o comando de disparo da Nikon e o efetivo registro da foto, junto com informações do cronômetro.

O cronômetro com milissegundos de resolução serviu como base também para medir a diferença de tempo entre os disparos das câmeras Nikon e GoPRO para, assim, levantar a defasagem da base de tempo da GoPRO em relação ao tempo UTC do GNSS. Os dígitos no visor do cronômetro eram apresentados sequencialmente em uma varredura de 125Hz

do menor para o maior dígito, ou seja, desde a apresentação de um dígito até sua reapresentação decorriam 8ms acarretando um tempo de apresentação entre um dígito e o seu vizinho de 1,6 ms. A Figura 3.25 mostra todos os dispositivos utilizados no procedimento de sincronismo e a Figura 3.26 apresentada as fotos obtidas por cada câmera.

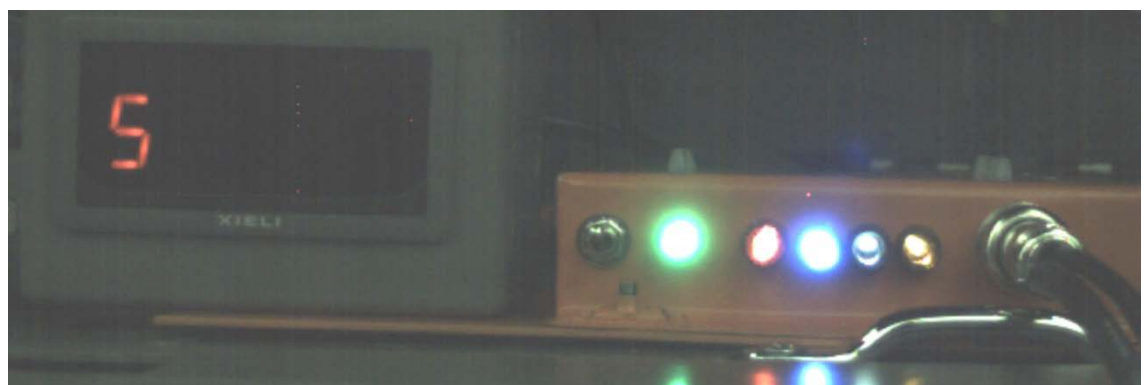
Figura 3.25 – Disposição dos equipamentos durante a realização do sincronismo completo das bases de tempo das câmeras e dos sistemas da aeronave.



- 1 – Câmera GoPRO.
- 2 – Câmera Nikon.
- 3 – Câmera de alta velocidade MotionBLITZ Cube7.
- 4 – Circuito de sincronismo.
- 5 – Cronômetro de milissegundos.
- 6 – Receptor GNSS geodésico.
- 7 – Circuito condicionador do SAD.

Fonte: Produção do Autor.

Figura 3.26 – Fotos obtidas pelas câmeras no procedimento de sincronismo completo: (1) foto da câmera de alta velocidade, (b) foto da Nikon e (c) foto da GoPRO.



25/05/2017 09:03:20 2225,4[ms] 000011093 EoSens Cube7 Mikrotron 640x216 1500fps 664µs

(a)



(b)



(c)

Fonte: Produção do Autor.

Com este procedimento foi possível levantar todos os atrasos envolvidos nos circuitos e, conseqüentemente, das bases de tempo das câmeras e do SAD em relação ao tempo UTC do receptor GNSS geodésico. No APÊNDICE G são apresentados maiores detalhes do equacionamento de todos os atrasos em cada elemento do esquema de sincronismo.

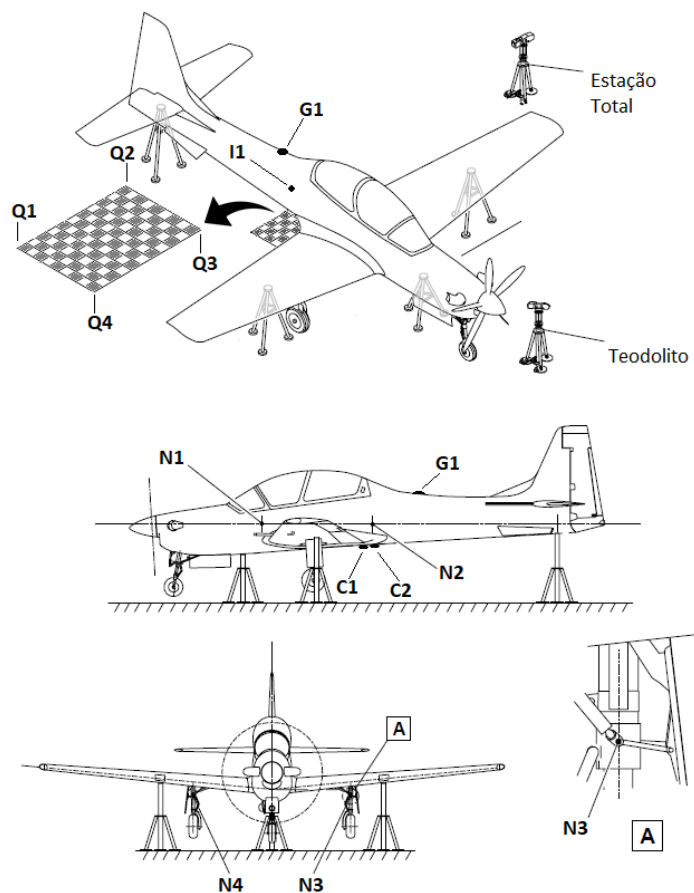
Além deste procedimento completo de sincronismo, realizado dias antes do voo, foi realizado um sincronismo simplificado imediatamente antes do voo, sem uso da câmera de alta velocidade. Esse procedimento simplificado teve a finalidade de levantar a deriva das bases de tempo das câmeras para considerá-la no sincronismo dos tempos no início e durante o voo, já que teve duração de 1:20h.

3.5 Determinação de *offsets*

A determinação dos *offsets* lineares e angulares das câmeras em relação aos sistemas e aos eixos de referência da aeronave foi realizada por meio de um procedimento de solo que exigiu o nivelamento da aeronave. Essa determinação foi necessária porque os dados de posição e orientação angular fornecidos pelo SAD da aeronave são medidos em relação a seus eixos de referência, enquanto que os dados correspondentes calculados por ressecção espacial são relativos aos eixos de referência das câmeras. Portanto, o conhecimento dos *offsets* lineares e angulares foi essencial para se compatibilizar os dados.

Uma placa plana quadriculada foi posicionada e nivelada sob a aeronave dentro do campo de visão das câmeras para ser usada como referência no levantamento da orientação angular das câmeras por meio de ressecção espacial. Estando a aeronave e a placa de referência niveladas, foi realizado levantamento com Estação Total das coordenadas de todos os pontos de interesse, como a posição das câmeras, da antena do receptor GNSS, do centro da IMU, das extremidades da placa de nivelamento, entre outros. O SAD da aeronave estava ligado e gravando dados para se verificar também os *offsets* da IMU. A Figura 3.27 mostra a aeronave e os dispositivos no procedimento de nivelamento.

Figura 3.27 – Ilustração do procedimento de nivelamento da aeronave sobre macacos hidráulicos e descrição da localização da posição dos pontos de interesse.



- N1 e N2 – Marcas de referência na fuselagem para nivelamento longitudinal.
- N3 e N4 – Marcas de referência no pino do trem de pouso para nivelamento lateral.
- C1 – Posição da Câmera Nikon.
- C2 – Posição da Câmera GoPRO.
- G1 – Posição da Antena do GNSS geodésico.
- I1 – Posição da IMU.
- Q1, Q2, Q3 e Q4 – Extremidades do quadro usado como referência para medição da orientação angular das câmeras.

Fonte: Adaptado pelo Autor do Manual de Manutenção AMM 1651 – Embraer (2016).

3.5.1 Nivelamento

O nivelamento lateral da aeronave foi balizado por meio de um Teodolito TOKIO TM20C e o longitudinal por uma Estação Total Nikon NPL-632, que orientavam a operação de ajuste da altura dos macacos hidráulicos nos quais estava apoiada a aeronave, conforme Figura 3.28. As marcas de referência de nivelamento da aeronave

estão mostradas na Figura 3.29. O procedimento foi realizado conforme instrução do Manual de Manutenção AMM 1651 (EMBRAER, 2016).

Figura 3.28 – Equipamentos utilizados para o nivelamento da aeronave: (1) Teodolito TOKIO TM20C e (b) Estação Total Nikon NPL-632.



(a)



(b)

Fonte: Produção do Autor.

Figura 3.29 – Marcas de referência na aeronave para nivelamento longitudinal e lateral.

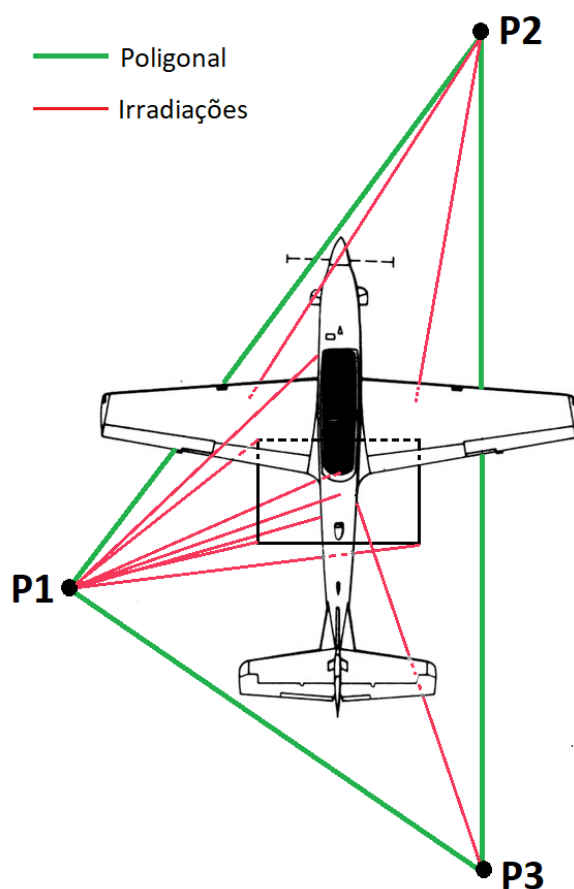


Fonte: Produção do Autor.

3.5.2 Levantamento de coordenadas na aeronave

Para o levantamento das coordenadas dos pontos de interesse descritos na Figura 3.27 foi necessário o estabelecimento de uma poligonal topográfica no entorno da aeronave para basear as irradiações das medidas (SILVA, 2015), conforme croqui na Figura 3.30.

Figura 3.30 – Poligonal topográfica estabelecida para basear as irradiações a fim de medir as coordenadas dos pontos de interesse.



Fonte: Produção do Autor.

Uma Estação Total Topcon GPT-3105W foi estacionada nos vértices P1, P2 e P3 da poligonal. Visadas a VANTE e a RÉ foram efetuadas para construir a poligonal e, ao mesmo tempo, visadas por irradiação para medir os pontos de interesse, conforme mostrado na Figura 3.31 e Figura 3.32. Este modelo de Estação total possui as características de resolução e acurácia apresentadas na Tabela 3.6 da Seção 3.3.

A poligonal foi ajustada no *software* de topografia DataGeosis Office, o que permitiu alcançar alta acurácia nas coordenadas dos pontos, com desvio padrão máximo de 5mm. Maiores detalhes do levantamento estão apresentados no APÊNDICE H.

Figura 3.31 – Levantamento da poligonal topográfica com Estação Total Topcon GPT-3105W estacionada no ponto P3 e prismas posicionados nos pontos P1 e P2.



Fonte: Produção do Autor

Figura 3.32 – Levantamento de pontos de interesse por irradiação com Estação Total: (a) vértices da placa de referência, (b) centro de perspectiva das câmeras com alvo em linha de prumo e (c) centro da antena do receptor GNSS com alvo em minitripé.



(a)



(b)

(c)

Fonte: Produção do Autor.

3.5.3 Ressecção espacial a partir da placa nivelada

A placa de referência colocada sob a aeronave dentro do campo de visão das câmeras foi nivelada utilizando um clinômetro digital com resolução de $0,01^\circ$ por meio de três apoios reguláveis, conforme mostrado na Figura 3.33. A partir das fotos das câmeras Nikon e GoPRO, capturadas com a aeronave e a placa de referência niveladas, Figura 3.34, a posição do Centro de Perspectiva (CP) e a orientação angular das câmeras foram determinadas fazendo-se ressecção espacial, de acordo com a teoria apresentada na Seção 0. Para isso, foram necessárias as coordenadas tridimensionais das marcas da

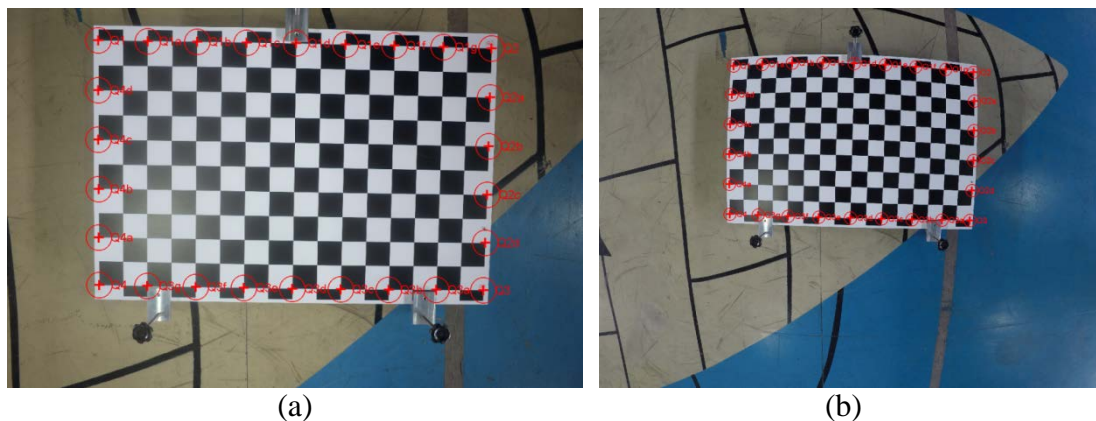
placa, medidas com Estação Total, e as bidimensionais (linha-coluna) correspondentes, extraídas da imagem.

Figura 3.33 – Nivelamento da placa de referência sob a aeronave dentro do campo de visão das câmeras.



Fonte: Produção do Autor.

Figura 3.34 – Fotos da placa de referência nivelada sob a aeronave com pontos capturados para fazer a ressecção espacial a fim de determinar o apontamento angular e a posição acurada do CP das câmeras: (a) foto da Nikon e (b) foto da GoPRO.

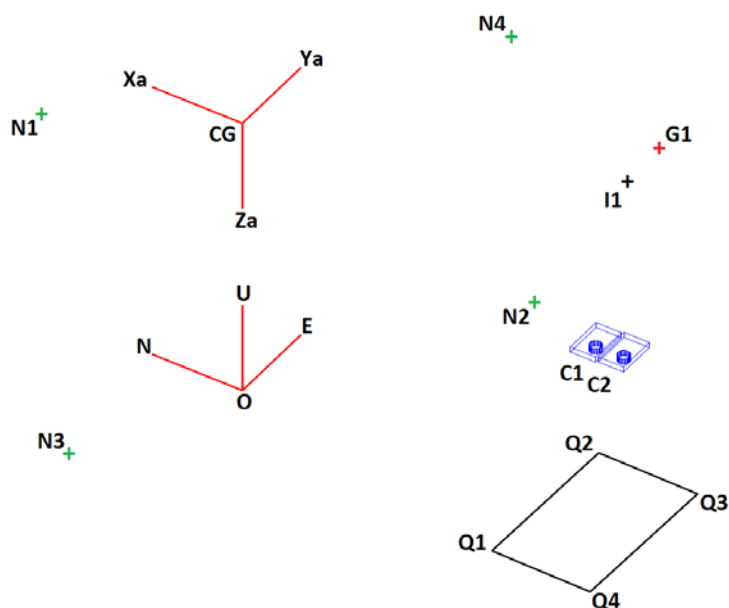


Fonte: Produção do Autor.

Com base nos pontos medidos nos vértices Q1, Q2, Q3 e Q4 da placa, os demais pontos da aresta foram determinados por interpolação, uma vez que o espaçamento da quadrícula era conhecido. A localização da origem do sistema de referência da aeronave (X_a, Y_a, Z_a) foi estabelecido no seu Centro de Gravidade (CG). A localização do CG foi obtida no Manual de Peso e Balanceamento OTFN1A-29A/B-5 (EMBRAER, 2016). A definição dos eixos do sistema da aeronave está apresentada na Seção 2.2.2.

O sistema terrestre local ENU, de acordo com definição apresentada na Seção 2.2.3, foi estabelecido na vertical do CG da aeronave com origem no piso, conforme mostrado na Figura 3.35. A direção do eixo Norte N foi alinhada com o eixo longitudinal X_a da aeronave, pois não foi possível obter a direção do norte verdadeiro no interior do hangar. Para isso, a aeronave deveria estar campo aberto para que fossem levantadas com GNSS as coordenadas geográficas de, pelo menos, dois pontos da poligonal.

Figura 3.35 – Sistema de referência da aeronave (X_a, Y_a, Z_a) e sistema local (E, N, U), definidos para representação dos ângulos e coordenadas das câmeras e dos sistemas da aeronave.



- N1 e N2 – Marcas de referência na fuselagem para nivelamento longitudinal.
- N3 e N4 – Marcas de referência no pino do trem de pouso para nivelamento lateral.
- C1 – Posição da Câmera Nikon.
- C2 – Posição da Câmera GoPRO.
- G1 – Posição da Antena do GNSS geodésico.
- I1 – Posição da IMU.
- Q1, Q2, Q3 e Q4 – Extremidades do quadro usado como referência para medição da orientação angular das câmeras.

Fonte: Produção do Autor no *software* MATLAB.

Ainda, as coordenadas linha-coluna dos pontos capturados nas imagens foram corrigidas usando-se os parâmetros de distorção geométrica identificados para cada câmera no procedimento de calibração, descrito na Seção 3.3. As coordenadas do CP das câmeras, medidas com Estação Total de forma aproximada, foram utilizadas como valores iniciais no ajustamento por mínimos quadrados da ressecção espacial, que teve como resultados os ângulos de apontamento e a posição exata do CP de cada câmera. Com isso foi possível obter *offsets* lineares e angulares das câmeras em relação aos eixos e sistemas da aeronave.

3.5.4 Correção da declinação magnética

Os dados de proa gravados no SAD da aeronave são medidos em relação ao norte magnético, pois são oriundos de um magnetômetro, conforme apresentado na Seção 3.2. Já os dados de proa obtidos por ressecção espacial a partir das fotos das câmeras foram calculados em relação ao norte geográfico ou verdadeiro, pois baseiam-se em pontos geodésicos do terreno. Assim, para compatibilizar os dados, foi necessário converter a proa magnética da aeronave, descontando-se a declinação magnética.

Para obter o valor da declinação magnética, foi utilizado o modelo WMM.2015 - *World Magnetic Model* da NOAA - *National Oceanic and Atmospheric Administration* pertencente à agência norte-americana NGA - *National Geospatial-Intelligence Agency*. Os coeficientes de transformação do modelo constam no Relatório Técnico da NOAA (CHULLIAT *et al.*, 2015).

O Intervalo de Confiança de 95% da declinação magnética fornecida pelo modelo WMM.2015 da NOAA é de 0,383 graus. Com isso, a variância da proa verdadeira foi obtida por propagação de incertezas, que é a soma das variâncias dos termos que são somados ou subtraídos.

3.6 Extração dos pontos nas imagens aéreas

Em cada imagem obtida em voo e selecionada para fazer a ressecção espacial, foram capturadas as coordenadas linha-coluna de três pontos de referência. Poderia ser

utilizado um número maior de pontos, pois melhora a acurácia da ressecção, mas optou-se por utilizar três pontos, que é o mínimo para a ressecção, por se tratar da situação mais crítica.

Para a captura dos pontos na imagem foi desenvolvido um algoritmo no *software* MATLAB em que o ponto era designado manualmente, mas o processo de montagem das matrizes das coordenadas era automatizado, associando às coordenadas correspondentes levantadas em campo, Seção 3.7. Também gerava uma imagem com a indicação da localização e do código dos pontos capturados. Algoritmos de designação automática não foram utilizados visando eliminar possíveis erros de geolocalização neste processo, além de não ser o foco deste trabalho. Sabe-se que o procedimento manual é subjetivo, podendo não ocorrer reprodução idêntica, mas acredita-se que o erro na designação seja da ordem de grandeza do tamanho pixel.

O critério adotado na escolha dos pontos capturados levou em conta dois quesitos. Um deles foi o tipo de feição no solo, que deveria ser de fácil identificação na imagem aérea bem como de fácil locação no levantamento em campo. Assim, foram escolhidas feições como vértices e intersecções evidentes em discontinuidades de pavimentos, pinturas de vias, dentre outros, conforme alguns exemplos mostrados na Figura 3.36. O álbum completo das fotos está apresentado no APÊNDICE I.

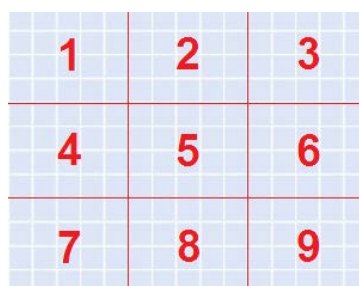
Figura 3.36 – Algumas feições do terreno escolhidas para levantamento em campo.



Fonte: Produção do Autor.

Outro quesito do critério adotado para escolha dos pontos capturados foi a distribuição dos pontos na imagem, que deveriam estar espaçados de modo a formar um “tripé” bem apoiado, a fim de minimizar a diluição de precisão da ressecção espacial, conforme comentado na Seção 2.7.1. Desta forma, foram idealizados nove setores na imagem, assim como mostrado na Figura 3.37, procurando-se não capturar dois ou mais pontos dentro de um mesmo setor ou em setores vizinhos. Também não foram capturados pontos com ou próximo da disposição colinear. A disposição ideal buscada foi a com maior espaçamento entre os pontos como, por exemplo, dos setores 2-7-9 e 1-7-6.

Figura 3.37 – Setores da imagem considerados no critério de distribuição geométrica dos pontos capturados para a ressecção espacial.



Fonte: Produção do Autor.

Na Figura 3.38 são apresentados alguns exemplos da disposição dos pontos capturados em imagens da câmera Nikon com visadas nadir e off-nadir em três alturas diferentes. Por outro lado, na Figura 3.39 são apresentados alguns exemplos em imagens da câmera GoPRO. O álbum completo com o total de 411 imagens indicando os pontos capturados está apresentado em mídia eletrônica.

Para as ressecções espaciais realizadas sem considerar o efeito das distorções das câmeras, as coordenadas linha-coluna dos pontos capturados nas imagens foram corrigidas usando-se os parâmetros de distorção geométrica identificados para cada câmera no procedimento de calibração, descrito na Seção 3.3.

Figura 3.38 – Imagens da câmera Nikon em visadas nadir e off-nadir para três alturas diferentes, com indicação dos pontos capturados para a ressecção espacial.

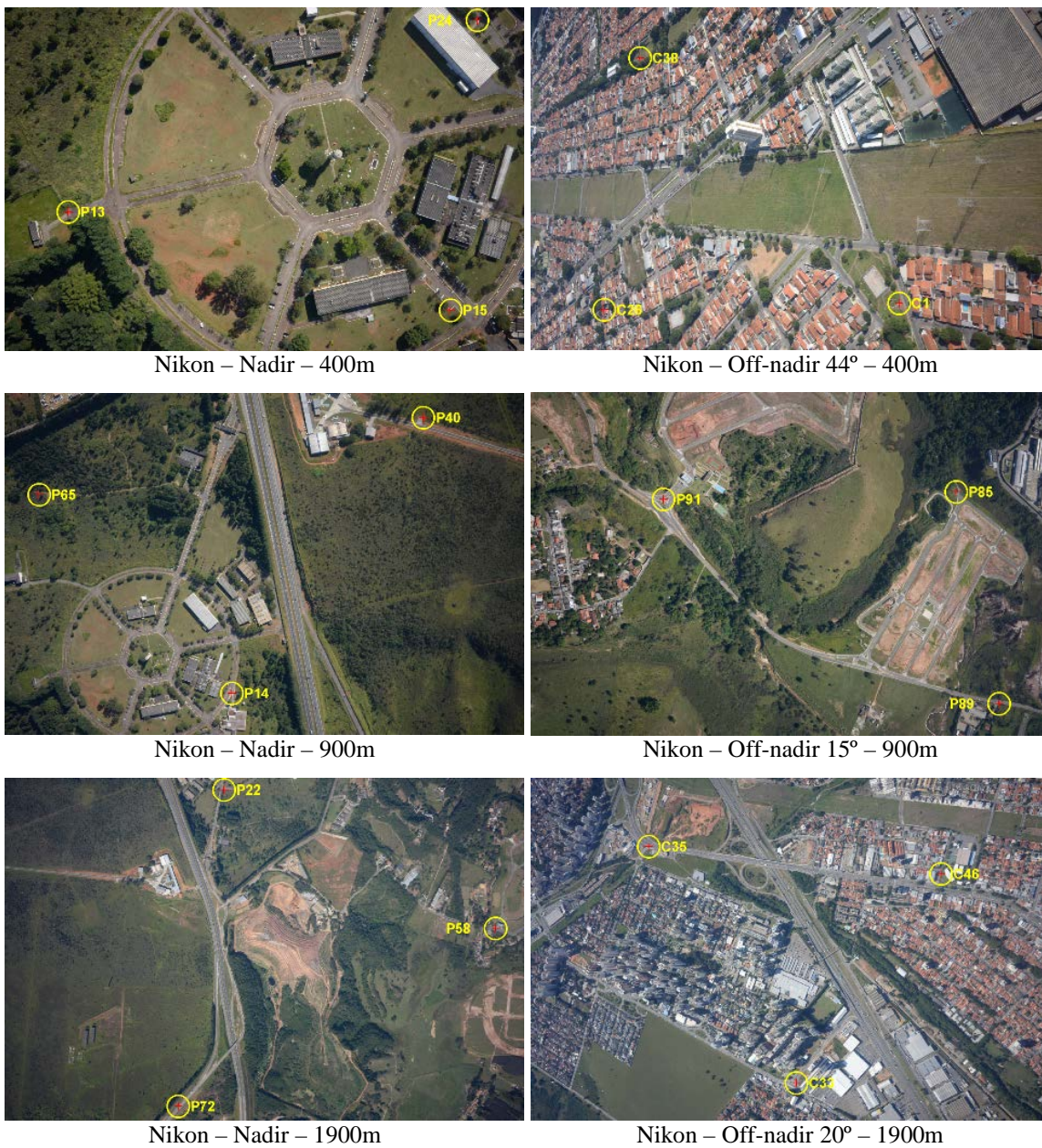
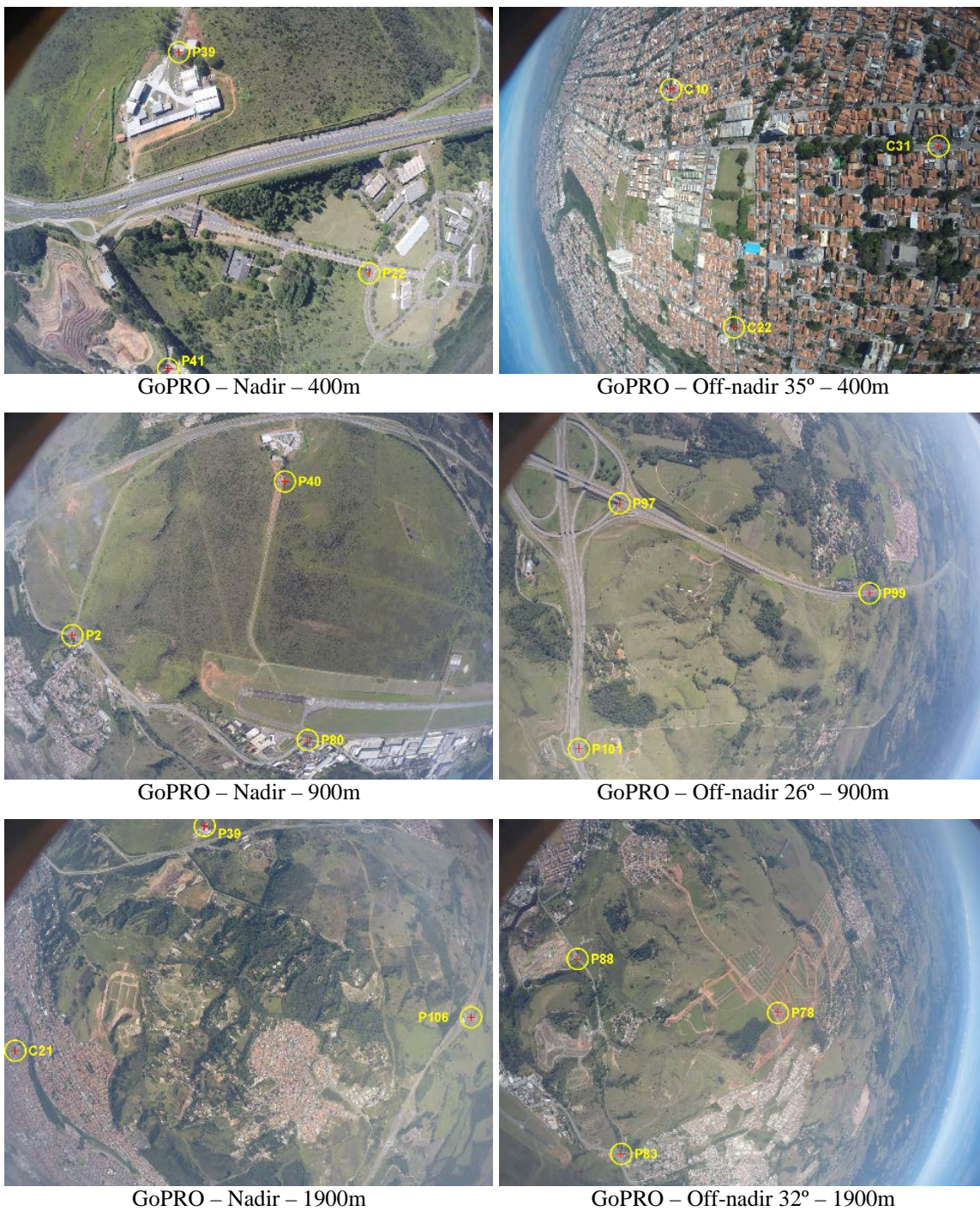


Figura 3.39 – Imagens da câmera GoPRO em visadas nadir e off-nadir para três alturas diferentes, com indicação dos pontos capturados para a ressecção espacial.



3.7 Levantamento de campo

Para fazer a ressecção espacial com as fotos obtidas pelas câmeras em voo, foi necessário o levantamento no terreno das coordenadas das feições foto-identificadas, conforme teoria apresentada na Seção 0. A fim de isolar os resultados da ressecção espacial da influência dos erros das coordenadas no terreno, o levantamento foi planejado para atingir acurácia pelo menos na mesma ordem de grandeza do menor tamanho de pixel no solo (GSD), ou seja, subdecimétrica.

Para alcançar a acurácia requerida, foi necessária a utilização de receptores GNSS geodésicos, com posicionamento do tipo relativo estático (IBGE, 2008), cujas especificações técnicas estão mostradas na Tabela 3.7. Com esse receptor e com essa técnica, em curtas linhas de base, sem interferência de vegetação nem de edificação, é possível alcançar acurácia subdecimétrica (ROBERTO, 2015).

Tabela 3.7 – Especificações técnicas do receptor GNSS TechGEO GTR-G2, utilizado nos levantamentos de campo.

Número de canais	72
Frequências	L1 e L2
Constelações	GPS e GLONASS
Taxa de aquisição	1Hz
Modos de posicionamento	Estático e cinemático, com correção diferencial pós-processada
Acurácia	Estático Horizontal: 3mm + 0,5ppm Vertical: 5mm + 0,5ppm

Fonte: Novatel (2007).

3.7.1 Ponto base

O local usado para o posicionamento do receptor base, que serviu de referência para o processamento diferencial dos pontos levantados, foi estabelecido no interior no Campus do IEAv em um ponto denominado G0 e materializado com chapa de metal em base de concreto, Figura 3.40. A centragem foi realizada por meio de tripé e mesa niveladora com mira óptica.

Figura 3.40 – Ponto G0 base, no interior do Campus do IEAv, utilizado como referência para o processamento relativo dos pontos levantados.



Fonte: Produção do Autor.

O ponto G0 foi levantado por meio de posicionamento estático relativo com mais de 8h de rastreamento em três dias diferentes, utilizando-se o receptor geodésico GTR-G2. Os dados foram pós-processados no *software GTR Processor* usando como base dados de rastreamento da estação SJSP 91537 da Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo (RBMC) do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), localizada nas dependências do INPE em São José dos Campos - SP, com cerca de 5 km de linha de base. O relatório desta estação está apresentado no APÊNDICE I.

As coordenadas do ponto SJSP possuem uma alta precisão posicional, da ordem de milímetros de desvio-padrão. Com isso, o processamento diferencial para o ponto G0 resultou em uma coordenada com a mesma ordem de grandeza de precisão, conforme apresentado na Tabela 3.8.

Tabela 3.8 – Coordenadas da estação SJSP da RBMC e do ponto base G0 levantado.

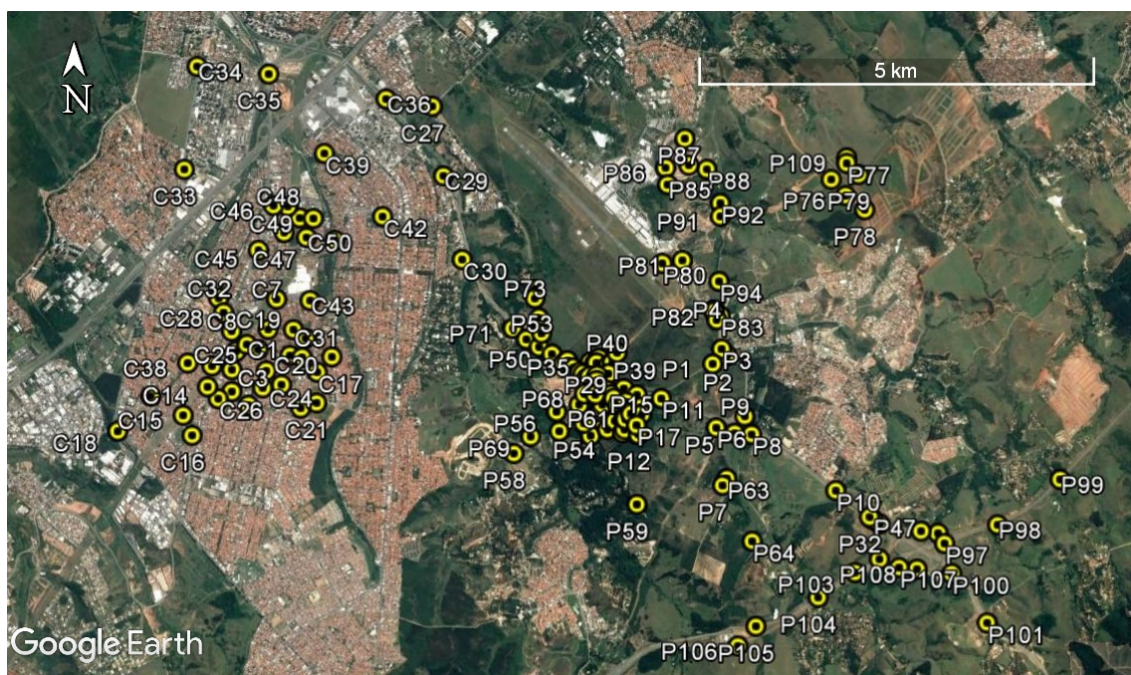
Ponto	Latitude	σ_{Lat} (m)	Longitude	σ_{Long} (m)	h (m)	σ_h (m)
SJSP 91537	S 23°12'25,6767"	0,002	W 45°51'42,2560"	0,003	605,809	0,016
	N 7.433.289,119 m		E 411.820,813 m			
G0	S 23°15'09,5455"	0,005	W 45°51'26,3906"	0,007	676,461	0,017
	N 7.428.252,296 m		E 412.301,542 m			

Datum SIRGAS2000, MC 45° (fuso 23)

3.7.2 Pontos de interesse

Foram levantados um total de 160 pontos abrangendo regiões urbanas, estradas e o entorno do Campus do IEAv. Foi utilizado o receptor GTR-G2 com posicionamento relativo estático rápido de 1 a 5 min de duração, dependendo da linha de base, que chegou a 7 km (IBGE, 2008).

Figura 3.41 – Disposição dos pontos levantados em campo para serem utilizados na ressecção espacial a partir das fotos das câmeras embarcadas.



Fonte: Produção do Autor.

A definição dos pontos para serem medidos em campo foi feita a partir da análise das fotos aéreas da Nikon e GoPRO selecionadas para ressecção espacial, conforme apresentado na Seção 3.6. A posição exata em que foi estacionado o tripé do receptor GNSS no levantamento dos pontos foi registrada em imagem para auxiliar a identificação no momento da captura nas fotos aéreas. Alguns exemplos estão mostrados na Figura 3.42 e o álbum completo no APÊNDICE I.

Figura 3.42 – Posição em que foi estacionado o GNSS no levantamento das coordenadas de alguns pontos.



Fonte: Produção do Autor.

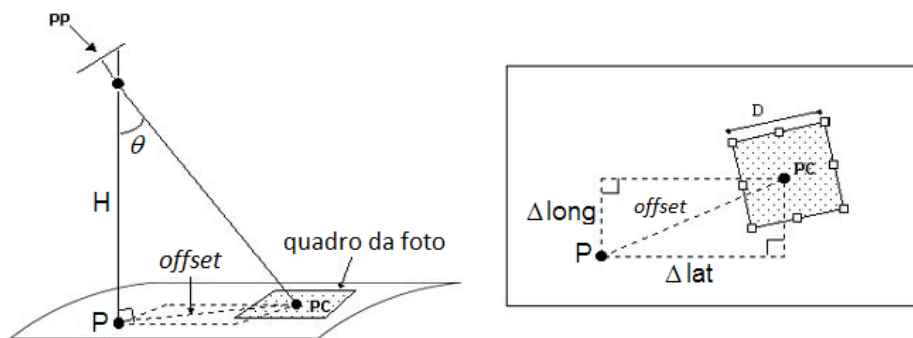
No APÊNDICE I é apresentada a tabela completa com as coordenadas e desvios-padrão de todos os pontos levantados no solo.

3.8 Ressecção espacial

A ressecção espacial foi o procedimento computacional realizado para a determinação da posição (componentes leste, norte e vertical) e da orientação (proa, arfagem e rolamento ou inclinação lateral) da aeronave a partir das coordenadas linha-coluna dos pontos capturados nas imagens aéreas, de acordo com a Seção 3.6, e das coordenadas correspondentes levantadas em campo com GNSS, conforme apresentado na Seção 3.7. Foi utilizado um algoritmo desenvolvido no *software* MATLAB.

A ressecção foi necessária porque nem sempre a posição da aeronave corresponde à vertical do ponto que aparece no pixel central da imagem, conforme ilustrado na Figura 3.43. A Tabela 3.9 mostra que, mesmo para pequenos ângulos off-nadir, o *offset* da posição da aeronave em relação ao ponto correspondente ao pixel central da imagem assume valores significativos em função da altura.

Figura 3.43 – Ilustração do *offset* da posição da aeronave em relação ao pixel central da imagem, que ocorre em condição off-nadir.



PP – ponto principal
 PC – pixel central
 P – posição da aeronave/câmera
 H – altura de voo
 θ - ângulo off-nadir

Fonte: Produção do Autor.

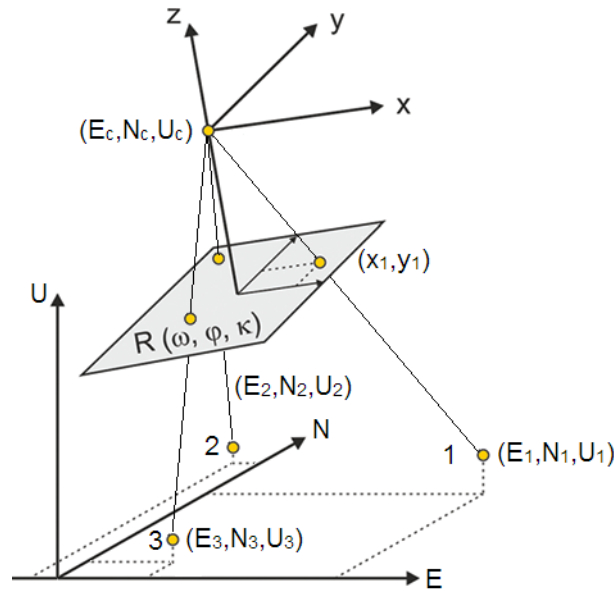
Tabela 3.9 – Valores de *offset* horizontal em metros no solo devido à condição off-nadir, em função da altura.

	Altura	100m	500m	1000m	2000m
Ângulo off-nadir	3°	5	26	52	105
	7°	12	61	123	246
	15°	27	134	268	536

Fonte: Produção do Autor.

Em cada imagem foram capturados somente três pontos, conforme mostrado na Figura 3.44, pois é o mínimo necessário para computar a ressecção e por ser a situação mais crítica, ou seja, quanto maior o número de pontos, menor a diluição da precisão, isto é, melhor o resultado da ressecção.

Figura 3.44 – Ilustração das coordenadas dos três pontos capturados na imagem para ressecção espacial e as coordenadas correspondentes no solo, segundo sistema ENU.



E,N,U – sistema de referência terrestre *east-north-up*
 E_c, N_c, U_c – posição do centro de perspectiva da câmera
 x, y, z – sistema de referência da câmera
 R – rotação pelos ângulos de orientação externa ω, φ, κ

Fonte: Produção do Autor.

$$\begin{aligned}
 F_1(E_c, N_c, U_c, \omega, \varphi, \kappa) &= 0 \\
 G_1(E_c, N_c, U_c, \omega, \varphi, \kappa) &= 0 \\
 F_2(E_c, N_c, U_c, \omega, \varphi, \kappa) &= 0 \\
 G_2(E_c, N_c, U_c, \omega, \varphi, \kappa) &= 0 \\
 F_3(E_c, N_c, U_c, \omega, \varphi, \kappa) &= 0 \\
 G_3(E_c, N_c, U_c, \omega, \varphi, \kappa) &= 0
 \end{aligned}
 \tag{3.1}$$

O cômputo da ressecção com três pontos resume-se à resolução de um sistema não-linear de 6 equações a 6 incógnitas, conforme mostrado nas Equações 3.1, de acordo com a teoria apresentada na Seção 0. Para a resolução foi realizado uma otimização, também denominada de ajustamento, usando-se a função “lsqnonlin” implementada no MATLAB, com opção para o algoritmo de Levenberg-Marquardt, um método matricial iterativo baseado no conceito dos mínimos quadrados. Neste

ajustamento, há necessidade de se fornecer uma estimativa inicial dos parâmetros. O fornecimento dos limites máximo e mínimo de injuncionamento dos parâmetros é opcional.

Os valores utilizados para a estimativa inicial da posição foram os dados do inercial puro provenientes da IMU da aeronave. Para a estimativa inicial da proa verdadeira, foi utilizada a proa magnética da aeronave. E para os ângulos de arfagem e inclinação lateral, foram atribuídos valores iniciais iguais a zero nas visadas nadir e os ângulos puros dos girômetros da IMU da aeronave nas visadas off-nadir. Isso porque procurou-se representar o caso real de ressecção para uma aeronave ou VANT que não dispõe de sensores acurados.

Para cada imagem com pontos capturados, foi realizada a ressecção espacial tanto com as coordenadas linha-coluna brutas, ou seja, sem correção de distorção geométrica, quanto com as coordenadas corrigidas.

Os dados de posição obtidos da ressecção espacial estavam representados no sistema de referência local ENU, conforme definição apresentada na Seção 2.2. Mas os dados de posição fornecidos pelo GNSS geodésico a bordo da aeronave estavam representados no sistema geodésico, ou seja, em coordenadas angulares (latitude e longitude). Assim, para a comparação das posições a fim de levantar os erros, foi necessária a transformação das coordenadas geodésicas para o sistema ECEF e, depois, para o local ENU, de acordo com o exposto na Seção 2.2.

4 RESULTADOS

O objetivo principal deste trabalho foi avaliar a acurácia na determinação dos parâmetros de navegação (posição e orientação espacial) de uma aeronave, feita por ressecção espacial de imagens geradas por câmeras embarcadas. Para essa avaliação, os “valores verdadeiros” utilizados como referência foram os dados de posição e de orientação gravados por sensores de alta acurácia a bordo.

Para ambas as câmeras, foram obtidos resultados em três alturas diferentes, visadas nadir e off-nadir, com e sem correção das distorções geométricas das câmeras, totalizando 24 condições diferentes.

Os resultados da ressecção pelas imagens com distorção da câmera, quando comparados com essa referência, indicaram a magnitude do erro total. Já a comparação dos resultados da ressecção pelas imagens com correção das distorções, por meio dos parâmetros de calibração, indicaram a magnitude dos erros devido à influência dos demais fatores.

Dessa forma, os resultados forneceram subsídios para entender a influência do tipo da câmera, da altura, do tipo de visada e da correção das distorções na determinação dos parâmetros de navegação de uma aeronave.

4.1 Parâmetros de distorção identificados na calibração das câmeras

O procedimento de calibração das câmeras, realizado conforme metodologia apresentada na Seção 3.3, teve como objetivo identificar os parâmetros de distorção geométrica a fim de corrigir a posição dos pixels dos pontos extraídos das imagens utilizadas na ressecção espacial.

Os parâmetros obtidos para a câmera Nikon estão apresentados na Tabela 4.1 e para a câmera GoPRO na Tabela 4.2. A observação destes valores por si só não permite ter uma visão da magnitude do erro na geometria da imagem. Para isso, foi realizada na Seção 4.1.1 uma análise da influência destes fatores no erro em distância no solo.

Tabela 4.1 – Valores dos parâmetros de distorção geométrica identificados no processo de calibração da câmara Nikon no campo do IEAv.

Parâmetro	Valor
Distância Focal Nominal	$f = 18,5 \text{ mm}$
Distância Focal Calibrada	$f_c = 18,361 \text{ mm}$
Tamanho do Sensor (CMOS 1/2.3")	$q_x = 23,6 \text{ mm}$ $q_y = 15,6 \text{ mm}$
Tamanho do pixel	$\mu_x = 4,789 \text{ }\mu\text{m}$ $\mu_y = 4,779 \text{ }\mu\text{m}$
Distância Focal equivalente a 35mm	$f_{35} = 28,082 \text{ mm}$
<i>Crop Factor</i>	$\text{CrF} = 1,53$
Distorção Radial	$k_1 = -0,0638938$ $k_2 = 0,0034213$ $k_3 = 0,1222400$ $k_4 = -0,0653188$
Distorção Tangente	$p_1 = -0,000649265$ $p_2 = 0,002233340$ $p_3 = 0,537146000$ $p_4 = 0,014828200$
Distorção de Afinidade	$a_x = 3837,1$ $a_y = 3838,6$
Cisalhamento (<i>skew</i>)	$s = -2,46$
Ponto Principal	$c_x = 2466,7 \text{ pixels}$ $c_y = 1616,5 \text{ pixels}$
Tamanho da Imagem	$C = 4928 \text{ pixels}$ $L = 3264 \text{ pixels}$

Fonte: Produção com o algoritmo CALIBRA.

Tabela 4.2 – Valores dos parâmetros de distorção geométrica identificados no processo de calibração da câmara GoPRO no campo do IEAv.

Parâmetro	Valor	
	FOV M ¹	FOV W ²
Distância Focal Nominal	$f = 2,6596 \text{ mm}$	$f = 2,6596 \text{ mm}$
Distância Focal Calibrada	$f_c = 2,6581 \text{ mm}$	$f_c = 2,6580 \text{ mm}$
Tamanho do Sensor (CMOS 1/2.3")	$q_x = 4,63 \text{ mm}$ $q_y = 3,41 \text{ mm}$	$q_x = 6,17 \text{ mm}$ $q_y = 4,55 \text{ mm}$
Tamanho do pixel	$\mu_x = 1,543 \text{ }\mu\text{m}$ $\mu_y = 1,517 \text{ }\mu\text{m}$	$\mu_x = 1,543 \text{ }\mu\text{m}$ $\mu_y = 1,517 \text{ }\mu\text{m}$
Distância Focal equivalente a 35mm	$f_{35} = 20,162 \text{ mm}$	$f_{35} = 15,002 \text{ mm}$
<i>Crop Factor</i>	CrF = 7,53	CrF = 5,64
Distorção Radial	$k_1 = -0,26442300$ $k_2 = 0,11103300$ $k_3 = -0,03511770$ $k_4 = 0,00499513$	$k_1 = 0,0116949$ $k_2 = -0,0531050$ $k_3 = -0,2840050$ $k_4 = 0,1666620$ $k_5 = -0,0392797$ $k_6 = 0,0034252$
Distorção Tangente	$p_1 = 0,000312387$ $p_2 = -0,000569671$ $p_3 = -0,116402000$ $p_4 = -0,186847000$	$p_1 = -0,0001206$ $p_2 = -0,0002603$ $p_3 = -0,1778850$ $p_4 = 0,0115032$
Distorção de Afinidade	$a_x = 1758,8$ $a_y = 1744,5$	$a_x = 1737,5$ $a_y = 1738,0$
Cisalhamento (<i>skew</i>)	$s = -0,498$	$s = -1,24$
Ponto Principal	$c_x = 1480,2 \text{ pixels}$ $c_y = 1134,2 \text{ pixels}$	$c_x = 1975,0 \text{ pixels}$ $c_y = 1510,8 \text{ pixels}$
Tamanho da Imagem	$C = 3000 \text{ pixels}$ $L = 2250 \text{ pixels}$	$C = 4000 \text{ pixels}$ $L = 3000 \text{ pixels}$

¹M – modo FOV *Medium*, ²W – modo FOV *Wide*

Fonte: Produção com o algoritmo CALIBRA.

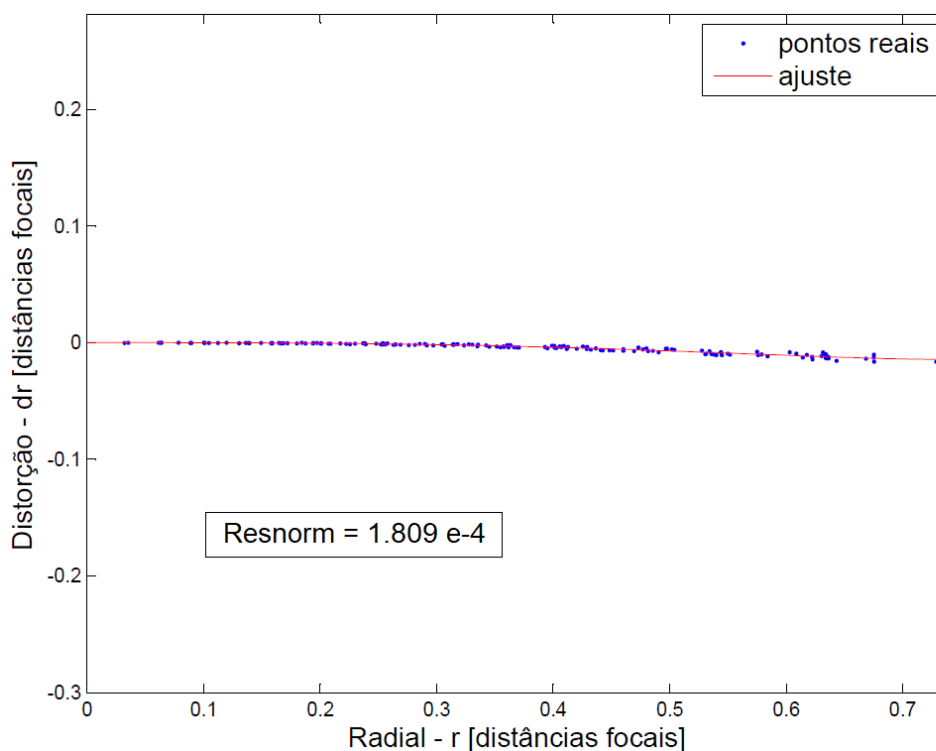
A distorção radial geralmente é a que mais causa impacto na geometria na imagem. Os parâmetros k_1 a k_6 são os coeficientes da curva polinomial que exprime a distorção em função da distância radial, conforme mostrado na Figura 4.1 e na Figura 4.2.

A curva radial da câmara Nikon, Figura 4.1, confirma a baixa magnitude deste tipo de distorção nessa câmara e mostra que houve uma aderência adequada do modelo de distorção radial aos pontos reais medidos.

O coeficiente de determinação R^2 , geralmente utilizado para indicar a qualidade do ajustamento de uma regressão linear, não pode ser calculado para o ajuste da curva de

distorção radial por se tratar de uma função não-linear. Neste caso, o indicativo de qualidade pode ser obtido pelo valor da norma do quadrado do resíduo, aqui denominado de ‘Resnorm’. Enquanto o R^2 varia de 0 a 1, sendo 1 o ajuste perfeito, o Resnorm varia de zero a infinito, sendo 0 o ajuste perfeito. Os valores encontrados para todos os casos foram da ordem de 10^{-4} , conforme apresentado na legenda dos gráficos, indicando um excelente ajuste das curvas.

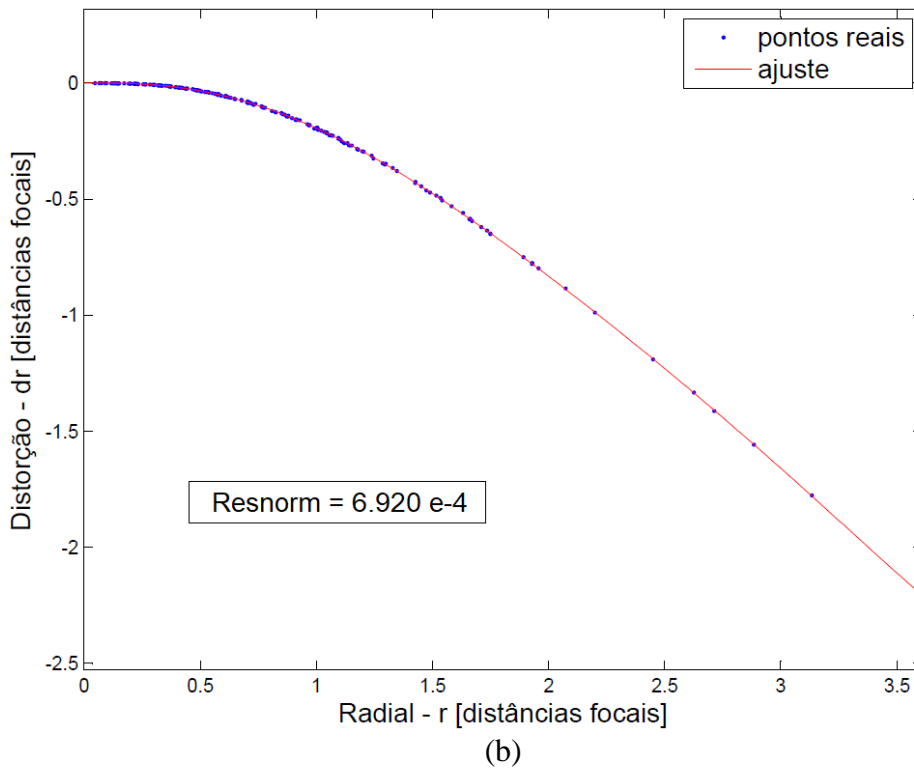
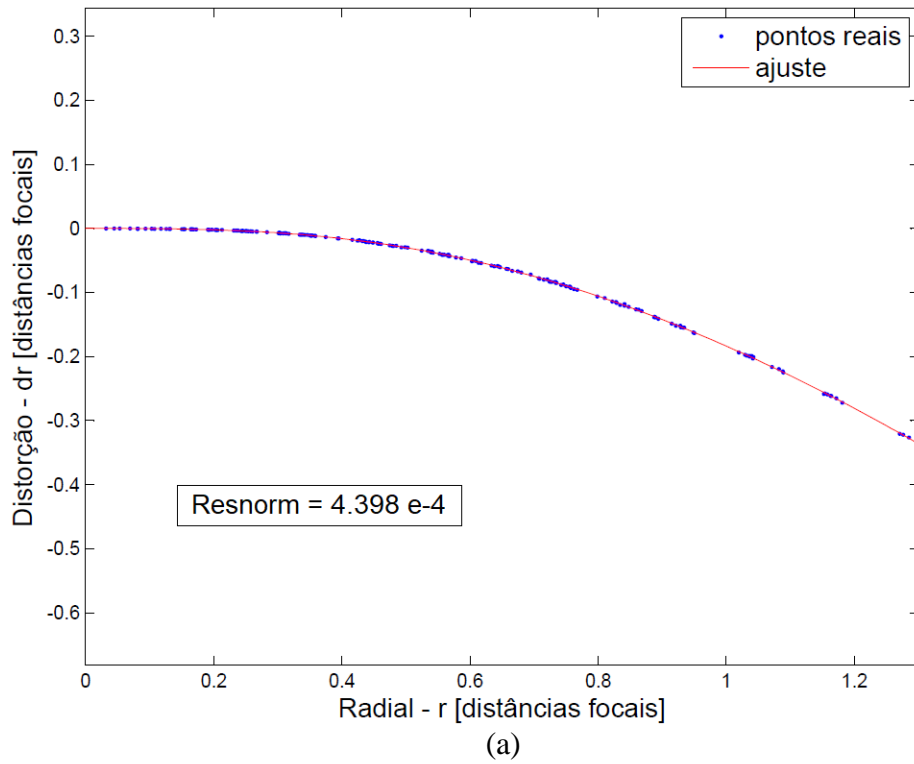
Figura 4.1 – Curva de distorção radial obtida na calibração da câmera Nikon no campo do IEAv.



Fonte: Produção com o algoritmo CALIBRA.

A curva da câmera GoPRO no modo *Medium*, Figura 4.2a, além da boa aderência do modelo, mostra uma magnitude cerca de 18 vezes a da Nikon. No modo *Wide*, Figura 4.2b, chega a mais de 100 vezes.

Figura 4.2 – Curva de distorção radial obtida na calibração da câmera GoPRO no campo do IEAv para os modo (a) FOV *Medium* e (b) FOV *Wide*.



Fonte: Produção com o algoritmo CALIBRA.

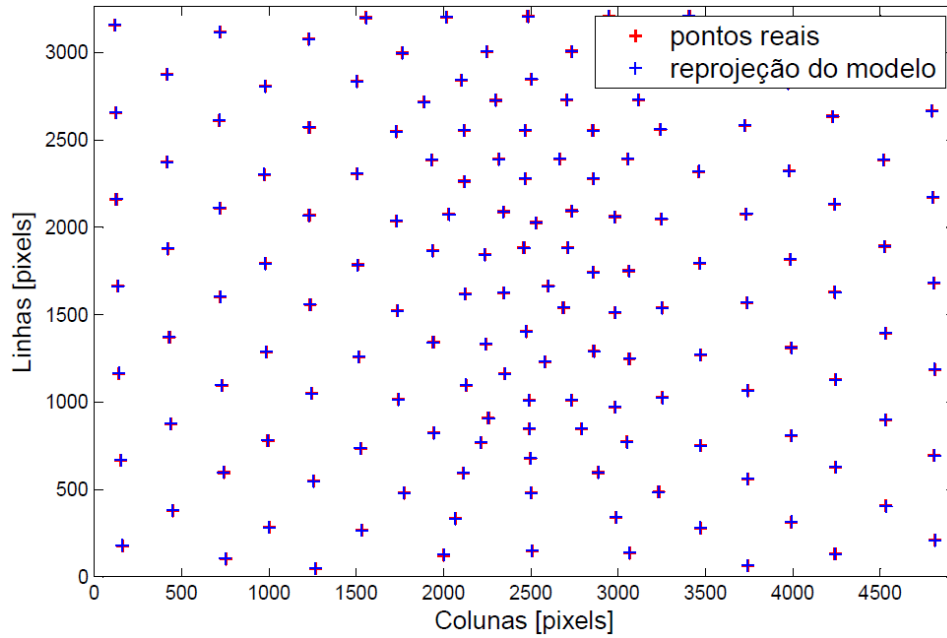
A partir de todos os parâmetros identificados no modelo completo de distorção foi realizada a reprojeção das coordenadas conhecidas dos marcos do campo de calibração para o sistema bidimensional da imagem, sendo comparadas graficamente com as coordenadas reais correspondentes, obtidas na captura, conforme mostrado na Figura 4.3a, Figura 4.4a e Figura 4.5a. Com isso, pretendia-se avaliar qualitativamente a aderência do modelo à realidade da câmera, mas, como pode ser visto, as discrepâncias encontradas ficaram aquém da escala gráfica dessas figuras, o que demandou uma avaliação quantitativa.

Dessa forma, para cada marco foi computada a discrepância em pixels e plotada em forma de erro circular, conforme mostrado na Figura 4.3b, Figura 4.4b e Figura 4.5b. O erro médio quadrático da reprojeção ficou entre 1 e 4 pixels, indicando uma boa aderência do modelo identificado à realidade de distorção da câmera.

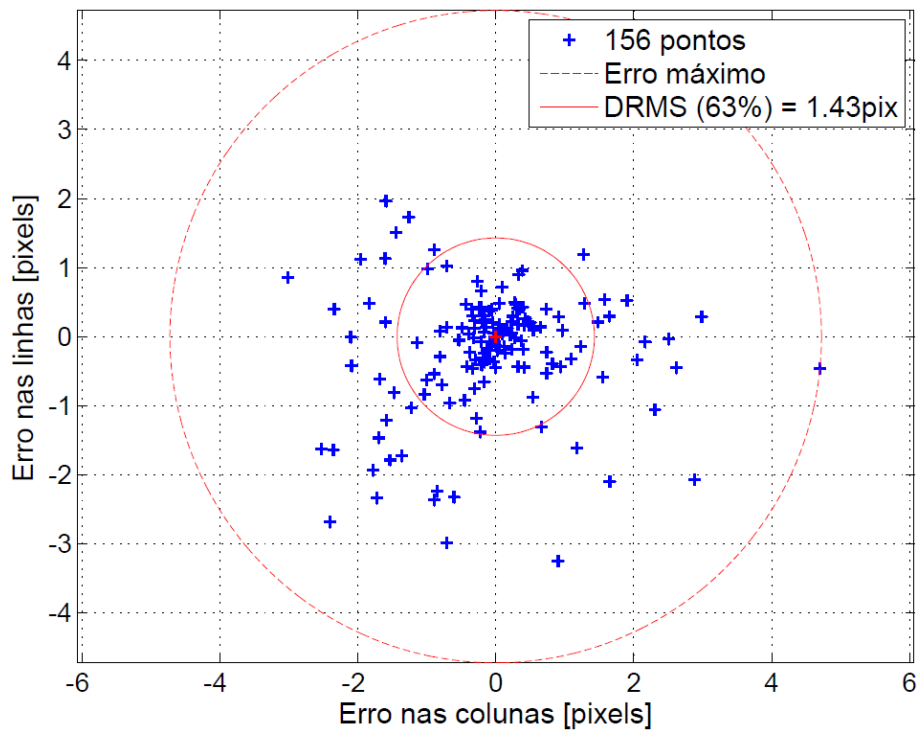
Também foi mostrada na Figura 4.3c, Figura 4.4c e Figura 4.5c a representação do histograma dos erros por meio da distribuição de probabilidade de Rayleigh, que pode ser obtida a partir do valor DRMS, seu parâmetro característico.

Por fim, a Figura 4.6 mostra a comparação da distribuição dos erros de reprojeção das calibrações das câmeras.

Figura 4.3 – Análise dos erros do modelo de distorção da câmera Nikon: (a) reprojeção dos marcros segundo o modelo identificado, em comparação com os pontos reais capturados, (b) erro circular da reprojeção de todos os marcros e (c) representação do histograma.

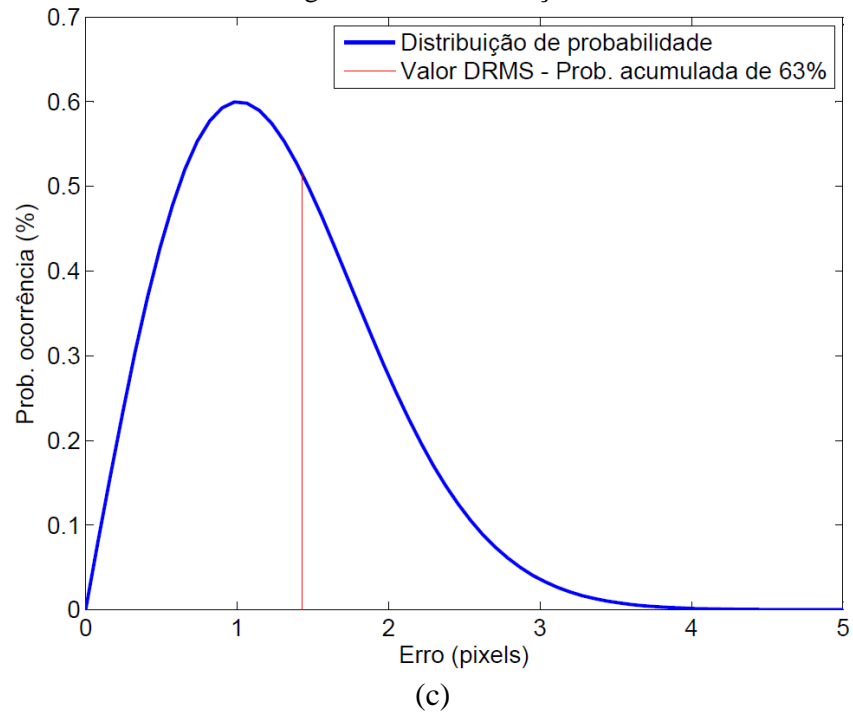


(a)



(b)

Figura 4.3 – Continuação.



Fonte: Produção com o algoritmo CALIBRA.

Figura 4.4 – Análise dos erros do modelo de distorção da câmera GoPRO no modo FOV *Medium*: (a) reprojeção dos marcos segundo o modelo identificado, em comparação com os pontos reais capturados, (b) erro circular da reprojeção de todos os marcos e (c) representação do histograma.

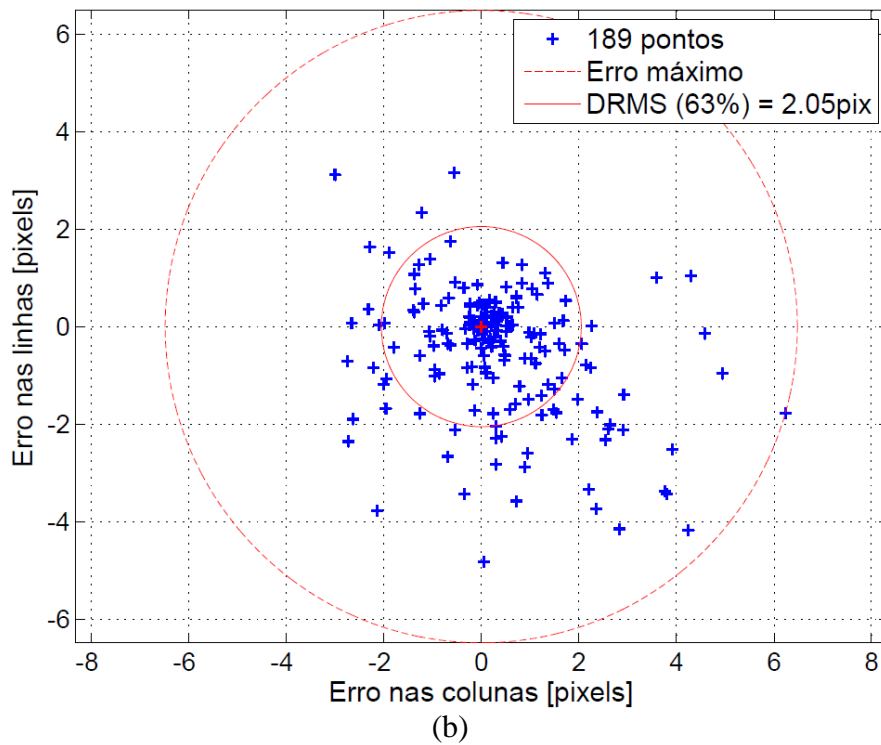
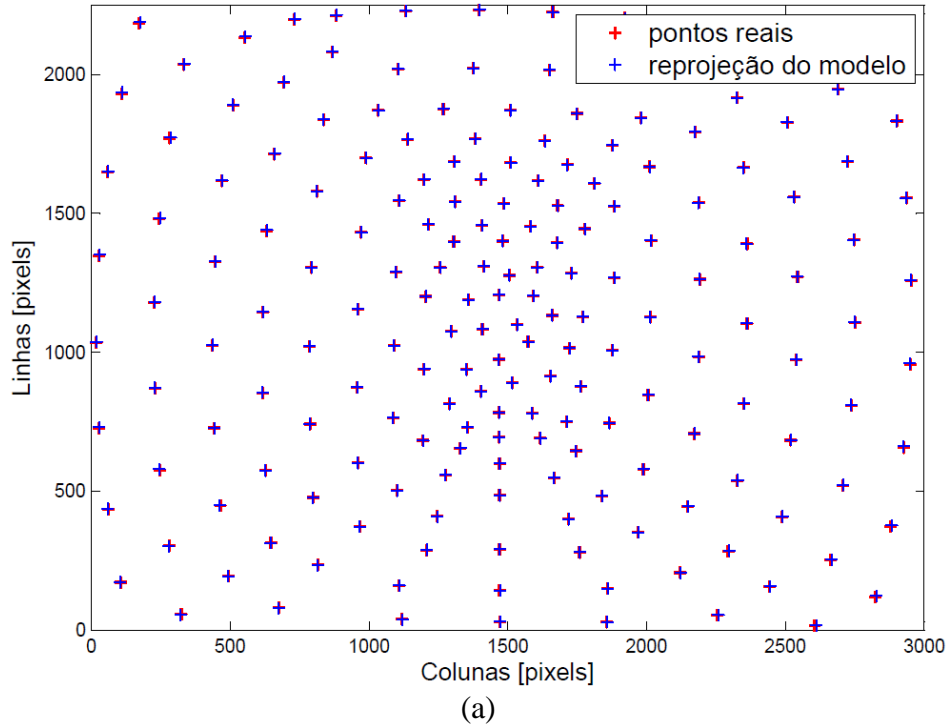
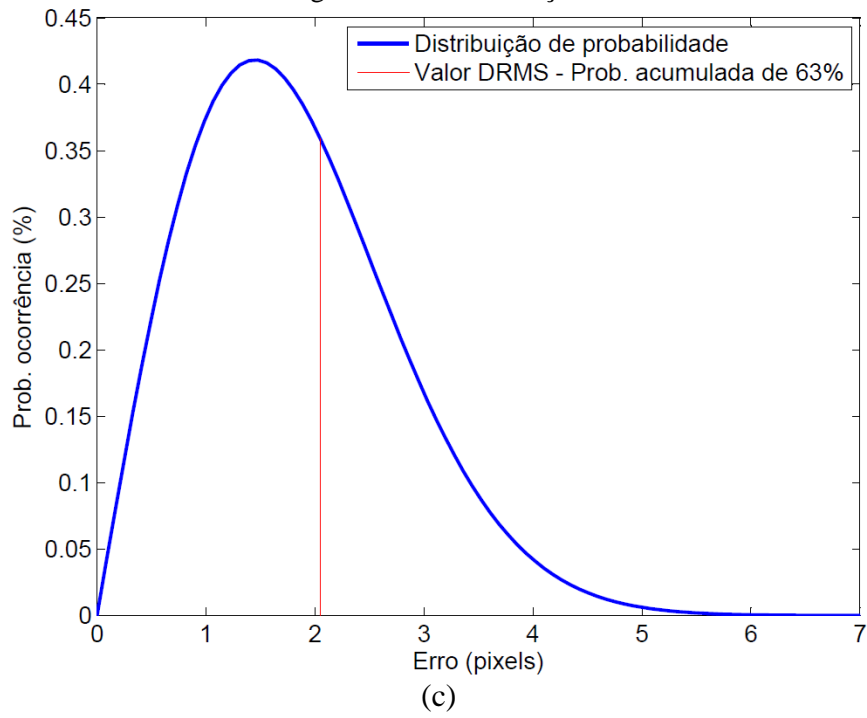
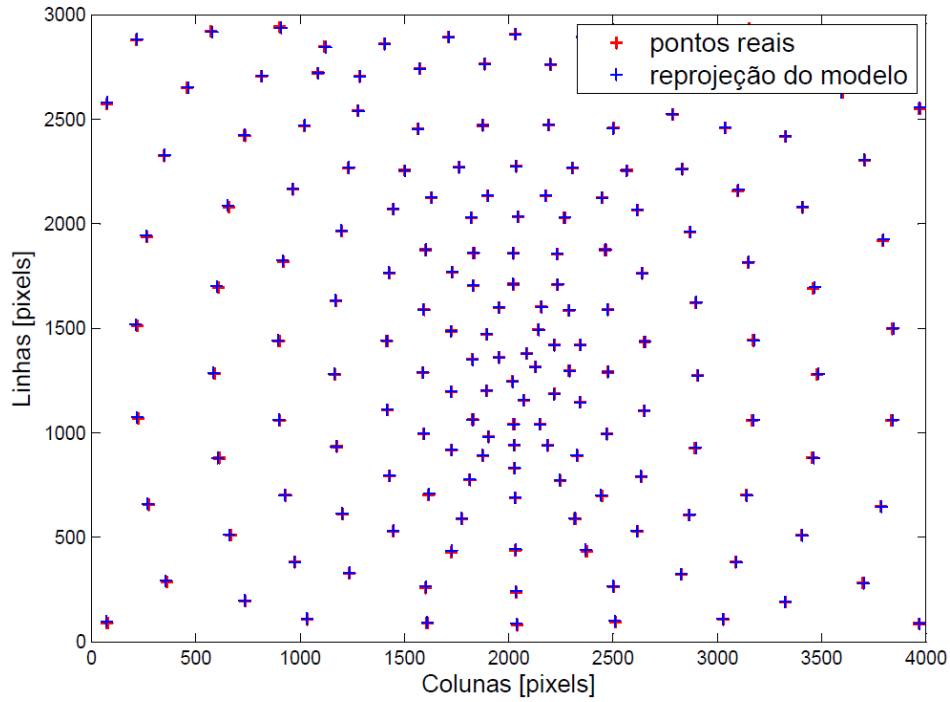


Figura 4.4 – Continuação.

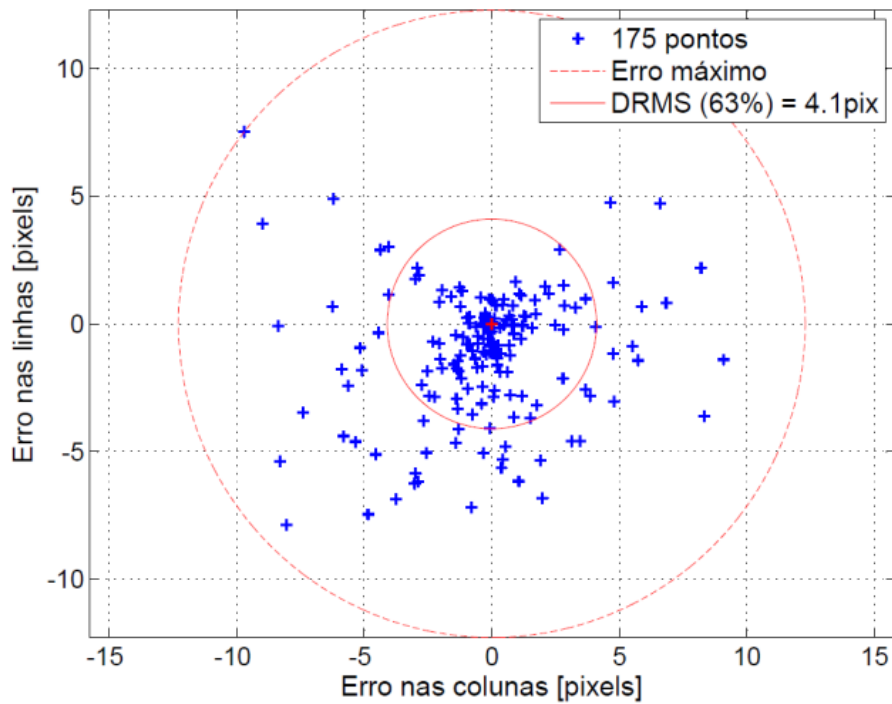


Fonte: Produção com o algoritmo CALIBRA.

Figura 4.5 – Análise dos erros do modelo de distorção da câmera GoPRO no modo FOV Wide: (a) reprojeção dos marcos segundo o modelo identificado, em comparação com os pontos reais capturados, (b) erro circular da reprojeção de todos os marcos e (c) representação do histograma.

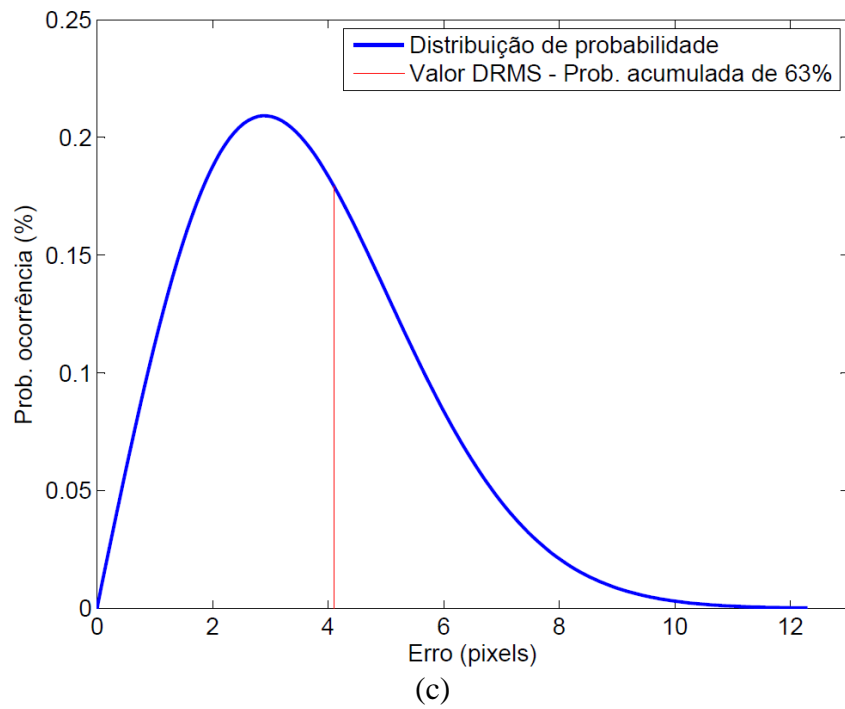


(a)



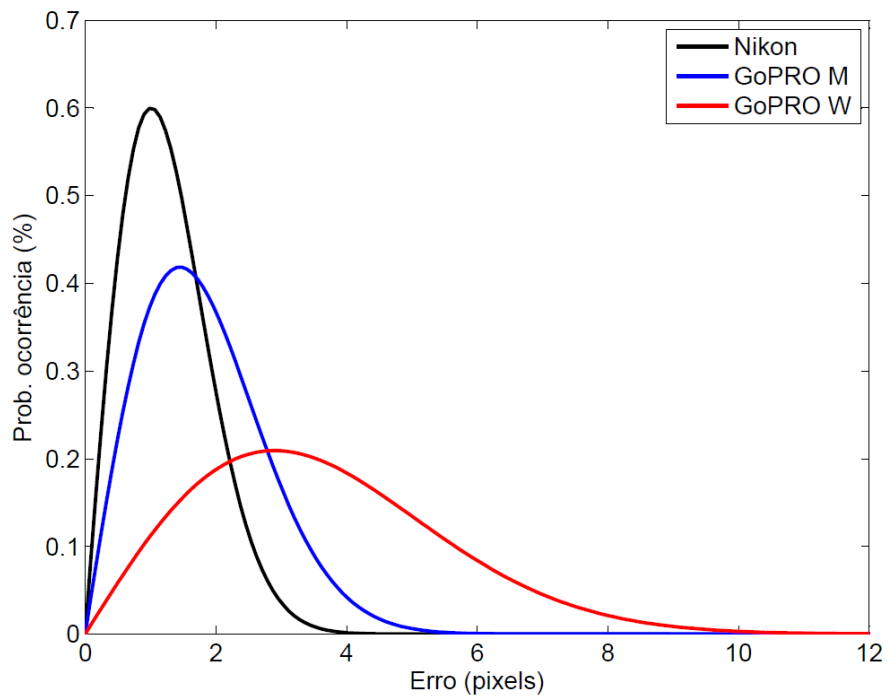
(b)

Figura 4.5 – Continuação.



Fonte: Produção com o algoritmo CALIBRA.

Figura 4.6 – Comparação da representação do histograma dos erros de reprojeção da calibração das câmeras.



4.1.1 Influência das distorções no erro em solo

De posse dos parâmetros de distorção identificados no processo de calibração das câmeras, foi possível fazer uma análise quantitativa da influência isolada de cada parâmetro na geometria da imagem, em pixels e, conseqüentemente, no erro em distância correspondente no solo, para determinada altura.

Para isso, foi criada uma matriz com dimensão em linha e coluna, representando os pixels de uma imagem ideal sem distorção, e aplicado o modelo de distorção de cada câmera para alterar as posições dos pixels. A diferença foi convertida para distâncias correspondentes no solo, considerando alturas de 400, 900 e 1900 metros. Foram computados o erro médio quadrático (RMS) e o erro máximo para a matriz. A Tabela 4.3 apresenta os erros da câmera Nikon e a Tabela 4.4 os erros da câmera GoPRO.

Em ambas as câmeras, a distorção radial é a que tem maior influência. Na GoPRO, o erro no solo é exorbitante, com a mesma ordem de grandeza da altura. O da Nikon é bem menor, mas não desprezível, mesmo em baixas alturas. Em uma odometria por imagem, por exemplo, conforme comentado no Capítulo 1, erros da ordem de unidades de metros são acumulados, podendo chegar a centenas ou milhares de metros no final da navegação.

Tabela 4.3 – Influência individual dos parâmetros de distorção geométrica da câmera Nikon, com visada nadir, no erro em solo para diversas alturas.

Altura (m)		400		900		1900	
GSD (m)		0,10		0,23		0,50	
Erro (m)		RMS	Máximo	RMS	Máximo	RMS	Máximo
Parâmetro	Distância Focal	1,27	2,21	2,87	4,97	6,06	10,5
	Distorção Radial	2,42	5,79	5,45	13,0	11,5	27,5
	Distorção Tangente	0,43	1,54	0,98	3,46	2,06	7,30
	Distorção de Afinidade	0,03	0,06	0,07	0,13	0,15	0,26
	Cisalhamento (<i>skew</i>)	0,06	0,11	0,14	0,24	0,29	0,50
	Ponto Principal		1,68		3,79		8,00
Total		2,37	6,06	5,34	13,6	11,3	28,8

Fonte: Produção com o algoritmo CALIBRA.

Tabela 4.4 – Influência individual dos parâmetros de distorção geométrica da câmera GoPRO, com FOV *Wide* e visada nadir, no erro em solo para diversas alturas.

Altura (m)		400		900		1900	
GSD (m)		0,23		0,52		1,09	
Erro (m)		RMS	Máximo	RMS	Máximo	RMS	Máximo
Parâmetro	Distância Focal	0,41	0,71	0,92	1,59	1,94	3,36
	Distorção Radial	291	669	655	1505	1382	3176
	Distorção Tangente	0,39	0,96	0,88	2,15	1,86	4,54
	Distorção de Afinidade	0,20	0,20	0,25	0,44	0,53	0,93
	Cisalhamento (<i>skew</i>)	0,32	0,56	0,72	1,25	1,52	2,64
	Ponto Principal	6,34		14,3		30,1	
Total		295	674	663	1520	1401	3210

Fonte: Produção com o algoritmo CALIBRA.

4.1.2 Correção das distorções geométricas da imagem

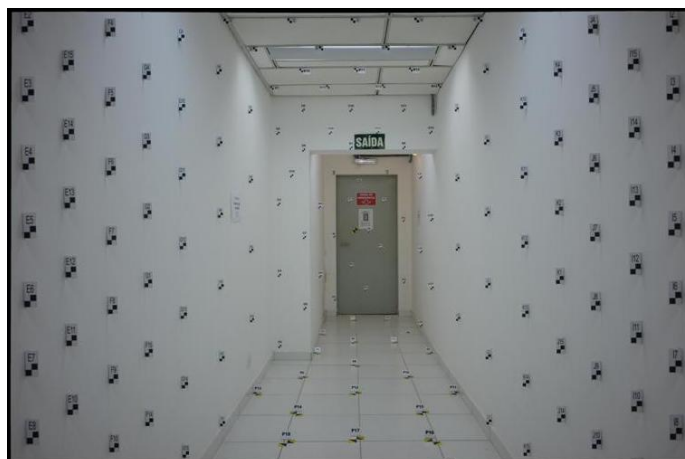
De posse dos parâmetros identificados no processo de calibração, as imagens geradas pelas câmeras, contendo distorções geométricas, puderam ser reamostradas pixel a pixel de modo a representar a imagem que seria gerada se a câmera fosse isenta de distorções. Isso foi feito somente em algumas imagens para um efeito visual das distorções. As imagens utilizadas para a ressecção espacial não foram reamostradas, bastando a conversão das coordenadas dos pixels dos pontos capturados.

O método de reamostragem empregado foi a interpolação pelo vizinho mais próximo, mantendo o tamanho original do pixel. A Figura 4.7 apresenta a imagem real distorcida e a correspondente corrigida da câmera Nikon, mostrando que as distorções são visualmente imperceptíveis para essa câmera. A Figura 4.8 apresenta as imagens da GoPRO no modo FOV *Medium*, onde já é perceptível o efeito da distorção radial, acentuando ainda mais no modo FOV *Wide*, Figura 4.9. Outros pares de imagens distorcida-corrigida da GoPRO estão apresentadas no APÊNDICE E.

Figura 4.7 – Imagem da câmera Nikon obtida no campo de calibração do IEAv: (a) sem correção e (b) com correção das distorções geométricas, imperceptíveis.



(a)



(b)

Fonte: Produção com o algoritmo CALIBRA.

Figura 4.8 – Imagem da câmera GoPRO com FOV *Medium* obtida no campo de calibração do IEAV: (a) sem correção e (b) com correção das distorções geométricas.



(a)



(b)

Fonte: Produção com o algoritmo CALIBRA.

Figura 4.9 – Imagem da câmera GoPRO com FOV *Wide* obtida no campo de calibração do IEAv: (a) sem correção e (b) com correção das distorções geométricas.



(a)



(b)

Fonte: Produção com o algoritmo CALIBRA.

4.1.3 Aplicação do método de calibração em Sensoriamento Remoto

O uso do método empregado neste trabalho para calibração de câmeras, incluindo a construção do campo, os modelos implementados e o algoritmo desenvolvido, pode melhorar os produtos gerados nos processos de mapeamento com VANT direcionados às aplicações em Sensoriamento Remoto, segundo a justificativa que segue.

As câmeras de pequeno formato empregadas nestes VANTs de mapeamento geralmente não possuem calibração geométrica. Embora os *softwares* fotogramétricos que geram os mapas aproveitem o ajustamento do mosaico para fazer uma calibração *on the job*, (PIX4D, 2015; AGISOFT, 2016), os parâmetros de distorção fornecidos não possuem acurácia, conforme analisado e apresentado na Seção 3.3 e no APÊNDICE F. Mas nestes *softwares* é possível que o usuário forneça os parâmetros de calibração obtidos em laboratório. Assim, o uso do método de calibração empregado neste trabalho permite obter parâmetros de distorção das câmeras embarcadas em VANTs com maior acurácia, podendo gerar Ortofotomosaicos e Modelos Digitais de Superfície (MDS) com maior qualidade geométrica. Com isso, esses produtos podem atingir um maior nível de acurácia no Padrão de Exatidão Cartográfica – PEC (NOGUEIRA *et al.*, 2017), sem contar que o tempo de processamento no *software* fotogramétrico pode ser diminuído.

4.2 Defasagens de tempo

O procedimento de sincronismo, realizado conforme metodologia apresentada na Seção 3.3, teve como objetivo levantar com resolução de milissegundos as defasagens das bases de tempo das câmeras Nikon e GoPRO e do SAD em relação à base de tempo UTC do receptor GNSS geodésico. Os valores obtidos para o início do voo estão apresentados na Tabela 4.5. Maiores detalhes dos atrasos em cada componente do circuito de sincronismo estão apresentados no APÊNDICE G.

Tabela 4.5 – Defasagem e deriva no início do voo das bases de tempo das câmeras Nikon e GoPRO e do SAD da aeronave em relação à base de tempo UTC do receptor GNSS geodésico embarcado, obtidas a partir do procedimento de sincronismo.

Componente	Defasagem para o UTC	Deriva
Câmera Nikon	- 2h : 58min : 08,6818s	+16,6 μ s/s (+60 ms/h)
Câmera GoPRO	-2h : 57min : 35,2190s	-54,2 μ s/s (-195 ms/h)
SAD	-0,0156s	0

4.3 Offsets encontrados

A determinação dos *offsets*, realizado conforme metodologia apresentada na Seção 3.5, teve como objetivo obter a posição exata do Centro de Perspectiva (CP) das câmeras Nikon e GoPRO bem como suas orientações angulares em relação aos eixos e aos sistemas da aeronave. Também foram obtidos os *offsets* da IMU e do GNSS, conforme mostrado na Tabela 4.6 e Tabela 4.7.

Tabela 4.6 – *Offsets* angulares das câmeras e da IMU em relação aos eixos de referência da aeronave.

Sistema	$\delta\psi$ ($\mu\pm\sigma$) (graus)	$\delta\theta$ ($\mu\pm\sigma$) (graus)	$\delta\phi$ ($\mu\pm\sigma$) (graus)
Câmera Nikon	+0,074 \pm 0,507	-2,734 \pm 0,268	-0,579 \pm 0,192
Câmera GoPRO	-0,509 \pm 0,018	-6,073 \pm 0,079	+0,066 \pm 0,058
IMU ¹	(*)	-0,022 \pm 0,050	-0,028 \pm 0,050

¹Offsets da gravação do SAD

$\delta\psi$ - *offset* da proa, $\delta\theta$ - *offset* da arfagem, $\delta\phi$ - *offset* da inclinação lateral

(*) não obtido

Conforme explanado na Seção 3.5.3, não foi possível obter o *offset* de proa $\delta\psi$ da IMU porque o procedimento de nivelamento da aeronave foi realizado no interior do hangar, onde não foi possível obter a direção do norte verdadeiro. Para isso, a aeronave deveria estar campo aberto para que fossem levantadas com GNSS coordenadas geográficas de referência para a poligonal que serviu de apoio no levantamento das coordenadas.

Tabela 4.7 – *Offsets* lineares das câmeras e dos sistemas da aeronave, em relação ao sistema de referência terrestre e ao sistema de referência da aeronave.

Dispositivo	Símbolo	Ponto	Sistema Terrestre			Sistema da Aeronave		
			E (m)	N (m)	U (m)	X _a (m)	Y _a (m)	X _c (m)
Câmera Nikon	C1	CP medido com ET	-0,012	-1,965	1,081	-1,965	-0,012	0,489
		CP final (ressecção)	-0,006	-1,967	1,066	-1,967	-0,006	0,504
Câmera GoPRO	C2	CP medido com ET	-0,016	-2,050	1,089	-2,050	-0,016	0,481
		CP final (ressecção)	-0,008	-2,048	1,085	-2,049	-0,008	0,485
GNSS	G1	Centro da antena	-0,006	-2,321	2,391	-2,320	-0,006	-0,821
IMU	I1	Centro da carcaça	0,221	-1,991	1,915	-1,991	0,221	-0,345
Placa de Referência	Q1	Vértice frontal-esquerdo	-0,437	-1,666	0,052	-1,666	-0,437	1,519
	Q2	Vértice frontal-direito	0,454	-1,679	0,050	-1,680	0,454	1,521
	Q3	Vértice traseiro-direito	0,444	-2,232	0,050	-2,233	0,444	1,520
	Q4	Vértice traseiro-esquerdo	-0,447	-2,217	0,052	-2,217	-0,447	1,518

4.4 Aplicação do sincronismo e de *offsets* em Sensoriamento Remoto

O uso dos métodos empregados neste trabalho para sincronismo de tempo das câmeras e para determinação de *offsets* lineares e angulares, pode também melhorar os produtos gerados nos processos de mapeamento com VANT direcionados às aplicações em Sensoriamento Remoto, segundo as justificativas que seguem.

A montagem dos mosaicos nesses *softwares* fotogramétricos é feita por aerotriangulação, em que a orientação externa de cada foto é obtida com processamento computacional que procura pontos homólogos nas fotos adjacentes. Mas é possível fornecer ao *software* os ângulos de orientação externa da câmera, o que encurta o tempo de processamento e diminui os erros do ajustamento (PIX4D, 2015). Esses ângulos podem ser obtidos pela formulação apresentada neste trabalho, Seção 2.5.2, para converter os ângulos (ψ, θ, ϕ), gravados pela IMU do VANT segundo a definição aeronáutica, para os ângulos (ω, φ, κ), segundo a definição fotogramétrica exigida no *software*.

Além desta conversão, se for utilizada a metodologia deste trabalho para determinação dos *offsets* lineares e angulares da câmera em relação aos eixos de referência do VANT e da IMU, os ângulos de orientação externa fornecidos ao *software* ficarão isentos de

erros sistemáticos, garantindo maior acurácia ao Ortofotomosaico e ao MDS. Dessa forma, esses produtos podem atingir um maior nível de acurácia no Padrão de Exatidão Cartográfica (PEC), sem contar que o tempo de processamento no *software* fotogramétrico pode ser diminuído.

Ainda, se for utilizada no VANT a metodologia empregada neste trabalho para integração da câmera a um sistema de posicionamento GNSS com capacidade de correção diferencial, tomando o devido cuidado quanto ao sincronismo das bases de tempo, os produtos gerados terão geolocalização com acurácia subdecimétrica, dispensando a necessidade de levantamento em campo dos Pontos de Controle (*Ground Control Points* – GCP) ou então a necessidade de registro ou georreferenciamento ao importar o Ortofotomosaico em um Sistema de Informação Geográfica (SIG).

4.5 Posição e orientação da aeronave obtidos por ressecção espacial

Para a obtenção da posição e da orientação angular da aeronave, a partir das imagens aéreas das câmeras Nikon e GoPRO, foi utilizado o método de ressecção espacial descrito na Seção 3.8. Os dados de entrada foram as coordenadas linha-coluna dos três pontos capturados em cada imagem, de acordo com a Seção 3.6, e as coordenadas correspondentes levantadas em campo com GNSS, conforme apresentado na Seção 3.7. Os resultados foram, para cada imagem, valores de posição no sistema ENU e de ângulos de proa ψ , arfagem θ e rolamento ou inclinação lateral ϕ , conforme definição apresentada na Seção 2.2.

Para ambas as câmeras, foram obtidos resultados para três alturas diferentes (400m, 900m e 1900m) e duas condições de visada (nadir $\rightarrow \phi < 3^\circ$ e off-nadir $\rightarrow \phi$ até 45°), tanto com a correção de suas distorções geométricas quanto sem, conforme Tabela 4.8, que mostra o número de ressecções realizadas em cada condição, representando o tamanho da amostra na abordagem estatística realizada na Seção 4.5.1.

Tabela 4.8 – Número de imagens das câmeras Nikon e GoPRO utilizadas na ressecção espacial para cada condição de altura, visada e distorção geométrica.

		400		900		1900	
		Nadir	Off-nadir	Nadir	Off-nadir	Nadir	Off-nadir
		Visada					
Nikon	Sem correção	35	20	27	19	23	20
	Com correção	35	20	27	19	23	20
GoPRO	Sem correção	57	44	38	45	31	52
	Com correção	57	44	38	45	31	52

Para fins de avaliação dos erros de posição e de orientação, obtidos por ressecção, esses resultados foram comparados com os dados correspondentes fornecidos pelos sensores acurados do SAD da aeronave, cujos dados processados e compatibilizados com os instantes das fotos das câmeras Nikon e GoPRO estão apresentados no APÊNDICE J. Os erros estão apresentados na Tabela 4.9 e Tabela 4.10 e também mostrados em gráficos como os da Figura 4.10 e da Figura 4.11, onde são mostradas as dispersões, o erro médio quadrático, as médias e os desvios-padrão.

Tabela 4.9 – Médias e desvios-padrão dos erros da posição e orientação da aeronave obtidos por ressecção espacial com as imagens da câmera Nikon, com e sem correção das distorções.

		400m		900m		1900m		
		Nadir	Off-nadir	Nadir	Off-nadir	Nadir	Off-nadir	
		Visada						
Sem correção	Erro horizontal (m)	DRMS	8,00	13,00	25,00	35,00	53,00	112,00
		$\epsilon_{\text{máx}}$	20,00	35,00	64,00	73,00	153,00	255,00
	Erro vertical (m)	$h (\mu \pm \sigma)$	8,30±1,70	8,80±6,10	10,00±5,10	17,00±13,00	17,00±9,80	11,00±27,00
		RMS _h	8,47	10,71	11,23	21,40	19,62	29,15
	Erros angulares (graus)	$\psi (\mu \pm \sigma)$	2,20±0,08	2,40±0,55	2,10±0,08	2,00±0,24	2,10±0,04	2,40±0,40
		$\phi (\mu \pm \sigma)$	-0,16±0,65	-0,14±1,00	-0,31±0,95	0,17±1,20	-0,26±0,75	0,00±1,80
$\theta (\mu \pm \sigma)$		0,56±0,93	1,00±1,30	0,57±1,20	0,23±1,60	0,00±1,30	-0,15±2,30	
Com Correção	Erro horizontal (m)	DRMS	6,20	4,20	11,00	21,00	26,00	77,00
		$\epsilon_{\text{máx}}$	18,00	13,00	25,00	59,00	69,00	182,00
	Erro vertical (m)	$h (\mu \pm \sigma)$	4,90±1,20	4,90±5,30	3,80±2,10	4,00±11,00	0,83±5,20	4,40±19,00
		RMS _h	5,04	7,22	4,34	11,70	5,27	19,50
	Erros angulares (graus)	$\psi (\mu \pm \sigma)$	2,10±0,06	2,40±0,58	2,10±0,05	1,90±0,23	2,10±0,04	2,50±0,35
		$\phi (\mu \pm \sigma)$	-0,18±0,45	-0,07±0,44	-0,13±0,31	-0,14±0,84	-0,11±0,39	-0,48±1,40
$\theta (\mu \pm \sigma)$		0,58±0,71	0,65±0,32	0,51±0,49	0,37±0,61	0,54±0,63	0,60±1,30	

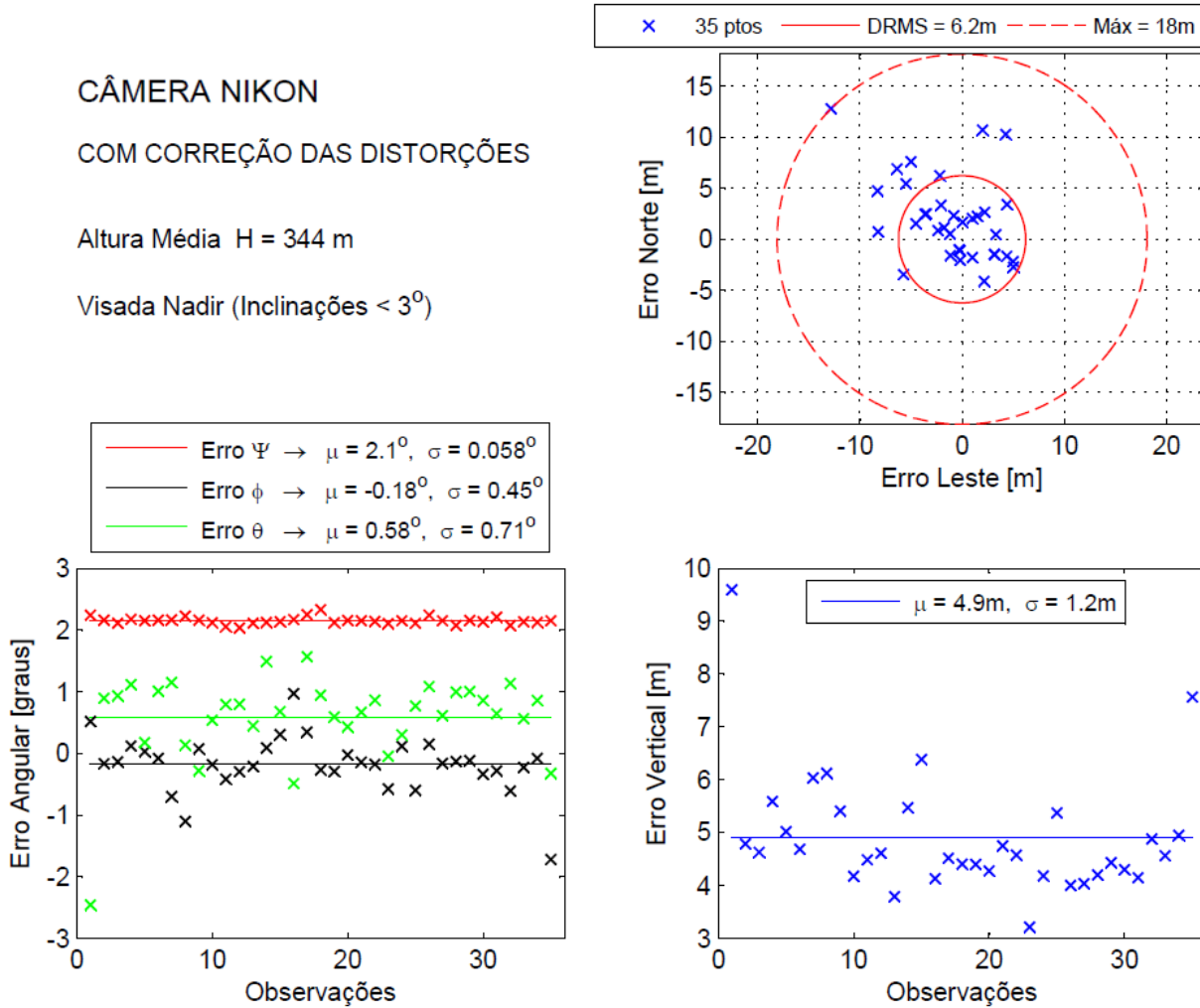
Tabela 4.10 – Médias e desvios-padrão dos erros da posição e orientação da aeronave obtidos por ressecção espacial com as imagens da câmera GoPRO, com e sem correção das distorções.

GoPRO	Altura	400m		900m		1900m			
	Visada	Nadir	Off-nadir	Nadir	Off-nadir	Nadir	Off-nadir		
Sem correção	Erro horizontal (m)	DRMS	97,00	115,00	182,00	246,00	363,00	417,00	
		$e_{\text{máx}}$	236,00	278,00	316,00	504,00	831,00	1153,00	
	Erro vertical (m)	$h (\mu \pm \sigma)$	59,0±41,0	56,0±76,0	66,0±51,0	106,0±77,0	186,0±140,0	196,0±110,0	
		RMS _h	71,85	94,40	83,41	131,02	232,80	224,76	
	Erros angulares (graus)	$\psi (\mu \pm \sigma)$	2,00±1,20	2,10±2,30	2,00±0,74	2,40±1,10	2,00±0,49	2,10±0,80	
		$\phi (\mu \pm \sigma)$	-0,61±8,10	-4,90±9,80	2,40±7,00	4,10±6,00	2,90±3,70	-2,50±6,10	
		$\theta (\mu \pm \sigma)$	-1,70±9,90	-0,58±9,10	-1,00±7,20	-5,90±8,40	2,80±8,10	-0,34±9,00	
	Com Correção	Erro horizontal (m)	DRMS	6,70	9,30	11,00	14,00	17,00	22,00
			$e_{\text{máx}}$	17,00	26,00	29,00	34,00	46,00	50,00
Erro vertical (m)		$h (\mu \pm \sigma)$	-1,10±3,20	-0,24±4,00	-5,60±3,80	-9,40±5,20	-22,00±7,60	-19,00±6,90	
		RMS _h	3,38	4,01	6,77	10,74	23,28	20,21	
Erros angulares (graus)		$\psi (\mu \pm \sigma)$	2,00±0,15	2,10±0,23	2,00±0,06	2,00±0,11	2,00±0,06	2,00±0,07	
		$\phi (\mu \pm \sigma)$	0,62±0,73	0,70±0,64	0,41±0,46	0,45±0,45	0,36±0,25	0,72±0,37	
		$\theta (\mu \pm \sigma)$	-0,34±0,52	-0,13±0,64	-0,31±0,46	-0,09±0,55	-0,19±0,30	-0,18±0,41	

A Figura 4.10 e a Figura 4.11 são referentes às condições mais favoráveis obtidas com as câmeras Nikon e GoPRO, ou seja, com correção das distorções, a baixa altura e visada nadir. O conjunto completo destes gráficos para as 24 condições analisadas está apresentado no APÊNDICE K.

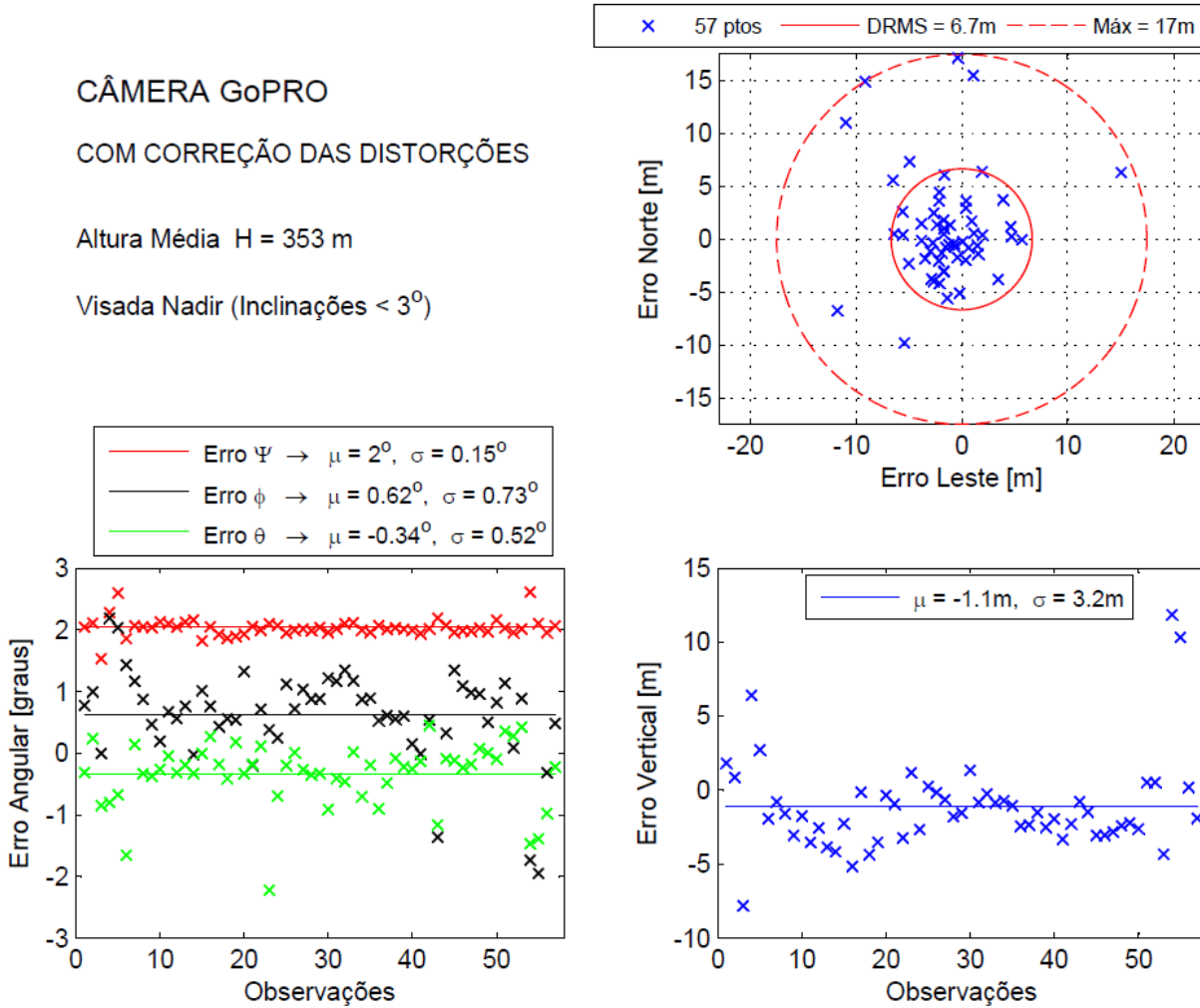
A proa ψ foi o ângulo que apresentou menor dispersão, embora com um erro sistemático de $+2^\circ$, devidamente esclarecido na Seção 3.5. Essa baixa dispersão indica que a determinação de proa na ressecção foi mais precisa que a de arfagem e de inclinação lateral, apresentando dispersão até 30 vezes menor. A precisão da arfagem apresentou ligeira diferença da inclinação lateral, com tendência sempre maior.

Figura 4.10 – Erros da posição e da orientação angular obtidos por ressecção espacial a partir de imagens da câmera Nikon com correção das distorções geométricas, alturas em torno de 340m e visada nadir.



Fonte: Produção com algoritmo desenvolvido pelo Autor no *software* MATLAB.

Figura 4.11 – Erros da posição e da orientação angular obtidos por ressecção espacial a partir de imagens da câmera GoPRO com correção das distorções geométricas, alturas em torno de 350m e visada nadir.



Fonte: Produção com algoritmo desenvolvido pelo Autor no *software* MATLAB.

4.5.1 Erros sistemáticos

Conforme mostrado nos gráficos da Figura 4.10 e Figura 4.11, os erros possuem dispersão em torno de um valor médio que não é zero deterministicamente. No entanto, com uma abordagem por teste de hipóteses, conforme teoria apresentada na Seção 2.11, foi possível verificar se as médias encontradas podiam ser consideradas estatisticamente iguais a zero, caso contrário constatou-se a existência de um erro sistemático na amostra.

Dessa forma, todas as amostras de erro, de cada parâmetro, para cada condição, foram verificadas por meio do teste de hipóteses, sendo os resultados apresentados na Tabela 4.11. O erro horizontal (componentes leste e norte) e os erros angulares de arfagem θ e inclinação lateral ϕ estavam isentos de erros sistemáticos.

O erro angular da proa ψ apresentou um erro sistemático em torno de $+2^\circ$ em todas as amostras. Isso pode ser decorrente do fato de não ter sido possível obter o *offset* de proa $\delta\psi$ da IMU, conforme explicado na Seção 4.3. Ou então, devido a algum erro sistemático no modelo de declinação magnética, apresentado na Seção 3.5.4.

O erro vertical apresentou erro sistemático na maioria das amostras e de forma aleatória, ou seja, com um valor diferente em cada amostra. Uma possível explicação é o fato de a posição vertical determinada por ressecção espacial ser muito sensível a erros, o que aumenta sua diluição de precisão.

Tabela 4.11 – Resultado do teste de hipóteses para cada amostra de erros em cada condição analisada. O p-valor aparece entre parênteses. As que passaram no teste estão isentas de erro sistemático. As que não passaram trazem o valor do erro sistemático em metros.

Altura (m)	Visada→	400		900		1900		
		Nadir	Off-nadir	Nadir	Off-nadir	Nadir	Off-nadir	
Nikon	Sem Correção	eE	(0,87)☑	(0,72)☑	(0,94)☑	(0,68)☑	(0,86)☑	(0,72)☑
		eN	(0,78)☑	(0,53)☑	(0,82)☑	(0,73)☑	(0,95)☑	(0,68)☑
		eV	(0,00)8,3	(3,52e-16)8,8	(1,47e-10)10	(2,10e-05)17	(3,08e-08)17	(0,08)☑
		eψ	(0,00)2,2	(4,67e-12)2,4	(0,00)2,1	(9,34e-13)2,0	(1,00e-15)2,1	(2,40e-13)2,4
		eθ	(0,62)☑	(0,71)☑	(0,36)☑	(0,68)☑	(0,45)☑	(0,99)☑
		eφ	(0,11)☑	(0,03)☑	(0,14)☑	(0,63)☑	(0,99)☑	(0,80)☑
	Com Correção	eE	(0,93)☑	(0,71)☑	(0,88)☑	(0,71)☑	(0,84)☑	(0,47)☑
		eN	(0,78)☑	(0,64)☑	(0,86)☑	(0,59)☑	(0,99)☑	(0,63)☑
		eV	(0,00)4,9	(5,68e-04)4,9	(8,78e-10)3,8	(0,13)☑	(0,45)☑	(0,31)☑
		eψ	(0,00)2,1	(8,28e-12)2,4	(0,00)2,1	(1,90e-12)1,9	(1,00e-15)2,1	(4,20e-14)2,5
		eθ	(0,56)☑	(0,82)☑	(0,67)☑	(0,69)☑	(0,73)☑	(0,28)☑
		eφ	(0,08)☑	(0,05)☑	(0,17)☑	(0,28)☑	(0,11)☑	(0,17)☑
GoPRO	Sem Correção	eE	(0,95)☑	(0,53)☑	(0,89)☑	(0,79)☑	(0,96)☑	(0,58)☑
		eN	(0,92)☑	(0,71)☑	(0,84)☑	(0,73)☑	(0,87)☑	(0,67)☑
		eV	(2,00e-15)59	(1,46e-05)56	(1,48e-09)66	(7,34e-12)106	(3,05e-08)186	(0,00)196
		eψ	(4,00e-15)2,0	(6,69e-07)2,1	(4,00e-15)2,0	(0,00)2,4	(2,00e-15)2,0	(0,00)2,1
		eθ	(0,58)☑	(0,02)☑	(0,05)☑	(0,03)☑	(0,07)☑	(0,08)☑
		eφ	(0,21)☑	(0,68)☑	(0,41)☑	(0,04)☑	(0,08)☑	(0,79)☑
	Com Correção	eE	(0,78)☑	(0,59)☑	(0,86)☑	(0,77)☑	(0,93)☑	(0,68)☑
		eN	(0,75)☑	(0,63)☑	(0,92)☑	(0,74)☑	(0,87)☑	(0,71)☑
		eV	(0,01)☑	(0,69)☑	(6,40e-11)-5,6	(1,00e-15)-9,4	(0,00)-22	(0,00)-19
		eψ	(0,00)2,0	(0,00)2,1	(0,00)2,0	(0,00)2,0	(0,00)2,0	(0,00)2,0
		eθ	(0,05)☑	(0,03)☑	(0,19)☑	(0,15)☑	(0,24)☑	(0,02)☑
		eφ	(0,27)☑	(0,68)☑	(0,32)☑	(0,79)☑	(0,54)☑	(0,56)☑

eE - erro leste (m), eN - erro norte (m), eV - erro vertical (m), eψ - erro de proa (°), eθ - erro de arfagem (°), eφ - erro de inclinação lateral (°), () - p-valor, ☑ passou no teste de hipóteses

4.5.2 Influência da altura nos erros

Os erros encontrados para cada parâmetro resultante da ressecção espacial pelas câmeras Nikon e GoPRO, com correção das distorções, foram agrupados para mostrar a influência da altura nos erros, resultando os gráficos da Figura 4.12, Figura 4.13, Figura 4.14 e Figura 4.15.

Assim, foi analisada a dispersão dos erros de todos os parâmetros por meio do desvio-padrão e do erro médio quadrático calculados. Para os erros de posição (horizontal e vertical), verificou-se, de forma geral, que a dispersão aumenta em função da altura para ambas as câmeras, tanto em visada nadir quanto off-nadir. A Tabela 4.12

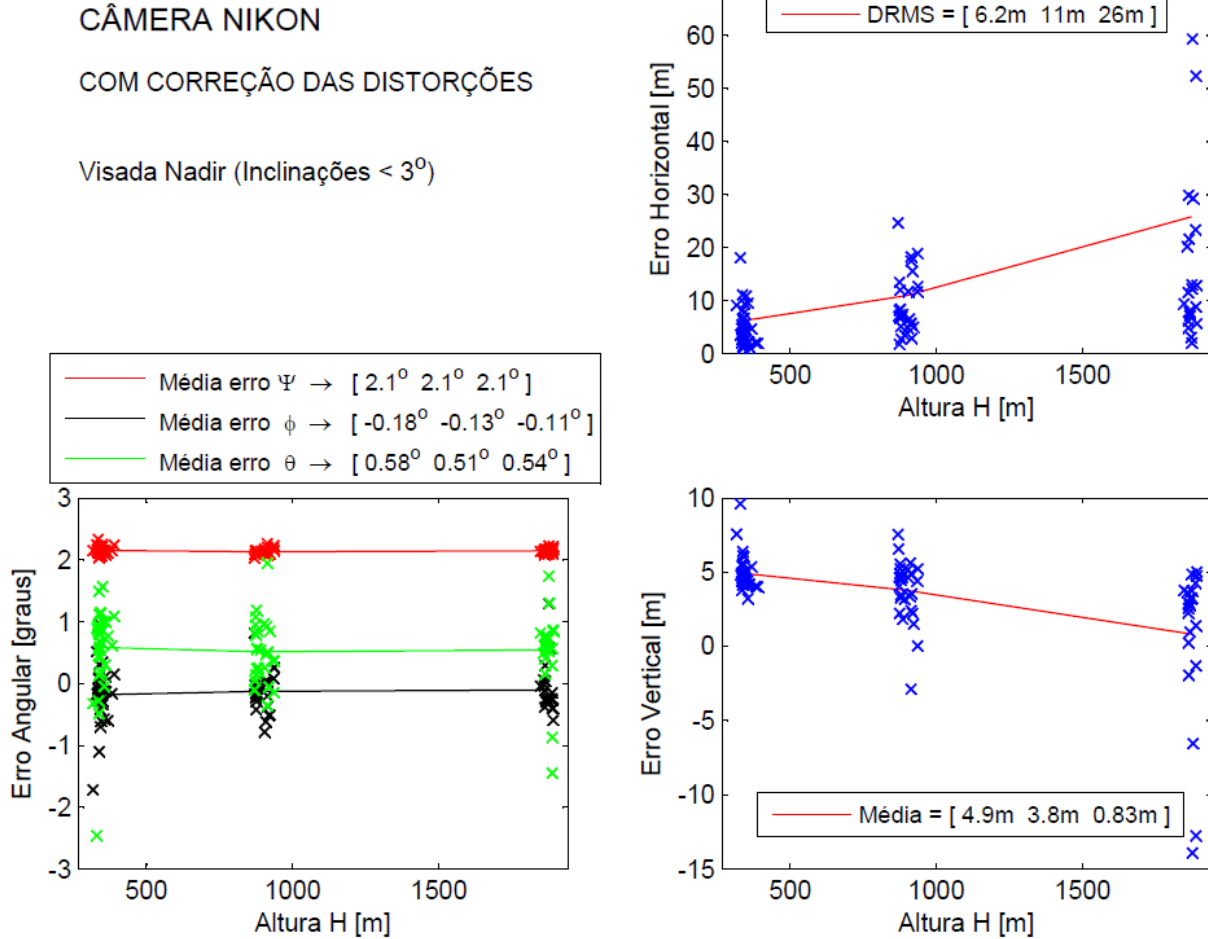
mostra o gradiente de aumento das dispersões horizontal (DRMS) e vertical (RMS) na determinação da posição da aeronave, tendo sido obtidos por regressão linear.

Tabela 4.12 – Gradiente de variação da dispersão da posição horizontal e vertical em função da altura para condições de visada nadir e off-nadir, com correção das distorções.

		Nadir	Off-nadir
Nikon	Horizontal (m/km)	13	50
	Vertical (m/km)	1	8
GoPRO	Horizontal (m/km)	7	8
	Vertical (m/km)	14	11

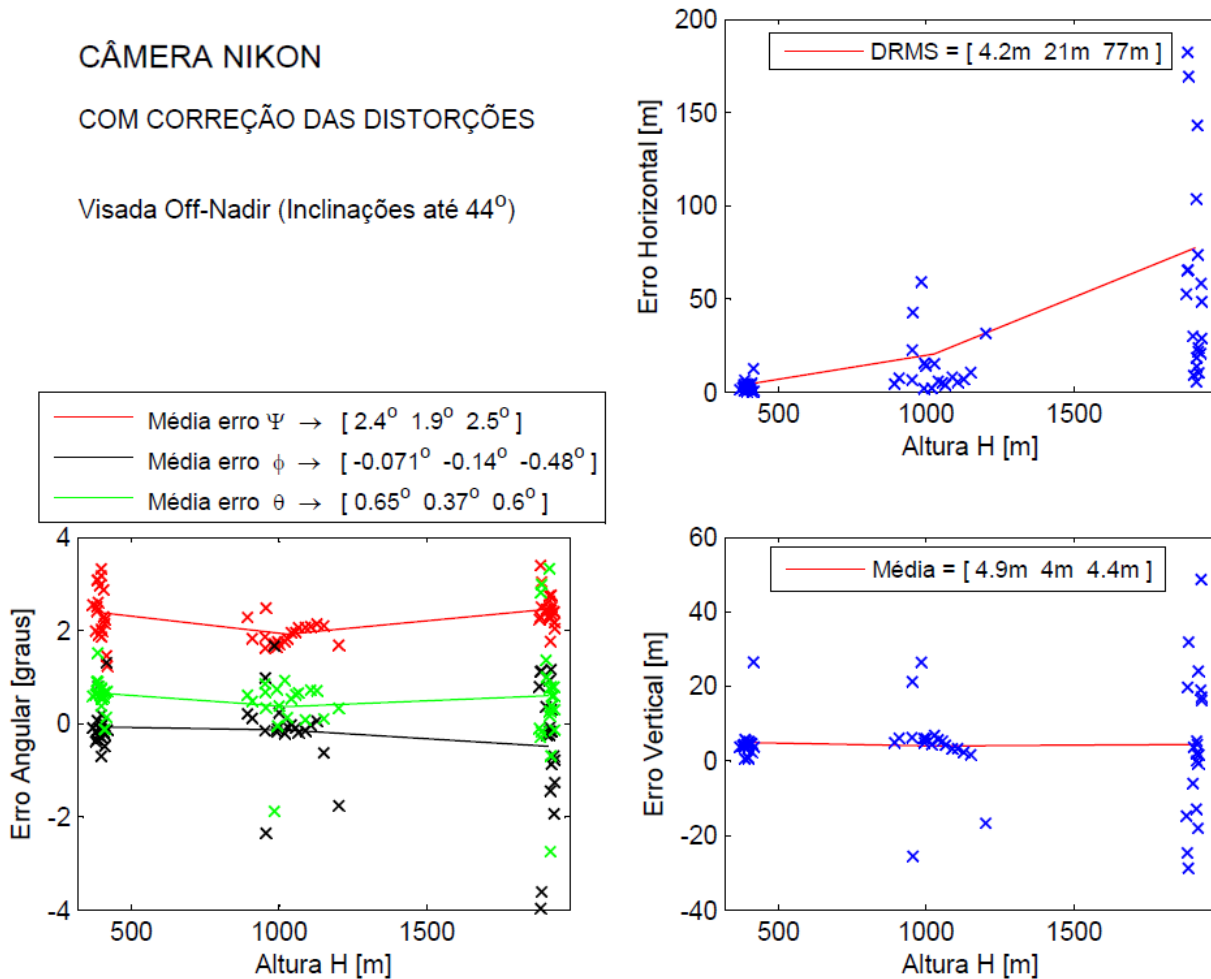
Quanto aos erros angulares, foi observado para a câmera GoPRO (grande FOV) que a dispersão diminui com a altura, com cerca de $-0,1^\circ/\text{km}$ para proa ψ e $-0,2^\circ/\text{km}$ para arfagem e inclinação lateral (θ e ϕ). Já para a câmera Nikon (FOV menor), não foi observada variação com a altura, mas os valores das dispersões foram maiores que os da GoPRO em cada altura. Estes resultados permitem afirmar que câmeras com FOV maior são melhores para determinação dos ângulos por ressecção em relação às câmeras de pequeno FOV.

Figura 4.12 – Erros dos resultados da ressecção espacial em função da altura para a câmera Nikon com correção das distorções e visada nadir.



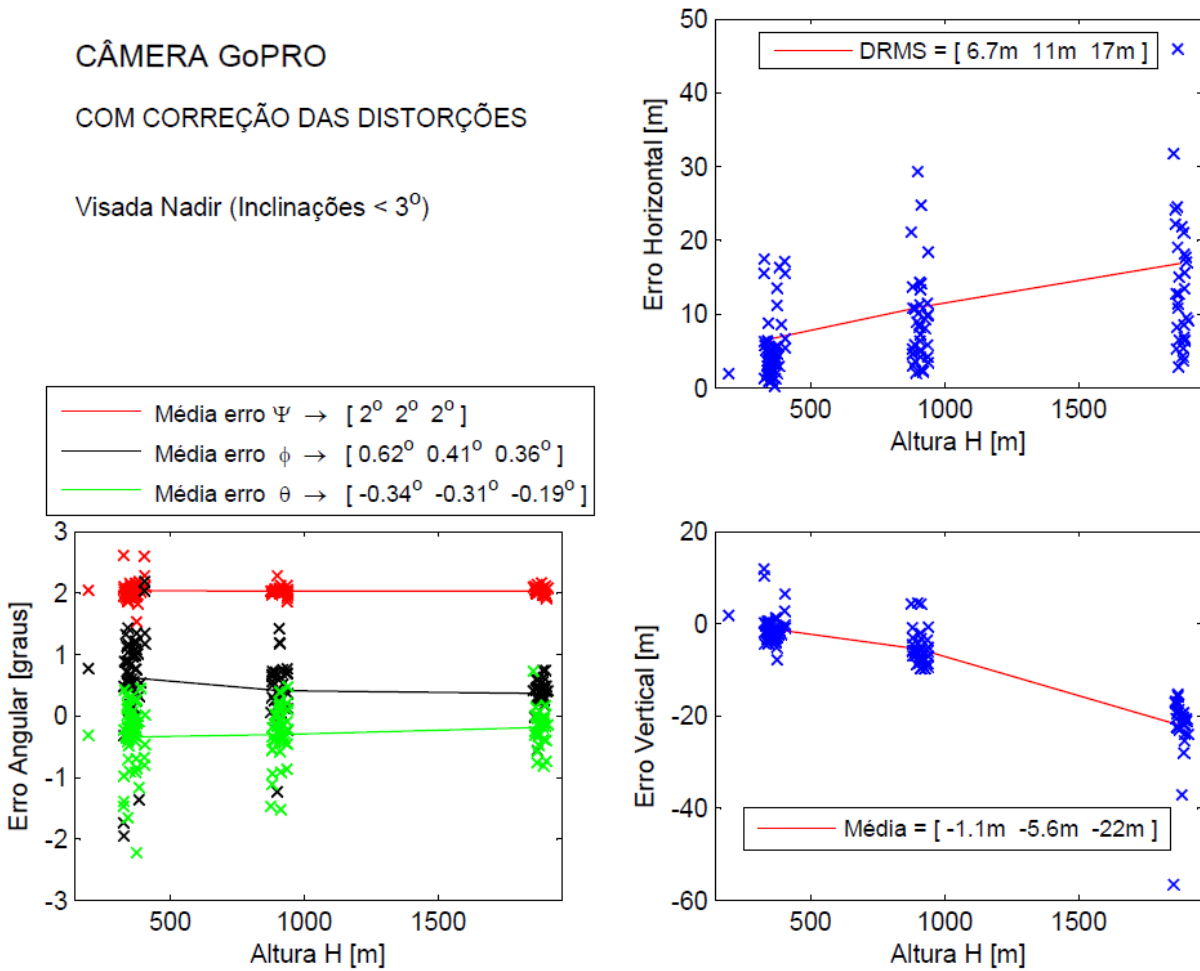
Fonte: Produção com algoritmo desenvolvido pelo Autor no *software* MATLAB.

Figura 4.13 – Erros dos resultados da ressecção espacial em função da altura para a câmera Nikon com correção das distorções e visada off-nadir.



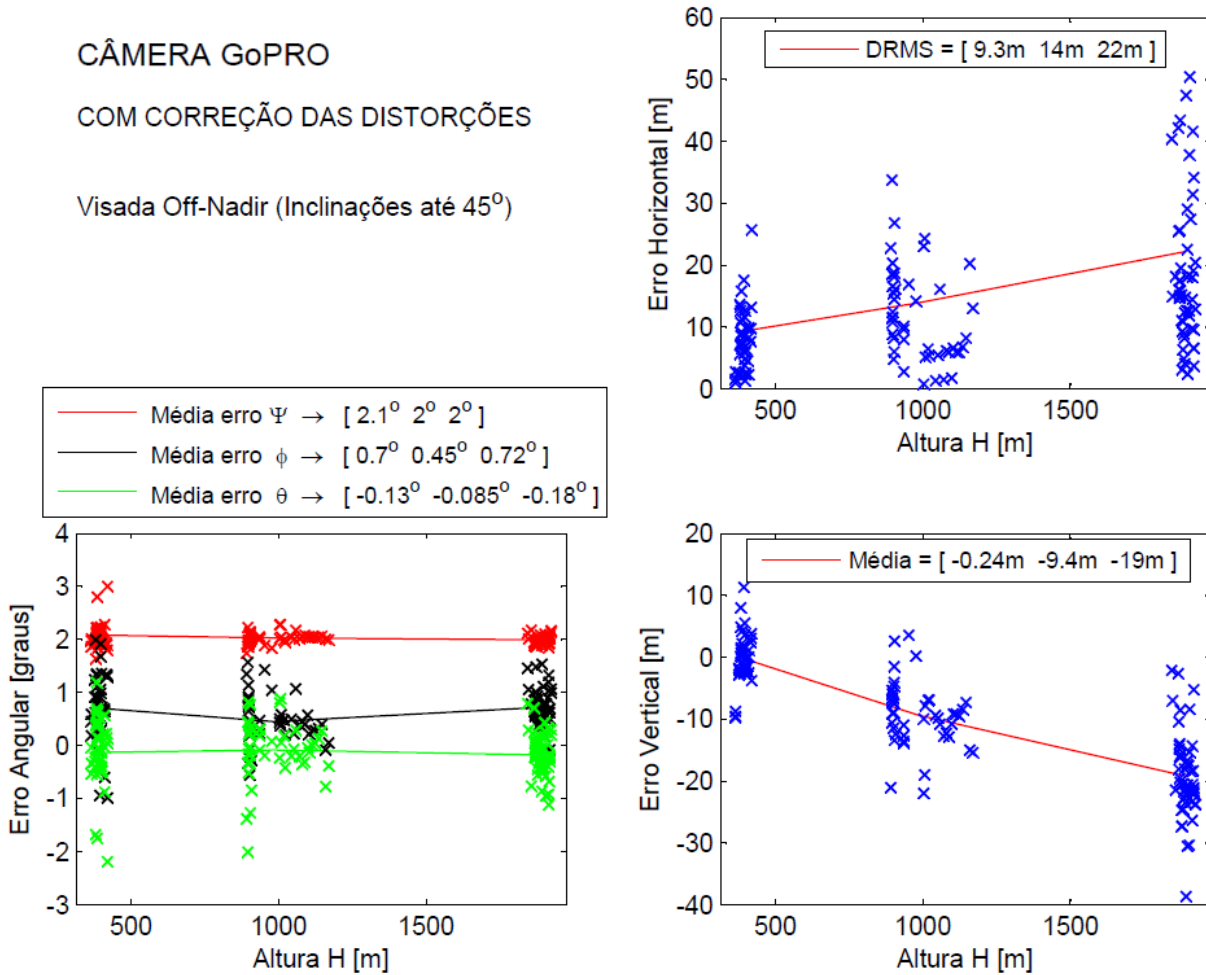
Fonte: Produção com algoritmo desenvolvido pelo Autor no *software* MATLAB.

Figura 4.14 – Erros dos resultados da ressecção espacial em função da altura para a câmera GoPRO com correção das distorções e visada nadir.



Fonte: Produção com algoritmo desenvolvido pelo Autor no *software* MATLAB.

Figura 4.15 – Erros dos resultados da ressecção espacial em função da altura para a câmera GoPRO com correção das distorções e visada off-nadir.

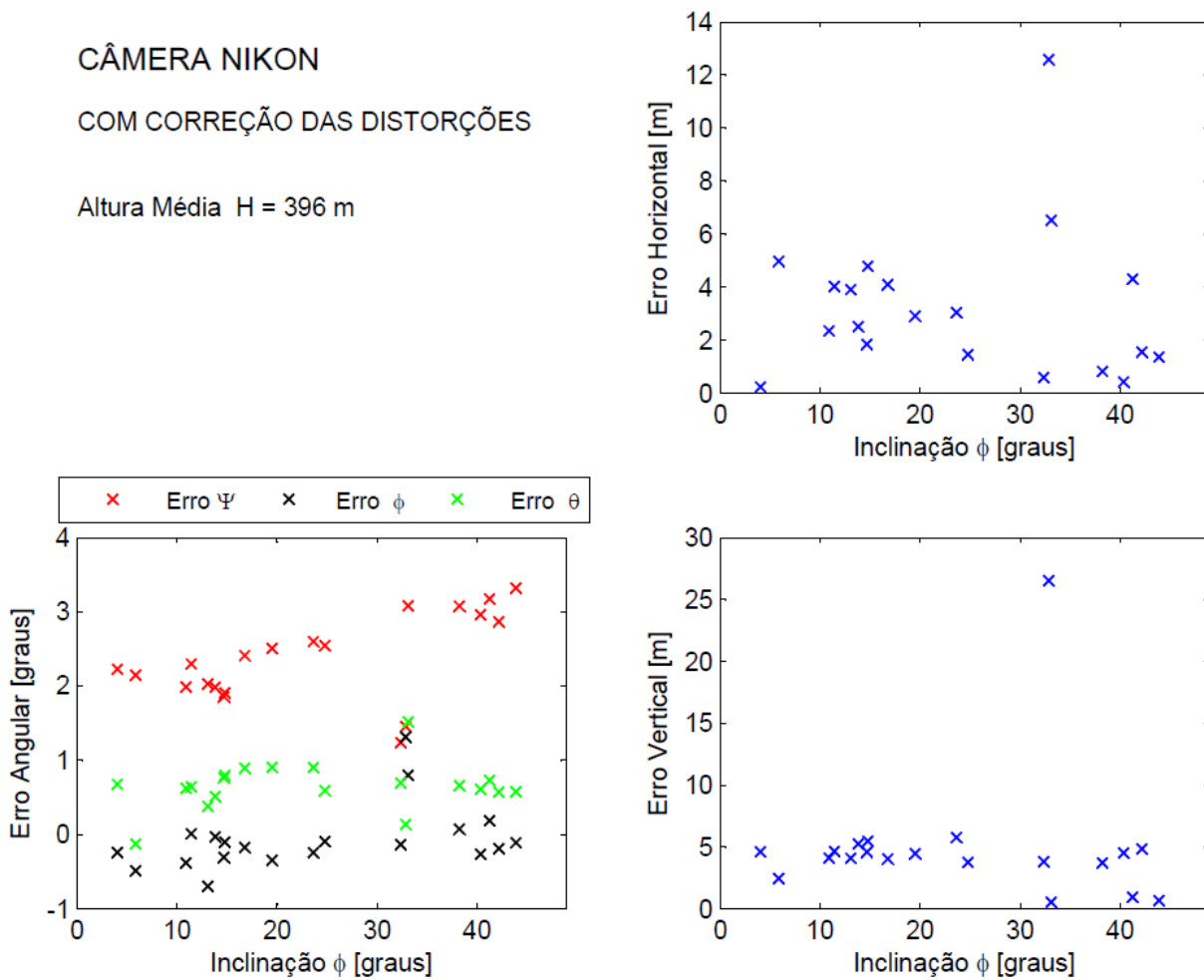


Fonte: Produção com algoritmo desenvolvido pelo Autor no *software* MATLAB.

4.5.3 Influência da inclinação nos erros

Os erros encontrados para cada parâmetro resultante da ressecção espacial pelas câmeras com correção das distorções, em situações off-nadir, foram agrupados para se pesquisar a existência de alguma função de influência da inclinação lateral da aeronave ϕ nos erros. A Figura 4.16 e a Figura 4.17 apresentam, respectivamente, os resultados da Nikon e da GoPRO a baixa altura. O APÊNDICE L apresenta o conjunto de todos os resultados. Não foi constatada relação alguma de dependência dos erros de posição nem dos erros angulares com a inclinação da aeronave.

Figura 4.16 – Erros dos resultados da ressecção espacial em função da inclinação da aeronave para a câmera Nikon com correção das distorções para alturas em torno de 390m.

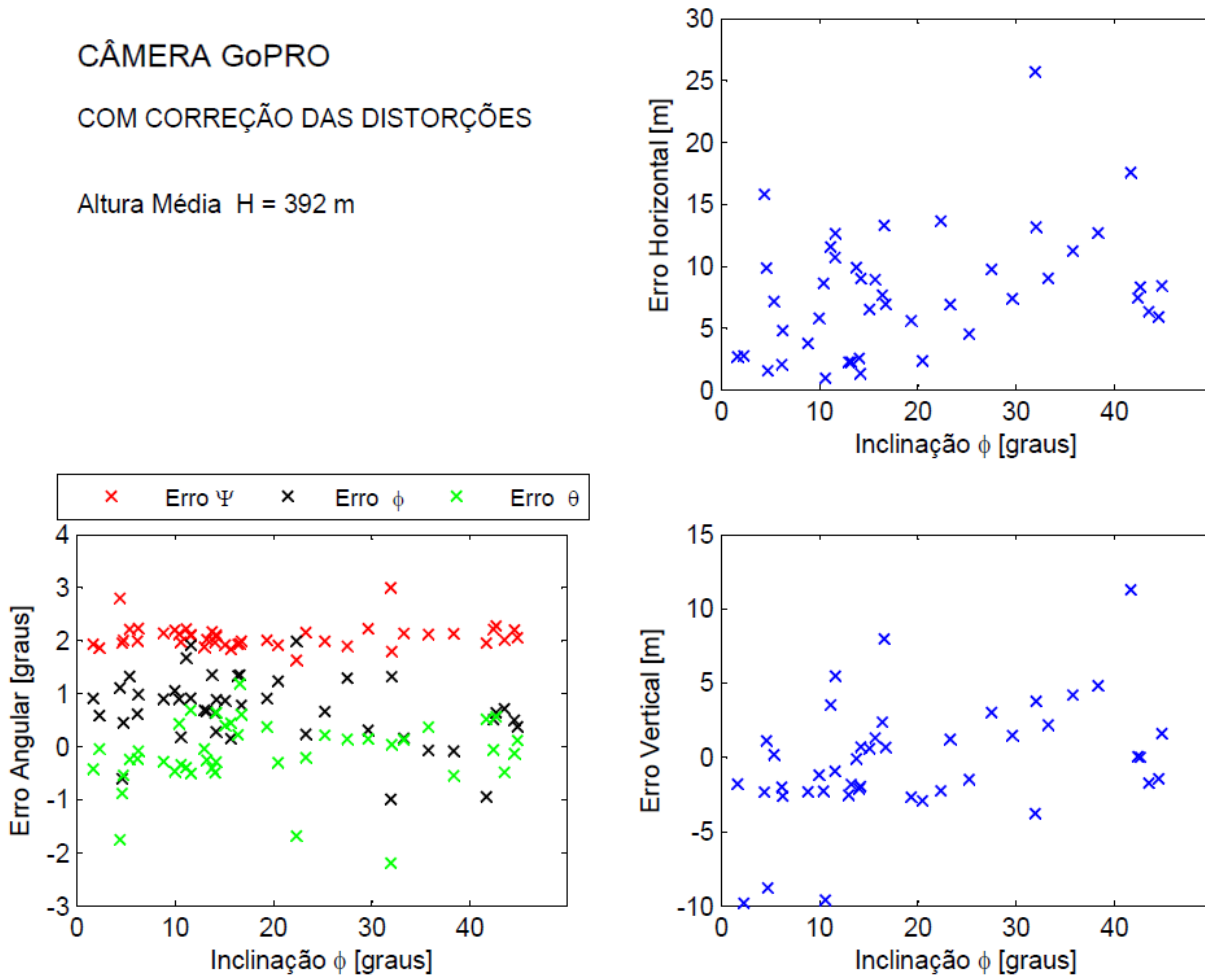


Fonte: Produção com algoritmo desenvolvido pelo Autor no *software* MATLAB.

Figura 4.17 – Erros dos resultados da ressecção espacial em função da inclinação da aeronave para a câmera GoPRO com correção das distorções para alturas em torno de 390m.

CÂMERA GoPRO
COM CORREÇÃO DAS DISTORÇÕES

Altura Média $H = 392$ m

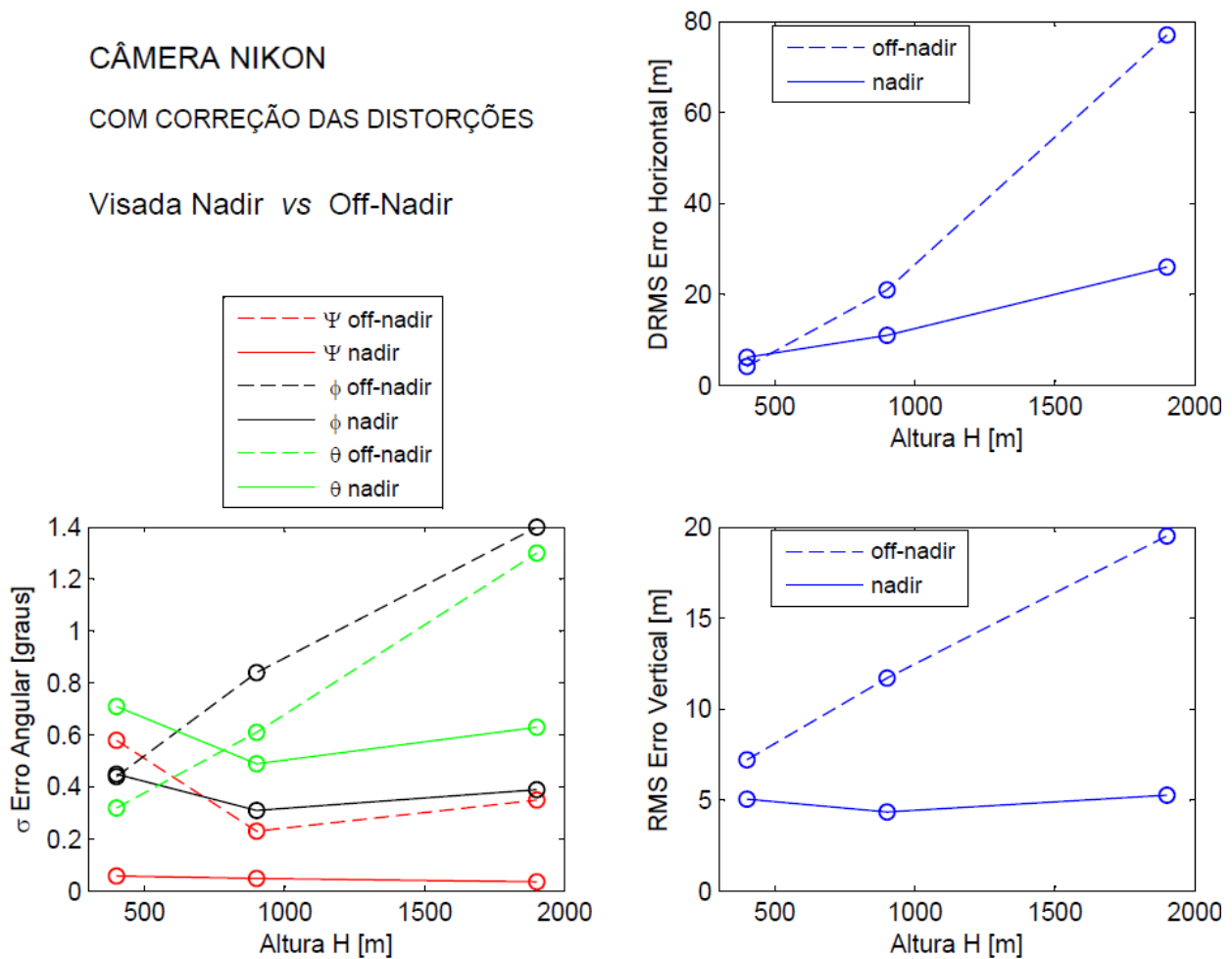


Fonte: Produção com algoritmo desenvolvido pelo Autor no *software* MATLAB.

4.5.4 Nadir vs off-nadir

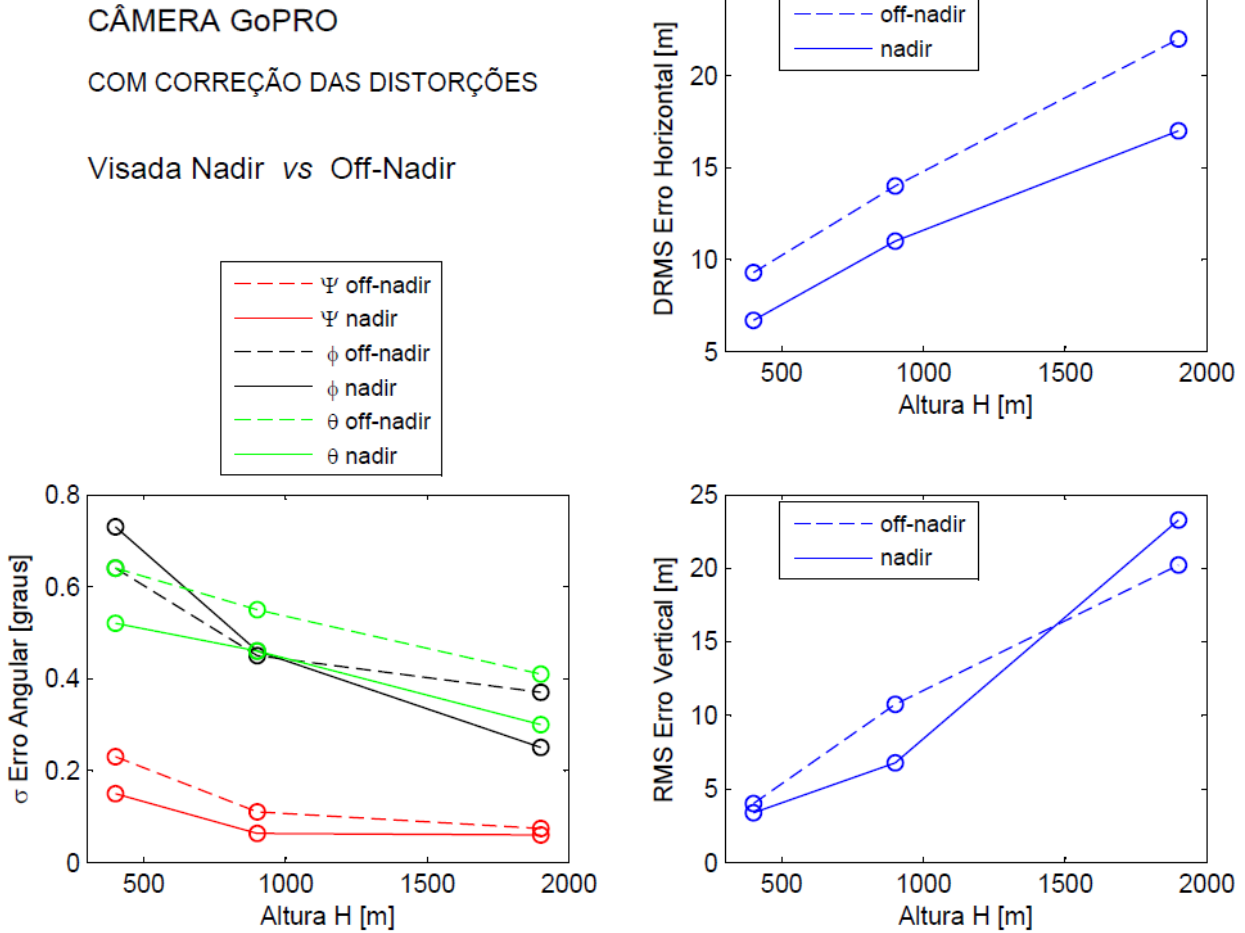
Na Seção 4.5.3 foi constatado que não houve relação de dependência dos erros lineares nem dos angulares em função da inclinação lateral. No entanto, a dispersão dos erros de todos os parâmetros mostrou-se, em geral, maior nas amostras com visada off-nadir ($\phi > 3^\circ$) em relação às amostras com visada nadir ($\phi < 3^\circ$), principalmente em alturas maiores, de acordo com os gráficos apresentados na Figura 4.18 e na Figura 4.19.

Figura 4.18 – Erros dos resultados da ressecção espacial para a câmera Nikon nas condições de visada nadir em comparação com as condições off-nadir, em função da altura.



Fonte: Produção com algoritmo desenvolvido pelo Autor no *software* MATLAB.

Figura 4.19 – Erros dos resultados da ressecção espacial para a câmera GoPRO nas condições de visada nadir em comparação com as condições off-nadir, em função da altura.

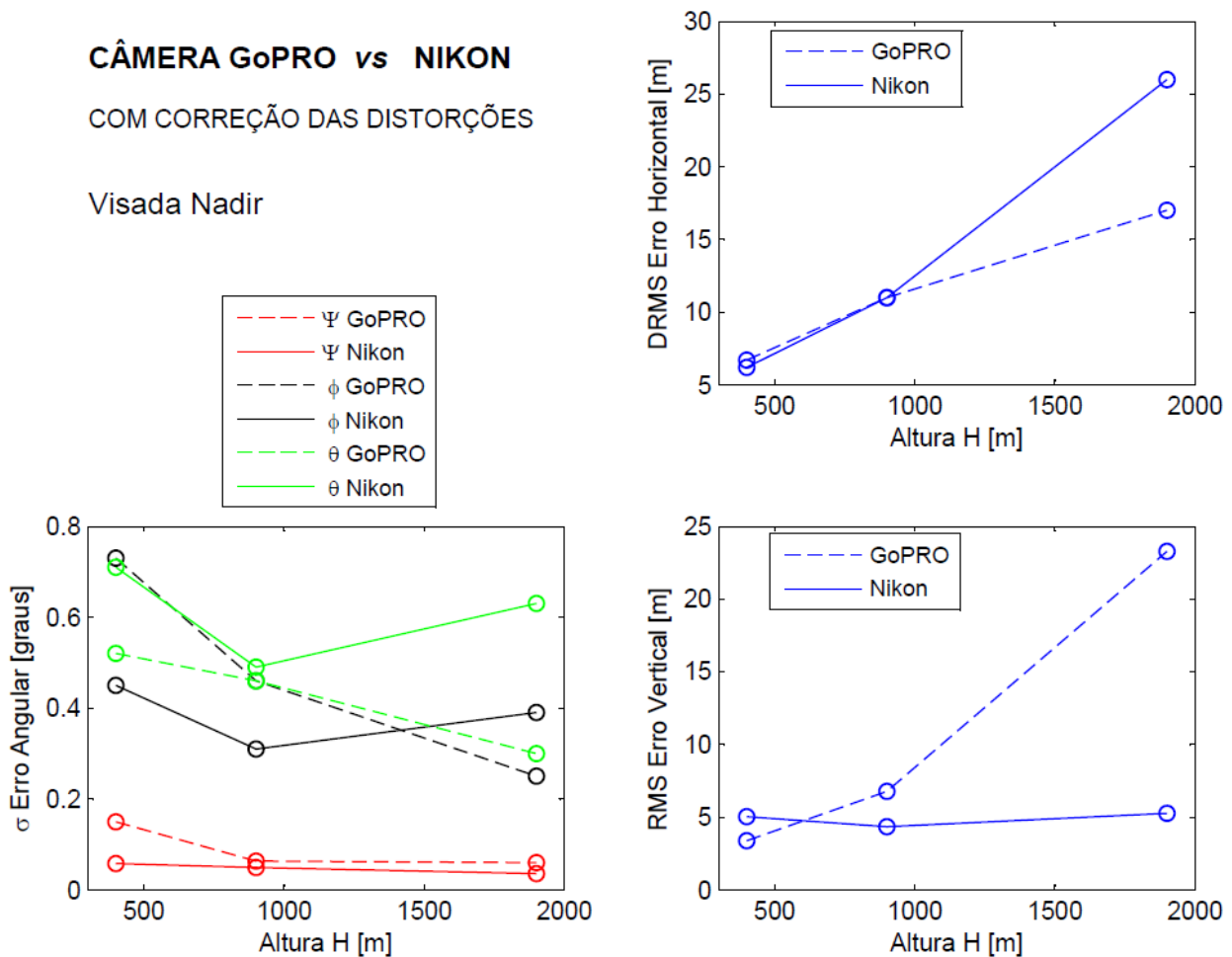


Fonte: Produção com algoritmo desenvolvido pelo Autor no *software* MATLAB.

4.5.5 GoPRO vs Nikon

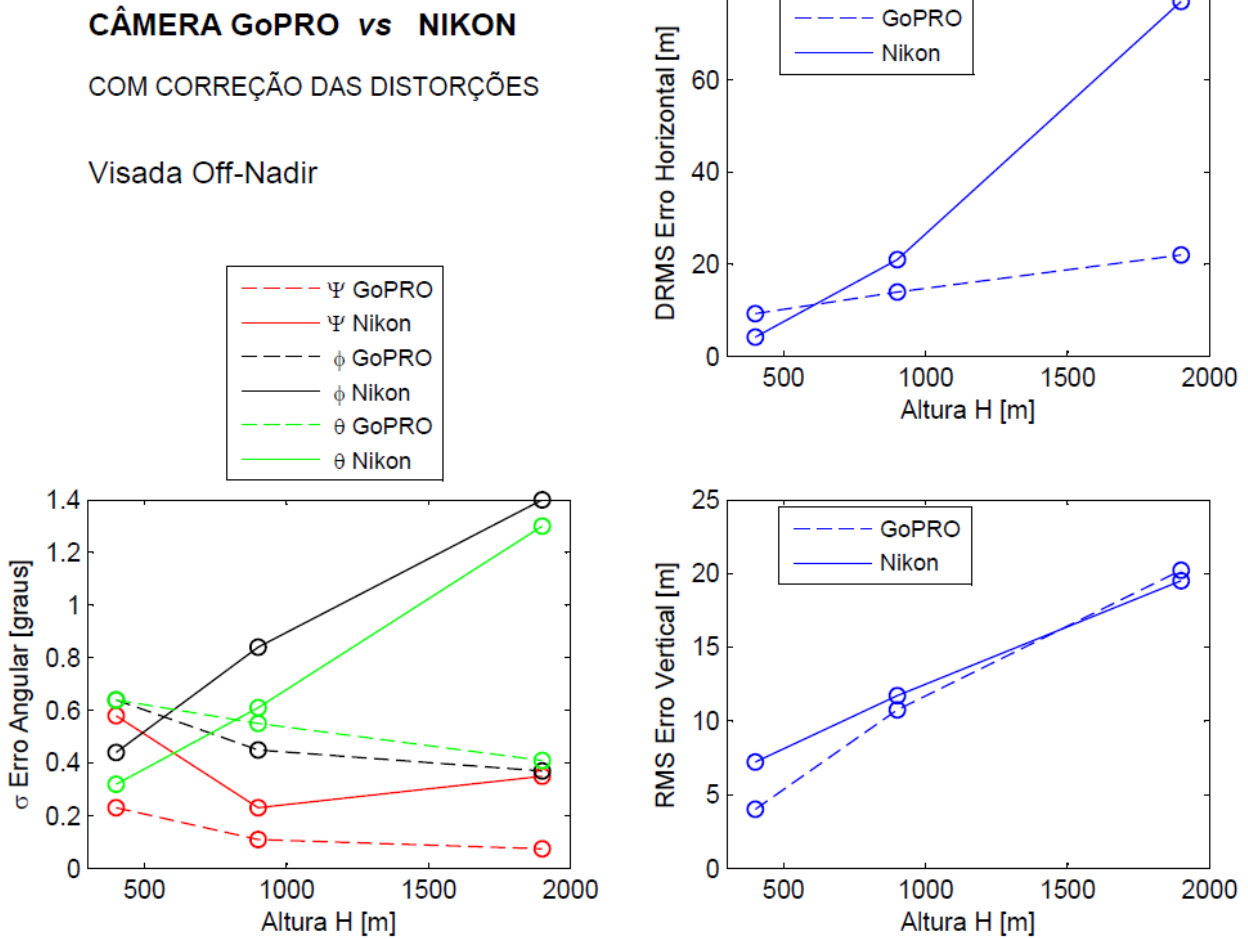
Nas ressecções em que foi aplicada correção das distorções das câmeras Nikon e GoPRO, foi observado que as dispersões dos erros horizontais e angulares pela Nikon em geral são maiores que os pela GoPRO, para as mesmas alturas, conforme os gráficos da Figura 4.20 e Figura 4.21. Estes resultados permitem afirmar que câmeras com FOV menor imprimem maior erro na ressecção. Isso pode ser explicado pela base de apoio para ressecção ser reduzida, o que fica evidente especialmente em grandes altitudes e em visadas off-nadir.

Figura 4.20 – Erros dos resultados da ressecção espacial para a câmera GoPRO em comparação com a Nikon, ambas com correção das distorções e em visada nadir, em função da altura.



Fonte: Produção com algoritmo desenvolvido pelo Autor no *software* MATLAB.

Figura 4.21 – Erros dos resultados da ressecção espacial para a câmera GoPRO em comparação com a Nikon, ambas com correção das distorções e em visada off-nadir, em função da altura.



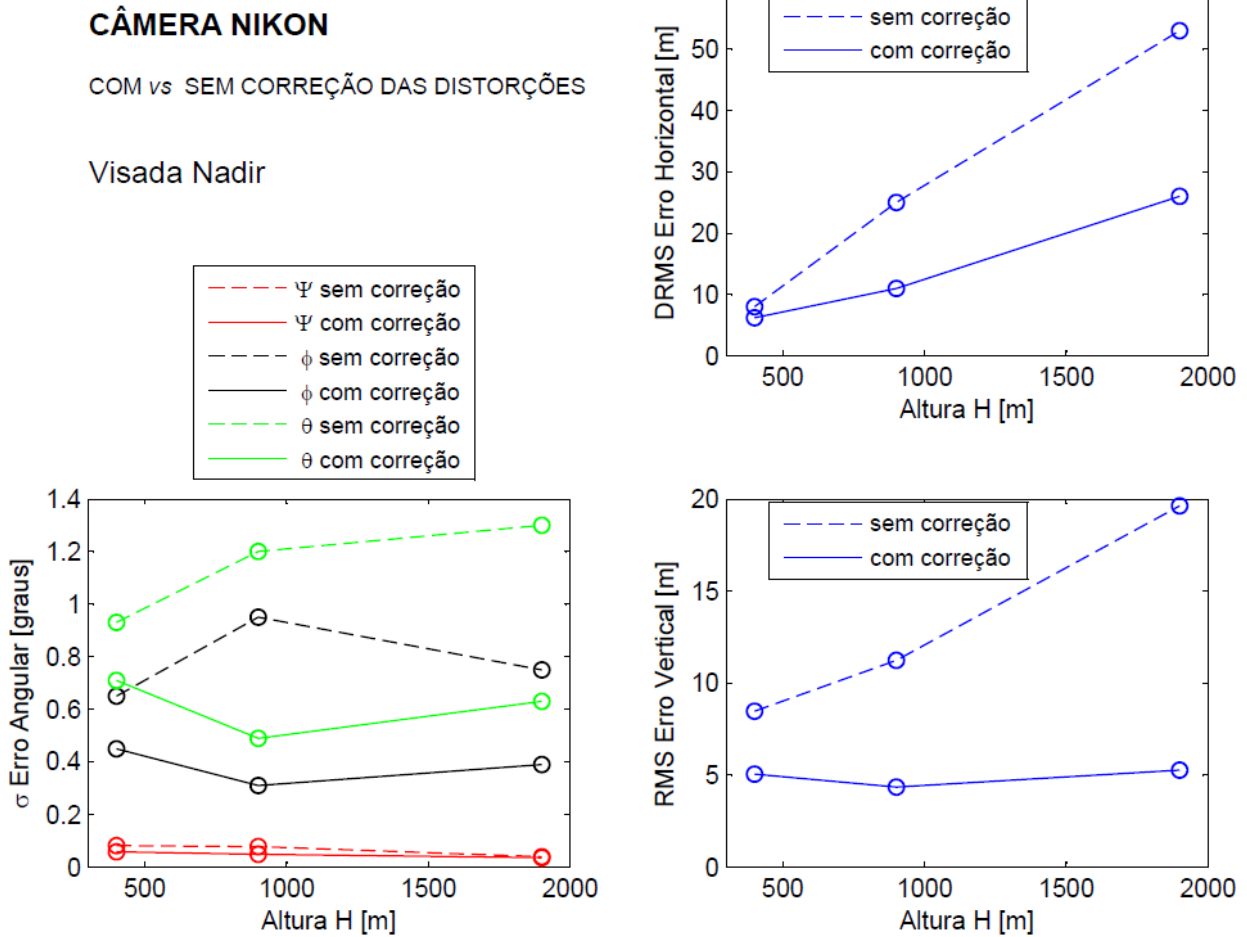
Fonte: Produção com algoritmo desenvolvido pelo Autor no *software* MATLAB.

4.5.6 Com vs sem correção das distorções

Como era esperado, os erros dos parâmetros obtidos na ressecção sem efetuar a correção das distorções das câmeras apresentaram valores maiores que os obtidos na ressecção com a correção, nas mesmas condições. O objetivo dessa comparação, mostrada nos gráficos da Figura 4.22 à Figura 4.25, foi quantificar a melhora com a calibração.

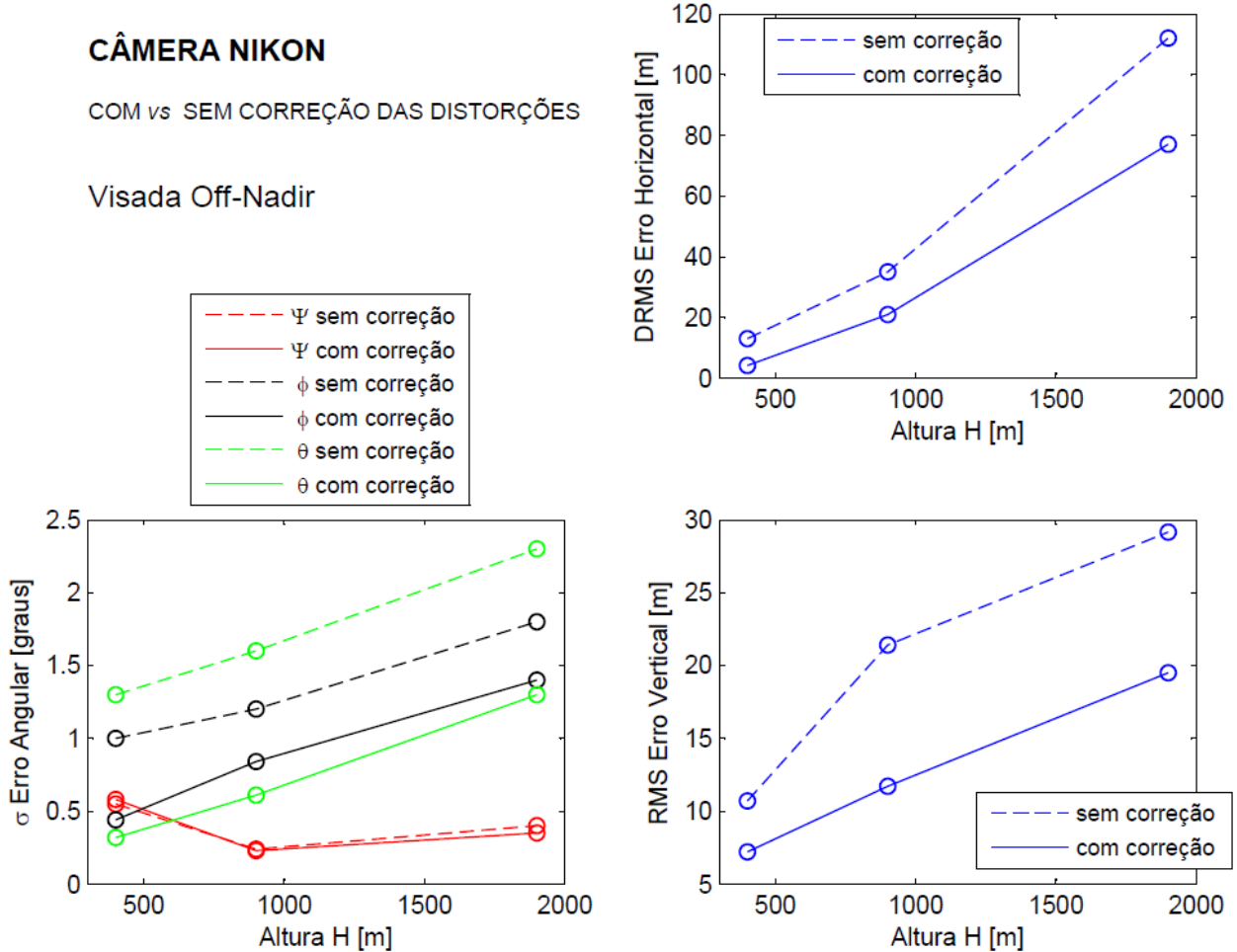
Para a câmera Nikon, o fator de diminuição da dispersão dos erros chegou até 4 vezes para posição e ângulos, considerando todas as condições de altura e de visada. Já para a câmera GoPRO, o fator de diminuição da dispersão chegou até 20 vezes para posição e ângulos. Para ambas as câmeras, estes fatores foram aleatórios, ou seja, não mostraram nenhuma relação de dependência com a altura nem com o tipo de visada.

Figura 4.22 – Erros dos resultados da ressecção espacial para a câmera Nikon com visada nadir na condição sem correção das distorções em comparação com correção, em função da altura.



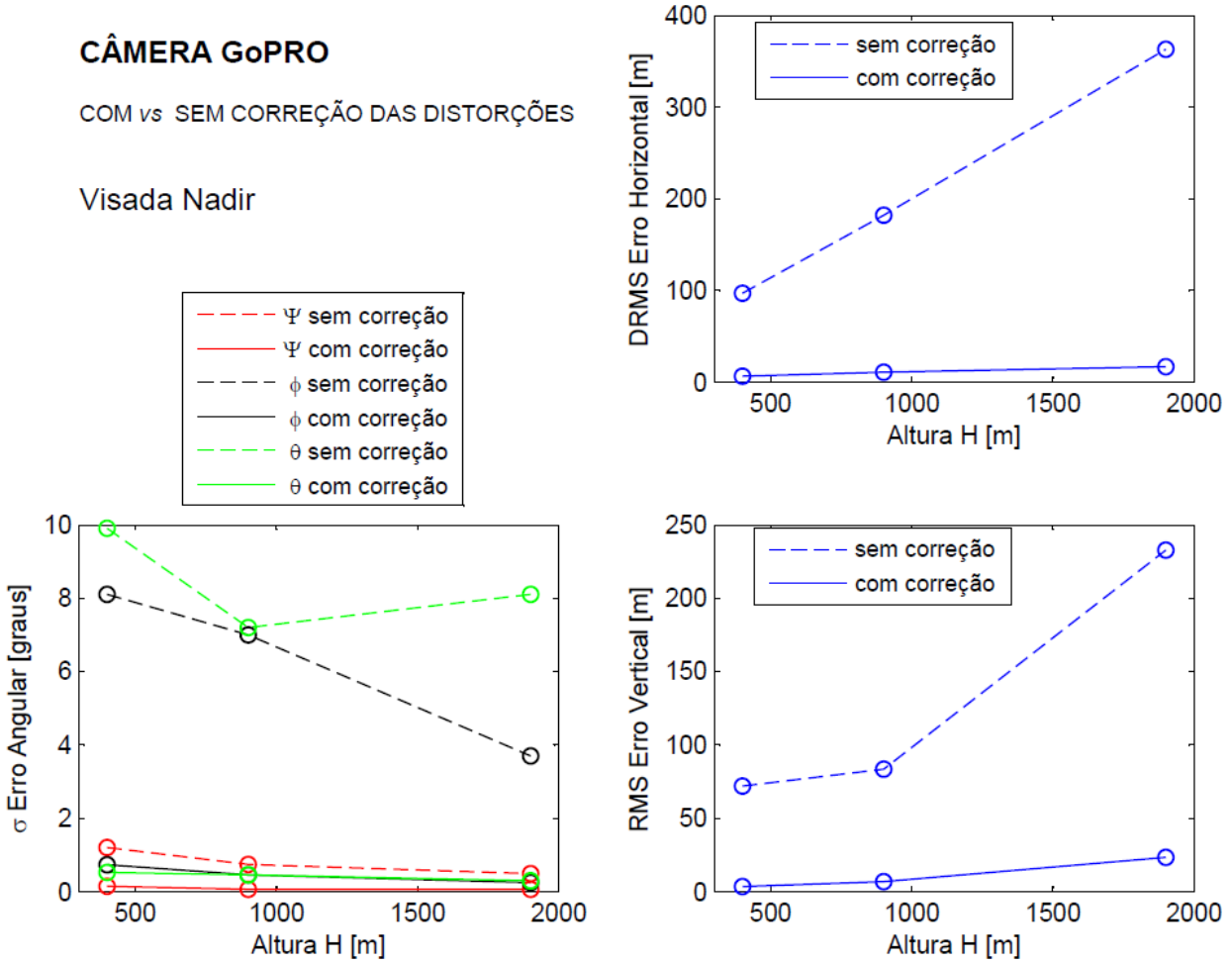
Fonte: Produção com algoritmo desenvolvido pelo Autor no *software* MATLAB.

Figura 4.23 – Erros dos resultados da ressecção espacial para a câmera Nikon com visada off-nadir na condição sem correção das distorções em comparação com correção, em função da altura.



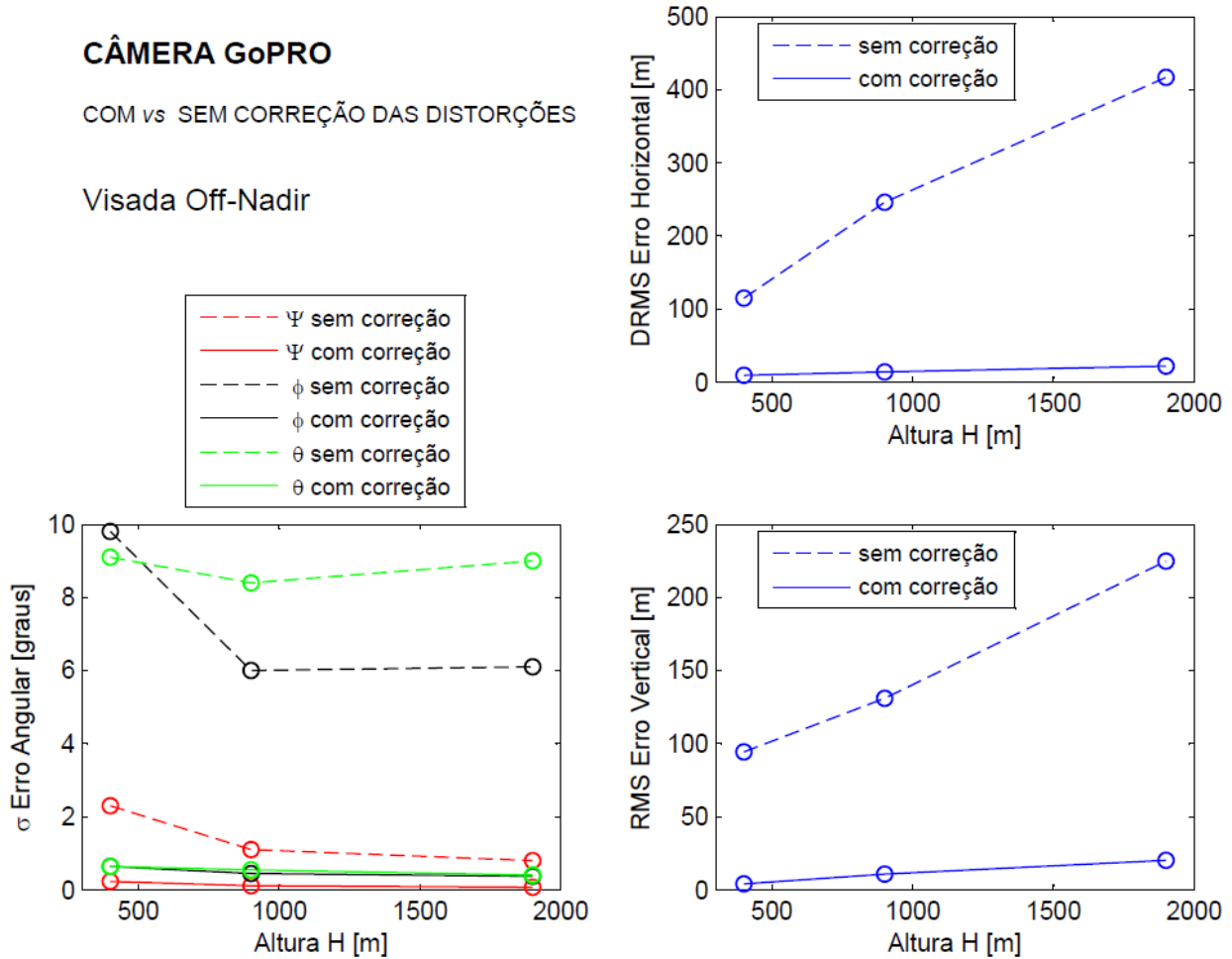
Fonte: Produção com algoritmo desenvolvido pelo Autor no *software* MATLAB.

Figura 4.24 – Erros dos resultados da ressecção espacial para a câmera GoPRO com visada nadir na condição sem correção das distorções em comparação com correção, em função da altura.



Fonte: Produção com algoritmo desenvolvido pelo Autor no *software* MATLAB.

Figura 4.25 – Erros dos resultados da ressecção espacial para a câmera GoPRO com visada off-nadir na condição sem correção das distorções em comparação com correção, em função da altura.



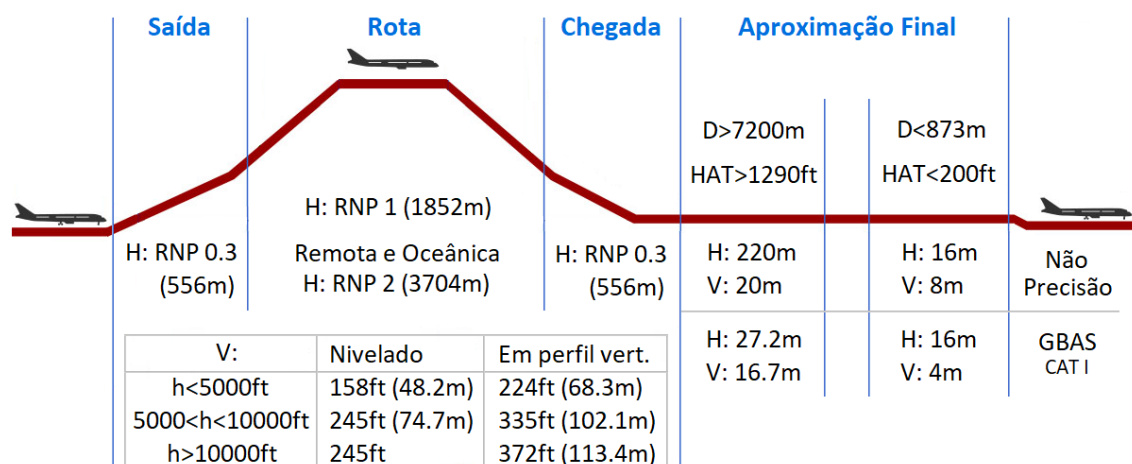
Fonte: Produção com algoritmo desenvolvido pelo Autor no *software* MATLAB.

4.6 Aceitabilidade dos resultados para navegação aérea

4.6.1 Posição

Conforme discutido no Capítulo 1, os requisitos de acurácia posicional para navegação aérea são definidos pela ICAO em função das regras de tráfego aéreo. Os requisitos aqui utilizados foram os da navegação baseada unicamente em equipamentos embarcados, denominada PBN (*Performance Based Navigation*) (ICAO, 2008). Os critérios dependem da fase do voo, sendo mais apertados nas fases terminais, principalmente nos pousos de precisão, conforme mostrado na Figura 4.26. Esses valores de acurácia representam um intervalo de confiança de 95%.

Figura 4.26 – Critério de acurácia horizontal e vertical para as diversas fase de voo na navegação aérea.



RNP – *Required Navigation Performance*

GBAS – *Ground Based Augmentation System*

D – Distância horizontal da aeronave ao aeródromo

CAT I – Categoria de aproximação I, em que a altura de decisão é 200ft ou mais

HAT – *Height Above Threshold*

h – Altitude acima do nível do mar

H – Acurácia horizontal

V – Acurácia vertical

Fonte: Produção do Autor com base no Manual PBN da ICAO (2008) e da AC 20-290 da FAA (1988).

Para verificação do cumprimento destes requisitos, foram levantados, a partir dos resultados da ressecção espacial, intervalos de confiança a 98% para a posição horizontal (2.DRMS) e intervalos de confiança a 95% para a posição vertical (2.RMS), conforme

apresentado na Tabela 4.13, que derivou da Tabela 4.9 e Tabela 4.10 da Seção 4.5. Os dados a grande altitude (30.000ft = 9200m) foram calculados por extrapolação, a partir dos gradientes de variação das dispersões, apresentados na Tabela 4.12 da Seção 4.5.2.

Tabela 4.13 – Parâmetros dos intervalos de confiança da dispersão de posição horizontal (DRMS) e vertical (RMS), para cada câmera em cada altura com condições de visada nadir e off-nadir.

		Altura	400m		900m		1900m		9200m	
		Visada	nadir	off-nadir	nadir	off-nadir	nadir	off-nadir	nadir	off-nadir
Nikon	Sem	2.DRMS (m)	16	26	50	70	106	224	541	1206
	correção	2.RMS (m)	17	21	23	43	39	58	149	230
	Com	2.DRMS (m)	12	8	22	42	52	154	248	875
	correção	2.RMS (m)	10	14	9	23	11	39	14	158
GoPRO	Sem	2.DRMS (m)	194	230	364	492	726	834	3321	3723
	correção	2.RMS (m)	144	189	167	262	466	450	2102	1730
	Com	2.DRMS (m)	13	19	22	28	34	44	133	167
	correção	2.RMS (m)	7	8	14	22	47	40	246	196

A câmera Nikon, sem correção das distorções geométricas, cumpre os requisitos de acurácia de posição horizontal na navegação em todas as fases de voo, exceto na aproximação final próximo ao aeródromo ($D < 873m$). Com correção das distorções, a Nikon cumpre a acurácia horizontal em todas as fases, conforme resumo gráfico apresentado na Figura 4.27.

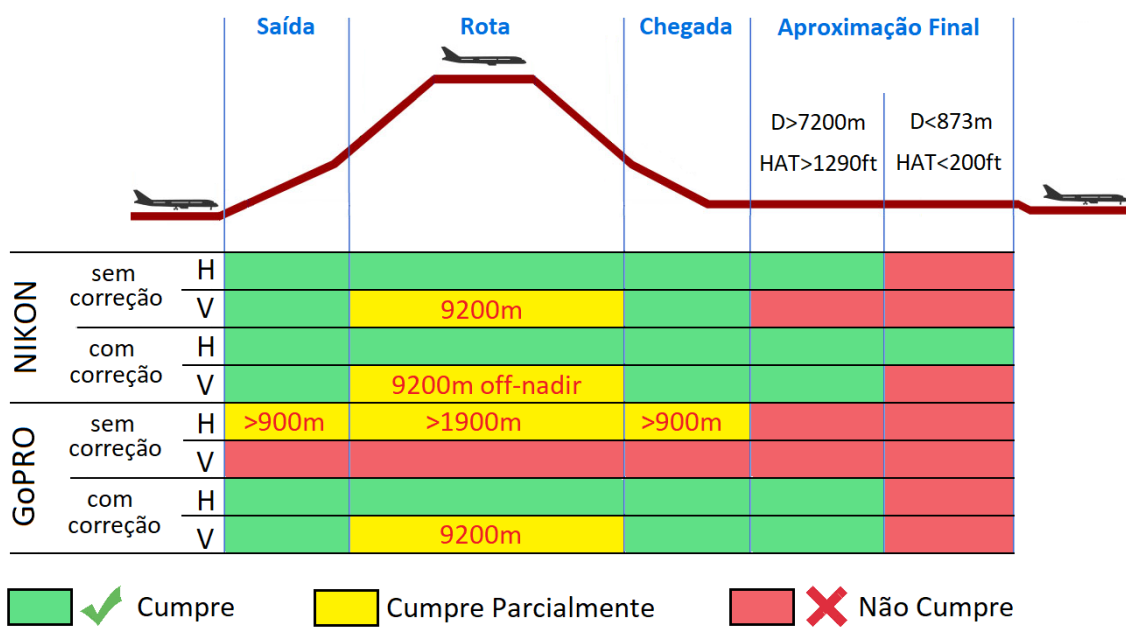
Quanto à acurácia de posicionamento vertical, a Nikon sem correção não cumpre em toda a fase de aproximação final ($D < 7.200m$) nem a grandes altitudes (avaliado a 30.000ft = 9.200m). Com correção das distorções, a Nikon cumpre a acurácia vertical em todas as fases, exceto na aproximação final próximo ao aeródromo ($D < 873m$) e a grandes altitudes com visada off-nadir.

Vale ressaltar que o não cumprimento da acurácia na fase final para pouso é devido essencialmente ao valor do requisito ser mais restritivo, não por perda de acurácia da câmera nesta fase.

A câmara GoPRO sem correção das distorções cumpre os critérios de acurácia horizontal nas fases de saída e de chegada somente a baixas altitudes (até 900m de altura avaliado). Na fase em rota, só cumpre a baixas altitudes (até 1900m de altura avaliado). Não cumpre nas demais fases, nem mesmo em rota remoto a grandes altitudes. Quanto à acurácia vertical, não cumpre em nenhuma fase de voo.

Com correção das distorções, a GoPRO cumpre acurácia horizontal em todas as fases de voo, exceto na aproximação final próximo ao aeródromo ($D < 873m$). Quanto à acurácia vertical, cumpre em todas as fases, exceto na aproximação final próximo ao aeródromo ($D < 873m$) e em grandes altitudes (avaliado a $30.000ft = 9.200m$).

Figura 4.27 – Enquadramento dos resultados da ressecção espacial de cada condição em relação aos requisitos de acurácia horizontal (H) e vertical (V) em cada fase de voo.



Fonte: Produção do Autor.

Assim, a calibração das câmeras para correção das distorções geométricas é mandatória para se extrair dados de posição por ressecção espacial, pois, permite atender aos requisitos de acurácia horizontal em todas as fases de voo. Se não for calibrada, uma possibilidade para melhorar a acurácia horizontal é fazer a combinação de dados com um sensor inercial, por exemplo. E nas situações em que não cumpre a acurácia vertical, pode-se fazer combinação ou substituição com um barômetro, por exemplo.

4.6.2 Orientação angular

Os requisitos de acurácia para os ângulos de atitude e proa são definidos na Norma DO-334 (RTCA, 2012), sendo resumidos na Tabela 4.14.

Tabela 4.14 – Critérios de acurácia dos ângulos de atitude e proa para navegação aérea.

		Categoria	Proa (ψ)	Atitudes (θ e ϕ)
		1	2,0°	0,2°
		2	2,0°	0,5°
		3	4,0°	1,0°
		4	6,0°	2,5°
		5	6,0°	2,5°
Modo Degradado	Sem aceleração e sem manobra		12°	θ : 3° / ϕ : 4°
	Com aceleração e com manobra		24°	θ : 6° / ϕ : 8°

Fonte: Produção do Autor com base na Norma DO-334 da RTCA (2012).

Para verificação do cumprimento destes requisitos angulares, foram levantados, a partir dos resultados da ressecção espacial, intervalos de confiança a 95% para a proa ψ , ângulo de arfagem θ e ângulo de rolamento ou inclinação lateral ϕ , conforme apresentado na Tabela 4.15, que derivou da Tabela 4.9 e Tabela 4.10 da Seção 4.5.

Tabela 4.15 – Parâmetros dos intervalos de confiança das orientações angulares, para cada câmara em cada altura com condições de visada nadir e off-nadir.

		Altura	400m		900m		1900m	
		Visada	nadir	off-nadir	nadir	off-nadir	nadir	off-nadir
Nikon	Sem correção	$2\cdot\sigma_\psi$ (°)	0,16	1,10	0,16	0,48	0,08	0,80
		$2\cdot\sigma_\phi$ (°)	1,30	2,00	1,90	2,40	1,50	3,60
		$2\cdot\sigma_\theta$ (°)	1,86	2,60	2,40	3,20	2,60	4,60
	Com correção	$2\cdot\sigma_\psi$ (°)	0,12	1,16	0,10	0,46	0,07	0,70
		$2\cdot\sigma_\phi$ (°)	0,90	0,88	0,62	1,68	0,78	2,80
		$2\cdot\sigma_\theta$ (°)	1,42	0,64	0,98	1,22	1,26	2,60
GoPRO	Sem correção	$2\cdot\sigma_\psi$ (°)	2,40	4,60	1,48	2,20	0,98	1,60
		$2\cdot\sigma_\phi$ (°)	16,20	19,60	14,00	12,00	7,40	12,20
		$2\cdot\sigma_\theta$ (°)	19,80	18,20	14,40	16,80	16,20	18,00
	Com correção	$2\cdot\sigma_\psi$ (°)	0,30	0,46	0,13	0,22	0,12	0,15
		$2\cdot\sigma_\phi$ (°)	1,46	1,28	0,92	0,90	0,50	0,74
		$2\cdot\sigma_\theta$ (°)	1,04	1,28	0,92	1,10	0,60	0,82

A câmara Nikon cumpre os requisitos de acurácia para ângulo de proa na categoria 1 em todas as condições, tanto com correção das distorções quanto sem, conforme resumido na Tabela 4.16. Para os ângulos de arfagem e de rolamento, a Nikon cumpre a partir da categoria 3 em algumas condições, mas só cumpre em todas as condições analisadas de altura e visada o requisito de acurácia do modo degradado, tanto com quanto sem correção das distorções.

A câmara GoPRO sem correção das distorções cumpre os requisitos de acurácia para ângulo de proa na categoria 1 em algumas condições, mas só atende a todas as condições na categoria 4. Com correção das distorções, cumpre a acurácia de proa na categoria 1 em todas as condições. Quanto aos ângulos de arfagem e rolamento, a GoPRO sem correção das distorções não cumpre os requisitos nem no modo degradado. Com correção das distorções, cumpre a acurácia de atitude em algumas condições a partir da categoria 3, principalmente a grandes altitudes, mas só atente a todas as condições na categoria 4.

Tabela 4.16 – Enquadramento dos resultados da ressecção espacial de cada condição em relação aos requisitos de acurácia para ângulos de atitude e de proa.

		Altura Visada	400m		900m		1900m	
			nadir	off-nadir	nadir	off-nadir	nadir	off-nadir
Nikon	Sem correção	ψ	CAT1					
		ϕ	CAT4					DEGR
		θ	CAT4			DEGR		
	Com correção	ψ	CAT1					
		ϕ	CAT3		CAT4	CAT3	DEGR	
		θ	CAT4	CAT3	CAT4		DEGR	
GoPRO	Sem correção	ψ	CAT3	CAT4	CAT1	CAT3	CAT1	
		ϕ	Não Cumpre					
		θ	Não Cumpre					
	Com correção	ψ	CAT1					
		ϕ	CAT4		CAT3			
		θ	CAT4	CAT3	CAT4	CAT3		

CAT1 – Categoria 1, CAT3 – Categoria 3, CAT4 – Categoria 4, DEGR – Modo Degradado

Portanto, a calibração das câmeras para correção das distorções geométricas é mandatória para se extrair ângulos de proa e atitude por meio de ressecção espacial. Ainda, a câmara GoPRO (FOV maior), com correção das distorções, enquadra-se em uma melhor categoria de acurácia dos ângulos de arfagem e rolamento, em relação à câmara Nikon (FOV menor).

5 CONCLUSÕES

Usando a metodologia desenvolvida nesta pesquisa foi possível avaliar a acurácia dos parâmetros de navegação (posição e orientação) de uma aeronave, determinados por meio de ressecção espacial, com imagens obtidas por câmeras de pequeno formato embarcadas, objetivo principal deste trabalho.

Foram fundamentais para se chegar a esse objetivo: a utilização de uma aeronave com sistemas sensores de alta acurácia; o desenvolvimento de algoritmos e modelos analíticos próprios para calibração geométrica das câmeras; a realização do procedimento de sincronismo de tempo; o desenvolvimento de uma metodologia para determinação dos offsets; e o levantamento de coordenadas em campo com GNSS de alta acurácia.

O fator de distorção que mais contribuiu para o erro nas câmeras utilizadas foi a distorção radial.

Verificou-se que a obtenção de proa por imagem tem grande acurácia. Por outro lado, a determinação de posição vertical por ressecção espacial não tem acurácia, o que obriga o uso de outro tipo de sensor para navegação, por exemplo, um barômetro.

Quanto à influência da altura de voo na ressecção, a dispersão dos erros de posição aumentou em função da altura. A dispersão dos erros angulares para a câmera com FOV grande diminuiu com a altura sendo, portanto, melhores que a de FOV pequeno para determinação destes parâmetros.

Não foi verificada dependência alguma dos erros de posição nem dos angulares em função da inclinação da aeronave. A dispersão dos erros de todos os parâmetros foi maior nas situações com visada off-nadir comparadas com a nadir.

A calibração da câmera Nikon diminuiu a dispersão dos erros em até 4 vezes, enquanto que a da GoPRO diminuiu em até 20 vezes.

A câmera GoPRO, quando calibrada, apresentou dispersões menores que os da Nikon, permitindo concluir que câmeras com FOV maior são melhores para ressecção.

Quanto aos requisitos de acurácia posicional da navegação aérea, a câmera Nikon sem calibração só deixou de cumprir a horizontal na fase final. Com calibração, cumpriu em todas as fases de voo. Mas deixou de cumprir a acurácia vertical em algumas fases mesmo com calibração. A GoPRO sem calibração deixou de cumprir a acurácia horizontal em praticamente todas as fases de voo. Com calibração só não cumpriu na aproximação final.

Os requisitos de acurácia angular para proa foram cumpridos pela Nikon na melhor categoria tanto sem quanto com calibração. A GoPRO cumpriu na melhor categoria somente com calibração, apresentando valores mais acurados que a Nikon. Tanto a Nikon quanto a GoPRO só cumpriram os requisitos de acurácia para os ângulos de arfagem e rolamento em categorias menores, não sendo recomendáveis para a determinação destes parâmetros, devendo ser feita combinação ou substituição com outro tipo de sensor.

Portanto, a câmera Nikon pode ser usada sem calibração para navegação aérea, só não na fase final de aproximação. Dispondo do CALIBRA, *software* desenvolvido neste trabalho e que apresentou alta acurácia na calibração, é preferível o uso da câmera GoPRO, pois é mais barata e apresenta melhor acurácia quando calibrada.

Os métodos utilizados neste trabalho, bem como as técnicas desenvolvidas e os resultados alcançados, não são restritos ao problema da navegação de veículos aéreos. Eles podem beneficiar outras aplicações, principalmente na área de Sensoriamento Remoto. Mesmo na questão da navegação aérea, embora tenha sido utilizada neste trabalho uma aeronave tripulada por necessidade de sensores de alta acurácia, os resultados e conclusões sobre os parâmetros de navegação são aplicáveis também aos VANTs.

No Sensoriamento Remoto, o CALIBRA, pode melhorar a qualidade geométrica dos produtos cartográficos gerados por câmeras embarcadas em VANTs e diminuir o tempo de processamento. Essas melhorias também podem ser conseguidas se os ângulos de

atitude, gravados pelos sistemas do VANT ou da aeronave, forem fornecidos aos *softwares* fotogramétricos que geram Ortofotomosaicos e Modelos Digitais de Elevação (MDS), empregando o método de compatibilização desenvolvido neste trabalho.

Ainda, se o método desenvolvido neste trabalho para integração das câmeras aos sistemas da aeronave, que envolve o sincronismo de tempo e a determinação de *offsets*, for utilizado em VANTs ou em aeronaves de mapeamento, os dados fornecidos aos *softwares* fotogramétricos ficarão isentos de erros sistemáticos, garantindo maior acurácia ao Ortofotomosaico e ao MDS, que podem atingir um maior nível no Padrão de Exatidão Cartográfica (PEC). Dessa forma, o produto cartográfico pode inclusive dispensar a necessidade de levantamento em campo de pontos de controle ou então a necessidade de registro ao ser importado em um SIG. Todos estes benefícios visualizados para o Sensoriamento Remoto obviamente carecem de investigação e avaliação de custo-benefício em trabalhos futuros.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGISOFT. **Agisoft photoscan user manual**: Professional Edition. Ver 1.2. [S.l.]: Agisoft LLC, 2016. Disponível em: < http://www.agisoft.com/pdf/photoscan-pro_1_2_en.pdf>. Acesso em: 04/06/2016.

AMERICAN SOCIETY FOR PHOTOGRAMMETRY AND REMOTE SENSING (ASPRS). ASPRS positional accuracy standards for digital geospatial data. 1. ed., ver 1.0, nov 2104. **Photogrammetric Engineering & Remote Sensing** v. 81, n. 3, p. 1–26, 2015. Disponível em: <<http://openurl.ingenta.com/content/xref?genre=article&issn=0099-1112&volume=81&issue=3&spage=1>>.0099-1112/15/813–A1>. Acesso em: 18/09/2017.

ANDRADE, J. B. **Fotogrametria**. 2. ed. Curitiba: SBEE, 2003. 274 p. ISBN (85-86180-28-9).

ANDRADE, J. B. **Photogrammetric refraction**. 117p. PhD Thesis – The Ohio State University, Columbus, 1977.

ANTUNES, A. F. B.; HOLLATZ, R. C. V. Cadastro técnico multifinalitário de baixo custo utilizando VANT. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO - SBSR, 17., 2015, João Pessoa, Brasil. **Anais...** São José dos Campos: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), 2015. p. 5858-5864. ISBN (978-85-17-0076-8).

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 13133**: Execução de levantamento topográfico. Rio de Janeiro, maio 1994. 35p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 14166**: Rede de referência cadastral – procedimento. Rio de Janeiro, ago 1998. 23p.

BARAZZETTI, L.; MUSSIO, L.; REMONDINO, F.; SCAIONI, M. Targetless camera calibration. In: ISPRS TRENTO WORKSHOP, 2011, Trento, Italy. **Proceedings...** Trento: International Society of Photogrammetry and Remote Sensing (ISPRS), 2011. p. 335-342. Vol XXXVIII-5/W16. ISSN (1682-1777).

BAZAN, W. S.; TOMMASELLI, A. M. G.; GALO, M.; RUY, R. S. Calibração de um sistema dual de câmaras digitais convergentes. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE GEOMÁTICA e COLÓQUIO BRASILEIRO DE CIÊNCIAS GEODÉSICAS, 2. e 5., 2007, Presidente Prudente, Brasil. **Anais...** Presidente Prudente: Universidade Estadual Paulista (UNESP), 2007. P. 726-734. ISSN (1981-6251).

BÖRLIN, N.; GRUSSENMEYER, P. Camera calibration using the damped bundle adjustment toolbox. In: ISPRS TECHNICAL COMMISSION SYMPOSIUM, 5., 2014, Riva del Garda, Italy. **Proceedings...** Riva del Garda: International Society of Photogrammetry and Remote Sensing (ISPRS), 2014. p. 89-96. Vol II-5. ISSN (2194-9050).

BRITO, J.; COELHO, L. **Fotogrametria digital**. Rio de Janeiro: Ed UERJ, 2002. 214 p. ISBN (978-85-7511-114-7).

BROADCOM COMPANY. **Diffused LED lamps**. [S.l.], 2017. Data Sheet AV02-1555EN.

- BROWN, D. C. Decentering distortion of lenses. In: ANNUAL CONVENTION OF THE AMERICAN SOCIETY OF PHOTOGRAMMETRY, 29., 1965, Washington, USA. **Proceedings...** Washington: American Society for Photogrammetry and Remote Sensing (ASPRS), 1966. p. 444-462. Vol 32.
- BROWN, D. C. Decentering distortion of lenses. **Photogrammetric Engineering** v. 32, n. 3, p. 444-462, 1966.
- CANHOTO, A.; SHIGUEMORI, E. H.; DOMICIANO, M. A. P. Image sequence processing applied to autonomous aerial navigation. In: IEEE INTERNATIONAL CONFERENCE ON SIGNAL AND IMAGE PROCESSING APPLICATIONS – ICSIPA09, 2009, Kuala Lumpur, Malaysia. **Proceedings...** Kuala Lumpur: IEEE Signal Processing Society Malaysia, 2009. p.496-499. ISBN (9781424455614).
- CASTRO, A. M. O. **VANT – Veículos Aéreos Não Tripulados: avaliação da competitividade da indústria nacional e medidas para incrementá-la.** Trabalho de Conclusão (Curso de Altos Estudos de Política e Estratégia) – Escola Superior de Guerra (ESG), Rio de Janeiro, 2015.
- CHULLIAT, A.; MACMILLAN, S.; ALKEN, P.; BEGGAN, C.; NAIR, M.; HAMILTON, B.; WOODS, A.; RIDLEY, V.; MAUS, S.; THOMSON, A. **The US/UK world magnetic model for 2015-2020:** Technical Report, Boulder: National Geophysical Data Center (NOAA), 2015.
- CLARKE, T. A.; FRYER, J. G. The Development of camera calibration methods and models. **Photogrammetric Record**, v. 16, n. 91, p. 51-66, ISBN (1998.0197-9337).
- CONRADY, A. Decentered lens systems. **Monthly Notices of the Royal Astronomical Society**, v. 79, p. 384-390, 1919.
- COSTA, A. L. S.; SANTOS, S. S.; AZEVEDO, G. T. **Análise aerodinâmica e estrutural do suporte para câmeras da aeronave A-29 Supertucano.** São José dos Campos: Instituto de Aeronáutica e Espaço (IAE), 2017. (RT 001/ASA-D/2017, GDO-000000/B5007).
- CRISTINA, M.; CUNHA, C. **Métodos numéricos.** 2. ed. Campinas: Ed UNICAMP, 2000. 276 p. ISBN (978-85-268-0877-5).
- CRONK, S.; FRASER, C.; HANLEY, H. Automated metric calibration of colour digital cameras. **Photogrammetric Record**, v. 21, n. 116, p. 355-372, ISBN (2006.1477-9730).
- DAL'FORNO, G. L.; AGUIRRE, A. J.; HILLEBRAND, F. L.; GREGÓRIO, F. V. Transformação de coordenadas geodésicas em coordenadas no plano topográfico local pelos métodos da Norma NBR 14166:1998 e o de rotações e translações. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE CIÊNCIAS GEODÉSICAS E TECNOLOGIAS DA GEOINFORMAÇÃO, 3., 2010, Recife, Brasil. **Anais...** Recife: Universidade Federal do Pernambuco (UFPE), 2010. p. 1-7.
- DAMPF, J.; PANY, T.; BÄR, W.; WINKEL, J.; MERVART, L.; RODRÍGUEZ, J. A. A.; IOANNIDES, R. Real world spoofing trials and mitigation – via direction of arrival discrimination. **Inside GNSS Media & Research LLC**, v. 12, n. 3, p. 55-65, 2017. ISSN (1559-503X).

DEBIASI, P.; HAINOSZ, F.; MITISHITA, E. A. Calibração em serviço de câmara digital de baixo custo com o uso de pontos de apoio altimétrico. **Boletim de Ciências Geodésicas**, v. 18, n. 2, p. 225–241, 2012. ISSN (14134853).

EMPRESA BRASILEIRA DE AERONÁUTICA (EMBRAER). **Lista de verificações de peso básico e dados de carregamento**: Aeronaves A-29A (Monoposto) e A-29B (Biposto). Rev 3. São José dos Campos: EMBRAER S.A., 2016. (OTFN 1A-29 A/B-5).

EMPRESA BRASILEIRA DE AERONÁUTICA (EMBRAER). **Manual de manutenção – Nivelamento e pesagem – AMM 1651**. Rev 15. São José dos Campos: EMBRAER S.A., 2016. (EMB-314 08-10-01-500-801-A/200).

EMPRESA BRASILEIRA DE AERONÁUTICA (EMBRAER). **Manual de voo – Manual suplementar do sistema aviônico**: Aeronaves A-29A (Monoposto) e A-29B (Biposto). Rev 6. São José dos Campos: EMBRAER S.A., 2016. (OTFN 1A-29 A/B-1-1).

ETKIN, B.; REID, L. D. **Dynamics of flight: stability and control**. 3. ed. Toronto: Wiley, 1996. 382 p. ISBN (0-471-03418-5).

FARRELL, J. A.; BARTH, M. **The global positioning system & inertial navigation**. New York: McGraw-Hill, 1999. 340 p. ISBN (0-07-022045-X).

FEDERAL AVIATION ADMINISTRATION (FAA). **Advisory Circular AC 20-190**: Airworthiness approval of Vertical Navigation (VNAV) systems for use in the U.S. National Airspace System (NAS) and Alaska. [S.l.]: FAA, 9 Dec 1988.

FILHO, P. F. F. S. **Automatic landmark recognition in aerial images for the autonomous navigation system of unmanned aerial vehicles**. 158p. Dissertação (Mestrado em Engenharia da Computação) – Instituto Tecnológico de Aeronáutica (ITA), São José dos Campos, 2016. Disponível em: <http://bdita.bibl.ita.br/tesesdigitais/lista_resumo.php?num_tese=71989> . Acesso em: 29/09/2017.

FISHER, N.I. **Statistical analysis of circular data**. Cambridge: Cambridge University Press, 1993. 296 p. ISBN (0521568900).

GEMAEL, C.; MACHADO, A. M. L.; WANDRESEN, R. **Introdução ao ajustamento de observações**: aplicações geodésicas. 2. ed. Curitiba: Ed UFPR, 2015. 430 p. ISBN (978-85-8480-008-7).

GHILANI, C. D.; WOLF, P. R. **Adjustment computations: spatial data analysis**. 4. ed. Hoboken: Wiley, 2006. 611 p. ISBN (13-978-0-471-69728-2).

GILAT, A.; SUBRAMANIAM, V. **Métodos numéricos para engenheiros e cientistas**: uma introdução com aplicações usando o MATLAB. Porto Alegre: Bookman, 2008. 479 p. ISBN (978-85-7780-297-5).

GOPRO. **Hero 4 Black user manual**. Rev A. [S.l.]: GoPro Inc., 2016 (130-14708-000).

GREWAL, M. S.; WEILL, L. R.; ANDREWS, A. P. **Global positioning systems, inertial navigation, and integration**. 2. ed. Hoboken: Wiley, 2007. 525 p. ISBN (13 978-0-470-04190-1).

GRUEN, A.; HUANG, T. S. **Calibration and orientation of cameras in computer vision**. Berlin: Springer, 2001. 235 p. ISBN (3-540-65283-3).

HAMBLING, D. **Ships fooled in GPS spoofing attack suggest russian cyberweapon**. 2017. Disponível em: <<https://www.newscientist.com/article/2143499-ships-fooled-in-gps-spoofing-attack-suggest-russian-cyberweapon/>>. Acesso em: 23/08/2017.

HARTLEY, R.; ZISSERMAN, A. **Multiple view geometry in computer vision**. 2. ed. Cambridge: Cambridge University Press, 2003. 655 p. ISBN (13-978-0-521-54051-3).

HEIKKILÄ, J. Geometric camera calibration using circular control points. **IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence**, v. 22, n. 10, p. 1066–1077, 2000. ISSN (0162-8828).

HEIKKILÄ, J.; SILVÉN, O. A four-step camera calibration procedure with implicit image correction. In: IEEE COMPUTER SOCIETY CONFERENCE ON COMPUTER VISION AND PATTERN RECOGNITION, San Juan, Puerto Rico. **Proceedings...** Los Alamitos, CA: IEEE Computer Society, 1997. p. 1106-1112. ISBN (0-8186-7822-4).

HIERONYMUS, J. Comparison of methods for geometric camera calibration. In: INTERNATIONAL CONGRESS FOR PHOTOGRAMMETRY AND REMOTE SENSING, 22., 2012, Melbourne, Australia. **Proceedings...** Melbourne: International Society of Photogrammetry and Remote Sensing (ISPRS), 2012. p.595-599. Vol XXXIX-B5. ISSN (16821750).

HONEYWELL INTERNATIONAL INC. **Embedded GPS/INS (EGI) Navigation System**. [S.l.], 2015. Brochure N61-0411-000-002.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Recomendações para levantamentos relativos estáticos GPS**. [S.l.]: IBGE, 2008. Disponível em: <ftp://geoftp.ibge.gov.br/metodos_e_outros_documentos_de_referencia/normas/recom_gps_inte_rnet.pdf>. Acesso em: 15/04/2017.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). Resolução do Presidente R.PR 1/2005, de 22 de fevereiro de 2005. Altera a caracterização do Sistema Geodésico Brasileiro. **Fundação IBGE**. Disponível em: <ftp://geoftp.ibge.gov.br/metodos_e_outros_documentos_de_referencia/normas/rpr_01_25fev2005.pdf>. Acesso em: 14/09/2017.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). Resolução PR nº 22, de 21 de julho de 1983. Especificações e normas gerais para levantamentos geodésicos. **Boletim de Serviço nº 1602**, 1 de agosto de 1983. Disponível em: <ftp://geoftp.ibge.gov.br/metodos_e_outros_documentos_de_referencia/normas/bservico1602.pdf>. Acesso em: 15/09/2017.

INTERNATIONAL CIVIL AVIATION ORGANIZATION (ICAO). **Doc 9613 AN/937**. Performance-Based Navigation (PBN) manual. 3. ed. Quebec: ICAO, 2008. ISBN (978-92-9231-198-8).

JACKSON, P. **Jane's all the world's aircraft, development & productions: 2015-2016**. [S.l.]: IHS Group Inc., 2015. ISBN (13-978-0710631350).

KINGSLAKE, Rudolf. **Lenses in photography**: the practical guide to optics for photographers. New York: Garden City Books, 1951. 246 p. ASIN (B0007DS9F8).

LADSTÄDTER, R.; GRUBER, M. Geometric aspects concerning the photogrammetric workflow of the digital aerial camera UltraCamX. In: INTERNATIONAL CONGRESS FOR PHOTOGRAMMETRY AND REMOTE SENSING, 21., 2008, Beijing, China. **Proceedings...** Beijing: International Society of Photogrammetry and Remote Sensing (ISPRS), 2008. p. 521-526. Vol XXXVII part B1. ISSN (1682-1750).

LEVENBERG, K. A method for the solution of certain non-linear problems in least-squares. **Quarterly of Applied Mathematics**, v. 2, p. 164–168, 1944.

MARQUARDT, D. W. An algorithm for least squares estimation of nonlinear parameters. **Journal of the Society for Industrial and Applied Mathematics**, v. 11, n. 2, p. 431–441, 1963. ISBN (1963.0368-4245).

MATLAB. **Camera calibration toolbox tutorial**, MATLAB R2014a Ver 8.3.0.532. [S.l.]: The Mathworks Inc., 2014.

MCGLONE, J. C.; MIKHAIL, E. M.; BETHEL, J. S.; MULLEN, R. **Manual of photogrammetry**. 5. ed. Bethesda: American Society for Photogrammetry and Remote Sensing (ASPRS), 2004. 1151 p. ISBN (13-978-1570830716).

MEISTER, K. **Intro to film**: small, medium, & large formats. 2015. Disponível em: <<http://scenictraverse.com/blog/2015/4/26/intro-to-film-small-medium-large-formats>>. Acesso em: 13/07/2017.

MERCHANT, D. C. **Analytical photogrammetry**: theory and practice. Notes revised from earlier edition printed in 1973, The Ohio State University, 1979.

MIKHAIL, E. M.; BETHEL, J. S.; MCGLONE, J. C. **Introduction to modern photogrammetry**. 1. ed. Hoboken: Wiley, 2001. 496 p. ISBN (13-978-0471309246).

MINISTÉRIO DA DEFESA (MD). **Política Nacional de Defesa (PND) – Estratégia Nacional de Defesa (END)**. Brasília: MD, 2012. Disponível em: <http://www.defesa.gov.br/arquivos/estado_e_defesa/END-PND_Optimized.pdf>. Acesso em: 16/03/2017.

MINISTÉRIO DA DEFESA (MD). Portaria Normativa n° 953/MD de 16 de abril de 2014. Dispõe sobre a adoção de procedimentos para a atividade de aerolevanteamento no território nacional. **Diário Oficial da União (DOU)**, p. 14, seção 1, 17 de abril de 2014. Disponível em: <<https://www.jusbrasil.com.br/diarios/69167933/dou-secao-1-17-04-2014-pg-14>>. Acesso em: 03/08/2017.

MISRA, P.; ENGE, P. **Global positioning system**: signals, measurements, and performance. 2. ed. Massacusetts: Ganga-Jamuna Press, 2011. 590 p. ISBN (13-978-0970954428).

MONICO, J. F. G. **Posicionamento pelo GNSS**: descrição, fundamentos e aplicações. 2. ed. São Paulo: Ed UNESP, 2008. 480 p. ISBN (9788571397880).

MONICO, J. F. G.; GALO, M.; SANTOS, M. C.; PÓZ, A. P. Acurácia e precisão: revendo os conceitos de forma acurada. **Boletim de Ciências Geodésicas**, v. 15, n. 3, p. 469–483, 2009. ISBN (3939377090).

NIKON. **Coolpix A** – Digital camera reference manual. [S.l.]: Nikon Corporation, 2013. (SB3C03-11, 6MN05611-03).

NOGUEIRA, F. C.; ROBERTO, L.; KÖRTING, T. S.; SHIGUEMORI, E. H. Accuracy analysis of orthomosaic and DSM produced from sensor aboard UAV. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO - SBSR, 18., 2017, Santos, Brasil. **Anais...** São José dos Campos: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), 2017. p. 5515-5522. ISBN (978-85-17-00088-1).

NOVATEL. **DL-V3 user manual**. Rev 3. [S.l.]: Novatel Inc., 2009. (OM-20000119).

NOVATEL. **GPS position accuracy measures**. Rev 1. [S.l.]: Novatel Inc., 2003. (APN-029).

NOVATEL. **Manual do usuário: GTR-G2**. Rev1. [S.l.]: Novatel Inc., 2007. (OM-20000119).

OPENCV. **Camera calibration with OpenCV**: OpenCV 2.4.13.0 documentation. 2016. Disponível em: <http://docs.opencv.org/2.4/doc/tutorials/calib3d/camera_calibration/camera_calibration.html>. Acesso em: 18/07/2016.

PETERSON, S.; FARAMARZI, P. "**Exclusive: Iran hijacked US drone, says iranian engineer**". 2011. Disponível em: <https://www.csmonitor.com/World/Middle-East/2011/1215/Exclusive-Iran-hijacked-US-drone-says-Iranian-engineer>. Acesso em: 12/09/2017.

PIX4D. **How are the internal and external camera parameters defined**. 2016. Disponível em: <<https://support.pix4d.com/hc/en-us/articles/202559089HowaretheInternalandExternalCameraParametersdefined#gsc.tab=0>>. Acesso em 17/08/2016.

PIX4D. **Pix4D Mapper 3.1 user manual**. Lousanne: Pix4D S.A., 2015. Disponível em: <<https://support.pix4d.com/hc/en-us/articles/204272989-Offline-Getting-Started-and-Manual-pdf-#gsc.tab=0>>. Acesso em: 22/03/2016.

RADIO TECHNICAL COMMISSION FOR AERONAUTICS (RTCA). **DO-334**: Minimum Operational Performance Standards (MOPS) for Strapdown Attitude and Heading Reference Systems (AHRS). Washington: RTCA Inc., 21 march 2012.

RAJESH, R. J.; KAVITHA, P. Camera gimbal stabilization using conventional PID controller and evolutionary algorithms. In: IEEE INTERNATIONAL CONFERENCE ON COMPUTER COMMUNICATION AND CONTROL - IC4, 2015, Indore, India. **Proceedings...** Indore: Medi Caps Group, 2016. p. 1-6. ISBN (9781479981649).

REMONDINO, F.; FRASER, C. Digital camera calibration methods: considerations and comparisons. In: ISPRS COMMISSION SYMPOSIUM "IMAGE ENGINEERING AND VISION METROLOGY", 5., 2006, Dresden, Germany. **Proceedings...** Dresden: International Society of Photogrammetry and Remote Sensing (ISPRS), 2006. p. 266-272. Vol XXXVI Part 5.

RICHARDS, J. A.; JIA, X. **Remote sensing digital image analysis: an introduction**. 4th ed. Berlin: Springer, 2006. 439 p. ISBN (13-978-3-540-25128-6).

ROBERTO, L. **Análise da acurácia do posicionamento relativo estático rápido com receptor GNSS em condições com influência de edificação e vegetação**. 84p. Trabalho de Graduação (Curso em Engenharia de Agrimensura) – Faculdade de Engenharia de Agrimensura de Pirassununga (FEAP), Pirassununga, 2015.

ROBERTO, L. **Fixação das câmeras fotográficas na aeronave A-29** – Relatório de Análise. São José dos Campos: Instituto de Estudos Avançados (IEAv), 2017. (RA nº 01/EGI-S/IEAv/2017).

RÜGAMER, A.; KOWALEWSKI, D. Jamming and spoofing of GNSS signals – An underestimated risk?! In: FIG WORKING WEEK, 2015, Sofia, Bulgaria. **Proceedings...** Sofia: International Federation of Surveyors (FIG), 2015. ISBN (978-87-92853-35-6).

SANTOS JR., R. L.; MITISHITA, E. A.; MACHADO, A. M. L. Calibração de câmaras digitais intervaladas de um ano. In: SIMPÓSIO DE CIÊNCIAS GEODÉSICAS E TECNOLOGIAS DA GEOINFORMAÇÃO, 1., 2004, Recife, Brasil. **Anais...** Recife: Universidade Federal do Pernambuco (UFPE), 2004. p. 1-15. Disponível em: <[http://www.ufpe.br/cgtg/ISIMGEO/CD/html/Fotogrametria e Sensoriamento Remoto/Artigos/f010.pdf](http://www.ufpe.br/cgtg/ISIMGEO/CD/html/Fotogrametria%20e%20Sensoriamento%20Remoto/Artigos/f010.pdf)>. Acesso em: 10/10/2017.

SCHENK, T. **Digital photogrammetry**. Vol I. Columbus: TerraScience, 1999. 428 p. ISBN (13-9780967765303).

SILVA, C. A. O. **Avaliação da técnica de casamento de imagens aplicada à localização geográfica de VANTs**. 93p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG), Belo Horizonte, 2015.

SILVA, D. C.; TOONSTRA, G. W. A.; SOUZA, H. L. S.; PEREIRA, T. A. J. Qualidade de ortomosaicos de imagens de VANT processados com os softwares APS, Pix4D e Photoscan. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE CIÊNCIAS GEODÉSICAS E TECNOLOGIAS DA GEOINFORMAÇÃO, 5., 2014, Recife, Brasil. **Anais...** Recife: Universidade Federal do Pernambuco (UFPE), 2014. p. 747-754.

SILVA, I.; SEGANTINE, P. C. L. **Topografia para engenharia: teoria e prática de geomática**. 1. ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2015. 432 p. ISBN (13-978-8535277487).

SILVA, W. **Navegação autônoma de VANT em período noturno com imagens infravermelho termal**. 104p. (INPE 08.08.20.34-TDI). Dissertação (Mestrado em Computação Aplicada) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), São José dos Campos, 2016. Disponível em: <<http://urlib.net/8JMKD3MGP3W34P/3M8CSN8>>. Acesso em: 25/09/2017.

SOUZA, A.; PAULO, R. C.; COSTA, A. A. S. **Relatório de instrumentação da aeronave A-29B FAB 5923**, Rev B. São José dos Campos: Instituto de Pesquisas e Ensaios em Voo (IPEV), 2016. (IPEV-130438-RI-03613)

SWAPNA, P.; KROUGLICOF, N.; GOSINE, R. The question of accuracy with geometric camera calibration. In: IEEE CANADIAN CONFERENCE ON ELECTRICAL AND COMPUTER ENGINEERING - CCECE'09, 22., 2009, St. John's, Canada. **Proceedings...** Piscataway: Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), 2009. p. 541-546. ISBN (9781424435081).

TANG, R. **Mathematical methods for camera self-calibration in photogrammetry and computer vision**. 2013. 113p. Thesis (PhD in Aerospace Engineering and Geodesy) - Stuttgart University, Munich, 2013. Available in: <<http://elib.uni-stuttgart.de/opus/volltexte/2013/8505/>>. Access: December 2017.

TOPCON. **Instruction manual** – Non-prism Total Station GPT-3100W Series. Tokyo: Topcon Coproration, 2001. (64555 90020).

WALPOLE, R. E.; MYERS, R. H.; MYERS, S. L.; YE, K. **Probabilidade e estatística para engenharia e ciências**. 8. ed. São Paulo: Pearson, 2009. 512 p. ISBN (13-978-85-7605-199-2).

WOLF, P. R. **Elements of photogrammetry**. Singapore: McGraw-Hill, 1985. 562 p. ISBN (93-329-0167-8).

ZHANG, Z. A flexible new technique for camera calibration. **IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence**, v. 22, n. 11, p. 1330–1334, 2000. ISBN (MSR-TR-98-71).

ZHANG, Z.; WONG, K. H. A novel geometric approach for camera calibration. In: IEEE INTERNATIONAL CONFERENCE ON IMAGE PROCESSING (ICIP), 2014, Paris, France. **Proceedings...** Piscataway: Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), 2014. p. 5806-5810. ISBN (978-1-4799-5751-4).

APÊNDICE A
PLANEJAMENTO DOS VOOS DE IMAGEAMENTO REALIZADOS NA
REGIÃO DO VALE DO PARAÍBA



INSTITUTO DE PESQUISAS E ENSAIOS EM VOO
DIVISÃO DE ENSAIOS EM VOO

Imageamento PITER

ORDEM DE ENSAIO

Página: 1/15

OBJETIVO GERAL

Levantar imagens aéreas associadas a dados do SAD para apoiar o projeto PITER – Processamento de Imagens em Tempo Real do IEAv – Instituto de Estudos Avançados.

OBJETIVO (S) ESPECÍFICO (S)

(a) Gerar Imagens de áreas conhecidas para testar algoritmos de reconhecimento automático de feições e algoritmo de determinação de posição (lat, long, h) e orientação (roll, pitch e yaw) por imagem. Serão explorados:

- i. áreas diferentes com feições e coordenadas pré-conhecidas (DCTA, IEAv, UNIVAP, INPE).
- ii. eixos de passagem ortogonais
- ii. altitudes diferentes.
- iii. inclinações laterais (roll) da aeronave.

(b) Gerar imagens sobrepostas em rotas de navegação pré-estabelecidas para testar algoritmos automáticos de odometria por imagem. Serão explorados:

- i. rotas com diferentes coberturas do solo.
- ii. altitudes diferentes.
- iii. condições diferentes de iluminação (sol a pino e sol próximo do horizonte).

AERONAVE	MATRÍCULA	PESO	C.G./Trim	CONFIGURAÇÃO
A-29	FAB 5923	3.900kgf	traseiro	Sem cargas externas, câmeras no ventre da fuselagem

SOLICITANTE	MISSÃO	TP DE VOO	POUSOS	TRIPULAÇÃO	DATA
IEAv	20 FT 01	máx 1:00h / saída	01	PP/EP	22/5/17

MÍNIMOS METEOROLÓGICOS	ÁREAS	COMUNICAÇÃO	COMBUSTÍVEL MÍNIMO
Base (SBSJ): VMC Área: VMC Alternativa: VMC	SBR-417 Ensaio1 SBR-421 XavanteB SBR-423 Ensaio3	Solo: 121.95 Torre: 118.50 APP: 124.15/134.15 Tático: 131.25/124.10	Partida: 495 kg Pouso VMC: 100 kg Pouso IMC: 140 kg

INSTRUMENTAÇÃO

De bordo: Vc, Zpi, TOT, TOP.

Externa: DGPS, SAD, Câmeras Nikon A e GoPro Hero4.

LIMITES DA AERONAVE	LIMITES DO ENSAIO
Todas as do Manual de Voo. Em especial: Vmo/Mmo = 320 KCAS / M 0,56 Vfe = 180 KCAS Vle/Vlo = 150 KCAS Temp máx. do motor: 860°C. V _{min} para ejeção no solo: 0 kt.	V _{máx} =250 KCAS, Nz _{máx} =+2g Altura mínima nas passagens: 800 ft AGL V _{MÍN} : 1,3 Vs. Evitar ultrapassar 60° de inclinação lateral. Ausência de cobertura de nuvens que impossibilite o imageamento

EP: Maj Eng Leandro - #45	PP: Maj Av Cristiano - #107	Segurança de Voo: Maj Av Sena - #98	Aprovo: Maj Av Vinicius - #103 Chefe da SOP Maj Av Faria - #97 Chefe da EEV
---	---	---	--

SEGURANÇA

Relembrar procedimentos de ejeção e abandono da aeronave no solo.
 As emergências críticas deverão estar memorizadas.
 Atentar para pássaros, apagamento do motor em voo e tráfego local (áreas DCTA e IEAv).
 Atentar para a temperatura limite do motor (860°C).
 Atentar para o aviso de "LDG GEAR" (sonoro e no EICAS), não cancelável, nas passagens de baixa velocidade e trem recolhido.
 Proibido o sobrevoo da refinaria.

BRIFIM

Início 01:00h antes do horário de decolagem.
 Realizar o briefing do perfil do voo via telefone com a torre antes da decolagem (áreas DCTA e IEAv).
 Passar Plano de Voo e realizar briefing com APP-SP ANTES do briefing da equipagem de ensaio.

PREPARAÇÃO

PP – realizar planejamento no PMA para as rotas, contendo pontos de controle, subida e descida, planejamento de combustível e castelo de segurança.
 EST – realizar sincronismo de tempo das câmeras com o SAD e DGPS.
 PP e EP – guarnecer 30 minutos antes da decolagem.
 EP – realizar a configuração das câmeras
 EST – realizar a fixação das câmeras
 PP – operar a instrumentação de acordo com o check-list previsto (Anexo B).
 EP – portar tabela de 1,3 da Vs.
 PP – aguardar autorização do técnico da EST para o início do táxi (cheque do número de satélites).

ANÁLISE DE RISCO

Os riscos associados ao ensaio foram estabelecidos com base no Programa de Segurança de Voo em Ensaio (PSVE – Revisão C).
 O ensaio foi considerado de BAIXO RISCO.
 A análise completa dos riscos encontra-se no Anexo C desta OE.

Ponto	ÁREA DCTA		
Objetivo	Levantar imagens aéreas adjacentes em área definida no interior do campus do Departamento de Ciência e Tecnologia Aeroespacial.		
Segurança/ Avisos	Atentar para desbalanceamento de combustível. Usar velocidade segura para manobrar (aplicar flapes se necessário). Máxima elevação na região é 2.000ft MSL		
Condições Associadas	TR/FR, F/M recolhido e PVN. Asas niveladas. Velocidade: 150 KCAS Eixos e trajetos estabelecidos conforme ANEXO A para cada altitude abaixo: <u>3.000ft</u> - ajuste QNH (1.000ft AGL) -eixos A, B, C, D, E, F e G -trajetos em curva (a ser definido em briefing): Velocidade: 150 KCAS, Φ : 30° Velocidade: 200 KCAS, Φ : 60° <u>5.000 ft</u> – ajuste QNH -eixos A, C, D e F <u>8.000 ft</u> – ajuste QNH -eixos B e F	Limites	$V_{MÍN} = 1,3 V_s$ $V_{FE} = 180 \text{ KCAS}$ $T_5 = 860^\circ\text{C}$ $N_g = 103,8\%$ $T_q = 100\%$
Execução	Realizar passagens estabilizadas	Faixas	$\pm 500 \text{ ft}; +10\text{kt}, -20\text{kt}$
		Tol. nivelado	$+5\text{kt}, -15\text{kt}; \pm 200 \text{ ft}; \pm 5^\circ \text{ roll}$
		Tol. em curva	$+15\text{kt}, -5\text{kt}; \pm 300 \text{ ft}; \pm 10^\circ \text{ roll}$
Anotações	EP - TOP		

Ponto	ÁREA IEAv		
Objetivo	Levantar imagens aéreas adjacentes em área definida no interior do campus do Instituto de Estudos Avançados.		
Segurança/ Avisos	Atentar para desbalanceamento de combustível. Usar velocidade segura para manobrar (aplicar flapes se necessário). Máxima elevação na região é 2.300ft ASL		
Condições Associadas	TR/FR, F/M recolhido e PVN. Asas niveladas. Velocidade: 150 KCAS Eixos e trajetos estabelecidos conforme ANEXO A para cada altitude abaixo: <u>3.300ft</u> - ajuste QNH (1.000ft AGL) -eixos A, B, C, D, E e F -trajetos em curva (a ser definido em briefing): Velocidade: 150 KCAS, Φ : 30° Velocidade: 200 KCAS, Φ : 60° <u>5.000 ft</u> – ajuste QNH -eixos B e E <u>8.000 ft</u> – ajuste QNH -eixos B e E	Limites	$V_{MÍN} = 1,3 V_s$ $V_{FE} = 180 \text{ KCAS}$ $T5 = 860^\circ\text{C}$ $Ng = 103,8\%$ $Tq = 100\%$
Execução	Realizar passagens estabilizadas	Faixas	$\pm 500 \text{ ft}; +10\text{kt}, -20\text{kt}$
		Tol. nivelado	$+5\text{kt}, -15\text{kt}; \pm 200 \text{ ft}; \pm 5^\circ \text{ roll}$
		Tol. em curva	$+15\text{kt}, -5\text{kt}; \pm 300 \text{ ft}; \pm 10^\circ \text{ roll}$
Anotações	EP - TOP		

Ponto	ÁREA UNIVAP		
Objetivo	Levantar imagens aéreas adjacentes em área definida no interior do campus da Universidade do Vale do Paraíba – Urbanova – SJC		
Segurança/ Avisos	Atentar para desbalanceamento de combustível. Usar velocidade segura para manobrar (aplicar flapes se necessário). Máxima elevação na região é 2.000ft ASL		
Condições Associadas	TR/FR, F/M recolhido e PVN. Asas niveladas. Velocidade: 150 KCAS Eixos e trajetos estabelecidos conforme ANEXO A para cada altitude abaixo: <u>3.000ft</u> - ajuste QNH (1.000ft AGL) -eixos A, B, C, D e E -trajetos em curva (a ser definido em briefing): Velocidade: 150 KCAS, Φ : 30° Velocidade: 200 KCAS, Φ : 60° <u>5.000 ft</u> – ajuste QNH -eixos B, C e E <u>8.000 ft</u> – ajuste QNH -eixos A e D	Limites	$V_{MÍN} = 1,3 V_s$ $V_{FE} = 180 \text{ KCAS}$ $T5 = 860^\circ\text{C}$ $Ng = 103,8\%$ $Tq = 100\%$
Execução	Realizar passagens estabilizadas	Faixas	$\pm 500 \text{ ft}; +10\text{kt}, -20\text{kt}$
		Tol. nivelado	$+5\text{kt}, -15\text{kt}; \pm 200 \text{ ft}; \pm 5^\circ \text{ roll}$
		Tol. em curva	$+15\text{kt}, -5\text{kt}; \pm 300 \text{ ft}; \pm 10^\circ \text{ roll}$
Anotações	EP - TOP		

Ponto	ÁREA INPE		
Objetivo	Levantar imagens aéreas adjacentes em área definida no interior do campus do INPE de Cachoeira Paulista - SP		
Segurança/ Avisos	Atentar para desbalanceamento de combustível. Usar velocidade segura para manobrar (aplicar flapes se necessário). Máxima elevação na região é 2.000ft ASL		
Condições Associadas	TR/FR, F/M recolhido e PVN. Asas niveladas. Velocidade: 150 KCAS Eixos e trajetos estabelecidos conforme ANEXO A para cada altitude abaixo: <u>3.000ft</u> - ajuste QNH (1.000ft AGL) -eixos A, B, C, D, E, F e G -trajetos em curva (a ser definido em briefing): Velocidade: 150 KCAS, Φ : 30° Velocidade: 200 KCAS, Φ : 60° <u>5.000 ft</u> – ajuste QNH -eixos A, C, D e F <u>8.000 ft</u> – ajuste QNH -eixos B e F	Limites	$V_{MIN} = 1,3 V_s$ $V_{FE} = 180 \text{ KCAS}$ $T5 = 860^\circ\text{C}$ $Ng = 103,8\%$ $Tq = 100\%$
Execução	Realizar passagens estabilizadas	Faixas	$\pm 500 \text{ ft}; +10\text{kt}, -20\text{kt}$
		Tol. nivelado	$+5\text{kt}, -15\text{kt}; \pm 200 \text{ ft}; \pm 5^\circ \text{ roll}$
		Tol. em curva	$+15\text{kt}, -5\text{kt}; \pm 300 \text{ ft}; \pm 10^\circ \text{ roll}$
Anotações	EP - TOP		

Ponto	ROTA DUTRA		
Objetivo	Levantar imagens aéreas sobrepostas em rota de navegação sobre a Rodv. Pres. Dutra.		
Segurança/ Avisos	Máxima elevação no trecho é 2.500ft MSL Atentar para tráfegos sobre a Dutra		
Condições Associadas	TR/FR, F/M recolhido e PVN. Asas niveladas. Velocidade: 200 KCAS Trajeto estabelecido conforme ANEXO A – 50NM Altitudes: <u>3.500ft</u> - ajuste QNH (1.000ft AGL) <u>5.000 ft</u> – ajuste QNH <u>8.000 ft</u> – ajuste QNH	Limites	$T5 = 860^\circ\text{C}$ $Ng = 103,8\%$ $Tq = 100\%$
Execução	Procurar voar na rota planejada, seguindo os <i>waypoints</i> definidos e evitando deriva do vento.	Faixa	$\pm 500 \text{ ft}; \pm 10 \text{ kt}$
		Tolerância	$+5\text{kt}, -10\text{kt}; \pm 200 \text{ ft}; \pm 5^\circ \text{ roll}$
Anotações	EP – TOP		

Ponto	ROTA VALE		
Objetivo	Levantar imagens aéreas sobrepostas em rota de navegação sobre o vale do rio Paraíba do Sul		
Segurança/ Avisos	Máxima elevação no trecho é 2.000ft MSL		
Condições Associadas	TR/FR, F/M recolhido e PVN. Asas niveladas. Velocidade: 200 KCAS Trajeto estabelecido conforme ANEXO A – 50NM Altitudes: <u>3.000ft</u> - ajuste QNH (1.000ft AGL) <u>5.000 ft</u> – ajuste QNH <u>8.000 ft</u> – ajuste QNH	Limites	T5 = 860°C Ng = 103,8% Tq = 100%
Execução	Procurar voar na rota planejada, seguindo os <i>waypoints</i> definidos e evitando deriva do vento.	Faixa	± 500 ft; ± 10 kt
		Tolerância	+5kt,-10kt; ± 200 ft; ± 5° roll
Anotações	EP – TOP		

Ponto	ROTA SERRA		
Objetivo	Levantar imagens aéreas sobrepostas em rota de navegação sobre a parte alta da serra da Mantiqueira		
Segurança/ Avisos	Máxima elevação é 3.800ft ASL no trecho inicial (20NM) e 6.300ft ASL no trecho final (20NM). Ver perfil de elevações no Anexo A.		
Condições Associadas	TR/FR, F/M recolhido e PVN. Asas niveladas. Velocidade: 200 KCAS Trajeto estabelecido conforme ANEXO A – 50NM Altitudes: 5.000 ft (trecho inicial), 7.500 ft (trecho final) 7.500 ft (trecho inicial), FL100 - QNE (trecho final)	Limites	T5 = 860°C Ng = 103,8% Tq = 100%
Execução	Procurar voar na rota planejada, seguindo os <i>waypoints</i> definidos e evitando deriva do vento.	Faixa	± 500 ft; ± 10 kt
		Tolerância	+5kt,-10kt; ± 200 ft; ± 5° roll
Anotações	EP – TOP		

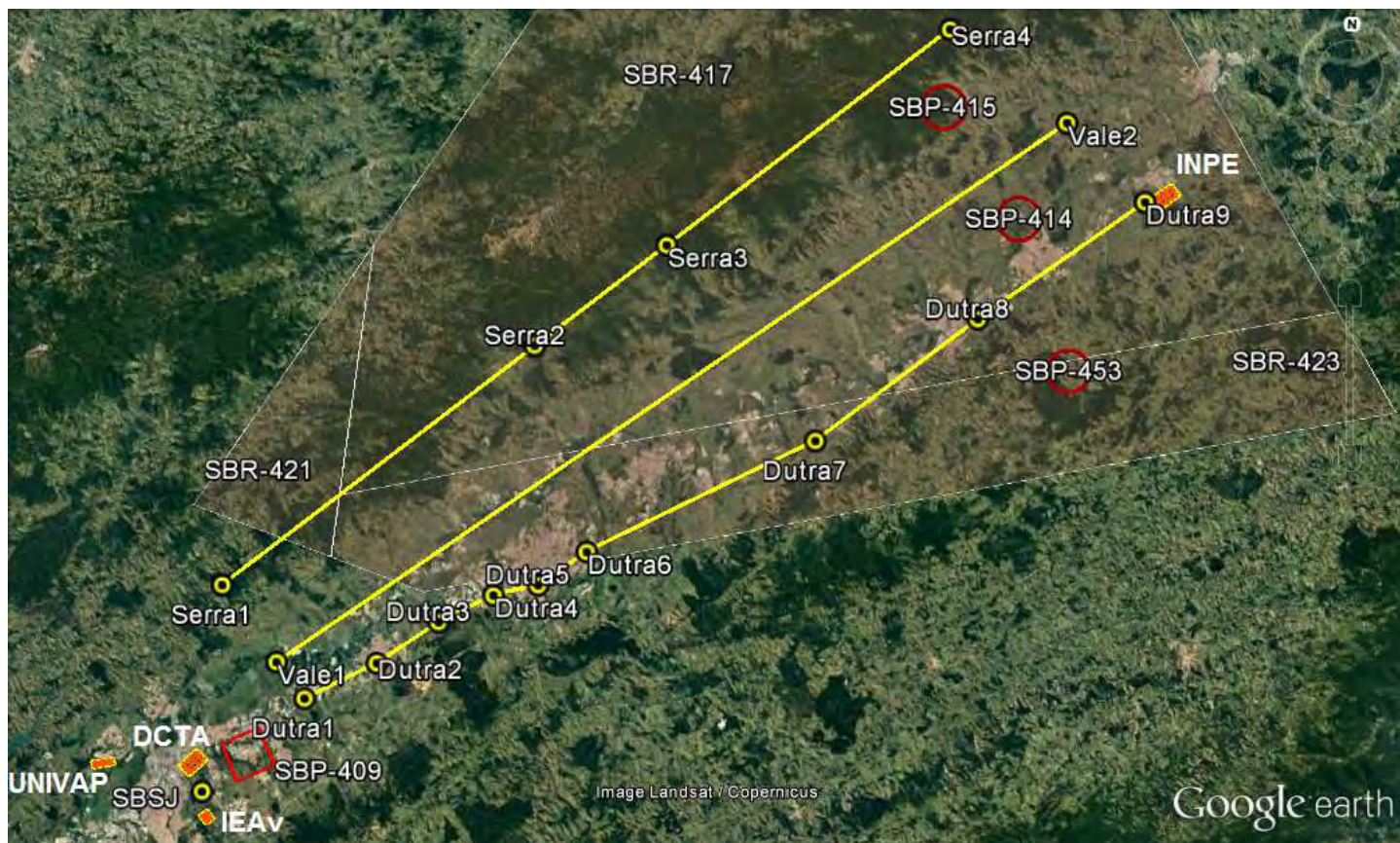
PROCEDIMENTOS PÓS VOO

Conforme Manual de Voo.

Cumprir o check-list da instrumentação para os procedimentos após o pouso e antes do corte do motor.

Baixar dados do SAD, DGPS e Câmeras

ANEXO A
ÁREAS E ROTAS DE IMAGEAMENTO
SITUAÇÃO HORIZONTAL



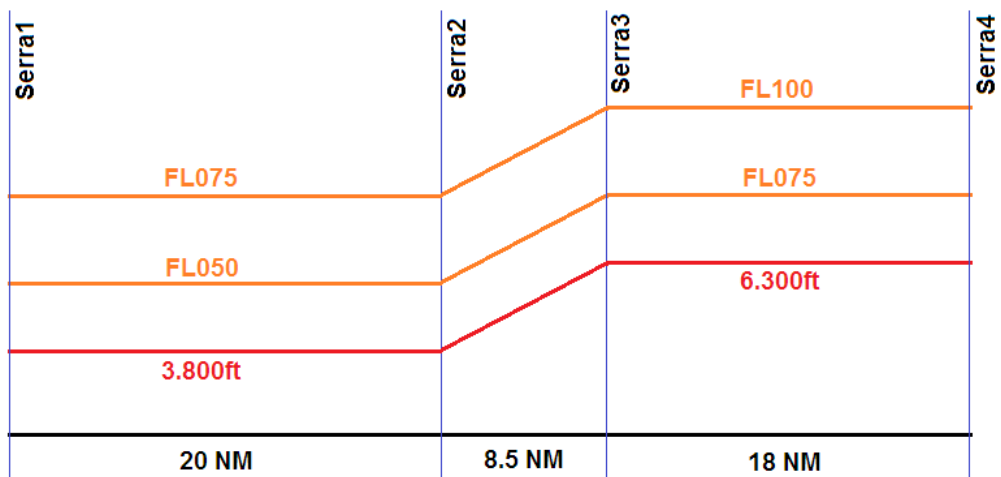
	Lat	Long
Dutra1	23° 08.67'S	45° 46.26'O
Dutra2	23° 06.69'S	45° 42.33'O
Dutra3	23° 04.44'S	45° 39.01'O
Dutra4	23° 02.95'S	45° 36.03'O
Dutra5	23° 02.32'S	45° 33.58'O
Dutra6	23° 00.50'S	45° 30.97'O
Dutra7	22° 54.28'S	45° 18.61'O
Dutra8	22° 47.66'S	45° 09.95'O
Dutra9	22° 41.25'S	45° 00.99'O

	Lat	Long
Serra1	23° 03.06'S	45° 51.13'O
Serra2	22° 50.11'S	45° 34.40'O
Serra3	22° 44.67'S	45° 27.35'O
Serra4	22° 32.94'S	45° 12.27'O

	Lat	Long
Vale1	23° 06.87'S	45° 47.91'O
Vale2	22° 37.42'S	45° 05.53'O

ANEXO A

PERFIL VERTICAL DA ROTA SERRA



ANEXO A

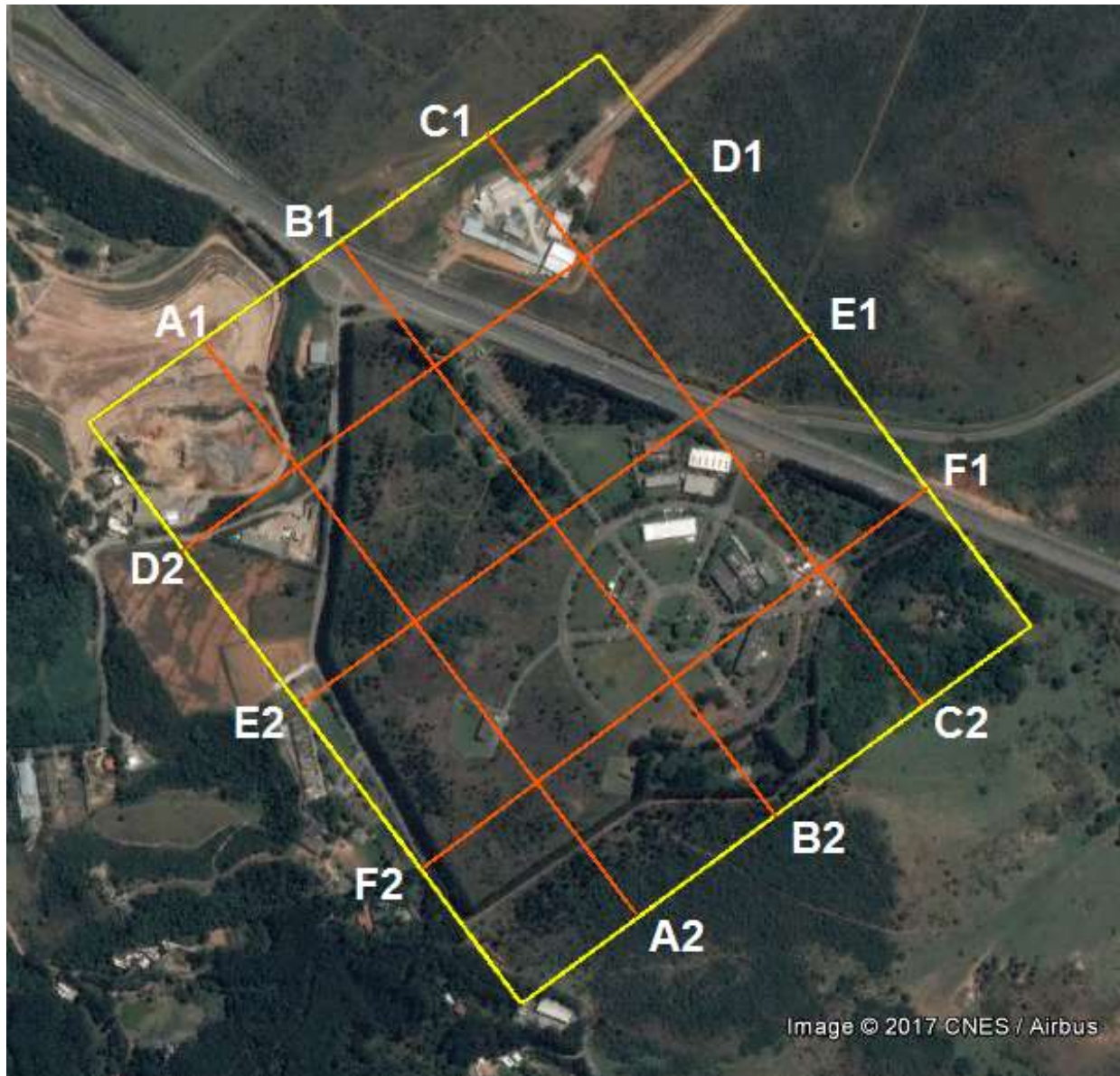
ÁREA DCTA
2,5 x 1,5 KM



	Lat	Long		Lat	Long
A1	23° 12.91'S	45° 52.70'O	A2	23° 12.00'S	45° 51.74'O
B1	23° 12.74'S	45° 52.88'O	B2	23° 11.84'S	45° 51.91'O
C1	23° 12.58'S	45° 53.05'O	C2	23° 11.69'S	45° 52.07'O
D1	23° 12.28'S	45° 53.01'O	D2	23° 12.86'S	45° 52.40'O
E1	23° 12.10'S	45° 52.82'O	E2	23° 12.67'S	45° 52.20'O
F1	23° 11.91'S	45° 52.61'O	F2	23° 12.48'S	45° 51.99'O
G1	23° 11.72'S	45° 52.40'O	G2	23° 12.29'S	45° 51.78'O

ANEXO A

ÁREA IEAv
1,2 x 1,0 KM



	Lat	Long		Lat	Long
A1	23° 14.90'S	45° 51.83'O	A2	23° 15.37'S	45° 51.42'O
B1	23° 14.82'S	45° 51.71'O	B2	23° 15.28'S	45° 51.30'O
C1	23° 14.72'S	45° 51.59'O	C2	23° 15.18'S	45° 51.17'O
D1	23° 14.75'S	45° 51.40'O	D2	23° 15.08'S	45° 51.85'O
E1	23° 14.87'S	45° 51.28'O	E2	23° 15.20'S	45° 51.73'O
F1	23° 15.00'S	45° 51.17'O	F2	23° 15.34'S	45° 51.62'O

ANEXO A

ÁREA UNIVAP
2,1 x 1,0 KM



	Lat	Long		Lat	Long
A1	23° 12.72'S	45° 58.01'O	A2	23° 12.49'S	45° 56.80'O
B1	23° 12.57'S	45° 58.04'O	B2	23° 12.33'S	45° 56.84'O
C1	23° 12.41'S	45° 57.85'O	C2	23° 12.79'S	45° 57.76'O
D1	23° 12.34'S	45° 57.47'O	D2	23° 12.71'S	45° 57.38'O
E1	23° 12.27'S	45° 57.11'O	E2	23° 12.64'S	45° 57.00'O

ANEXO A

ÁREA INPE
2,5 x 1,5 KM



	Lat	Long		Lat	Long
A1	22° 41.53'S	45° 00.27'O	A2	22° 40.77'S	44° 59.24'O
B1	22° 41.34'S	45° 00.43'O	B2	22° 40.59'S	44° 59.40'O
C1	22° 41.18'S	45° 00.57'O	C2	22° 40.43'S	44° 59.55'O
D1	22° 40.91'S	45° 00.50'O	D2	22° 41.52'S	44° 59.98'O
E1	22° 40.75'S	45° 00.27'O	E2	22° 41.35'S	44° 59.75'O
F1	22° 40.58'S	45° 00.03'O	F2	22° 41.17'S	44° 59.51'O
G1	22° 40.41'S	44° 59.80'O	G2	22° 41.00'S	44° 59.29'O

ANEXO B

CHECK-LIST INSTRUMENTAÇÃO

MAI/14	A-29B FAB 5923 / FAB 5924	
<p>1 – INSPEÇÃO EXTERNA</p> <ul style="list-style-type: none"> • BOOM.....CAPAS REMOVIDAS • CARTÃO SAD INSERIDO • CARTÃO DGPS INSERIDO <p>2 – INSPEÇÃO INTERNA (ANTES DA PARTIDA)</p> <p>1P</p> <ul style="list-style-type: none"> • DISJUNTOR DA INSTRUMENTAÇÃO..... ARMADO (LOCALIZADO NO PAINEL DE DISJUNTORES DC2) • CHAVE MASTER..... OFF (LOCALIZADA NO PAINEL DE DISJUNTORES DC1) • CHAVE TX OFF (LOCALIZADA NO PAINEL DE DISJUNTORES DC1) • CHAVE HOT VHF2 OFF (LOCALIZADA NO PAINEL DE DISJUNTORES DC1) <p>2P</p> <ul style="list-style-type: none"> • EXTENSÃO DO TOP..... INSTALADA <p>3 – APÓS A PARTIDA</p> <p>1P</p> <p>PAINEL DED (Após EGIR em modo NAV)</p> <ul style="list-style-type: none"> • MENU PRINCIPAL..... 0 – MISCELLANEOUS → 3 – FTI → CAMPO "OFF" DEVERÁ SER PASSADO PARA "EICAS" <p>PAINEL DE DISJUNTORES DC1</p> <ul style="list-style-type: none"> • CHAVE MASTER.....ON (LUZ ACESA) • DGPS.....AUTORIZAR APROXIMAÇÃO DO INSTRUMENTADOR (ON) <p>CHECAR ÁREA LIVRE</p> <ul style="list-style-type: none"> • CHAVE TXON (QUANDO VOO COM TLM – LUZ ACESA) • CHAVE HOT VHF2.....ON (QUANDO APLICÁVEL – MÁX 30s) <p>DURANTE O TÁXI/PAL CHECK</p> <ul style="list-style-type: none"> • PROFUNDOR (CABRAR – PICAR, 5s POR POSIÇÃO) • AILERON (ESQUERDA – DIREITA, 5s POR POSIÇÃO) • LEME (ESQUERDA – DIREITA, 5s POR POSIÇÃO) <p>4 – ANTES DO CORTE</p> <ul style="list-style-type: none"> • CHAVE TX.....OFF • DGPS.....AUTORIZAR APROXIMAÇÃO DO INSTRUMENTADOR (OFF) • CHAVE MASTER.....OFF • CHAVE HOT VHF2.....OFF <p>5 – APÓS O VOO</p> <p>EP</p> <ul style="list-style-type: none"> • CARTÃO SAD.....REMOVER E ENTREGAR PARA TELEMETRIA • CARTÃO DGPS.....REMOVER E ENTREGAR PARA EST-IE 		

ANEXO C

ANÁLISE DE RISCO

Os riscos associados ao ensaio foram estabelecidos de acordo com o Programa de Segurança de Voo em Ensaios do IPEV. Foram utilizadas as definições apresentadas na Tabela A1 a seguir para classificar os níveis de risco.

TABELA C1
NÍVEIS DE RISCO

Potencial de Perigo	Probabilidade de Ocorrência		
	Alta	Média	Baixa
Acidente (A)			
Incidente Grave (IG)			
Incidente (I)			
Situação de Perigo (SP)			

Alto risco
 Médio risco
 Baixo risco

Os fatores de risco dos ensaios, bem como o nível de risco avaliado para cada um estão apresentados na Tabela A2 a seguir.

TABELA C2
NÍVEIS DE RISCO ASSOCIADOS AOS ENSAIOS

#	Fator de Risco	Potencial de Perigo				Probabilidade de Ocorrência			Nível de Risco		
		A	IG	I	S	A	M	B	A	M	B
1	Conflitos de tráfego				✓		✓				✓
2	Colisão com pássaros			✓			✓				✓
3	Colisão com obstáculos	✓					✓				✓
4	Colisão com o solo	✓					✓				✓
5	Perda de controle em voo				✓		✓				✓
6	Apagamento de motor			✓			✓				✓
7	Esquecimento de item de "check-list"			✓			✓				✓
8	Estol/perda de controle do motor				✓		✓				✓
RISCO FINAL DOS ENSAIOS		BAIXO									

A determinação final do risco dos ensaios foi baseada no maior grau alcançado em qualquer um dos itens expostos, tendo sido classificado como BAIXO.

A análise completa dos principais riscos com a descrição das causas, consequências, ações mitigadoras a tomar e procedimentos de emergência a adotar estão apresentados na Tabela C3.

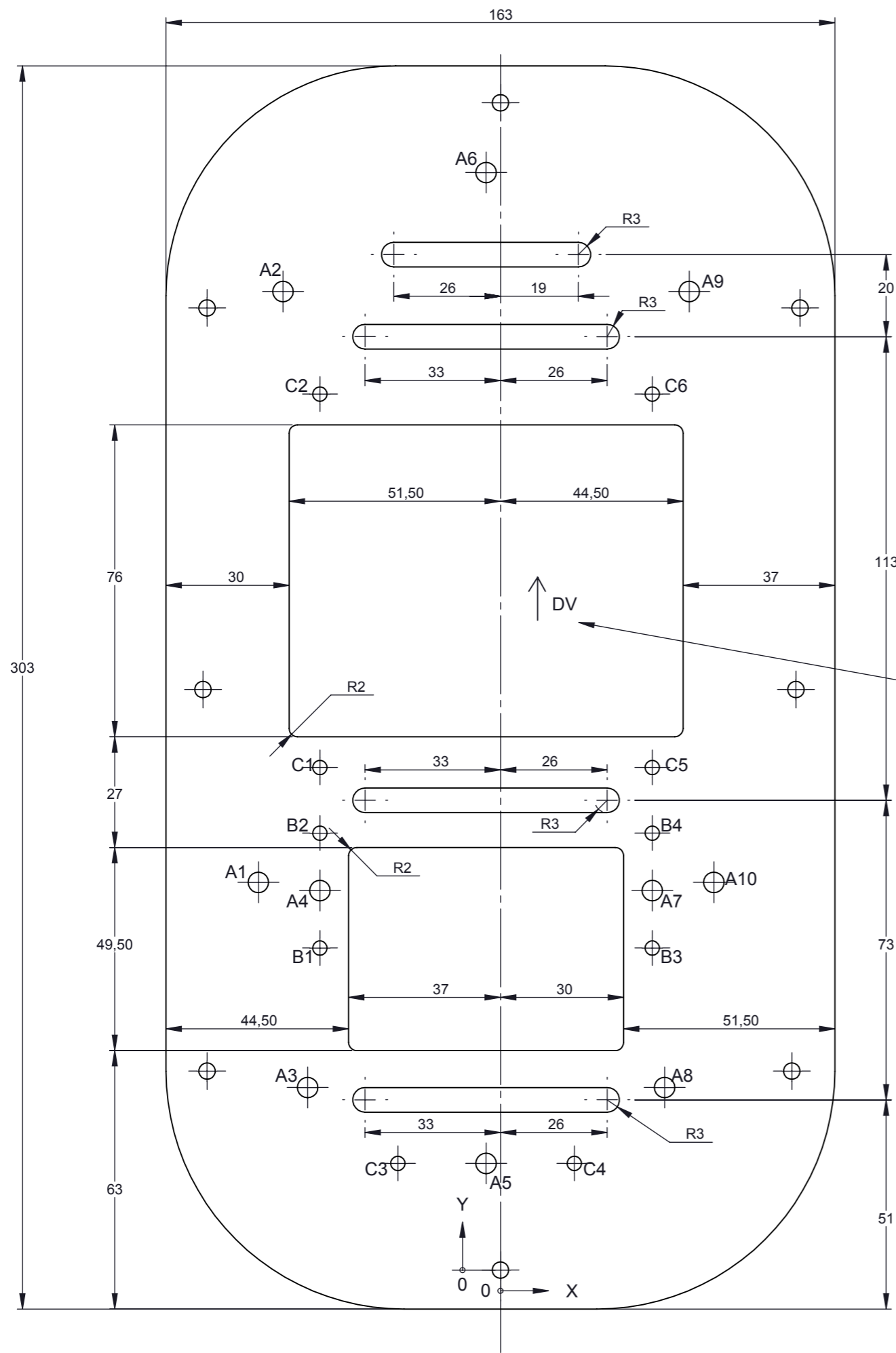
TABELA C3
ANÁLISE DOS FATORES DE RISCO

#	Fator de Risco	Causas	Consequências	Ação Mitigadora	Procedimento de Emergência
1	Conflitos de Tráfego	-Fraseologia Inadequada; -Voo dentro da ATZ SJC.	-Reposicionamento não planejado; -Colisão em voo.	-Atentar para a fraseologia utilizada; -Atentar para os demais tráfegos ao longo dos ensaios.	-Em caso de colisão, pousar assim que possível; -Ejetar.
2	Colisão com pássaros	-Ambiente com alta densidade de pássaros; -Voo a baixa altura.	-Apagamento do motor; -Fogo no motor; -Dano estrutural ou quebra do canopy.	-Evitar regiões com probabilidade de concentração de pássaros; -Fazer reconhecimento visual do ambiente durante o ensaio; - Reduzir o brilho do HUD, para aumentar a visibilidade externa. - Evitar voar em períodos com maior probabilidade de concentração de pássaros.	-Efetuar reacendimento do motor, em caso de apagamento; -Efetuar corte do motor, em caso de fogo; - Realizar tráfego de emergência preventivo; -Pousar assim que possível; -Ejetar.
3	Colisão com obstáculos	-Desconhecimento de Obstáculos; -Piloto voando "Head-Down".	-Dano estrutural; -Desintegração da aeronave;	-Fazer planejamento atentando para as altitudes mínimas permitidas na região do ensaio; -Fazer reconhecimento visual da região onde será feito o voo a baixa altura.	-Pousar assim que possível; -Ejetar.
4	Colisão com o solo	-Desconhecimento da Topografia -Piloto voando "Head-Down"	-Dano estrutural grave -Impacto com o solo	-Fazer planejamento atentando para as altitudes mínimas permitidas na região do ensaio -Voar "headup" quando VFR	- Executar cheques de controlabilidade. - Considerar Ejeção
5	Perda de controle em voo	-Voo em alto ângulo de ataque.	-Perda de altitude; -Colisão com o solo.	-Observar limites de ângulo de ataque e indícios de estol ("buffeting").	-Recuperação do estol; -Ejetar.
6	Apagamento de motor	- Operar o motor fora dos limites	- Apagamento do motor	- Atentar para os limites do motor -Correta operação do sistema de combustível	- Reacendimento do motor - Realizar tráfego de emergência - Considerar Ejeção

**TABELA C3 - CONTINUAÇÃO
ANÁLISE DOS FATORES DE RISCO**

#	Fator de Risco	Causas	Consequências	Ação Mitigadora	Procedimento de Emergência
7	Esquecimento de item de "check-list"	<ul style="list-style-type: none">- Quebra de sequência-Atenção a outra ocorrência durante o voo (ex: ponto de ensaio)- Fatores externos de stress (calor, humidade, ruído, falhas de sistemas)	<ul style="list-style-type: none">-pouso na configuração errada-operação errada de sistemas da aeronave-falha na realização de procedimentos normais e/ou emergência	<ul style="list-style-type: none">-Manter atenção difusa para gerenciar as ocorrências em voo enquanto realiza os cheques da aeronave	<ul style="list-style-type: none">Aplicáveis à falha gerada pelo esquecimento
8	Estol/perda de controle do motor	<ul style="list-style-type: none">-Alto ângulo de ataque	<ul style="list-style-type: none">-Dano ao motor-Apagamento do motor	<ul style="list-style-type: none">- Observar os limites de operação do motor	<ul style="list-style-type: none">-Reduzir ângulo de ataque-Reacender o motor-Realizar tráfego de emergência-Considerar Ejeção

APÊNDICE B
PROJETO DE INSTALAÇÃO DAS CÂMERAS NA AERONAVE

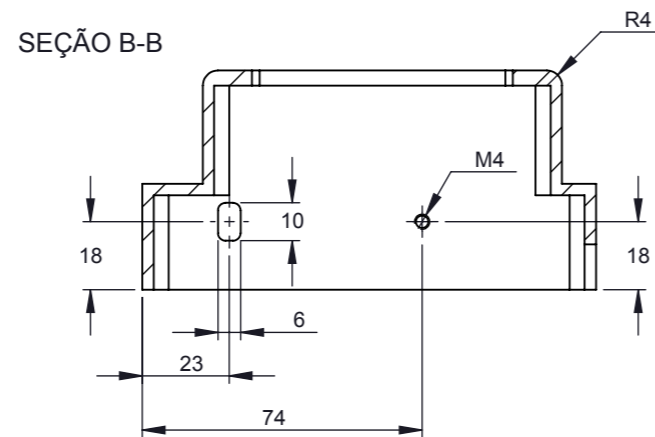
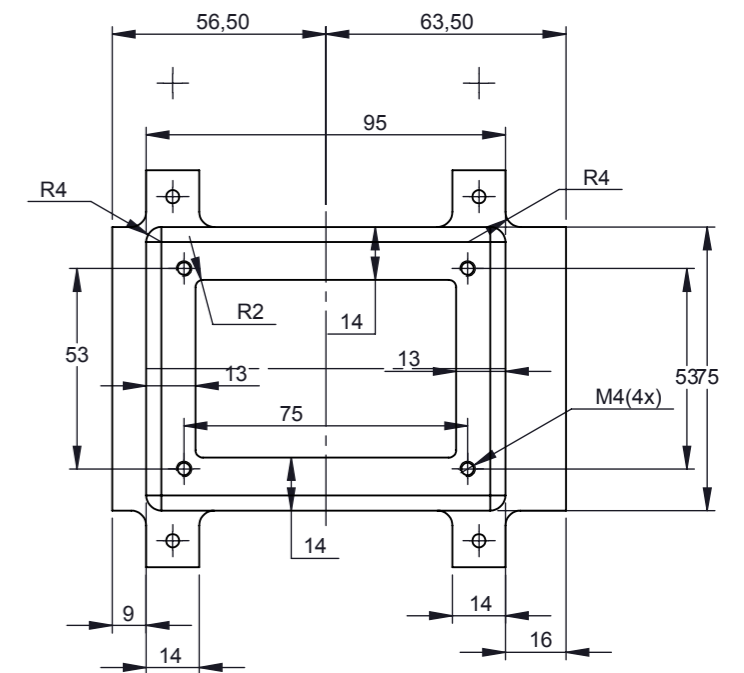
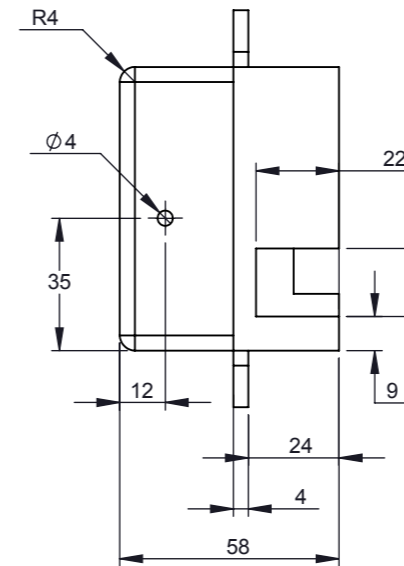
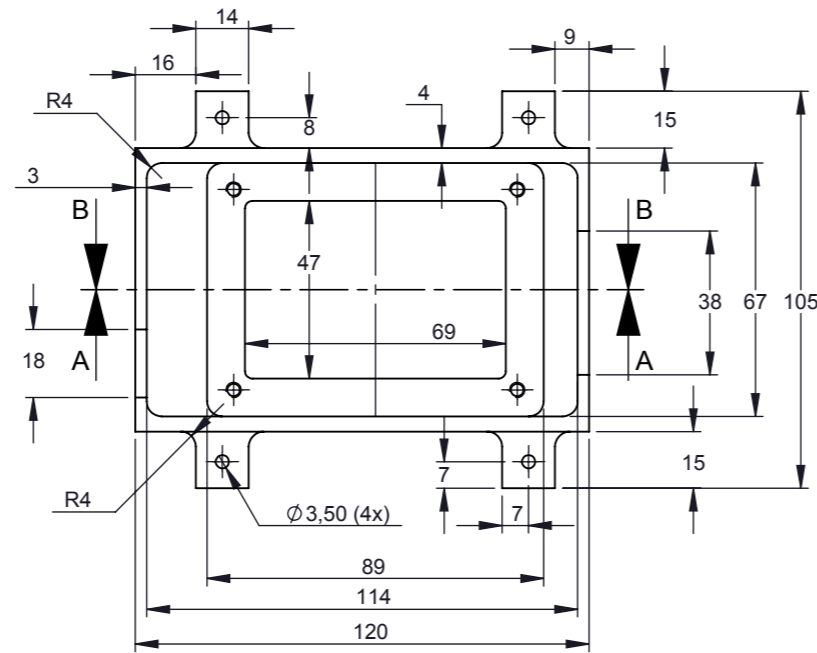
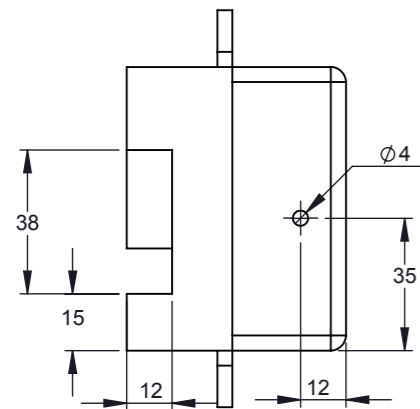
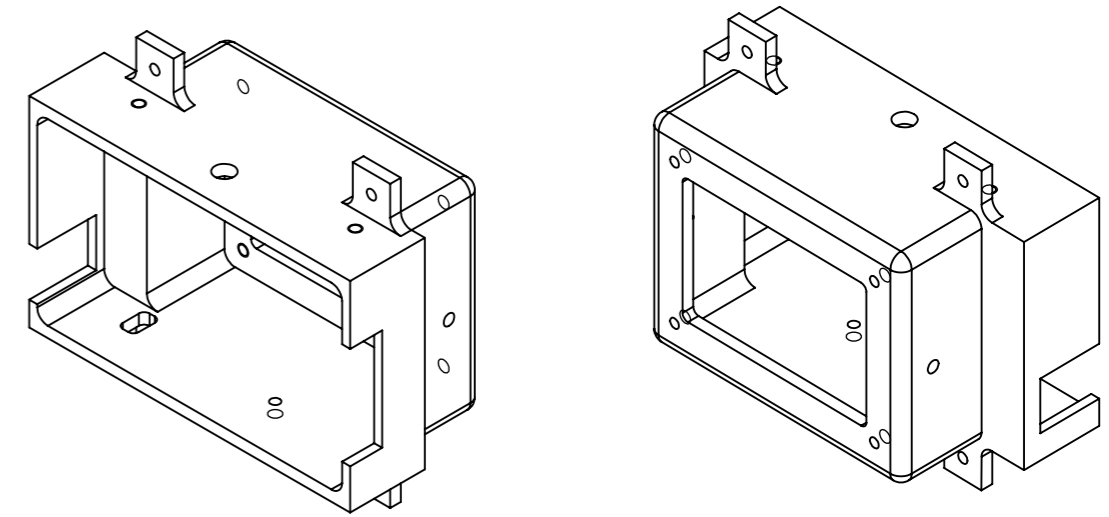
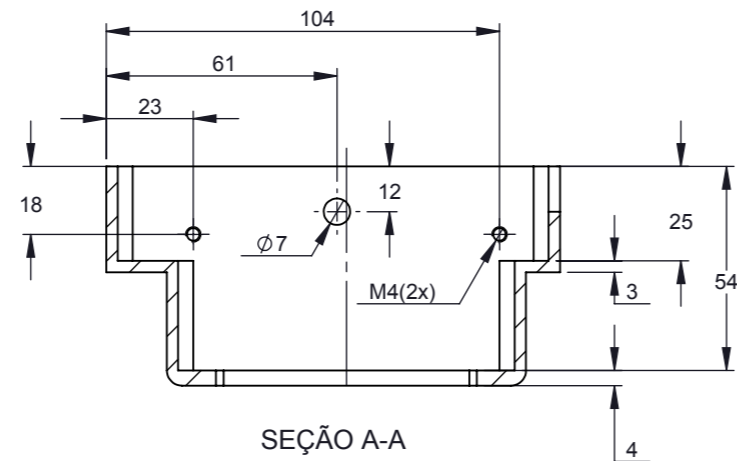


Obs: Cotas deslocadas do centro 3,5mm

Direção do Voo
- Manter esta face voltada para cima para usinagem.

RÓTULO	X	Y	Tamanho
A1	-59	94,50	Ø 5 PASSANTE TOTAL
A2	-53	238,50	
A3	-47	44,50	
A4	-44	92,50	
A5	-3,50	26	
A6	-3,50	267,50	
A7	37	92,50	
A8	40	44,50	
A9	46	238,50	
A10	52	94,50	
B1	-44	78,50	Ø 3,50 Passante
B2	-44	106,50	
B3	37	78,50	
B4	37	106,50	
C1	-44	122,50	Ø 3,50 PASSANTE TOTAL
C2	-44	213,50	
C3	-25	26	
C4	18	26	
C5	37	122,50	
C6	37	213,50	

1	1	Chapa	Alumínio	D:\Projetos IEAv\2017\Maj. Leandro_mar 17\												
Ítem	Qtd.	Denominação	Material	Arquivo												
		<table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="4">Tolerância</th> </tr> <tr> <th>x</th> <th>x.x</th> <th>x.xx</th> <th>angular</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>± 0.1</td> <td>± 0.05</td> <td>—</td> <td>± 0.5</td> </tr> </tbody> </table>			Tolerância				x	x.x	x.xx	angular	± 0.1	± 0.05	—	± 0.5
Tolerância																
x	x.x	x.xx	angular													
± 0.1	± 0.05	—	± 0.5													
Acabamento:		<p>DEPARTAMENTO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA AEROSPAÇIAL INSTITUTO DE ESTUDOS AVANÇADOS SUPORTE TECNOLÓGICO-PROJETOS</p>														
Tratamento:																
Proteção:		Projeto:	Escala: 4:5													
Desenhista: Alex		Solicitante: Maj. Leandro														
Visto:		Ordem de serviço: 4915/ECI-S/2017														
Data: 03/04/2017		A3		Folha: 1/1												

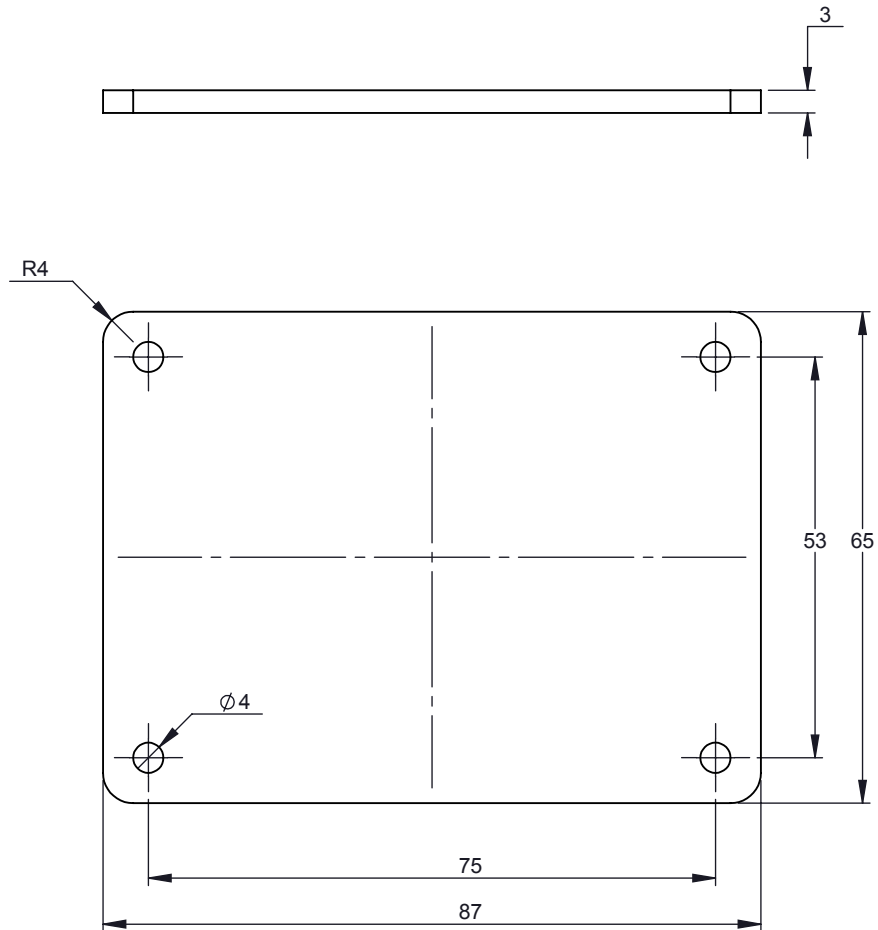


2		Caixa	Aluminio	D:\Projetos IEAv\2017\Maj. Leandro_mar 17\
Ítem	Qtd.	Denominação	Material	Arquivo
Tolerância				
x	x.x	x.xx	angular	
± 0.1	± 0.05	—	± 0.5	
Acabamento:			Projeto:	
Tratamento:			Escala: 1:2	
Proteção:			Solicitante: Maj. Leandro	
Desenhista: Alex			Folha:	
Visto:			1 / 1	
Data: 03/04/2017			Ordem de serviço: 4915/ECI-S/2017	
			A3	

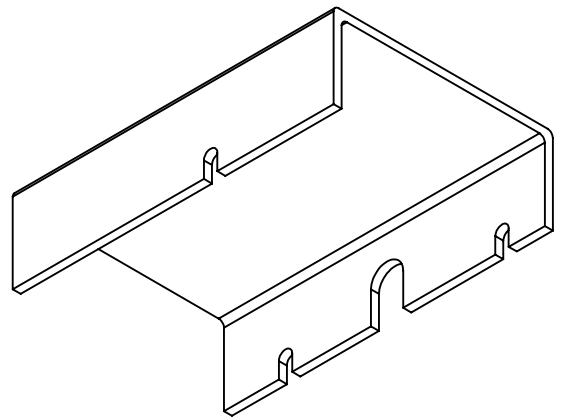
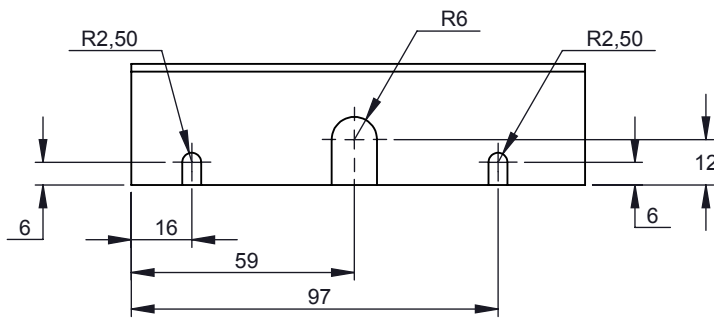
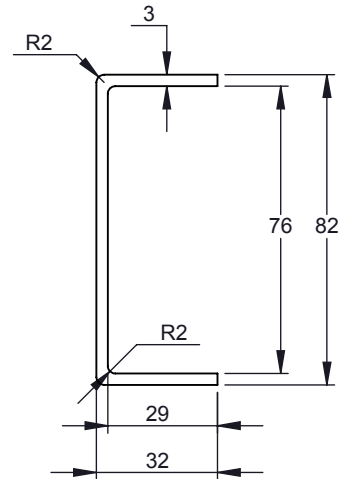
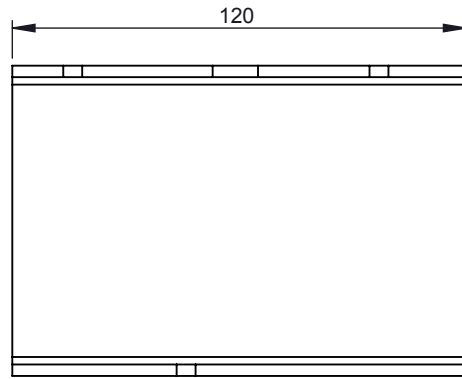
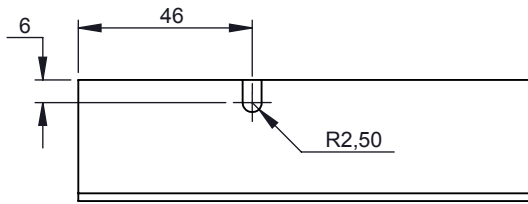


DEPARTAMENTO DE CIÊNCIAS
E TECNOLOGIA AEROESPACIAL
INSTITUTO DE ESTUDOS AVANÇADOS
SUPORTE TECNOLÓGICO-PROJETOS

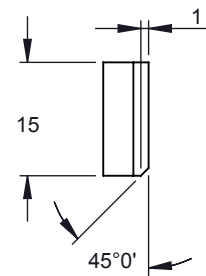
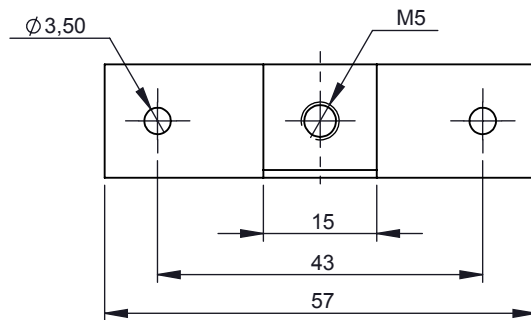
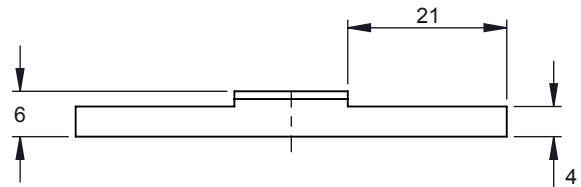
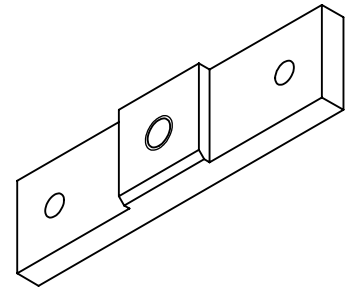




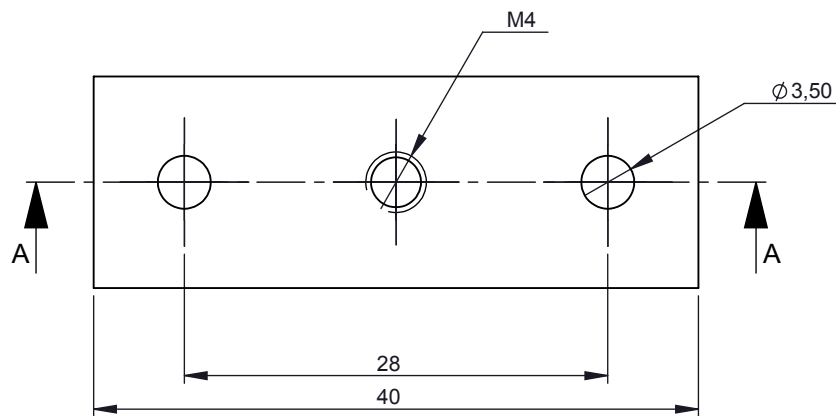
3	1	Janela Nikon		Acrílico	D:\Projetos IEAv\2017\Maj. Leandro_mar 17\	
Ítem	Qtd.	Denominação		Material	Arquivo	
Tolerância				 DEPARTAMENTO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA AEROESPACIAL INSTITUTO DE ESTUDOS AVANÇADOS SUPORTE TECNOLÓGICO-PROJETOS		Projeto: Escala: 1:1
x	x.x	x.xx	angular			
± 0.1	± 0.05	—	± 0.5			
Acabamento:				Projeto:		Folha:
Tratamento:				Solicitante: Maj. Leandro		
Proteção:				Ordem de serviço: 4915/ECI-S/2017		A4 1 / 1
Desenhista: Alex						
Visto:						
Data: 03/04/2017						



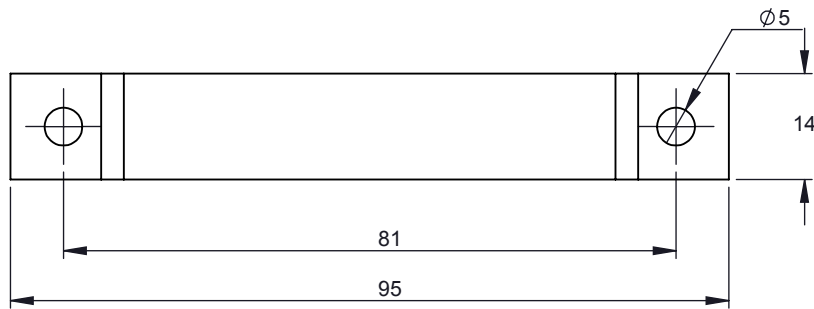
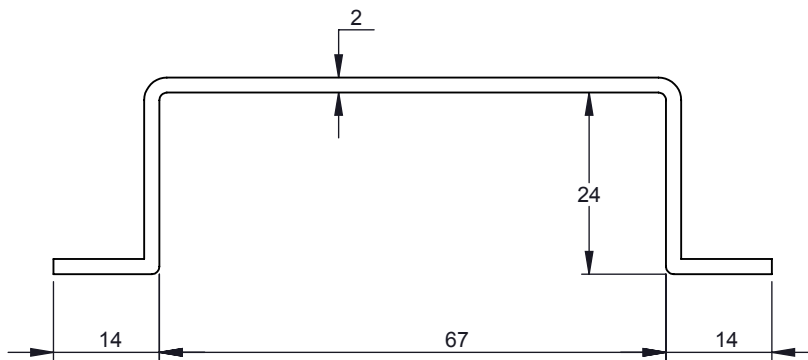
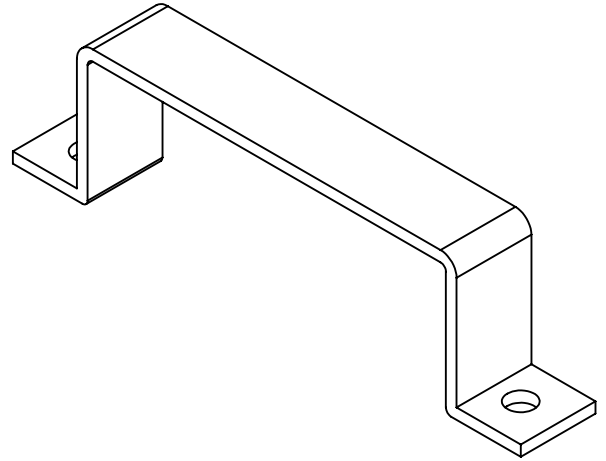
7	1	Fecho Nikon	Acrílico	D:\Projetos IEAv\2017\Maj. Leandro_mar 17\		
Ítem	Qtd.	Denominação	Material	Arquivo		
Tolerância			DEPARTAMENTO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA AEROESPACIAL INSTITUTO DE ESTUDOS AVANÇADOS SUPORTE TECNOLÓGICO-PROJETOS			
x	x.x				x.xx	angular
± 0.1	± 0.05				—	± 0.5
Acabamento:			Projeto: _____ Escala: 1:2			
Tratamento:						
Proteção:		Solicitante: Maj. Leandro		Folha:		
Desenhista: Alex		Ordem de serviço: 4915/ECI-S/2017		1 / 1		
Visto:		A4		1 / 1		
Data: 03/04/2017						



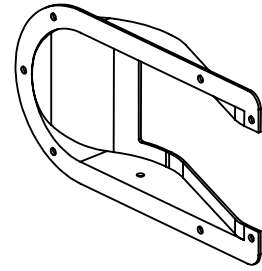
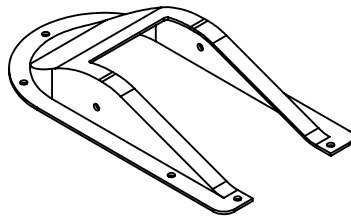
4	1	Suporte Go Pro	Aluminio	D:\Projetos IEAv\2017\Maj. Leandro_mar 17\												
Ítem	Qtd.	Denominação	Material	Arquivo												
		<table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="4">Tolerância</th> </tr> <tr> <th>x</th> <th>x.x</th> <th>x.xx</th> <th>angular</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>± 0.1</td> <td>± 0.05</td> <td>—</td> <td>± 0.5</td> </tr> </tbody> </table>			Tolerância				x	x.x	x.xx	angular	± 0.1	± 0.05	—	± 0.5
Tolerância																
x	x.x	x.xx	angular													
± 0.1	± 0.05	—	± 0.5													
Acabamento:			DEPARTAMENTO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA AEROSPAIAL INSTITUTO DE ESTUDOS AVANÇADOS SUPORTE TECNOLÓGICO-PROJETOS													
Tratamento:																
Proteção:		Projeto:	Escala: 1:1													
Desenhista: Alex		Solicitante: Maj. Leandro														
Visto:		Ordem de serviço: 4915/ECI-S/2017														
Data: 03/04/2017		A4		Folha: 1 / 1												



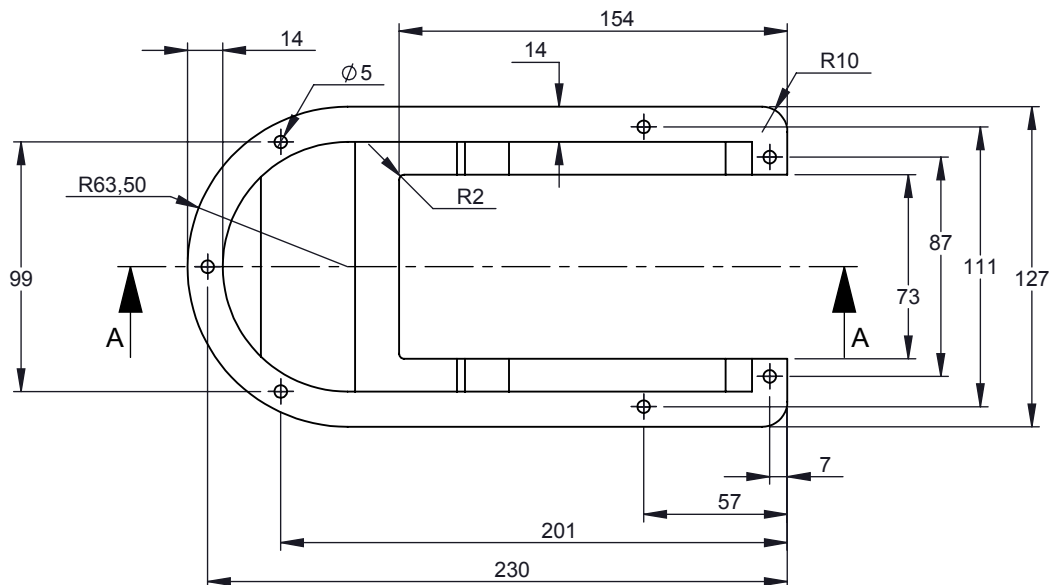
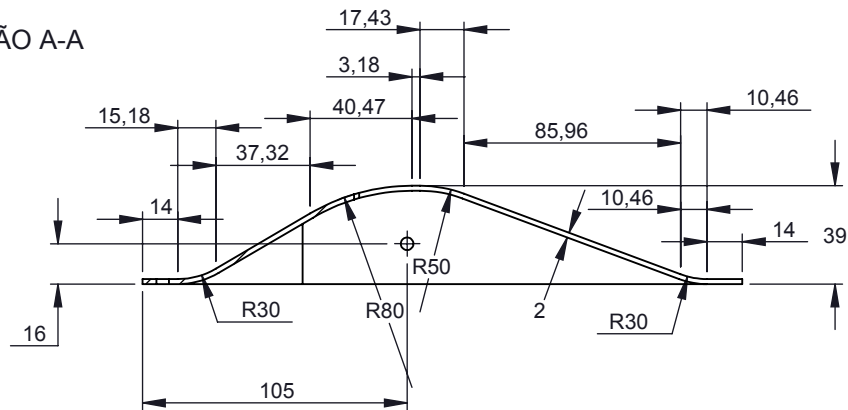
10	2	Calço da Abraçadeira Go Pro	Aluminio	D:\Projetos IEAv\2017\Maj. Leandro_mar 17\												
Ítem	Qtd.	Denominação	Material	Arquivo												
		<table border="1"> <tr> <th colspan="4">Tolerância</th> </tr> <tr> <td>x</td> <td>x.x</td> <td>x.xx</td> <td>angular</td> </tr> <tr> <td>± 0.1</td> <td>± 0.05</td> <td>—</td> <td>± 0.5</td> </tr> </table>			Tolerância				x	x.x	x.xx	angular	± 0.1	± 0.05	—	± 0.5
Tolerância																
x	x.x	x.xx	angular													
± 0.1	± 0.05	—	± 0.5													
																
		DEPARTAMENTO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA AEROESPACIAL INSTITUTO DE ESTUDOS AVANÇADOS SUPORTE TECNOLÓGICO-PROJETOS														
		Acabamento:	Projeto:	Escala: 2:1												
		Tratamento:														
		Proteção:														
		Desenhista: Alex	Solicitante: Maj. Leandro													
		Visto:														
		Data: 03/04/2017	Ordem de serviço: 4915/ECI-S/2017	Folha: 1 / 1												
			A4													



8	1	Abraçadeira	Aluminio	D:\Projetos IEAv\2017\Maj. Leandro_mar 17\	
Ítem	Qtd.	Denominação	Material	Arquivo	
		Tolerância	 DEPARTAMENTO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA AEROESPACIAL INSTITUTO DE ESTUDOS AVANÇADOS SUPORTE TECNOLÓGICO-PROJETOS 		
x	x.x	x.xx			angular
± 0.1	± 0.05	—			± 0.5
Acabamento:		Projeto:		Escala: 1:1	
Tratamento:		Solicitante: Maj. Leandro		Folha:	
Proteção:		Ordem de serviço: 4915/ECI-S/2017		1 / 1	
Desenhista: Alex		A4			
Visto:					
Data: 03/04/2017					

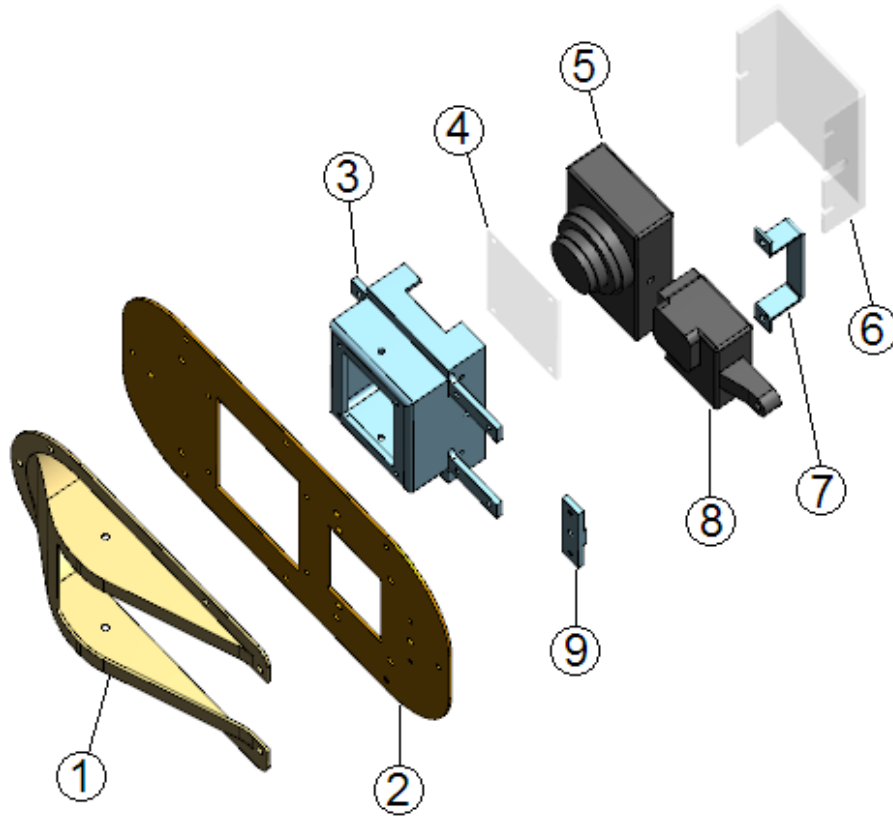


SEÇÃO A-A



9	1	Carenagem	Aluminio	D:\Projetos IEAv\2017\Maj. Leandro_mar 17\												
Ítem	Qtd.	Denominação	Material	Arquivo												
		<table border="1"> <tr> <th colspan="4">Tolerância</th> </tr> <tr> <td>x</td> <td>x.x</td> <td>x.xx</td> <td>angular</td> </tr> <tr> <td>± 0.1</td> <td>± 0.05</td> <td>—</td> <td>± 0.5</td> </tr> </table>			Tolerância				x	x.x	x.xx	angular	± 0.1	± 0.05	—	± 0.5
Tolerância																
x	x.x	x.xx	angular													
± 0.1	± 0.05	—	± 0.5													
		 <p>DEPARTAMENTO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA AEROSPAÇIAL INSTITUTO DE ESTUDOS AVANÇADOS SUPORTE TECNOLÓGICO-PROJETOS</p> 														
Acabamento:		Projeto:		Escala: 1:3												
Tratamento:																
Proteção:																
Desenhista: Alex		Solicitante: Maj. Leandro		Folha:												
Visto:		Ordem de serviço: 4915/ECI-S/2017		1 / 1												
Data: 03/04/2017				A4												

Figura B.1 – Vista explodida e agrupada das peças do suporte para fixação das câmeras na aeronave.



1 – Carenagem de fibra de vidro.

2 – Chapa de alumínio com janelas e furos de fixação.

3 – Caixa da câmera Nikon em alumínio.

4 – Janela de acrílico cristal da caixa da Nikon.

5 – Câmera Nikon

6 – Tampa de acrílico da caixa da Nikon

7 – Abraçadeira de fixação da GoPRO em alumínio.

8 – Câmera GoPRO

9 – Calço da fixação da GoPRO em alumínio.

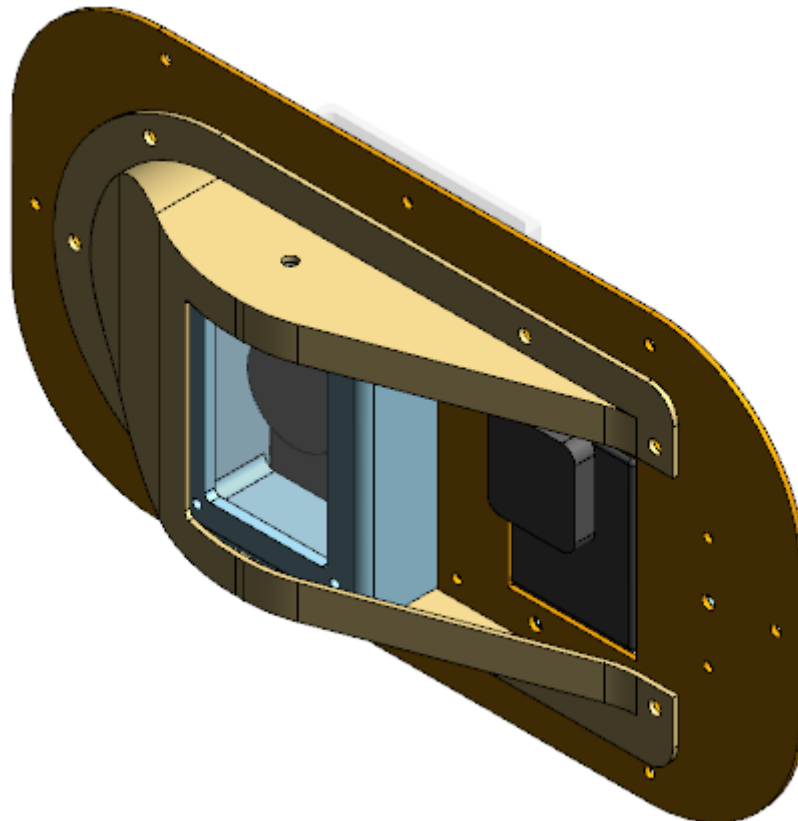


Figura B.2 – Molde em madeira e peça bruta da carenagem em fibra de vidro.



Figura B.3 – Chapa de alumínio bruta e usinada.

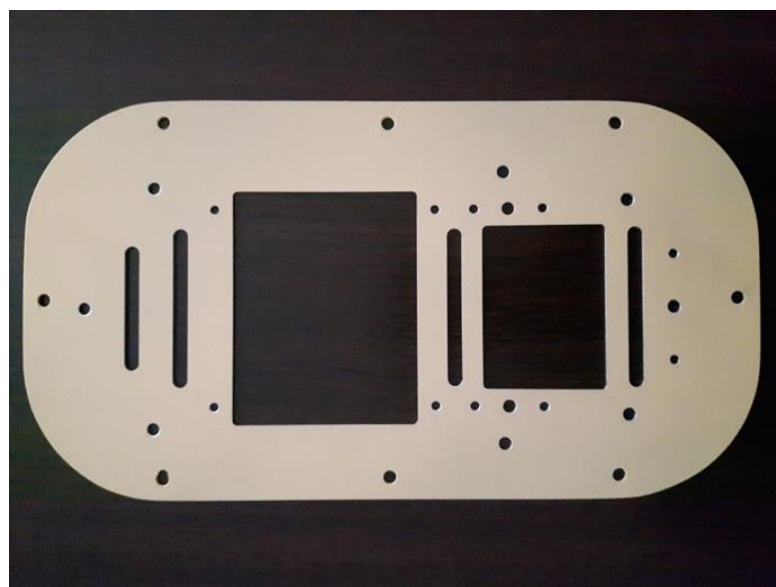


Figura B.3 – Caixa da câmera Nikon usinada em alumínio.

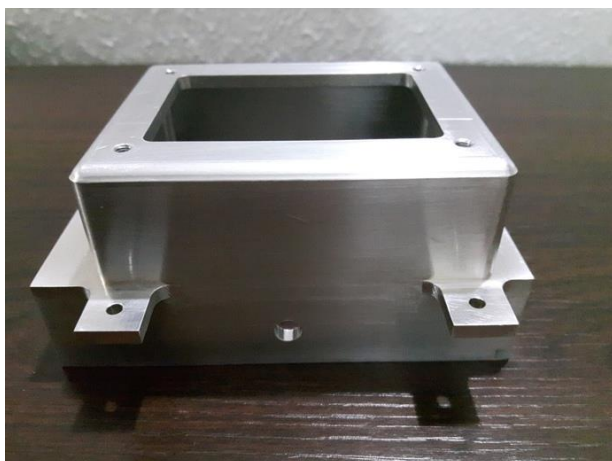
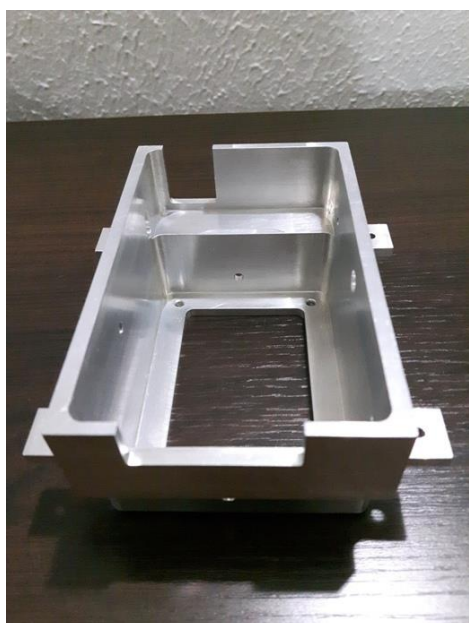


Figura B.4 – Suporte de fixação montado com as câmeras.

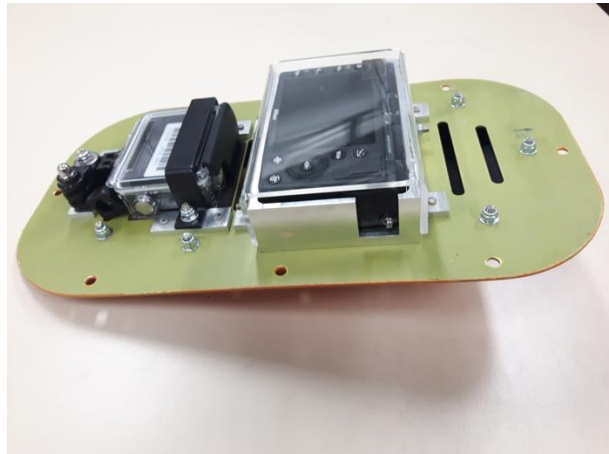


Figura B.5 – Instalação do suporte com as câmeras na aeronave.





MINISTÉRIO DA DEFESA
COMANDO DA AERONÁUTICA
INSTITUTO DE FOMENTO E COORDENAÇÃO INDUSTRIAL

PERMISSÃO ESPECIAL DE VOO

(SPECIAL FLIGHT PERMIT)

NÚMERO: 012/2017

Esta Permissão Especial de Voo é emitida com base na DCA 800-2, aprovada pela Portaria nº 1164/GC3, de 19 de setembro de 2016 e na ICA 57-21, aprovada pela Portaria DCTA nº 347/DNO, de 06 de outubro de 2014, do Comando da Aeronáutica. Somente o operador em nome do qual esta Permissão está sendo emitida - ver Quadro 3 - ou seus representantes legais poderão realizar os voos cujos propósitos estão listados no Quadro 1.

(This Special Flight Permit is issued according to DCA 800-2, dated September 19, 2016 and ICA 57-21, dated October 06, 2014 of Aeronautical Command. Only the operator to whom this Certificate is being issued - see Block 3 - or his legal representatives may conduct flights with the purposes that are listed in the Block 1).

1. PROPÓSITO *(PURPOSE)*

Esta permissão aplica-se a voos de ensaio do Instituto de Pesquisa e Ensaios em Voo (IPEV) para a aeronave A-29B, matrícula FAB 5923, a ser utilizada nos voos do Projeto PITER – Processamento de Imagens em Tempo Real do IEAv. As condições e limitações estão especificadas no item nº 5 desta Permissão.

2. IDENTIFICAÇÃO DA AERONAVE *(AIRCRAFT IDENTIFICATION)*

FABRICANTE *(MANUFACTURER)*: EMBRAER S.A.
TIPO *(TYPE)*/**MODELO** *(MODEL)*: EMB-314 / A-29B
MATRÍCULA *(REGISTRATION)*: FAB 5923
Nº DE SÉRIE *(SERIAL NUMBER)*: 31400027

3. OPERADOR *(OPERATOR)*

NOME *(NAME)*: INSTITUTO DE PESQUISAS E ENSAIOS EM VOO - IPEV
ENDEREÇO *(ADDRESS)*: Praça Mal. Eduardo Gomes, 50; Vila das Acácias; São José dos Campos – SP; CEP: 12228-930

4. DATA DA EMISSÃO E VALIDADE *(DATE OF ISSUANCE AND VALIDITY)*

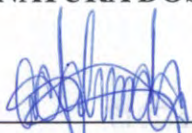
EM 23 de maio de 2017
(ON)


VÁLIDO ATÉ 23 de junho de 2017
(EXPIRATION)

5. LIMITAÇÕES

- a) Esta aeronave não deve ser operada para outro propósito que não seja aquele para o qual esta PEV foi emitida.
- b) Todos os ensaios deverão ser realizados dentro das áreas descritas: Aeródromo de São José dos Campos (SBSJ) e Áreas de Treinamento Militar definidas na AIP-Brasil. Esta aeronave deverá ser operada de acordo com as regras de tráfego aéreo em vigor.
- c) Alterações na aeronave ou no sistema de instrumentação de ensaio, posteriores à data de emissão desta PEV, propostas pelo operador, podem ser realizadas desde que pessoa autorizada faça seu registro no "log book" ou outros meios de registro autorizado e comunique a modificação ao IFI.
- d) Para o propósito desta PEV, cabe ao IPEV regular a qualificação da tripulação de acordo com o tipo de ensaio a ser executado.
- e) A aeronave deverá ser operada de acordo com o previsto Manual de Voo OTFN 1A-29 A/B-1 em vigor, e com a instrumentação instalada e operada conforme os Relatórios IPEV-130438-RI-03613 (Rev. B) ou RA N° 01/EGI-S/IEAv/2017 (Rev. Original), conforme aplicável. Para cada ensaio específico, observar as limitações descritas nas propostas de ensaio e aquelas contidas nesta permissão.
- f) Para operação desta aeronave, a manutenção deverá ter sido executada de acordo com o programa/manual de manutenção em vigor.
- g) Somente inspetores do IFI ou seus credenciados qualificados do COMAER podem executar inspeções conforme requerido por estas limitações operacionais.
- h) Devem ser seguidas todas as recomendações de inspeção e verificação funcional contidas no Relatório de Instrumentação IPEV-130438-RI-03613 (Rev. B) ou RA N° 01/EGI-S/IEAv/2017 (Rev. Original), conforme aplicável.
- i) Os ensaios deverão ocorrer em condições meteorológicas visuais (VMC).
- j) Nenhuma pessoa pode ser transportada na aeronave, a menos que ela seja essencial para a realização e propósito do voo, a critério do comandante da aeronave.
- k) Devem ser seguidas as limitações operacionais conforme ALA-02 Rev. 01, de 04 de outubro de 2004, "Limitação de operação da aeronave A-29 (AL-X)".
- l) A comunicação via rede Wi-Fi e a interface Bluetooth das câmeras deverão estar desativadas durante o voo, sendo um item mandatório de cheque no pré-voo.
- m) Ao final de cada voo deverá ser realizada uma inspeção visual do cabo de comando do profundor na região da carenagem acrílica das câmeras. Em caso de qualquer desgaste no cabo de comando ou na carenagem acrílica, os voos deverão ser suspensos e uma solução técnica para as devidas correções deverá ser proposta ao IFI.
- n) Um requerimento deve ser feito para o IFI/CPA quando houver a necessidade de qualquer revisão nas limitações operacionais.
- o) Para o propósito de certificação, o IP deve ser qualificado como Piloto de Provas.
- p) Documentos relacionados:
- Relatório de Instrumentação IPEV-130438-RI-03613 (Rev. B);
 - Relatório de Análise (RA) N° 01/EGI-S/IEAv/2017 "Fixação de Câmeras Fotográficas na Aeronave A-29" de 25 de Abril de 2017;
 - Ficha de Pesagem do IPEV para a aeronave FAB 5923, de 10/05/2013;
 - Parecer Técnico do ensaio de EMC, realizado em 23/08/2016, do IFI para a aeronave FAB 5923;
 - Mensagem Direta IPEV no N° 5/EST-IE/1111, de 10/05/2017;
 - Relatório de Inspeção RI 0714-001 (2017).

6. ASSINATURA DOS REPRESENTANTES DO IFI (SIGNATURE OF IFI REPRESENTATIVES)


Artemio Relvas de Almeida Ten Cel Eng
Chefe da CPA

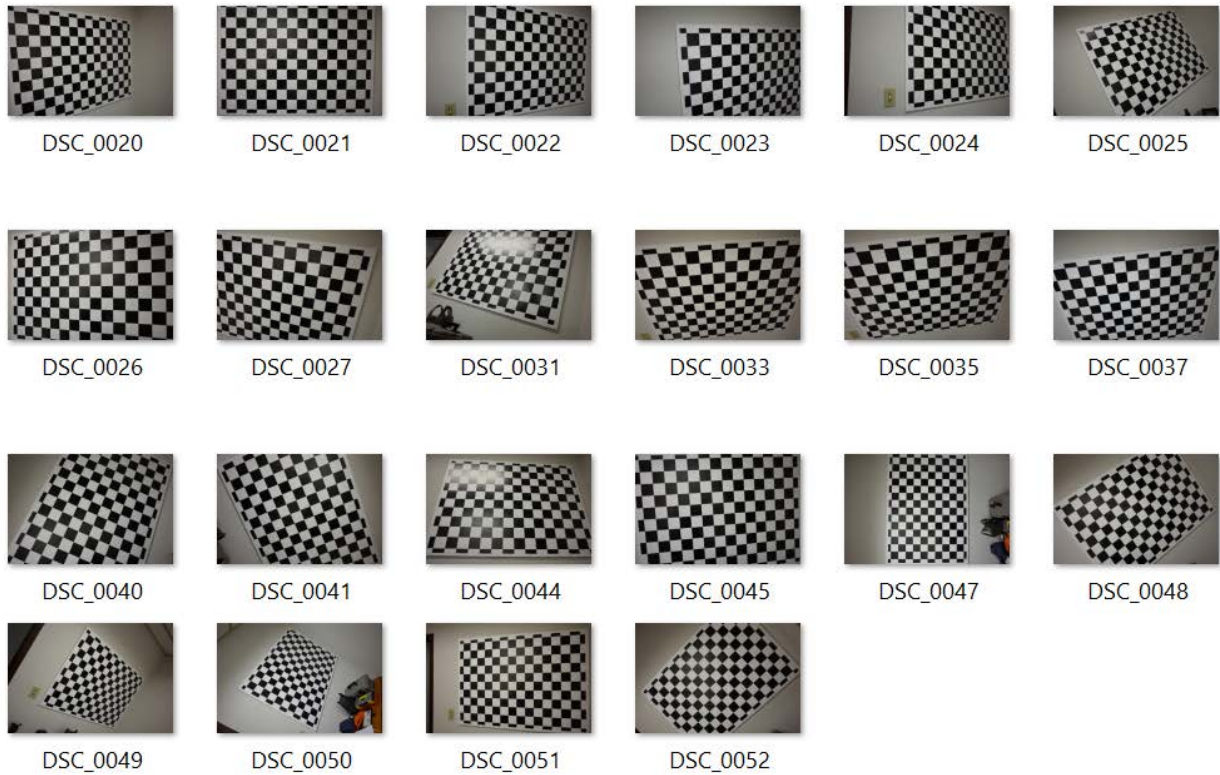

César Augusto O'Donnell Alván Cel Av
Diretor do IFI

José Renato de Araujo Costa Ten Cel Av
Vice Diretor do IFI

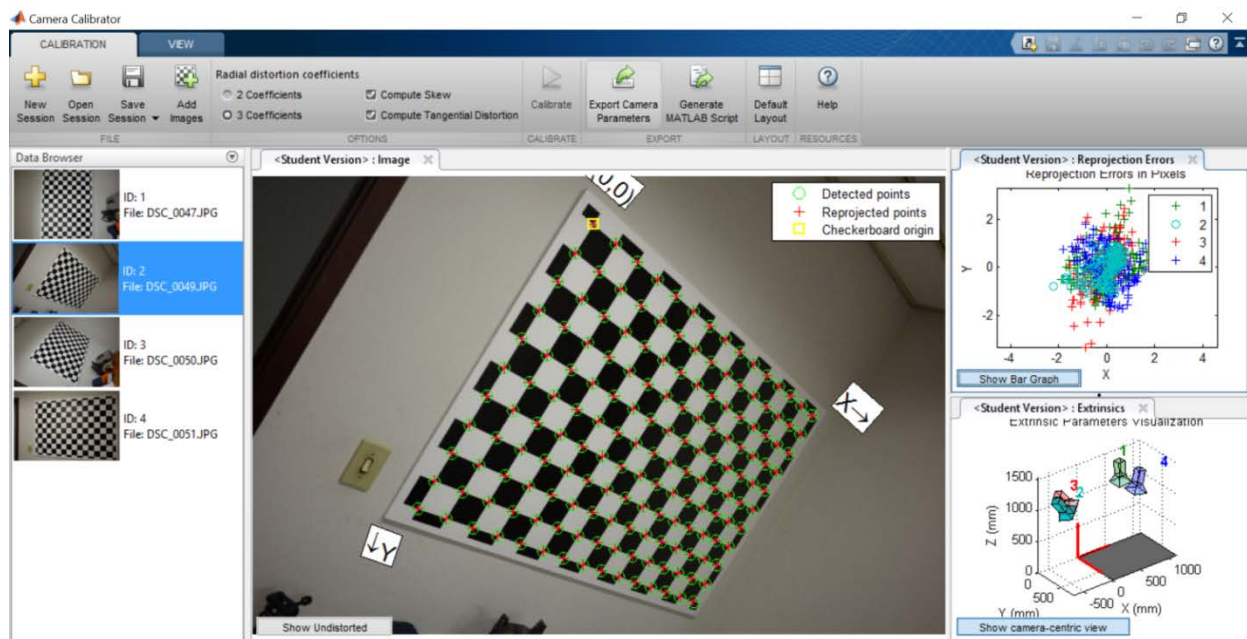
APÊNDICE C
CALIBRAÇÃO DA CÂMERA NIKON

C.1 – CALIBRAÇÃO DA CÂMERA NIKON UTILIZANDO PLACA 2D (CHESSBOARD) COM SOFTWARE DO MATLAB (CAMERA CALIBRATOR TOOLBOX)

C.1.1 – Conjunto de fotos utilizadas para calibração no MATLAB



C.1.2 – Processo de calibração no *Camera Calibrator Toolbox* do MATLAB



C.1.3 – Resultado da calibração - parâmetros de distorção

Lens Distortion

Radial Distortion: [-0.073545889495165 0.085017094157998 -0.020299291790931]
 Tangential Distortion: [-6.818040963656689e-04 -8.898056823487604e-04]

Intrinsic Matriz

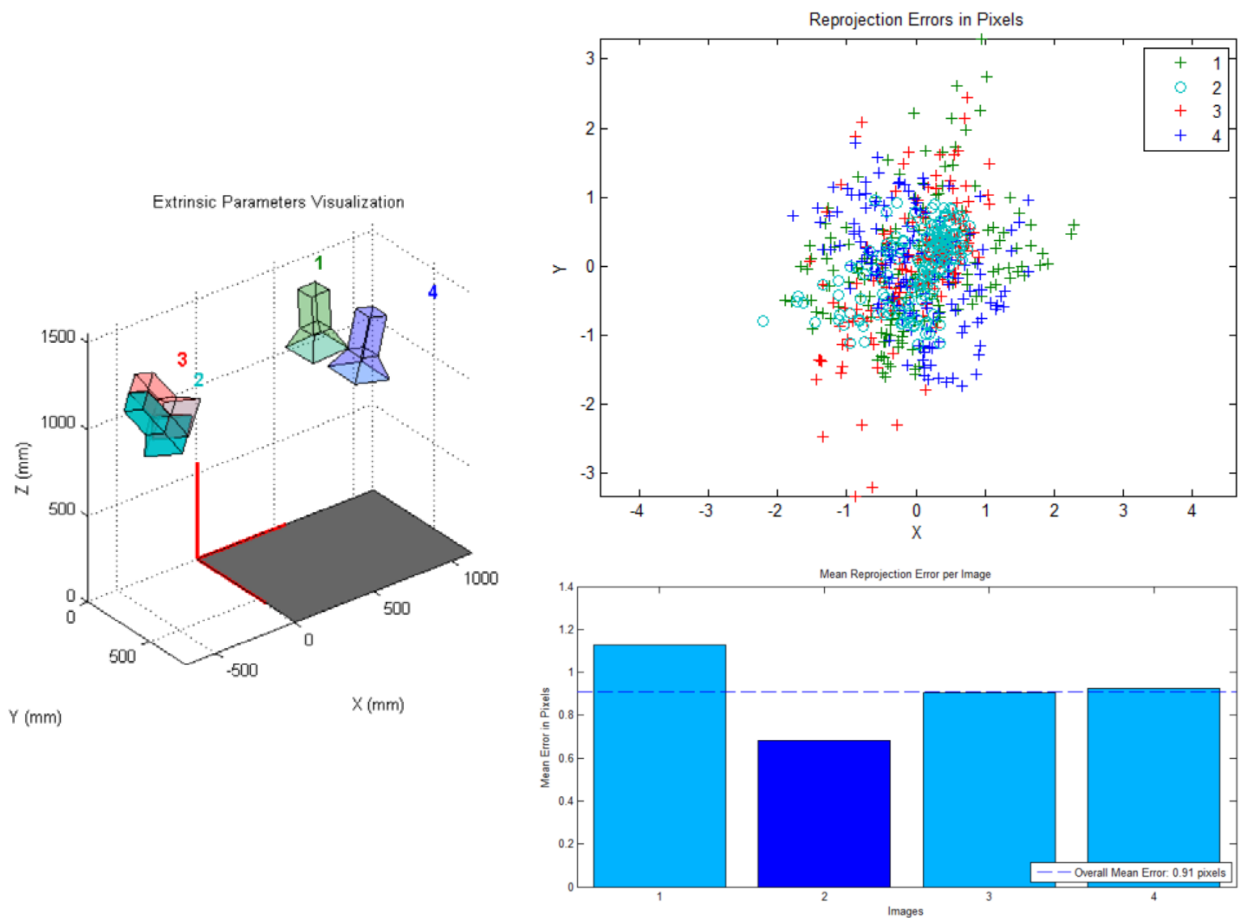
3888, 23062141286 0 0
 1,05355504033670 3888,28069372470 0
 2485,36073914903 1650,68726868152 1

a = [3888.23062141286 3888.28069372470]
 c = [2485.36073914903 1650.68726868152]
 s = 1.05355504033670

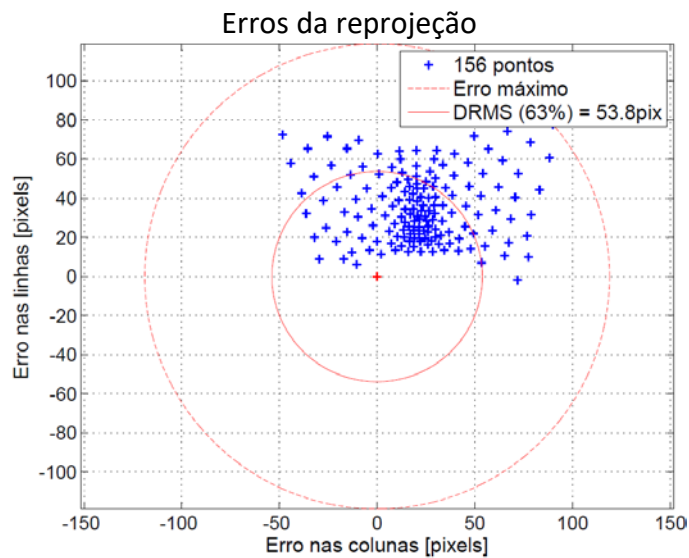
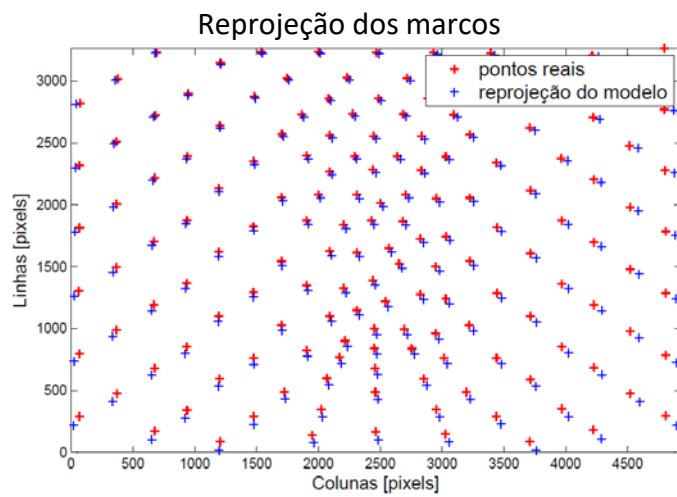
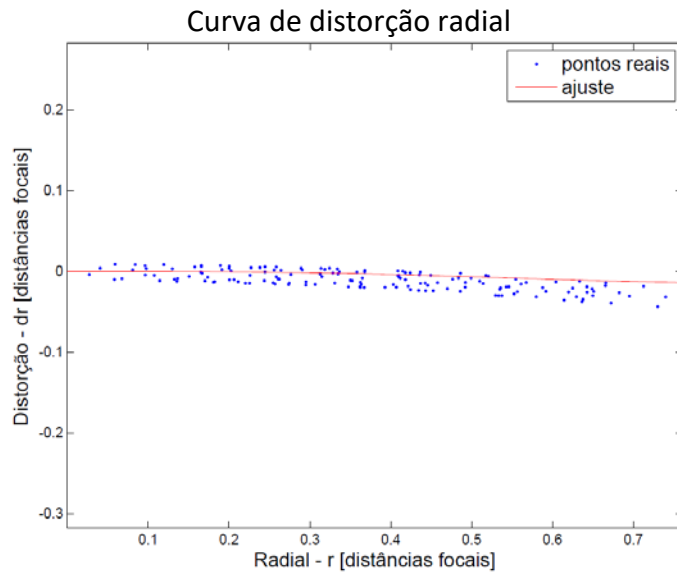
Accuracy of Estimation

MeanReprojectionError: 0.910754802317006
 Calibration Settings
 NumPatterns: 4
 WorldPoints: [165x2 double]
 WorldUnits: 'mm'
 EstimateSkew: 1
 NumRadialDistortionCoefficients: 3
 EstimateTangentialDistortion: 1

C.1.4 – Análise dos erros da calibração pelo MATLAB



C.1.5 – Análise dos erros da calibração pelo MATABL com a orientação externa da calibração no campo do IEAv (item C.3)



C.2 – CALIBRAÇÃO DA CÂMERA NIKON NO CAMPO 3D DO IEAV COM *SOFTWARE* CALIBRA, UTILIZANDO MODELO DE DISTORÇÃO DO MATLAB

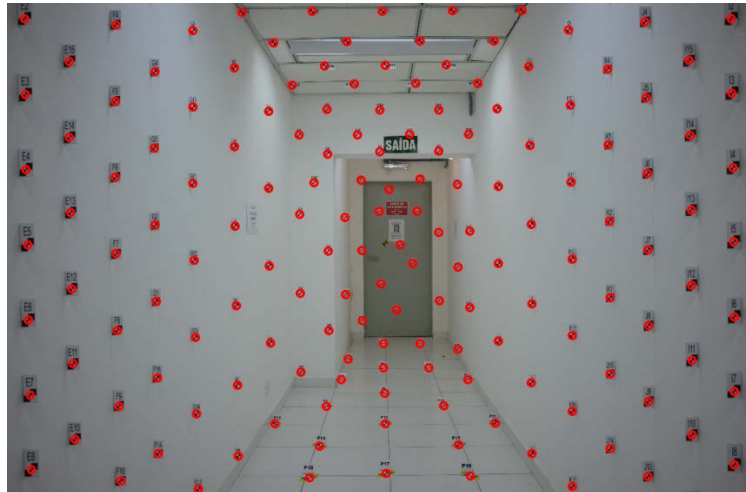
C.2.1 – Posicionamento no campo de calibração 3D do IEAv



C.2.2 – Imagem do campo obtida com a câmera Nikon



C.2.3 – Pontos de referência capturados para calibração



C.2.2 – Resultados da calibração – parâmetros de distorção

Distância Focal Nominal: $f = 18.5 \text{ mm}$

Distância Focal Calibrada: $f_c = 18.321 \text{ mm}$
 $\sigma_{f_c} = 0.0223 \text{ mm}$

Tamanho do Pixel: [4.789 x 4.779] micrometros

Tamanho Nominal do Sensor: [23.6 x 15.6] mm

Crop Factor: 1.53

Focal Equivalente: $f_{35} = 28.021 \text{ mm}$

Abertura Angular: FOV = [64.09 48.69 75.36] graus

Distorção Radial: $K = [-0.0808783 \quad 0.0158734 \quad 0.0703467]$
 $\sigma_K = [0.006304 \quad 0.03408 \quad 0.04442]$

Distorção Tangente: $T = [-0.00100438 \quad 0.00182185]$
 $\sigma_T = [9.363e-05 \quad 0.0001379]$

Afinidade: $a = [3828.6 \quad 3830.6] \text{ pixels}$
 $\sigma_a = [4.75 \quad 4.58] \text{ pixels}$

Cisalhamento (Skew): $s = -1.07$
 $\sigma_s = 0.882$

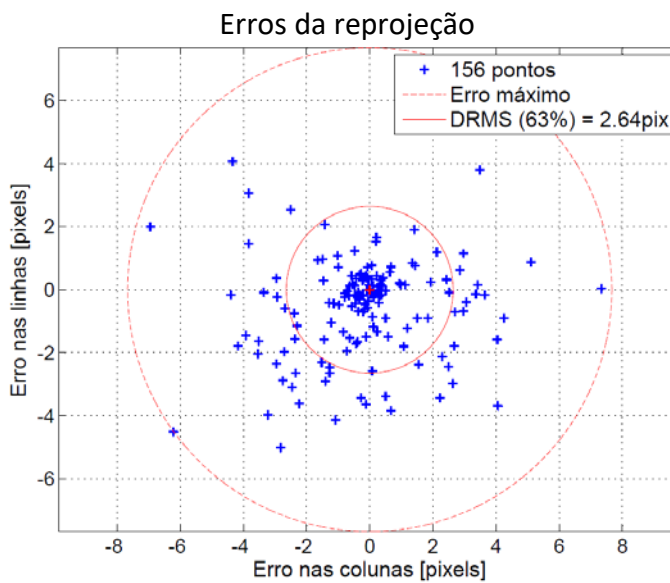
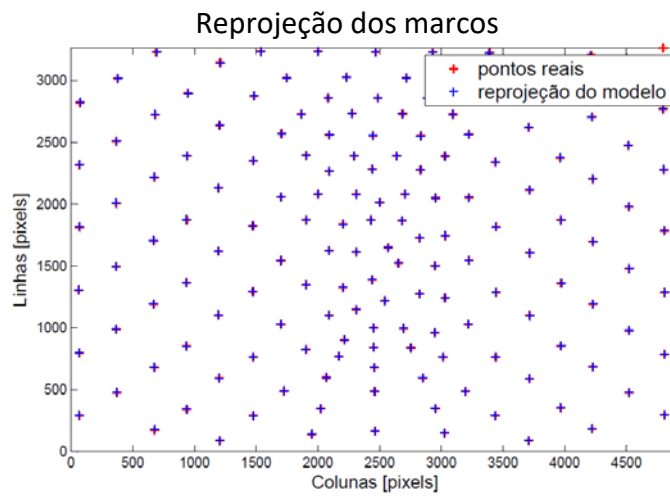
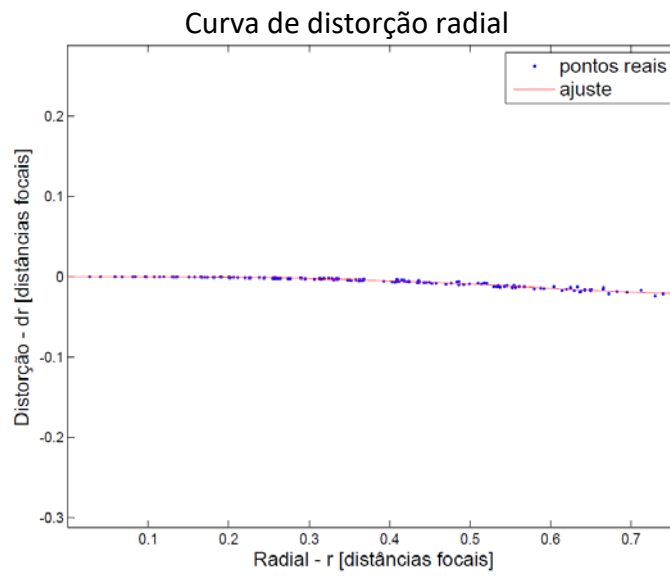
Ponto Principal: $c = [2464.4 \quad 1616.5] \text{ pixels}$
 $\sigma_c = [9.46 \quad 18] \text{ pixels}$

Tamanho da Imagem: [4928 x 3264] pixels

Apontamento da Câmera no Campo: Azim, Elev, Rot = [-0.0232 0.708 -0.245]
 $\sigma_{Azim}, \sigma_{Elev}, \sigma_{Rot} = [0.138 \quad 0.263 \quad 0.00994]$

Posição da Câmera no Campo: $X_c, Y_c, Z_c = [-0.00175 \quad 2.35 \quad 1.17]$
 $\sigma_{X_c}, \sigma_{Y_c}, \sigma_{Z_c} = [0.0012 \quad 0.0094 \quad 0.00129]$

C.2.3 – Análise dos erros da calibração pelo CALIBRA com modelo de distorção do MATLAB



C.3 – CALIBRAÇÃO DA CÂMERA NIKON NO CAMPO 3D DO IEAV COM *SOFTWARE* CALIBRA, UTILIZANDO MODELO DE DISTORÇÃO COMPLETO 4K

C.3.1 – Resultado da calibração – parâmetros de distorção

Distância Focal Nominal: $f = 18.5$ mm

Distância Focal Calibrada: $f_c = 18.361$ mm
 $\sigma_{f_c} = 0.0149$ mm

Tamanho do Pixel: [4.789 x 4.779] micrometros

Tamanho Nominal do Sensor: [23.6 x 15.6] mm

Crop Factor: 1.53

Focal Equivalente: $f_{35} = 28.082$ mm

Abertura Angular: FOV = [62.07 44.9 72.25] graus

Distorção Radial: $K = [-0.0638938 \quad 0.00342126 \quad 0.12224 \quad -0.0653188]$
 $\sigma_K = [0.01473 \quad 0.143 \quad 0.4296 \quad 0.4026]$

Distorção Tangente: $T = [-0.000649265 \quad 0.00223334 \quad 0.537146 \quad 0.0148282]$
 $\sigma_T = [0.0001207 \quad 0.0003745 \quad 1.196 \quad 1.651]$

Afinidade: $a = [3837.1 \quad 3838.6]$ pixels
 $\sigma_a = [3.17 \quad 3.04]$ pixels

Cisalhamento (Skew): $s = -2.46$
 $\sigma_s = 0.478$

Ponto Principal: $c = [2466.7 \quad 1616.5]$ pixels
 $\sigma_c = [6.3 \quad 11.9]$ pixels

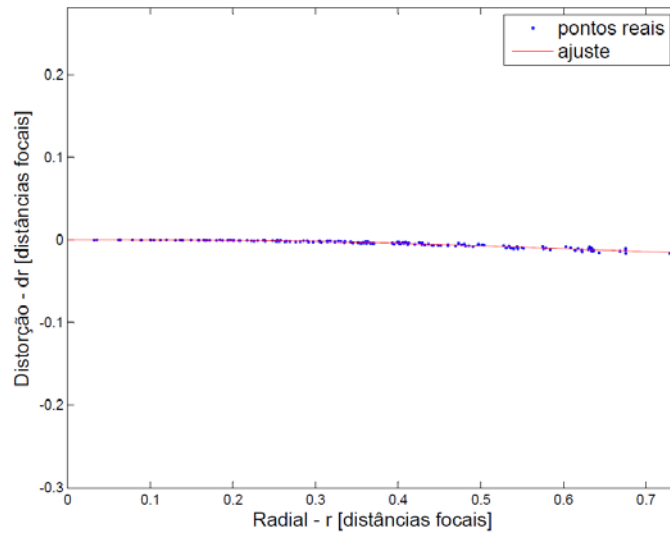
Tamanho da Imagem: [4928 x 3264] pixels

Apontamento da Câmera no Campo: Azim, Elev, Rot = [-0.513 0.0938 0.285]
 $\sigma_{Azim}, \sigma_{Elev}, \sigma_{Rot} = [0.0918 \quad 0.175 \quad 0.00702]$

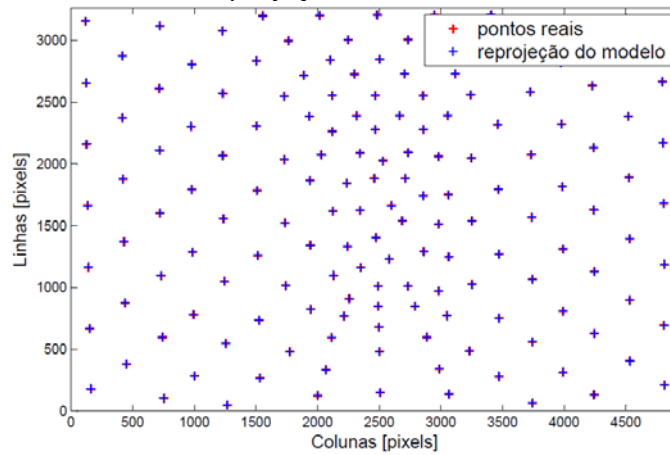
Posição da Câmera no Campo: $X_c, Y_c, Z_c = [0.00267 \quad 2.32 \quad 1.22]$
 $\sigma_{X_c}, \sigma_{Y_c}, \sigma_{Z_c} = [0.000791 \quad 0.00624 \quad 0.000812]$

C.3.2 – Análise dos erros da calibração pelo CALIBRA com modelo de distorção Completo 4K

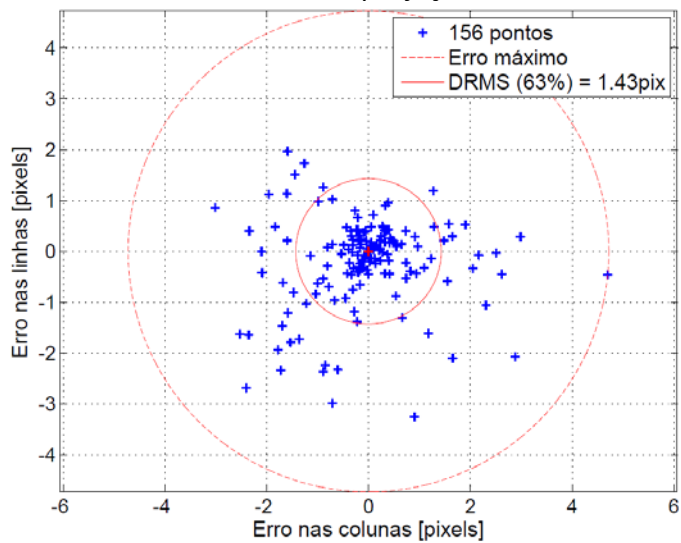
Curva de distorção radial



Reprojeção dos marcos



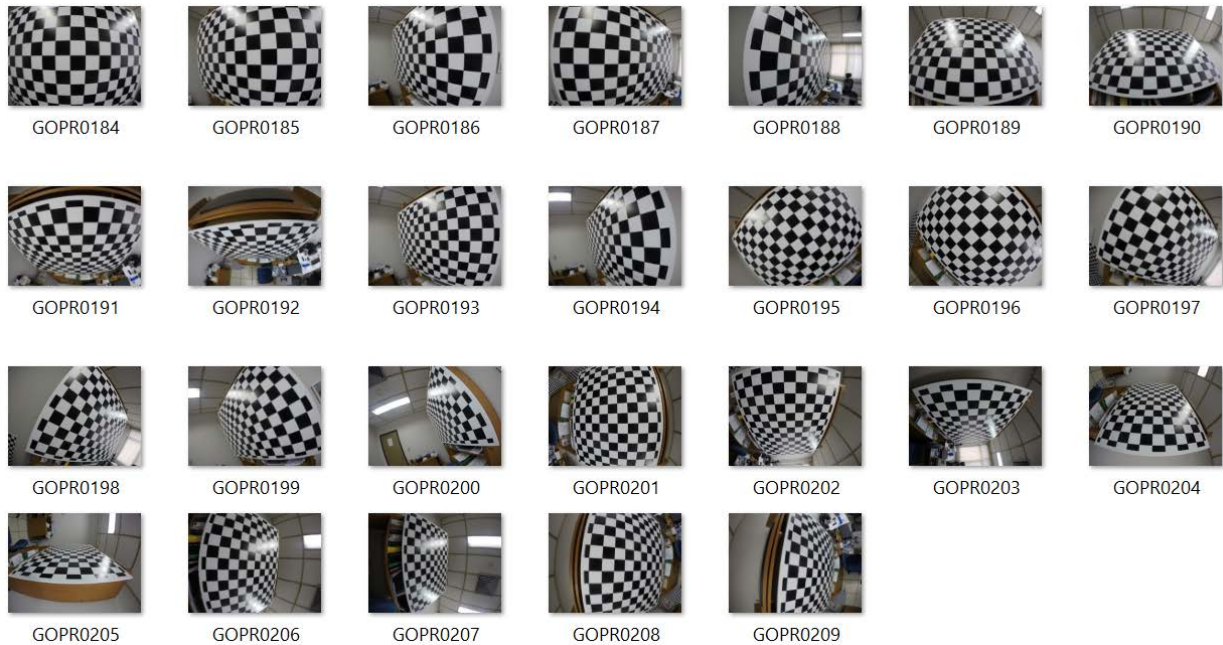
Erros da reprojeção



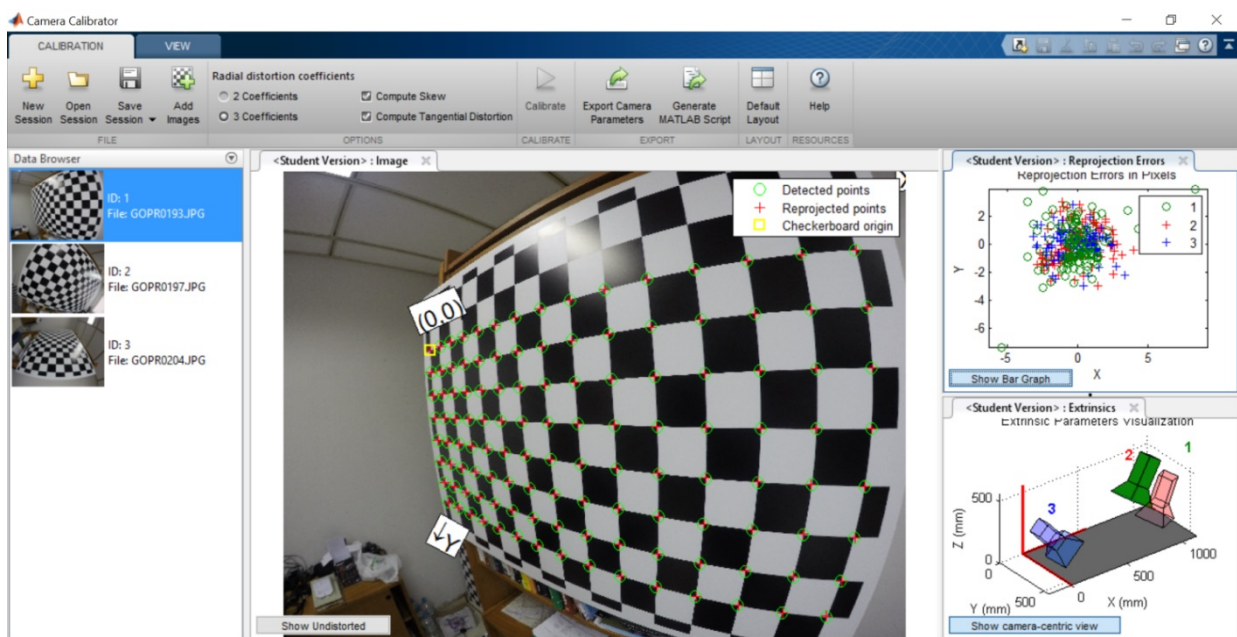
APÊNDICE D
CALIBRAÇÃO DA CÂMERA GOPRO

D.1 – CALIBRAÇÃO DA CÂMERA GOPRO NO MODO WIDE UTILIZANDO PLACA 2D (CHESSBOARD) COM SOFTWARE DO MATLAB (CAMERA CALIBRATOR TOOLBOX)

D.1.1 – Conjunto de fotos utilizadas para calibração



D.1.2 – Processo de calibração no Camera Calibrator Toolbox do MATLAB



D.1.3 – Resultado da calibração - parâmetros de distorção

Lens Distortion

Radial Distortion: [-0.236733728254304 0.061952237396520 -0.007321370218110]
Tangential Distortion: [4.215061124022930e-04 5.071014785251371e-06]

Intrinsic Matrix

1745,84456088687	0	0
-1,16403195442652	1746,51043717611	0
1977,20584596549	1518,36058336955	1

a = [1745.84456088687 1746.51043717611]
c = [1977.20584596549 1518.36058336955]
s = -1.16403195442652

Camera Extrinsic

Rotation Matrices: [3x3 double]
Translation Vectors: [3x3 double]

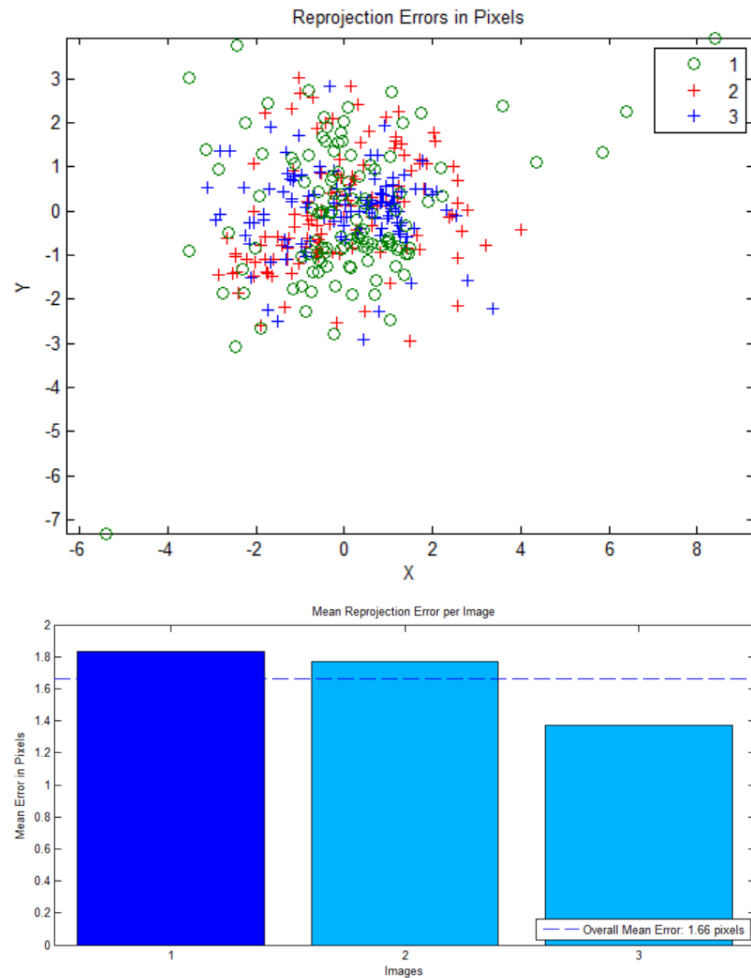
Accuracy of Estimation

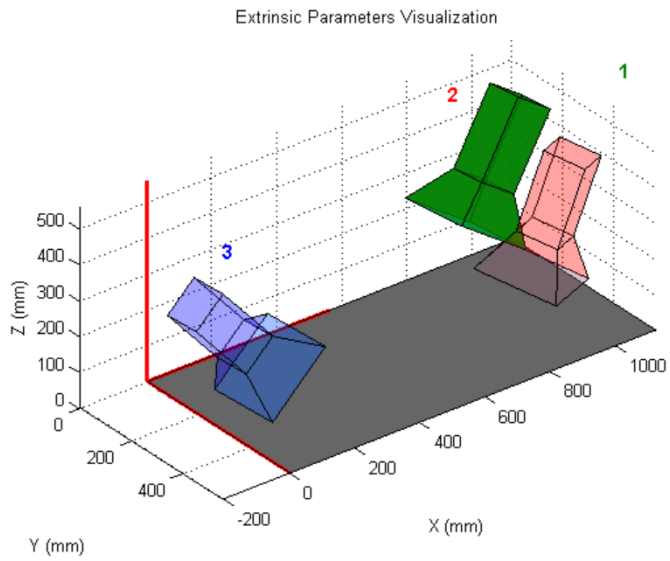
Mean Reprojection Error: 1.659845501970535
Reprojection Errors: [120x2x3 double]

Calibration Settings

NumPatterns: 3
WorldPoints: [120x2 double]
WorldUnits: 'mm'
EstimateSkew: 1
NumRadialDistortionCoefficients: 3
EstimateTangentialDistortion: 1

D.1.4 – Análise dos erros da calibração pelo MATLAB



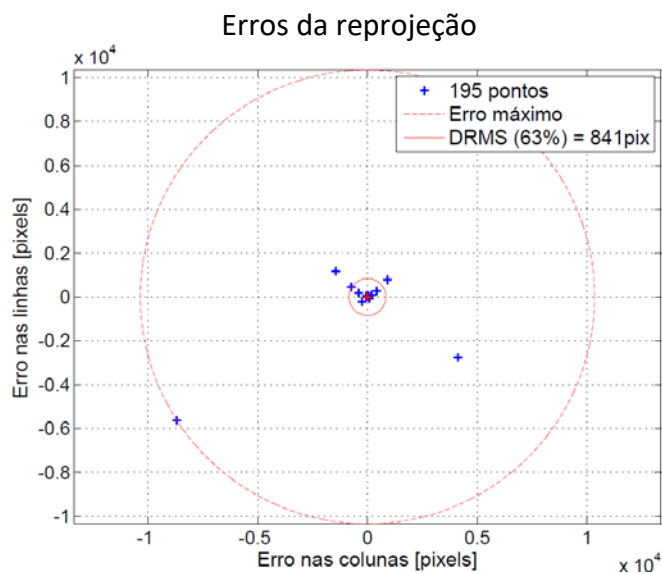
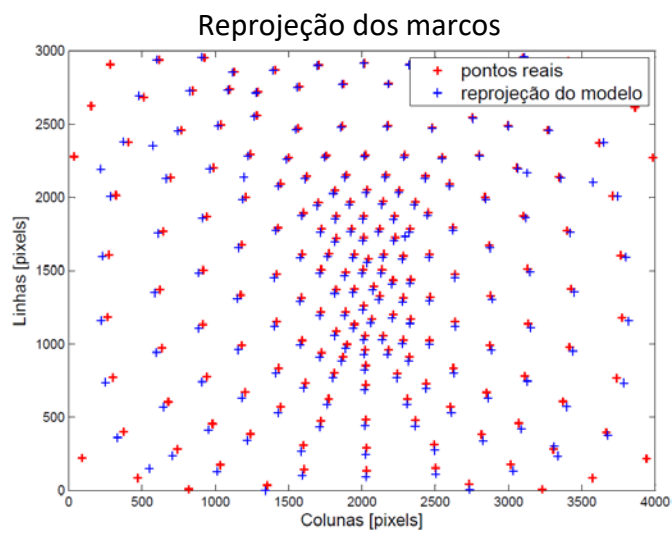
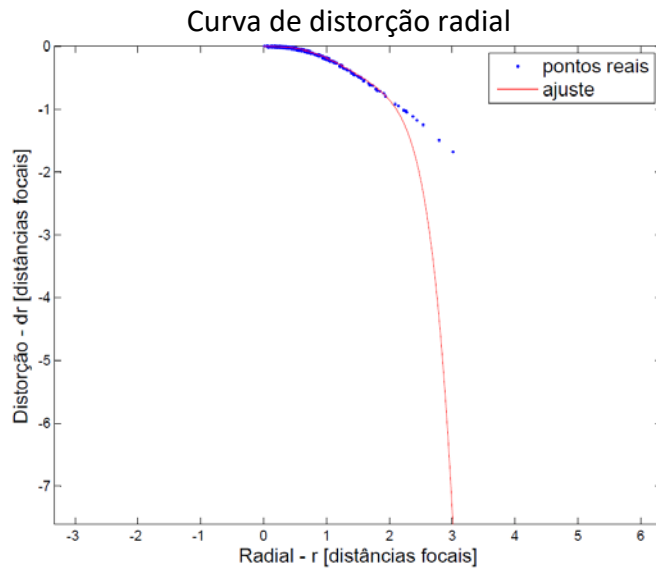


D.1.5 – Imagem sem correção e após correção pelo MATLAB – corte das bordas

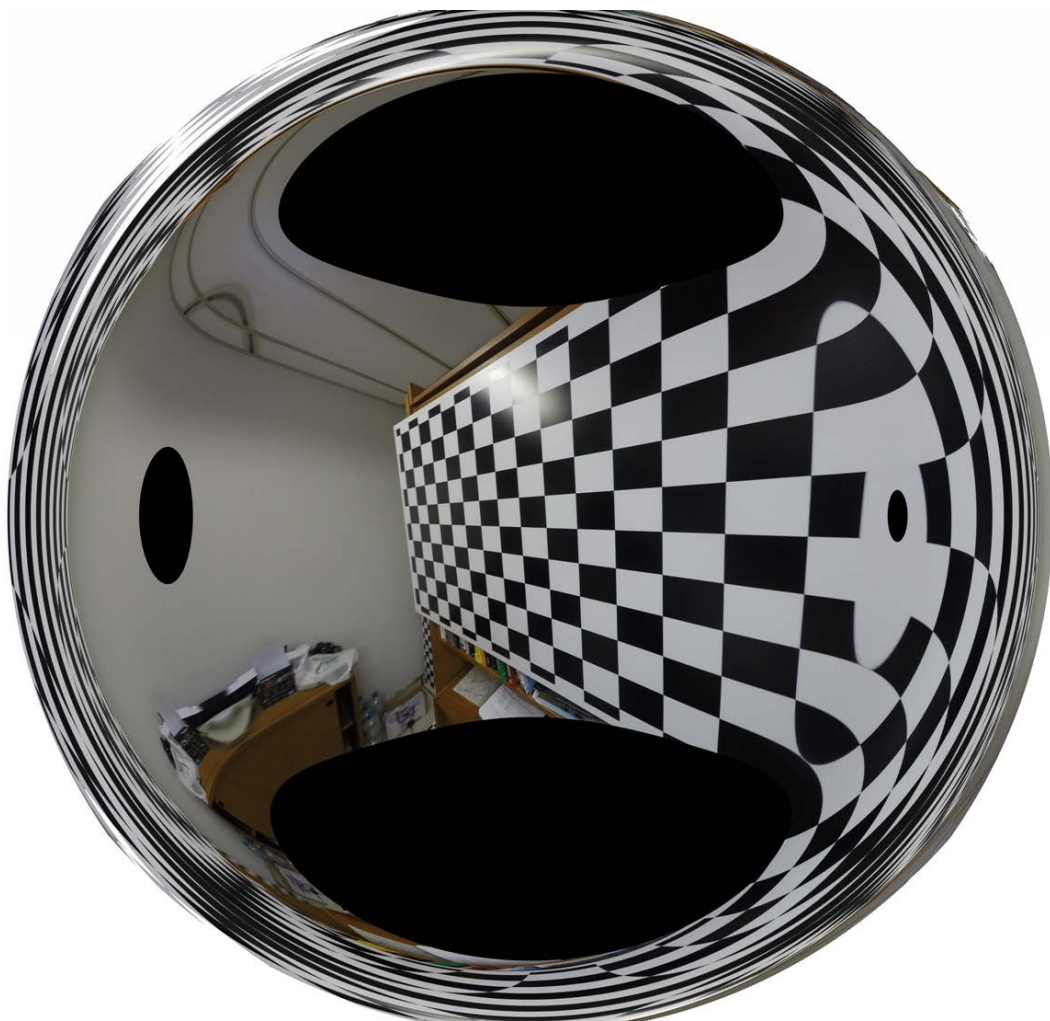
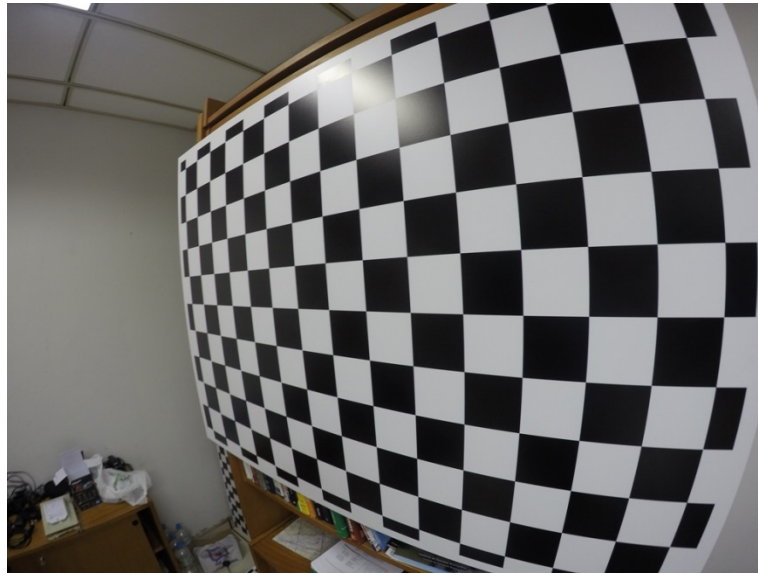


The screenshot shows the MATLAB Camera Calibrator software interface. On the left, a "Data Browser" lists three images: ID: 1 (File: GOPR0193.JPG), ID: 2 (File: GOPR0197.JPG), and ID: 3 (File: GOPR0204.JPG). The main window displays the original distorted checkerboard image. On the right, there are two subplots: "Reprojection Errors" showing a scatter plot of errors in pixels, and "Extrinsics" showing the 3D visualization of the extrinsic parameters with the three colored planes (blue, green, red) and their respective centers of projection (C1, C2, C3) and principal points (c1, c2, c3).

D.1.6 – Análise dos erros da calibração pelo MATLAB com a orientação externa da calibração no campo do IEAv (item D.3)



D.1.7 – Imagem sem correção e após correção pela calibração do MATLAB – sem corte das bordas



D.2 – CALIBRAÇÃO DA CÂMERA GOPRO NO MODO WIDE NO CAMPO 3D DO IEAV COM SOFTWARE CALIBRA, UTILIZANDO MODELO DE DISTORÇÃO DO MATLAB

D.2.1 – Posicionamento no campo de calibração 3D do IEAv



D.2.2 - Imagem do campo obtida com a câmera GoPRO no modo Wide



D.2.3 – Pontos de referência capturados para calibração



D.2.4 – Resultados da calibração – parâmetros de distorção

Distância Focal Nominal: $f = 2.6596 \text{ mm}$

Distância Focal Calibrada: $f_c = 2.6609 \text{ mm}$
 $\sigma_{f_c} = 0.00587 \text{ mm}$

Tamanho do Pixel: [1.543 x 1.517] micrometros

Tamanho Nominal do Sensor: [6.17 x 4.55] mm

Crop Factor: 5.64

Focal Equivalente: $f_{35} = 15.018 \text{ mm}$

Abertura Angular: FOV = [128.9 124.5 141] graus

Distorção Radial: $K = [-0.209167 \quad 0.0328556 \quad -0.00185723]$
 $\sigma_K = [0.001627 \quad 0.0006019 \quad 5.096e-05]$

Distorção Tangente: $T = [0.000241059 \quad -0.00130761]$
 $\sigma_T = [0.0002135 \quad 0.0002711]$

Afinidade: $a = [1739.3 \quad 1739.9] \text{ pixels}$
 $\sigma_a = [3.83 \quad 3.84] \text{ pixels}$

Cisalhamento (Skew): $s = -0.529$
 $\sigma_s = 3.51$

Ponto Principal: $c = [2011.6 \quad 1500.9] \text{ pixels}$
 $\sigma_c = [6.57 \quad 12.3] \text{ pixels}$

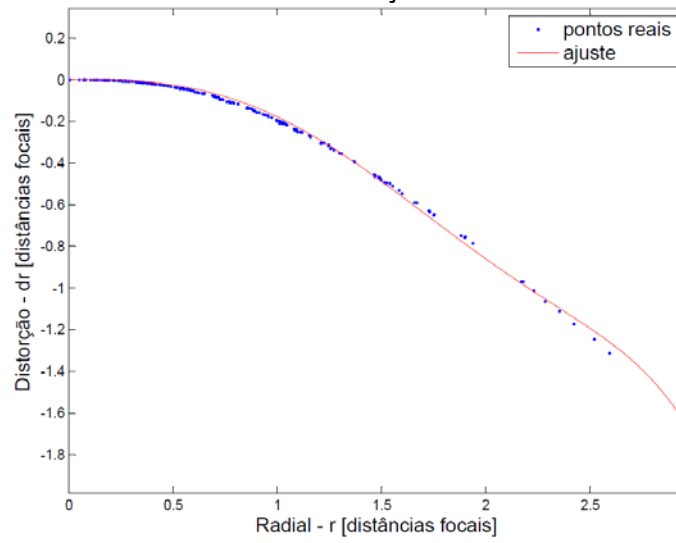
Tamanho da Imagem: [4000 x 3000] pixels

Apontamento da Câmera no Campo: Azim, Elev, Rot = [-0.503 3.84 -0.0311]
 $\sigma_{Azim}, \sigma_{Elev}, \sigma_{Rot} = [0.21 \quad 0.397 \quad 0.0203]$

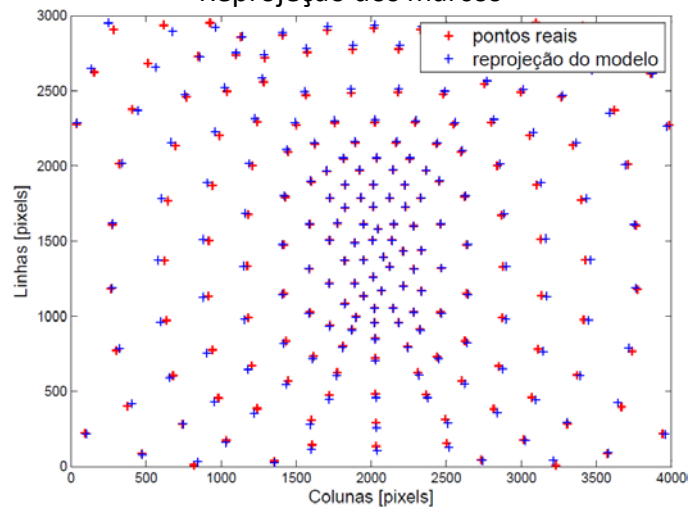
Posição da Câmera no Campo: $X_c, Y_c, Z_c = [-0.00543 \quad 3.25 \quad 1.22]$
 $\sigma_{X_c}, \sigma_{Y_c}, \sigma_{Z_c} = [0.00218 \quad 0.0147 \quad 0.00242]$

D.2.5 – Análise dos erros da calibração pelo CALIBRA com modelo de distorção do MATLAB

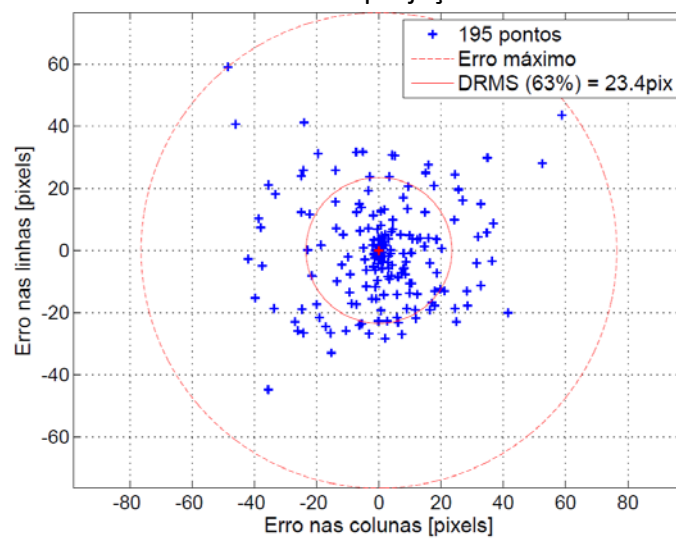
Curva de distorção radial



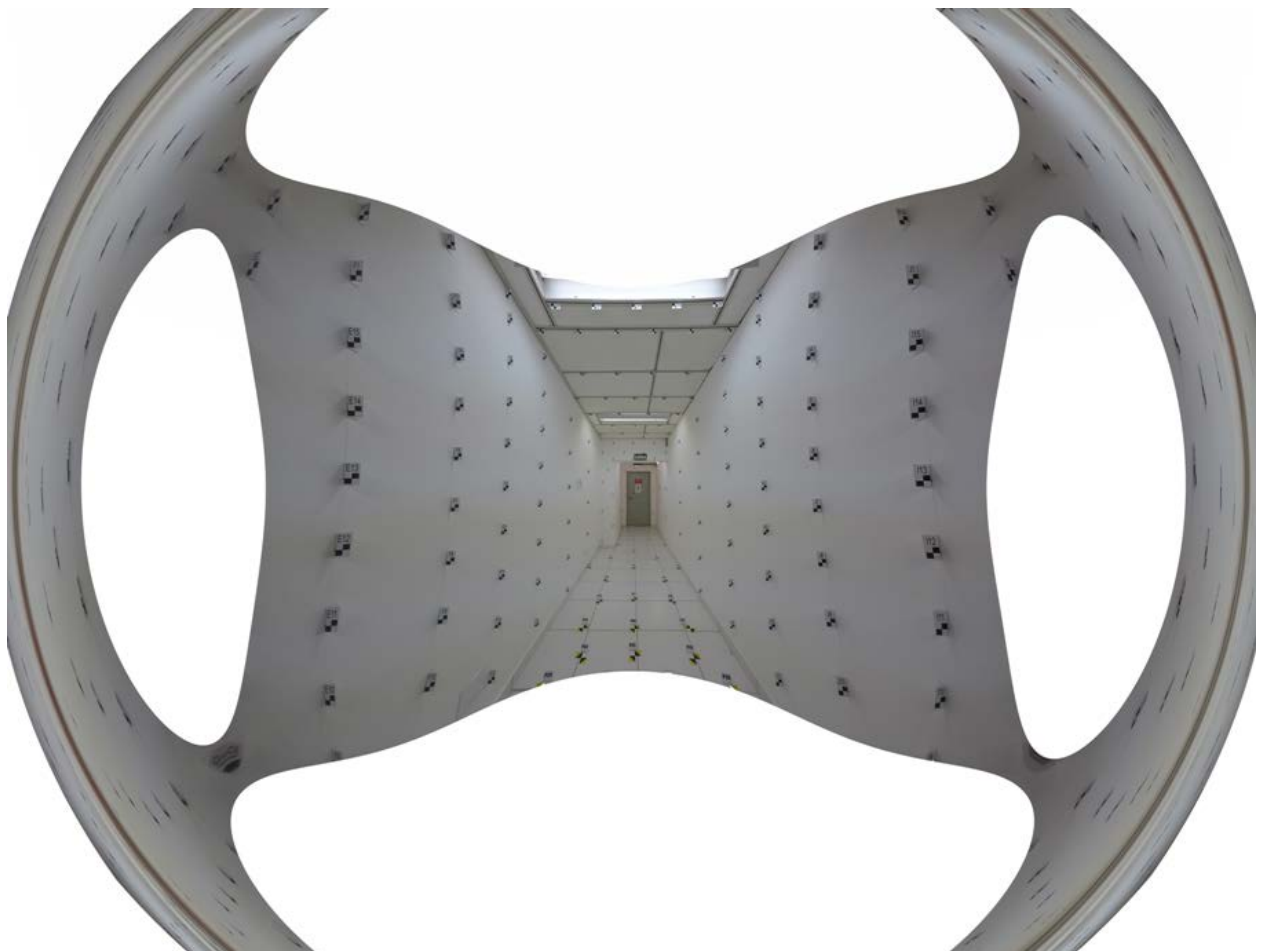
Reprojeção dos marcos



Erros da reprojeção



D.2.6 – Imagem sem correção e após correção pelo CALIBRA com modelo do MATLAB



D.3 – CALIBRAÇÃO DA CÂMERA GOPRO NO MODO WIDE NO CAMPO 3D DO IEAV COM SOFTWARE CALIBRA, UTILIZANDO MODELO DE DISTORÇÃO COMPLETO 6K

D.3.1 – Resultados da calibração – parâmetros de distorção

Distância Focal Nominal: $f = 2.6596$ mm

Distância Focal Calibrada: $f_c = 2.658$ mm
 $\sigma_{f_c} = 0.00378$ mm

Tamanho do Pixel: [1.543 x 1.517] micrometros

Tamanho Nominal do Sensor: [6.17 x 4.55] mm

Crop Factor: 5.64

Focal Equivalente: $f_{35} = 15.002$ mm

Abertura Angular: FOV = [133.1 125.5 143.3] graus

Distorção Radial: $K = [0.0116949 \quad -0.053105 \quad -0.284005 \quad 0.166662 \quad -0.0392797$
 $0.00342518]$

$\sigma_K = [0.003142 \quad 0.01216 \quad 0.01674 \quad 0.0103 \quad 0.002876 \quad 0.000296]$

Distorção Tangente: $T = [-0.00012064 \quad -0.000260328 \quad -0.177885 \quad 0.0115032]$

$\sigma_T = [8.824e-05 \quad 0.0001258 \quad 0.1061 \quad 0.009633]$

Afinidade: $a = [1737.5 \quad 1738]$ pixels

$\sigma_a = [2.49 \quad 2.45]$ pixels

Cisalhamento (Skew): $s = -1.24$

$\sigma_s = 0.651$

Ponto Principal: $c = [1975 \quad 1510.8]$ pixels

$\sigma_c = [4.18 \quad 8.23]$ pixels

Tamanho da Imagem: [4000 x 3000] pixels

Apontamento da Câmera no Campo: Azim, Elev, Rot = [-1.8 3.5 -0.284]

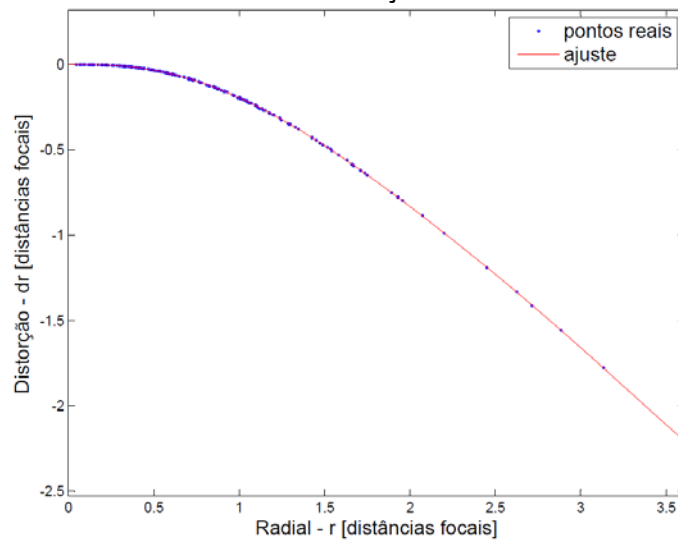
$\sigma_{Azim}, \sigma_{Elev}, \sigma_{Rot} = [0.134 \quad 0.264 \quad 0.0175]$

Posição da Câmera no Campo: $X_c, Y_c, Z_c = [-0.0145 \quad 3.28 \quad 1.28]$

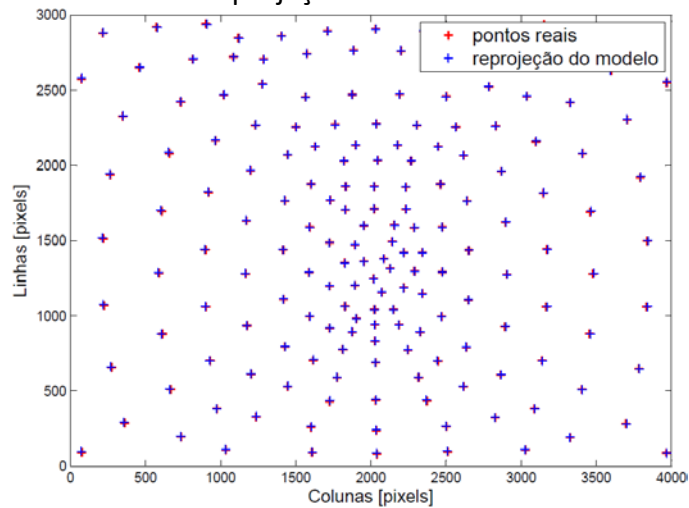
$\sigma_{X_c}, \sigma_{Y_c}, \sigma_{Z_c} = [0.00141 \quad 0.00928 \quad 0.00149]$

D.3.2 – Análise dos erros da calibração pelo CALIBRA com modelo de distorção Completo 6K

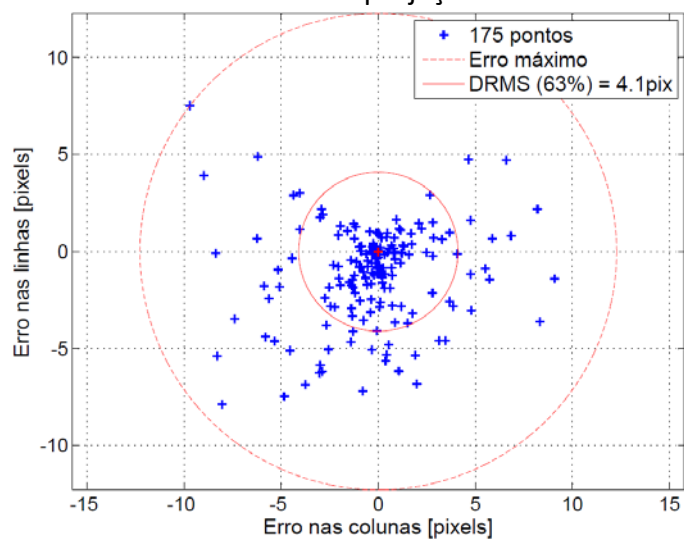
Curva de distorção radial



Reprojeção dos marcos



Erros da reprojeção

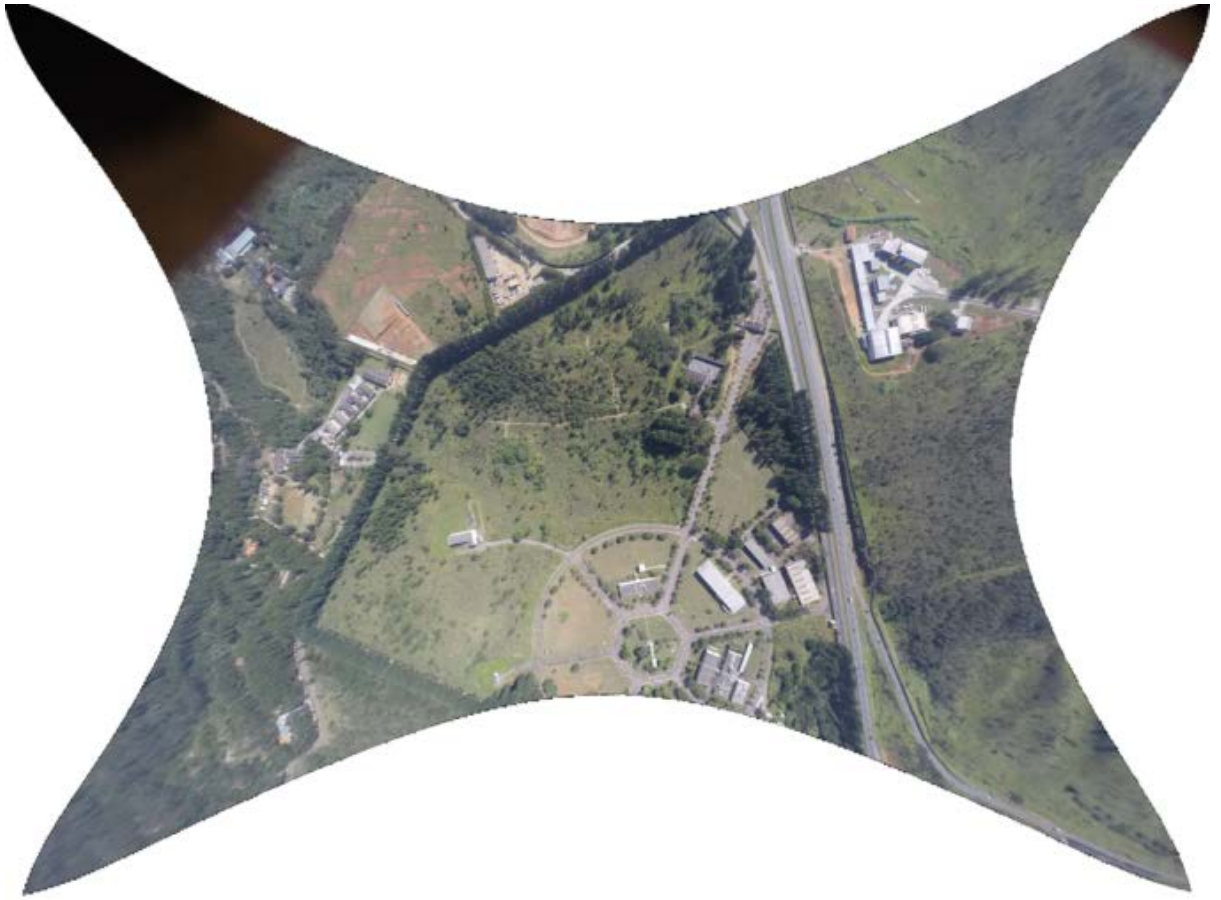


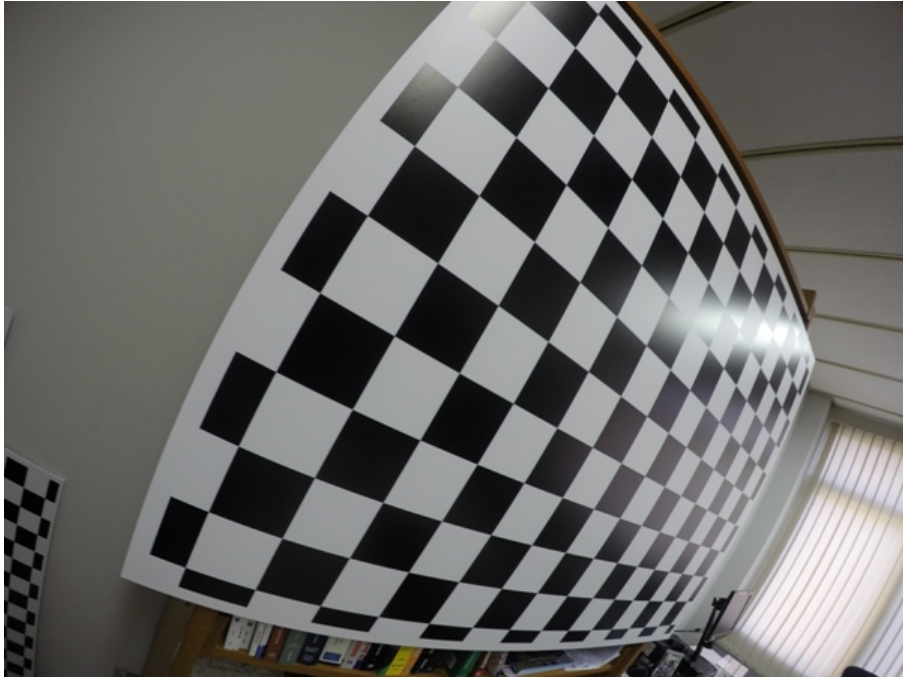
D.3.3 – Imagem sem correção e após correção pelo CALIBRA com modelo Completo 6K



APÊNDICE E
ILUSTRAÇÃO DA CORREÇÃO GEOMÉTRICA DE IMAGENS AÉREAS E
TERRESTRES DA CÂMERA GOPRO













APÊNDICE F
CALIBRAÇÃO DA CÂMERA FC330 DO VANT PHANTOM4 NO SOFTWARE
PIX4D EM COMPARAÇÃO COM O SOFTWARE CALIBRA

F.1 – CALIBRAÇÃO *ON THE JOB* DA CÂMERA FC330 DO VANT PHANTOM4 NO PROCESSO DE GERAÇÃO DO ORTOFOTOMOSAICO DO IEAV COM O *SOFTWARE* PIX4D

Os resultados da calibração estão no item *Internal Camera Parameters* do *Quality Report* do Pix4D a seguir

INTENCIONALMENTE EM BRANCO

Quality Report



Generated with Pix4Ddiscovery 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	2017-08-15 10:46:59
Camera Model Name(s)	FC330_3.6_4000x3000 (RGB)
Average Ground Sampling Distance (GSD)	3.57 cm / 1.4 in
Area Covered	1.2084 km ² / 120.839 ha / 0.4668 sq. mi. / 298.753 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	3.03% relative difference between initial and optimized internal camera parameters	
Matching	median of 9811.2 matches per calibrated image	
Georeferencing	yes, 14 GCPs (14 3D), mean RMS error = 0.037 m	

Preview

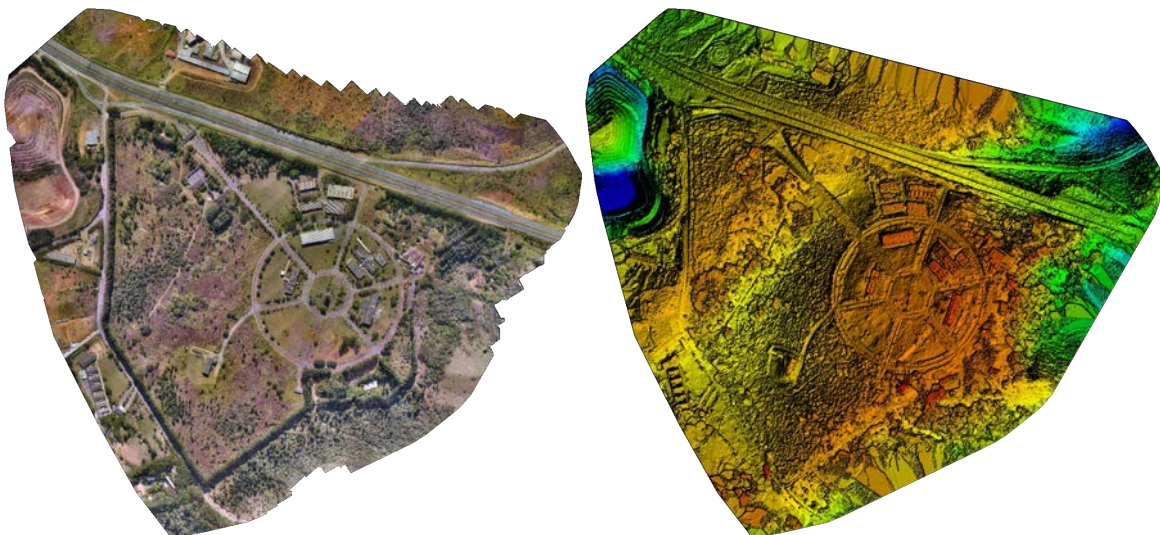


Figure 1: Orthomosaic and the corresponding sparse Digital Surface Model (DSM) before densification.

Calibration Details



Number of Calibrated Images	989 out of 990
-----------------------------	----------------

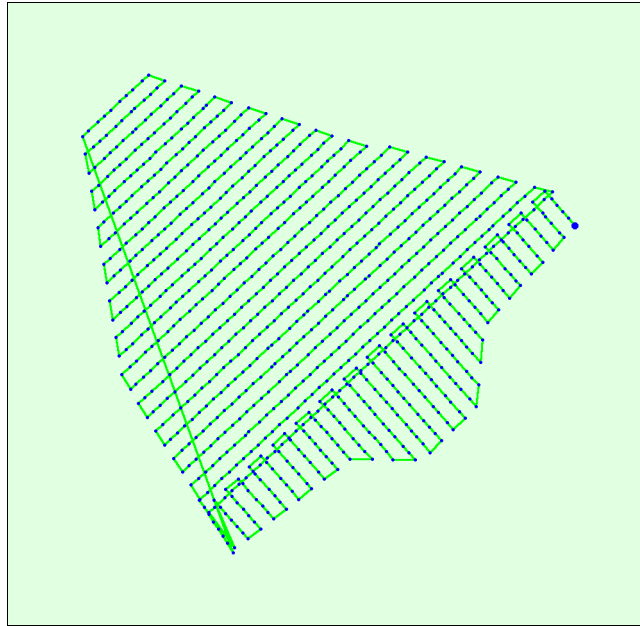
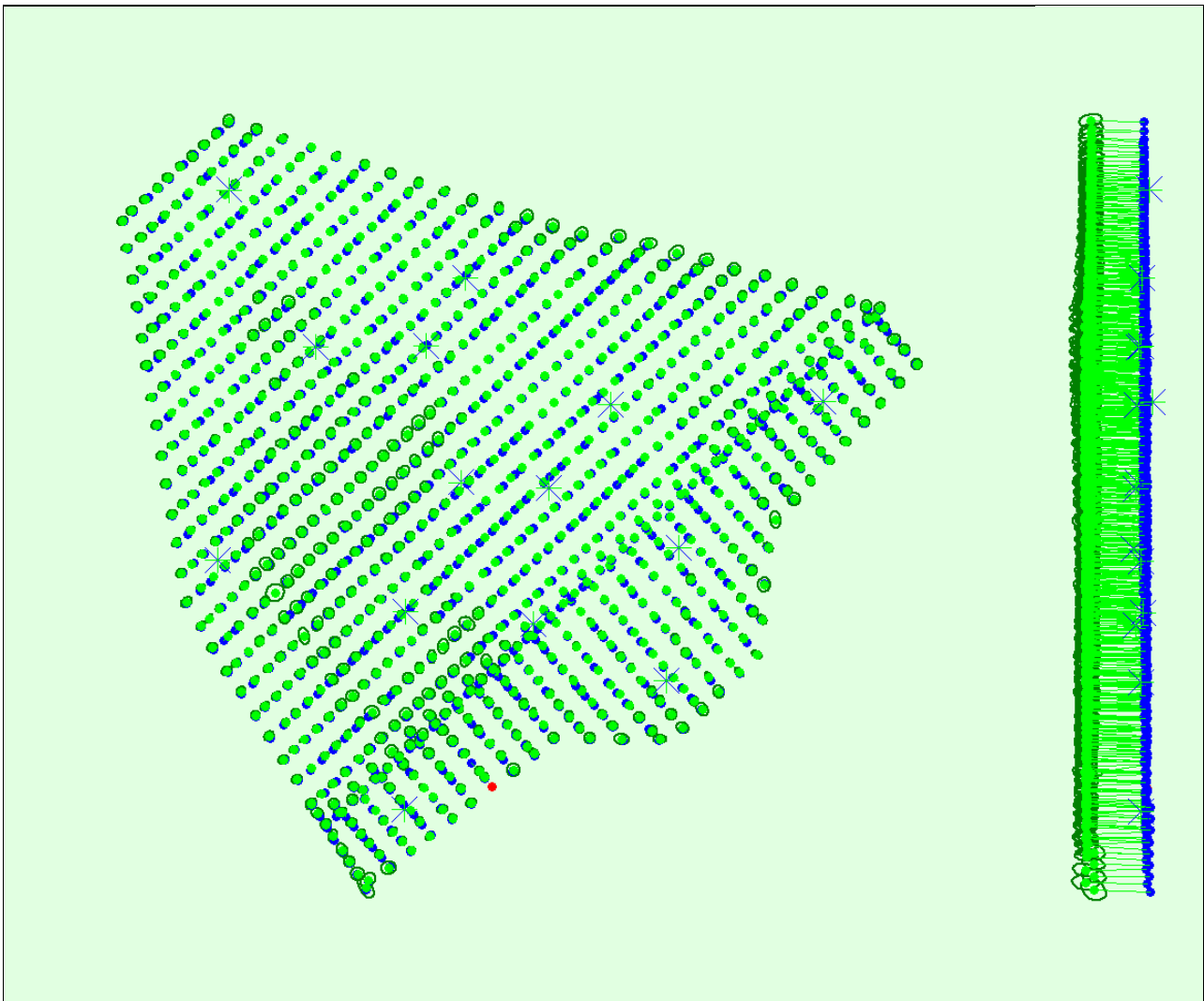
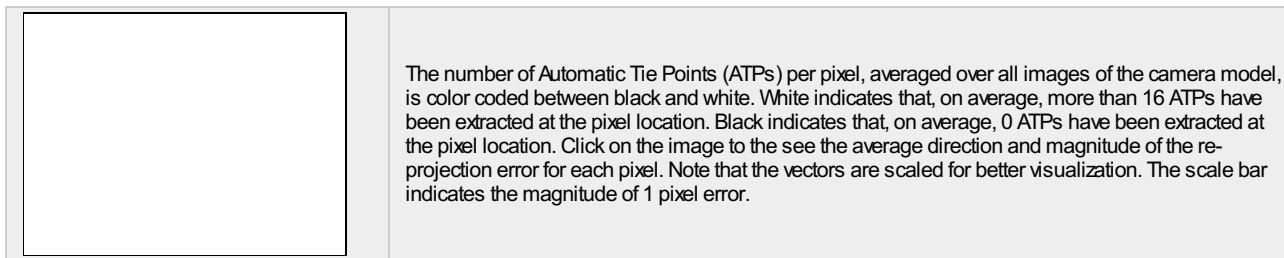
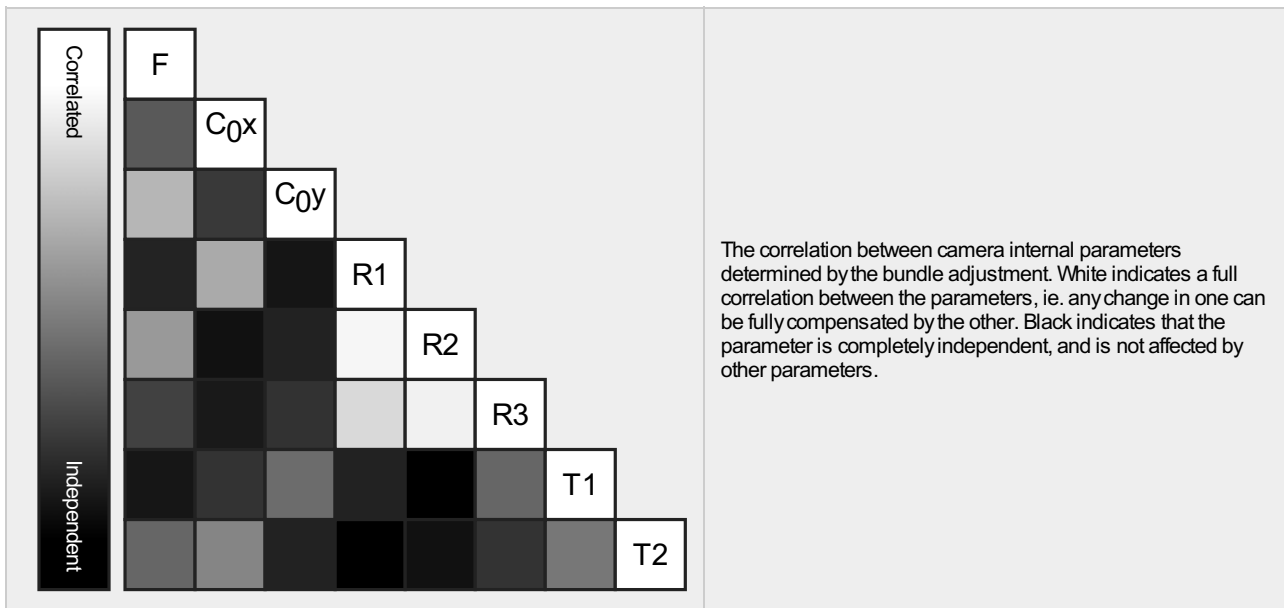
? Initial Image Positions

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.

? Computed Image/GCPs/Manual Tie Points Positions

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	2355.170 [pixel] 3.720 [mm]	2014.913 [pixel] 3.182 [mm]	1513.848 [pixel] 2.391 [mm]	-0.006	0.000	0.011	0.001	0.000
Uncertainties (Sigma)	4.236 [pixel] 0.007 [mm]	0.212 [pixel] 0.000 [mm]	0.234 [pixel] 0.000 [mm]	0.000	0.001	0.000	0.000	0.000



2D Keypoints Table

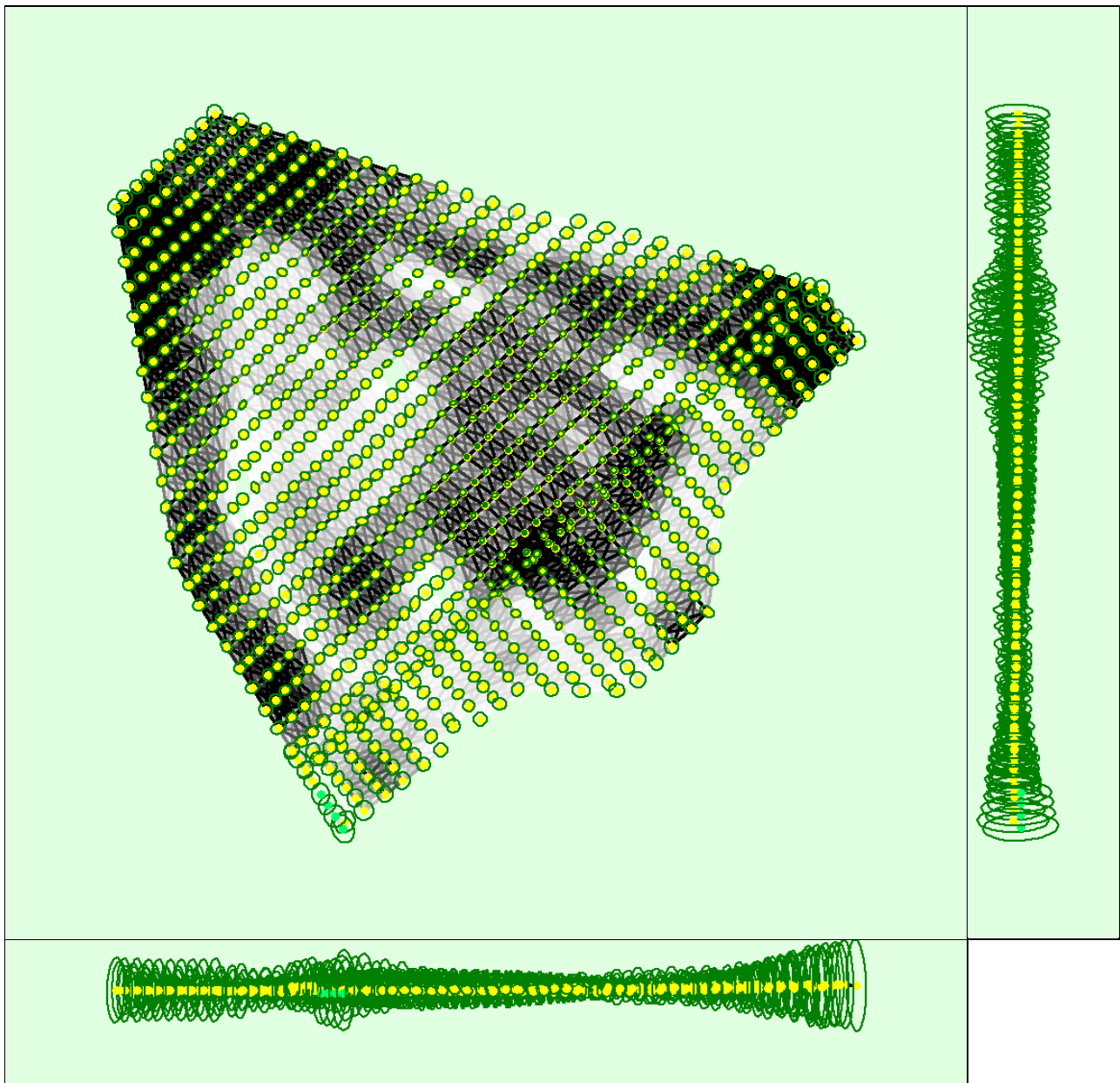
	Number of 2D Keypoints per Image	Number of Matched 2D Keypoints per Image
Median	51975	9811
Min	24275	569
Max	70418	28932
Mean	50156	10194

3D Points from 2D Keypoint Matches

	Number of 3D Points Observed
In 2 Images	2555902
In 3 Images	548899
In 4 Images	210816
In 5 Images	107619
In 6 Images	66113
In 7 Images	44192
In 8 Images	31383
In 9 Images	22829
In 10 Images	16766
In 11 Images	12201
In 12 Images	8960
In 13 Images	6296
In 14 Images	4706
In 15 Images	3529
In 16 Images	2451

In 17 Images	1758
In 18 Images	1211
In 19 Images	810
In 20 Images	583
In 21 Images	425
In 22 Images	321
In 23 Images	306
In 24 Images	234
In 25 Images	203
In 26 Images	157
In 27 Images	139
In 28 Images	99
In 29 Images	98
In 30 Images	58
In 31 Images	47
In 32 Images	27
In 33 Images	8
In 34 Images	4
In 35 Images	3
In 36 Images	2

2D Keypoint Matches



Uncertainty ellipses 100x magnified

Number of matches

25 222 444 666 888 1111 1333 1555 1777 2000

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	0.088	0.087	0.207	0.077	0.070	0.020
Sigma	0.025	0.026	0.126	0.029	0.027	0.006

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
GCP05 (3D)	0.006/ 0.010	0.032	0.021	-0.007	0.540	12 / 12
GCP07 (3D)	0.006/ 0.008	0.004	0.010	0.004	0.732	16 / 16
GCP09 (3D)	0.006/ 0.011	-0.009	-0.005	0.005	0.837	30 / 30
16 (3D)	0.006/ 0.011	0.021	-0.052	-0.009	0.570	16 / 16
19 (3D)	0.005/ 0.008	0.000	0.082	-0.022	0.845	12 / 12
27 (3D)	0.006/ 0.009	-0.018	0.006	-0.000	0.675	12 / 12
30 (3D)	0.006/ 0.009	-0.008	0.009	-0.006	0.535	19 / 19
33 (3D)	0.007/ 0.010	-0.063	0.000	0.014	0.769	12 / 12
35 (3D)	0.005/ 0.011	0.001	0.004	-0.001	0.863	19 / 19
38 (3D)	0.007/ 0.009	-0.017	0.010	0.006	0.427	13 / 13
45 (3D)	0.006/ 0.012	0.026	0.028	0.001	0.416	11 / 11
47 (3D)	0.008/ 0.018	0.000	0.000	0.000	n/a	0 / 16
48 (3D)	0.007/ 0.016	0.018	-0.022	-0.009	0.705	11 / 11
49 (3D)	0.009/ 0.020	0.118	-0.078	0.008	0.923	16 / 16
52 (3D)	0.012/ 0.026	-0.188	-0.069	-0.027	0.795	12 / 12
Mean [m]		-0.005925	-0.003984	-0.003062		
Sigma [m]		0.063187	0.039696	0.010878		
RMS Error [m]		0.063464	0.039895	0.011301		

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	0.2309	0.0050	0.0253	0.9558	11 / 11
GCP01	0.0060/0.0110	0.0578	-0.0160	0.0687	0.5298	11 / 11
GCP02	0.0050/0.0090	-0.0306	-0.5221	-0.2882	0.9749	16 / 16
GCP03	0.0060/0.0090	-0.4731	0.2199	-0.2085	0.7294	13 / 13
GCP04	0.0060/0.0080	-0.1594	0.2598	-0.0722	0.8169	12 / 12
GCP06	0.0060/0.0110	-0.1263	0.0682	0.1769	0.5198	17 / 17
GCP08	0.0060/0.0090	0.0884	0.0510	0.0776	0.8357	15 / 15
2	0.0040/0.0110	0.1515	-0.1920	-0.0411	0.3666	8 / 8
3	0.0040/0.0110	0.1860	-0.3021	-0.1121	1.0683	14 / 14
4	0.0040/0.0110	0.2234	-0.2407	-0.0703	0.9999	13 / 13
5	0.0050/0.0110	0.1545	-0.1052	0.0211	0.8441	11 / 11
6	0.0050/0.0120	0.0651	-0.0176	-0.0106	0.5594	10 / 10
7	0.0050/0.0120	-0.0072	-0.0762	-0.0310	0.5173	10 / 10
8	0.0050/0.0120	0.0633	-0.2174	-0.0574	0.7510	12 / 12
9	0.0060/0.0130	0.1673	-0.3820	-0.1719	1.4008	15 / 15
10	0.0060/0.0120	0.2233	-0.2468	0.0321	1.2747	17 / 17

11	0.0060/0.0120	0.2414	-0.1326	-0.0301	1.3848	15 / 15
12	0.0050/0.0110	0.1774	0.0677	-0.0164	0.9406	11 / 11
13	0.0050/0.0100	-0.0872	0.0917	0.0111	0.7942	11 / 11
14	0.0060/0.0120	-0.0691	-0.1017	-0.0146	0.8418	11 / 11
15	0.0050/0.0100	-0.1001	-0.2873	-0.1169	0.7599	12 / 12
17	0.0090/0.0090	0.0574	-0.1362	0.0410	0.6706	17 / 17
18	0.0060/0.0100	0.4511	0.2075	0.1505	0.8641	11 / 11
20	0.0060/0.0100	-0.2542	0.0720	-0.0002	0.7396	11 / 11
21	0.0060/0.0100	-0.5187	-0.0582	-0.0068	0.4062	15 / 15
22	0.0060/0.0110	-0.5219	0.0783	-0.0788	0.8247	9 / 9
23	0.0060/0.0100	-0.0038	-0.3872	-0.1873	0.8297	17 / 17
24	0.0050/0.0080	-0.0332	0.0404	0.0618	0.3063	14 / 14
25	0.0060/0.0100	0.0432	-0.0655	-0.0566	0.9463	17 / 17
26	0.0050/0.0090	0.2803	0.1926	-0.0049	0.6471	15 / 15
28	0.0060/0.0090	-0.1894	-0.0243	0.1827	0.7882	16 / 16
29	0.0050/0.0090	0.0475	-0.0266	0.0675	0.8155	12 / 12
31	0.0050/0.0080	0.2981	0.5161	0.0243	0.5940	12 / 12
32	0.0060/0.0090	-0.1095	-0.1453	0.4050	0.6103	13 / 13
34	0.0080/0.0140	-0.2263	-0.1308	0.0815	0.7628	16 / 16
36	0.0070/0.0070	-0.9099	-1.2022	0.9153	0.3801	11 / 11
37	0.0060/0.0130	-0.1631	-0.0444	0.0764	0.4628	13 / 13
39	0.0040/0.0080	-0.0336	0.3113	0.2876	0.4798	14 / 14
40	0.0060/0.0120	-0.1640	0.3310	-0.4134	0.4767	16 / 16
41	0.0060/0.0090	0.4998	0.9097	-0.4902	0.4585	18 / 18
42	0.0060/0.0090	0.2761	0.3781	-0.1439	0.3098	18 / 18
43	0.0060/0.0090	0.0769	-0.0153	0.0479	0.4642	14 / 14
44	0.0060/0.0100	0.3005	0.2422	-0.0359	0.3621	11 / 11
46	0.0100/0.0220	0.1374	-0.3876	-0.1905	0.9107	16 / 16
50	0.0090/0.0210	0.2359	0.2137	-0.0102	0.7373	12 / 12
51	0.0120/0.0250	-0.1843	0.3817	-0.0350	0.7519	14 / 14
1	0.0040/0.0110	0.0923	-0.0885	-0.0124	0.6592	10 / 10
Mean [m]		0.009821	-0.019439	-0.003263		
Sigma [m]		0.259382	0.311702	0.202381		
RMS Error [m]		0.259568	0.312308	0.202407		

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	0.10	0.00	0.20
-12.00	-9.00	0.00	0.00	1.72
-9.00	-6.00	4.35	2.73	19.92
-6.00	-3.00	15.77	17.29	8.70
-3.00	0.00	29.02	30.43	17.80
0.00	3.00	30.54	29.83	12.13
3.00	6.00	15.98	15.27	26.69
6.00	9.00	4.25	4.35	12.84
9.00	12.00	0.00	0.00	0.00
12.00	15.00	0.00	0.00	0.00
15.00	-	0.00	0.10	0.00
Mean [m]		-0.142669	-1.743121	-89.228239
Sigma [m]		3.438097	3.377040	5.258166
RMS Error [m]		3.441056	3.800378	89.383035

Min Error and Max Error represent geolocation error intervals between -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 initial 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]	-0.142669	-1.743121	-89.228239

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]	80.59	82.20	99.60
[-2.00, 2.00]	99.90	99.90	100.00
[-3.00, 3.00]	100.00	99.90	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	1.479
Phi	1.032
Kappa	6.474

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 / UTMzone 23S (egm96)
Output Coordinate System	WGS84 / UTMzone 23S (egm96)

Processing Options

Detected Template	3D Maps
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

DSM, Orthomosaic and Index Details

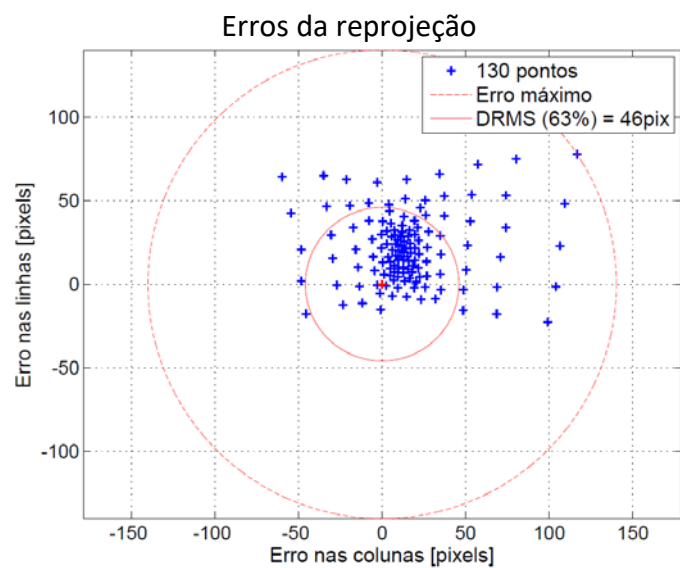
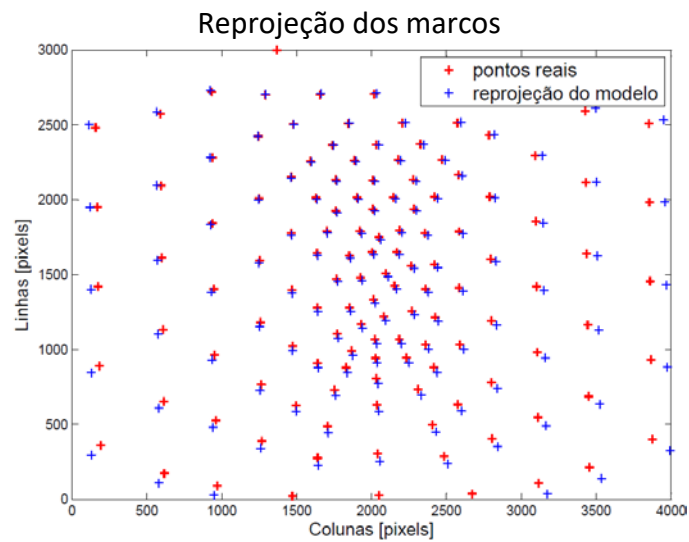
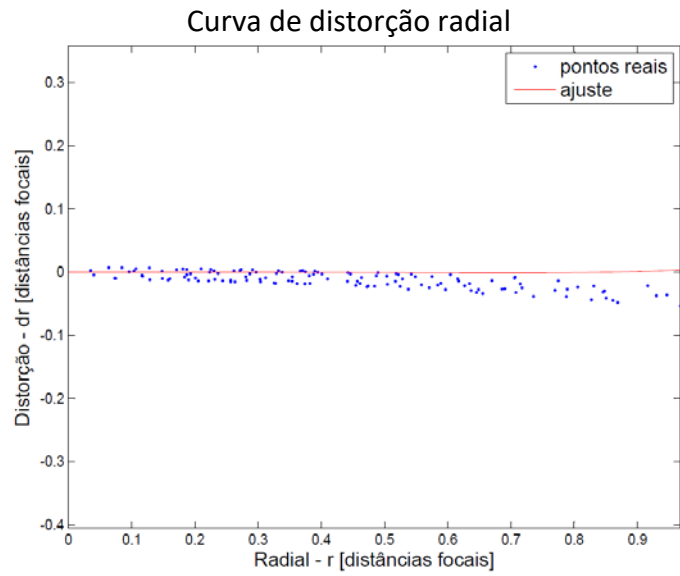


Processing Options



DSM and Orthomosaic Resolution	1 x GSD (3.58 [cm/pixel])
DSM Filters	Noise Filtering: yes Surface Smoothing: yes, Type: Sharp

F.1.1 – Análise dos erros da calibração do Pix4D com a orientação externa da calibração no campo do IEAv (item F.3)



F.2 – CALIBRAÇÃO DA CÂMERA FC330 DO VANT PHANTOM4 NO CAMPO 3D DO IEAV COM SOFTWARE CALIBRA, UTILIZANDO MODELO DE DISTORÇÃO DO PIX4D

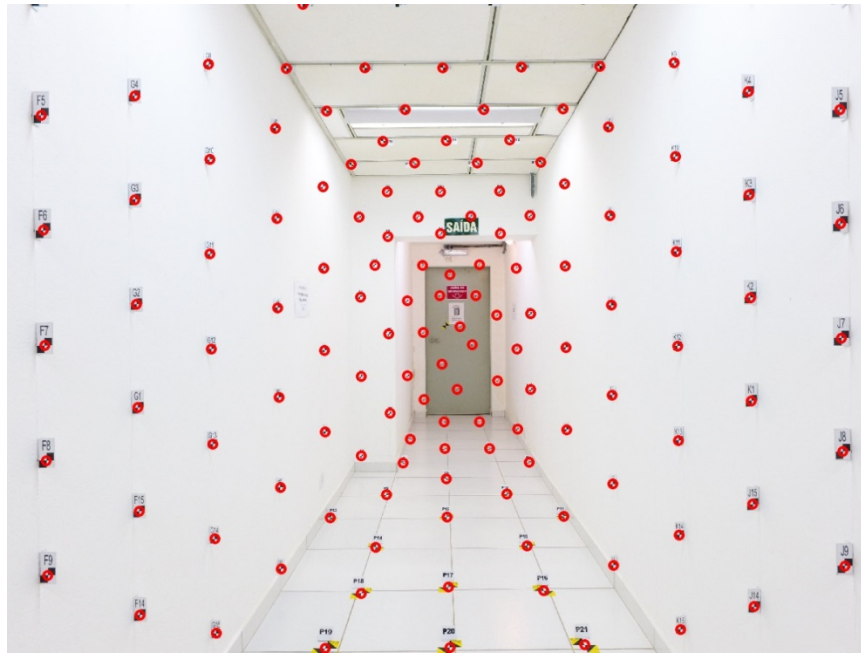
F.2.1 – Posicionamento no campo de calibração 3D do IEAv



F.2.2 - Imagem do campo obtida com a câmera FC330 do Phantom4



F.2.3 – Pontos de referência capturados para calibração



F.2.4 – Resultados da calibração – parâmetros de distorção

Distância Focal Nominal: $f = 3.6125 \text{ mm}$

Distância Focal Calibrada: $f_c = 3.5266 \text{ mm}$
 $\sigma_{f_c} = 0.00654 \text{ mm}$

Tamanho do Pixel: [1.543 x 1.517] micrometros

Tamanho Nominal do Sensor: [6.17 x 4.55] mm

Crop Factor: 5.64

Focal Equivalente: $f_{35} = 19.903 \text{ mm}$

Abertura Angular: FOV = [77.42 66.52 92] graus

Distorção Radial: $K = [-0.0259984 \quad -0.0171228 \quad 0.0156068]$
 $\sigma_K = [0.008218 \quad 0.02684 \quad 0.02088]$

Distorção Tangente: $T = [-0.00145406 \quad 0.00252928]$
 $\sigma_T = [0.0002091 \quad 0.0002613]$

Focal Normalizada: $a = 2305.6 \text{ pixels}$
 $\sigma_a = 4.28 \text{ pixels}$

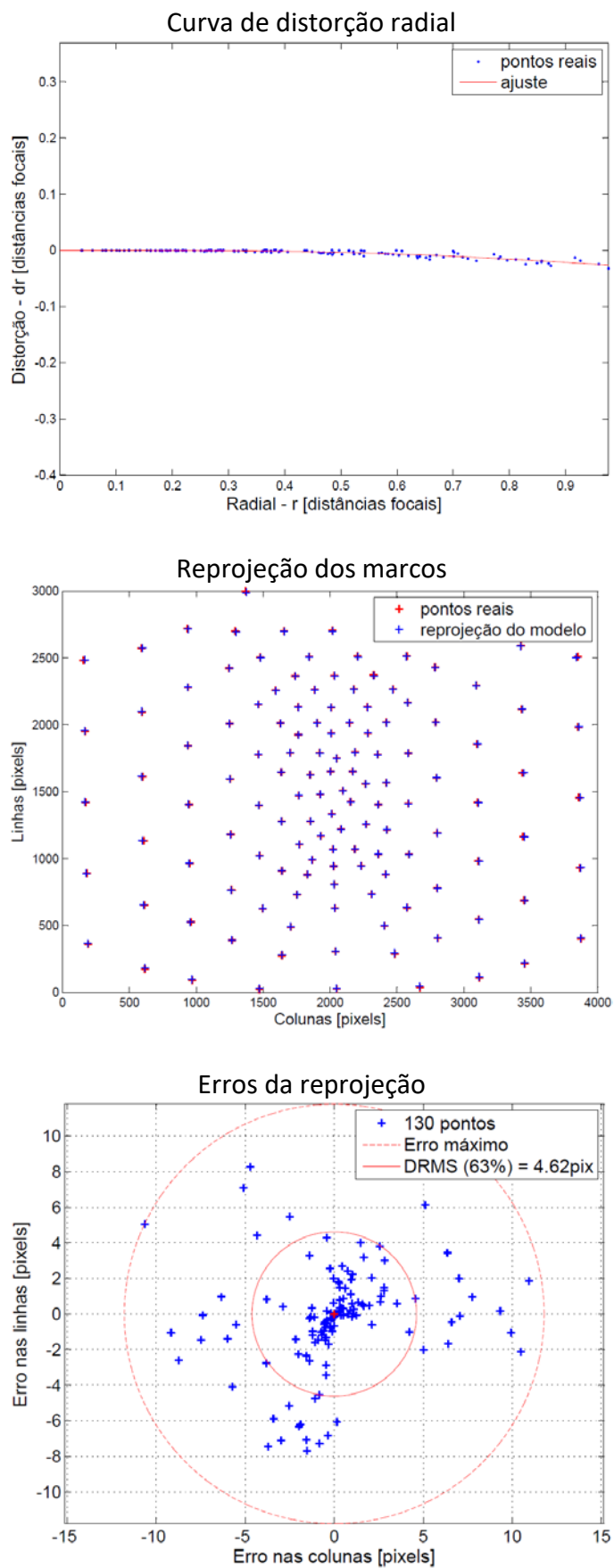
Ponto Principal: $c = [2006.2 \quad 1480.5] \text{ pixels}$
 $\sigma_c = [7.51 \quad 14.8] \text{ pixels}$

Tamanho da Imagem: [4000 x 3000] pixels

Apontamento da Câmera no Campo: Azim, Elev, Rot = [-0.519 0.579 0.371]
 $\sigma_{\text{Azim}}, \sigma_{\text{Elev}}, \sigma_{\text{Rot}} = [0.181 \quad 0.358 \quad 0.0159]$

Posição da Câmera no Campo: $X_c, Y_c, Z_c = [-0.00513 \quad 3.06 \quad 1.24]$
 $\sigma_{X_c}, \sigma_{Y_c}, \sigma_{Z_c} = [0.00182 \quad 0.013 \quad 0.00192]$

F.2.5 – Análise dos erros da calibração pelo CALIBRA com modelo de distorção do Pix4D



F.3 – CALIBRAÇÃO DA CÂMERA FC330 DO VANT PHANTOM4 NO CAMPO 3D DO IEAV COM SOFTWARE CALIBRA, UTILIZANDO MODELO DE DISTORÇÃO COMPLETO 4K

F.3.1 – Resultados da calibração – parâmetros de distorção

Distância Focal Nominal: $f = 3.6125$ mm

Distância Focal Calibrada: $f_c = 3.5286$ mm
 $\sigma_{f_c} = 0.00658$ mm

Tamanho do Pixel: [1.543 x 1.517] micrometros

Tamanho Nominal do Sensor: [6.17 x 4.55] mm

Crop Factor: 5.64

Focal Equivalente: $f_{35} = 19.915$ mm

Abertura Angular: FOV = [77.42 66.52 92] graus

Distorção Radial: $K = [-0.0182078 \quad -0.0360072 \quad 0.052082 \quad -0.0206222]$
 $\sigma_K = [0.01427 \quad 0.08183 \quad 0.1457 \quad 0.08117]$

Distorção Tangente: $T = [-0.00199523 \quad 0.000912822 \quad 0.181708 \quad -0.326958]$
 $\sigma_T = [0.0009561 \quad 0.0004517 \quad 1.799 \quad 1.591]$

Afinidade: $a = [2304.9 \quad 2308.9]$ pixels
 $\sigma_a = [4.38 \quad 4.22]$ pixels

Cisalhamento (Skew): $s = -1.92$
 $\sigma_s = 0.912$

Ponto Principal: $c = [2003.7 \quad 1494.3]$ pixels
 $\sigma_c = [7.57 \quad 14.9]$ pixels

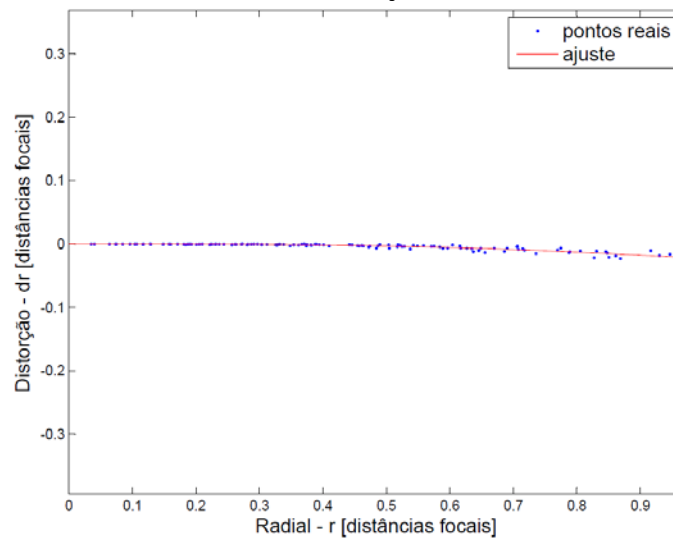
Tamanho da Imagem: [4000 x 3000] pixels

Apontamento da Câmera no Campo: Azim, Elev, Rot = [-0.58 0.246 0.381]
 $\sigma_{Azim}, \sigma_{Elev}, \sigma_{Rot} = [0.183 \quad 0.361 \quad 0.0162]$

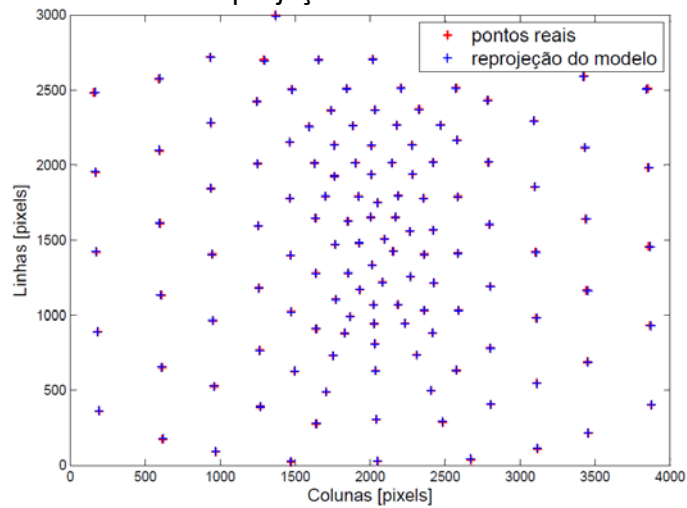
Posição da Câmera no Campo: $X_c, Y_c, Z_c = [-0.00544 \quad 3.06 \quad 1.24]$
 $\sigma_{X_c}, \sigma_{Y_c}, \sigma_{Z_c} = [0.00184 \quad 0.0131 \quad 0.00191]$

F.3.2 – Análise dos erros da calibração pelo CALIBRA com modelo de distorção completo 4K

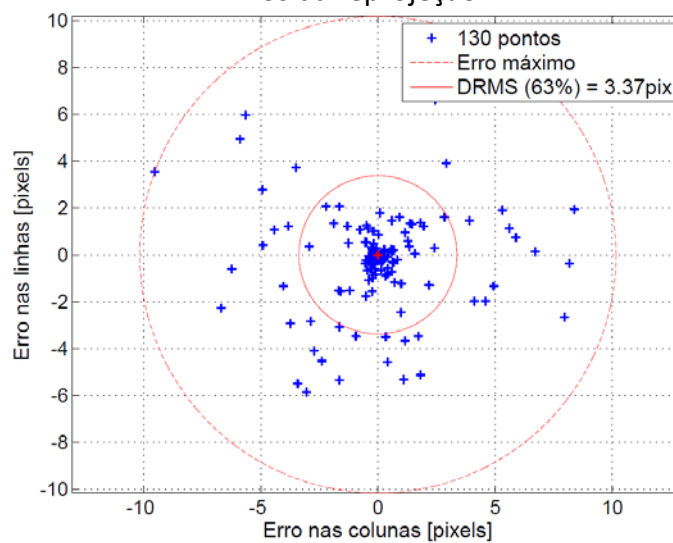
Curva de distorção radial



Reprojeção dos marcos



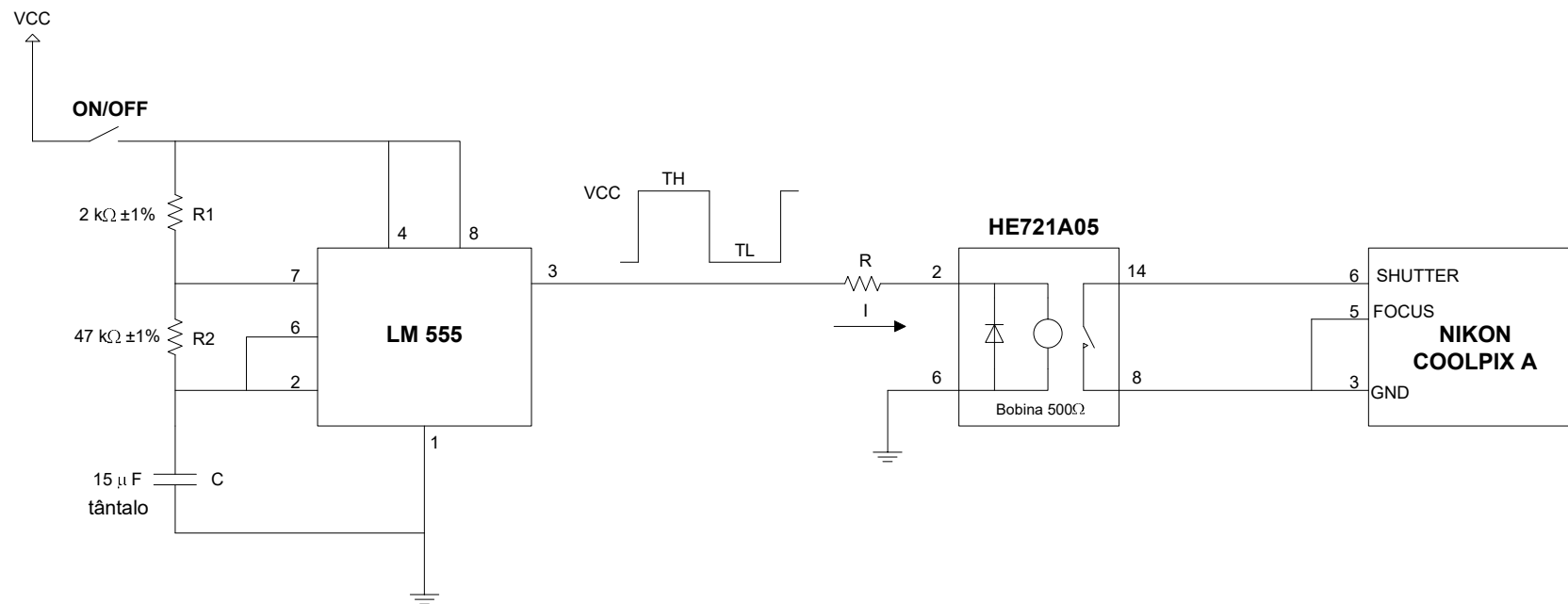
Erros da reprojeção



APÊNDICE G

DETALHES DO PROCEDIMENTO DE SINCRONISMO

(Esquema elétrico do circuito e Equacionamento dos atrasos de tempo)



$$TL = 0,693 \cdot R2 \cdot C, \quad [\Omega] \text{ e } [F]$$

$$TH = 0,693 \cdot C \cdot (R1+R2), \quad T=TH+TL, \quad f=1/T$$

R – dimensionar de acordo com VCC observando I min

Limites: $(R1+R2) \leq 3M\Omega$

$R1, R2 \geq 1k\Omega$

$500pF \leq C \leq 2200\mu F$

f máx = 1MHz

VCC máx = 18VDC

VCC min = +3,5VDC

I min = 7,5mA

IEAv – Instituto de Estudos Avançados

Projeto: PITER – Processamento de Imagens em Tempo Real

Descrição: Circuito de disparo intervalado da câmera Nikon em voo

Elaboração: Leandro Roberto – Maj Eng

Id: 494 246 COMAER

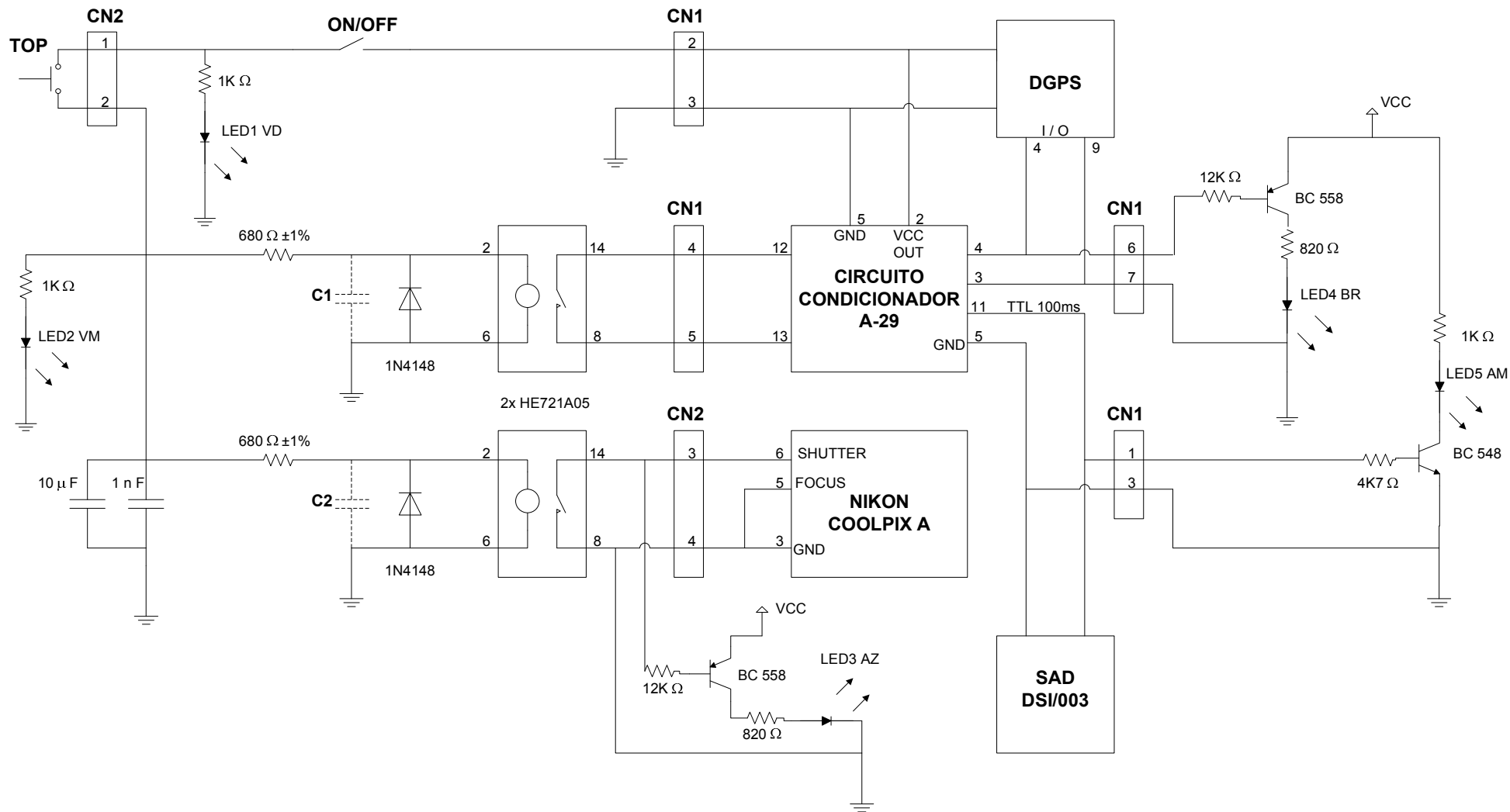
Aprovação: Dr. Ricardo Teixeira de Carvalho

RG: 50554813-6

Tamanho: A4

Data: 06/10/2017

Folha: 1/1



Esta configuração será utilizada somente para sincronismo no solo, voltando à configuração original do SAD para o voo. Ou seja, a câmera vai funcionar em *stand alone* com disparo intervalado programado

VCC = +12VDC (fornecida pelo circuito condicionador)

C1 e C2 Serão colocados de acordo com a defasagem de tempo entre os canais, se houver.

IEAv – Instituto de Estudos Avançados

Projeto: PITER – Processamento de Imagens em Tempo Real

Descrição: Circuito de disparo de câmera com marcação de evento no SAD

Elaboração: Leandro Roberto – Maj Eng

Id: 494 246 COMAER

Aprovação: Dr. Ricardo Teixeira de Carvalho

RG: 50554813-6

Tamanho: A4

Data: 17/04/2017

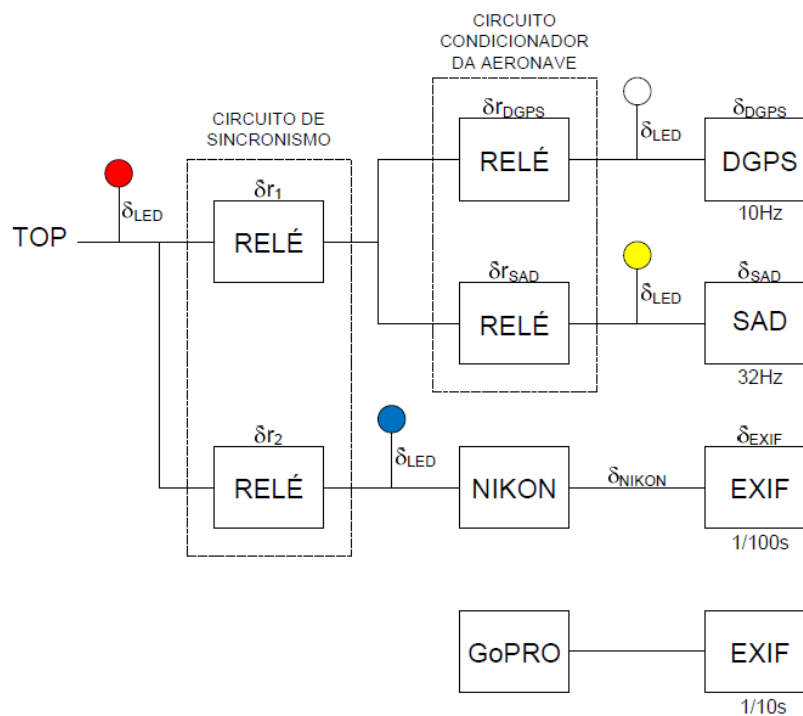
Folha: 1/1

EQUACIONAMENTO DO SINCRONISMO

O procedimento de sincronismo, realizado conforme metodologia apresentada no item 3.4, teve como objetivo levantar com resolução de milissegundos as defasagens das bases de tempo das câmeras Nikon e GoPRO e do SAD em relação à base de tempo UTC do receptor GNSS geodésico. Neste ANEXO estão apresentados em detalhe os atrasos de tempo de cada componente do circuito de sincronismo e dos dispositivos a ele conectados. Com isso foi possível chegar aos resultados apresentados no item 4.2.

A nomenclatura de todos os atrasos de tempo estão indicados na Figura G.1 e descritos ao longo do desenvolvimento das equações nas Tabelas correspondentes.

Figura G.1 – Diagrama com indicação do atraso de tempo em cada componente do circuito de sincronismo, do circuito condicionador e dos dispositivos a eles conectados.



Fonte: Produção do Autor.

A Tabela G.1 apresenta a definição de algumas nomenclaturas indicadas na Figura G.1 e de outras usadas na Equação G.1 dos tempos da Nikon.

$$t_{NIKON} = \delta_{NIKON} + \delta_{EXIF} + \delta_{r2} + [t_{TOP}]_{NIKON} \quad (G.1)$$

Tabela G.1 – Definição das nomenclaturas dos tempos da câmera Nikon.

t_{NIKON}	horário em que a foto foi registrada na câmera NIKON, segundo sua base de tempo
$[t_{\text{NIKON}}]_{\text{UTC}}$	horário em que a foto foi registrada na câmera NIKON, segundo a base de tempo UTC
Δt_{NIKON}	defasagem da base de tempo da câmera NIKON para com a base de tempo UTC
δ_{NIKON}	atraso entre a câmera Nikon receber o comando de disparo e efetivamente registrar a foto. Medido 0 valor de 65ms no sincronismo com base nos quadros da câmera de alta velocidade
δ_{EXIF}	erro de discretização do horário de registro da foto, função da velocidade de abertura do diafragma (até 1 centésimo de segundo)
δ_{r2}	atraso do relé de acionamento da câmera NIKON no circuito de sincronismo. Foi medido com osciloscópio o valor de 244 μs .
$[t_{\text{TOP}}]_{\text{NIKON}}$	horário em que foi marcado o evento TOP no circuito de sincronismo, segundo a base de tempo da Câmera NIKON

A Tabela G.2 apresenta a definição de algumas nomenclaturas indicadas na Figura G.1 e de outras usadas na Equação G.2 dos tempos do SAD da aeronave.

$$t_{\text{SAD}} = \delta_{\text{SAD}} + \delta_{r\text{SAD}} + \delta_{r1} + [t_{\text{TOP}}]_{\text{SAD}} \quad (\text{G.2})$$

Tabela G.2 – Definição das nomenclaturas dos tempos do SAD da aeronave.

t_{SAD}	horário em que o evento foi registrado no SAD, segundo sua base de tempo
$[t_{\text{SAD}}]_{\text{UTC}}$	horário em que o evento foi registrado no SAD, segundo a base de tempo UTC
Δt_{SAD}	defasagem da base de tempo do SAD para com a base de tempo UTC
δ_{SAD}	erro de discretização do horário de registro do evento no SAD. Considerado metade o valor médio de 15,625 ms verificado em vários eventos (valor é praticamente metade da amostragem – 1/32 de segundo)
$\delta_{r\text{SAD}}$	atraso do relé do circuito condicionador que aciona o SAD. Foi medido com osciloscópio o valor de 240 μs .
δ_{r1}	atraso do relé do circuito de sincronismo que aciona o circuito condicionador, o qual aciona o SAD. Foi medido com osciloscópio o valor de 230 μs .
$[t_{\text{TOP}}]_{\text{SAD}}$	horário em que foi marcado o evento TOP no circuito de sincronismo, segundo a base de tempo do SAD

A Tabela G.3 apresenta a definição de algumas nomenclaturas indicadas na Figura G.1 e de outras usadas na Equação G.3 dos tempos do GNSS embarcado na aeronave.

$$t_{\text{DGPS}} = \delta_{\text{DGPS}} + \delta_{r\text{DGPS}} + \delta_{r1} + [t_{\text{TOP}}]_{\text{UTC}} \quad (\text{G.3})$$

Tabela G.3 – Definição das nomenclaturas dos tempos do receptor GNSS embarcado na aeronave.

t_{DGPS}	horário em que o evento foi registrado no DGPS, segundo sua base de tempo
δ_{DGPS}	erro de discretização do horário de registro do evento no DGPS. Considerado nulo, pois foi observado que o tempo do evento registrado é fração do tempo de discretização (1/10s).
δ_{rDGPS}	atraso do relé do circuito de condicionador que aciona o DGPS. Foi medido com osciloscópio o valor de 250 μ s.
δ_{r1}	atraso do relé do circuito de sincronismo que aciona o circuito condicionador, o qual aciona o DGPS. Foi medido com osciloscópio o valor de 230 μ s.

A Tabela G.4 apresenta a definição de algumas nomenclaturas indicadas na Figura G.1 e de outras usadas na Equação G.4 dos tempos de acendimento dos LEDs do circuito de sincronismo.

$$\begin{aligned}
 t_{LED_VM} &= t_{TOP} + \delta_{LED} \\
 t_{LED_AZ} &= t_{TOP} + \delta_{r2} + \delta_{LED} \\
 t_{LED_BR} &= t_{TOP} + \delta_{r1} + \delta_{rDGPS} + \delta_{LED} \\
 t_{LED_AM} &= t_{TOP} + \delta_{r1} + \delta_{rSAD} + \delta_{LED}
 \end{aligned} \tag{G.4}$$

Tabela G.4 – Definição das nomenclaturas dos tempos de acendimento dos LEDs do circuito de sincronismo.

$[t_{TOP}]_{UTC}$	horário em que foi marcado o evento TOP no circuito de sincronismo, segundo a base de tempo UTC
t_{LED_VM}	horário de acendimento do LED vermelho do circuito de sincronismo, segundo a base de tempo UTC
t_{LED_AZ}	horário de acendimento do LED azul do circuito de sincronismo, segundo a base de tempo UTC
t_{LED_BR}	horário de acendimento do LED branco do circuito de sincronismo, segundo a base de tempo UTC
t_{LED_AM}	horário de acendimento do LED amarelo do circuito de sincronismo, segundo a base de tempo UTC

Com base na especificação do atraso nominal do LED (BROADCOM, 2017), foi atribuído o valor de 1 μ s para o parâmetro δ_{LED} .

Do acendimento simultâneo dos LEDs, verificado em um único frame da câmera de alta velocidade durante o procedimento de sincronismo, pode-se dizer o que está na Equação G.5.

$$\begin{aligned}
 \delta_{r2} &< 668\mu s \\
 \delta_{r1} + \delta_{rDGPS} &< 668\mu s \\
 \delta_{r1} + \delta_{rSAD} &< 668\mu s
 \end{aligned} \tag{G.5}$$

Da Equação G.3 tira-se o tempo que ocorreu o evento na base de tempo UTC, em função do tempo registrado no DGPS, resultando na Equação G.6. Também pode-se escrever em função das bases da NIKON e do SAD, resultando na Equação G.7.

$$[t_{TOP}]_{UTC} = t_{DGPS} - \delta_{DGPS} - \delta_{rDGPS} - \delta_{r1} \quad (G.6)$$

$$[t_{TOP}]_{UTC} = [t_{TOP}]_{SAD} + \Delta t_{SAD} = [t_{TOP}]_{NIKON} + \Delta t_{NIKON} \quad (G.7)$$

Das substituições e manipulações entre as Equações G.1, G.2, G.6 e G.7, tira-se as expressões para a defasagem das bases de tempo do SAD (Equação G.8) e da NIKON (Equação G.9):

$$\Delta t_{SAD} = t_{DGPS} - \delta_{DGPS} - \delta_{rDGPS} - \delta_{r1} + \delta_{SAD} + \delta_{rSAD} + \delta_{r1} - t_{SAD} \quad (G.8)$$

$$\Delta t_{NIKON} = t_{DGPS} - \delta_{DGPS} - \delta_{rDGPS} - \delta_{r1} + \delta_{NIKON} + \delta_{EXIF} + \delta_{r2} - t_{NIKON} \quad (G.9)$$

O sincronismo da GoPRO é feita em relação à Nikon com base no tempo do cronômetro de milissegundos, conforme Equação G.10. A Tabela G.5 apresenta a definição de algumas nomenclaturas indicadas na Figura G.1 e das usadas na Equação G.10.

$$[t_{GOPRO}]_{UTC} = t_{GOPRO} + \Delta t_{GOPRO}$$

$$[t_{GOPRO}]_{UTC} = t_{NIKON} + \Delta t_{NIKON} + \delta_{GP-NK_CRON} \quad (G.10)$$

$$\Delta t_{GOPRO} = t_{NIKON} + \Delta t_{NIKON} + \delta_{GP-NK_CRON} - t_{GOPRO}$$

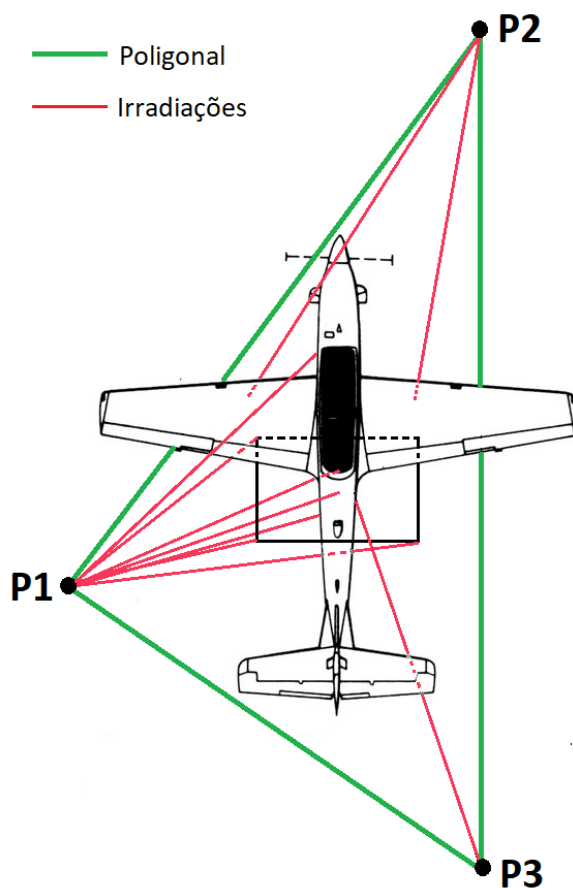
Tabela G.5 – Definição das nomenclaturas dos tempos da câmera GoPRO.

t_{GOPRO}	horário em que a foto foi registrada na câmera GoPRO, segundo sua base de tempo
$[t_{GOPRO}]_{UTC}$	horário em que a foto foi registrada na câmera NIKON, segundo a base de tempo UTC
Δt_{GOPRO}	defasagem da base de tempo da câmera NIKON para com a base de tempo UTC
δ_{GP-NK_CRON}	defasagem entre a foto da GOPRO e a foto da NIKON, medido pelo cronômetro de milissegundos.

APÊNDICE H
DETALHES DO AJUSTAMENTO DA POLIGONAL TOPOGRÁFICA

Para o levantamento das coordenadas dos pontos de interesse na aeronave e da placa de nivelamento, foi necessário o estabelecimento de uma poligonal topográfica no entorno da aeronave para basear as irradiações das medidas, conforme croqui da Figura H.1.

Figura H.1 – Poligonal topográfica estabelecida para basear as irradiações a fim de medir as coordenadas dos pontos de interesse.



Fonte: Produção do Autor.

Uma Estação Total Topcon GPT-3105W foi estacionada nos vértices P1, P2 e P3 da poligonal e realizou visadas a VANTE e a RÉ para construí-la e, ao mesmo tempo, mediu os pontos de interesse por irradiação. A poligonal foi ajustada no *software* de topografia DataGeosis Office, conforme mostrado nas telas reproduzidas nas Figuras H.2 a H.5.

Figura H.2 – Valores medidos pela Estação Total nas visadas aos pontos de interesse na aeronave, inseridos na caderneta do DataGeosis.

Nivelamento.cdn		eq Topcon IAE		op		uv Zenital							
pt	P1	ds	x	0.000	y	0.000	z	0.000					
pt	P1	ds	ai	0.000									
pt	P3	ds	ah	0°00'00"	dv	-0.018	di	10.168	ap	0.000			
pt	P2	ds	ah	242°28'14"	dv	-0.008	di	13.827	ap	0.000	x	-12.261	y
pt	C1	ds	ah	291°18'05"	dv	0.785	di	3.986	ap	0.000	x	-3.641	y
pt	C2	ds	ah	292°30'16"	dv	0.803	di	3.965	ap	0.000	x	-3.587	y
pt	Q1	ds	ah	284°54'12"	dv	0.036	di	3.599	ap	0.000	x	-3.478	y
pt	Q2	ds	ah	289°20'25"	dv	0.034	di	4.435	ap	0.000	x	-4.185	y
pt	Q3	ds	ah	296°21'42"	dv	0.034	di	4.294	ap	0.000	x	-3.847	y
pt	Q4	ds	ah	293°26'46"	dv	0.036	di	3.424	ap	0.000	x	-3.141	y
pt	N1	ds	ah	257°42'19"	dv	1.555	di	5.280	ap	0.000	x	-4.930	y
pt	N2	ds	ah	288°11'38"	dv	1.554	di	3.889	ap	0.000	x	-3.387	y
pt	G5	ds	ah	259°26'04"	dv	2.149	di	5.859	ap	0.000	x	-5.358	y
pt	A1	ds	ah	270°50'30"	dv	2.429	di	5.073	ap	0.000	x	-4.453	y

Figura H.3 – Seleção dos pontos para compor a poligonal no DataGeosis.

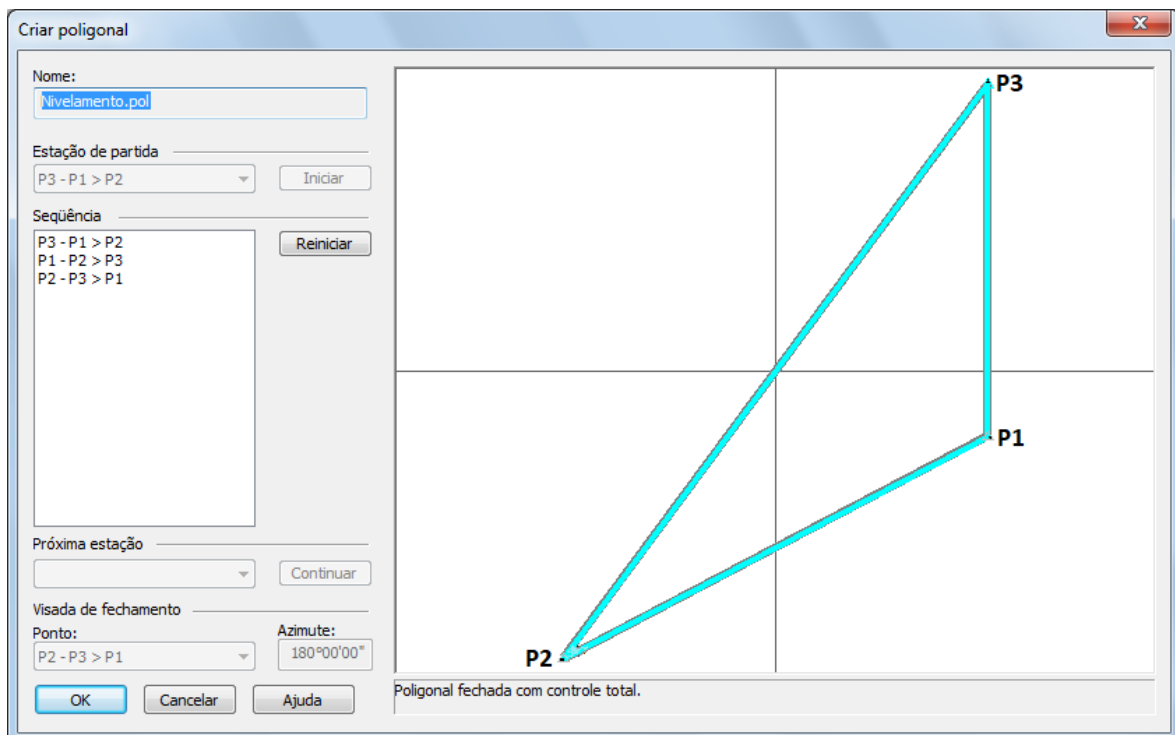


Figura H.4 – Configuração do ajustamento da poligonal no DataGeosis.

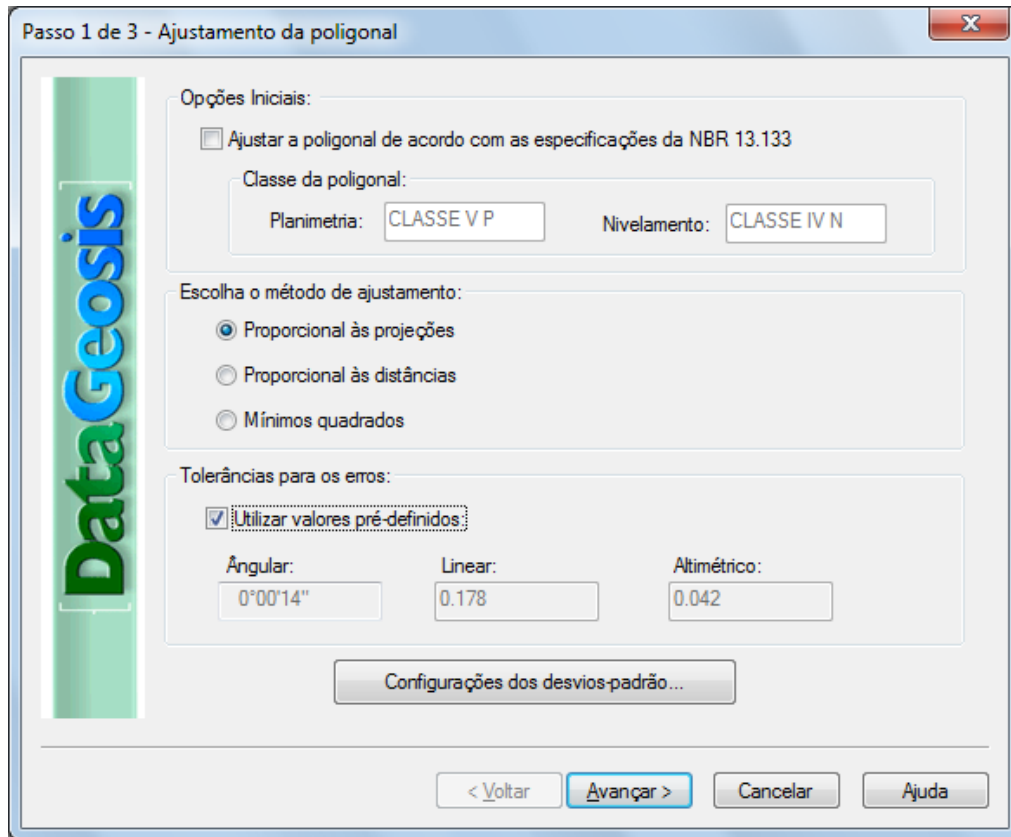
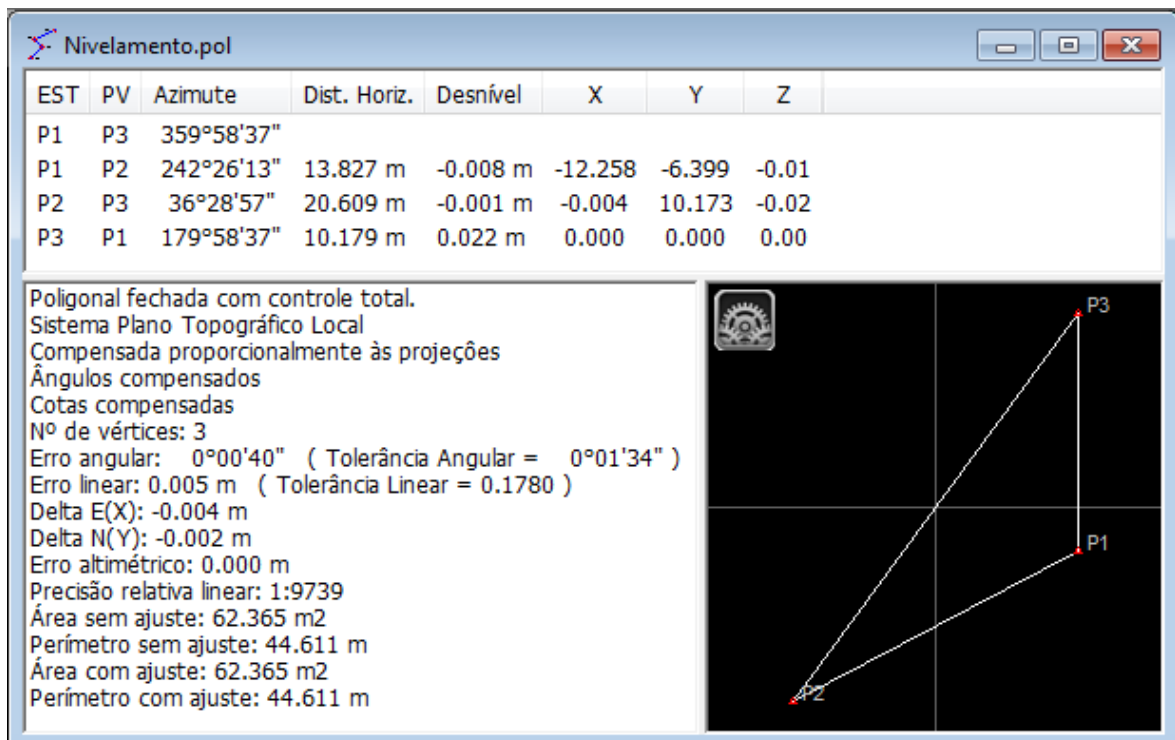


Figura H.5 – Resultados do ajustamento da poligonal no DataGeosis.



APÊNDICE I
RELATÓRIO DA ESTAÇÃO RBMC SJSP, FOTOS E COORDENADAS DOS
PONTOS LEVANTADOS EM CAMPO

0. Formulário

Preparado por: Centro de Controle Eng. Kátia Duarte Pereira - RBMC

Data: 29/04/2013

Atualização: 10/03/2015 - Troca de equipamento

1. Identificação da estação GPS

Nome da Estação: SÃO JOSÉ DOS CAMPOS

Ident. da Estação: SJSP

Inscrição no Monumento: SAT 91537

Código Internacional: [91537](#)

Informações Adicionais: -

2. Informação sobre a localização

Cidade: São José dos Campos

Estado: São Paulo

Informações Adicionais: Pilar de concreto com formato cilíndrico, medindo 1,16 m de altura e com 0,29 m de diâmetro, está assentado em uma base de 1,00 m x 1,00 m x 0,80 m. Possui no topo um dispositivo de centragem forçada padrão UFRJ. Foi colocado a 0,20 m do topo, uma chapa de metal padrão IBGE na parte sudeste do marco, foi estampado: SAT- 91537. Próximo a uma cerca, a SE da portaria 1 do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE, na cidade de São José dos Campos - SP.

3. Coordenadas oficiais

3.1. SIRGAS2000 (Época 2000.4)

Coordenadas Geodésicas			
Latitude:	- 23° 12' 25,6767"	Sigma:	0,002 m
Longitude:	- 45° 51' 42,2560"	Sigma:	0,003 m
Alt. Elip.:	605,089 m	Sigma:	0,016 m
Coordenadas Cartesianas			
X:	4.084.802,434 m	Sigma:	0,010 m
Y:	-4.209.560,398 m	Sigma:	0,011 m
Z:	-2.498.056,959 m	Sigma:	0,006 m
Coordenadas Planas (UTM)			
UTM (N):	7.433.289,119 m		
UTM (E):	411.820,813 m		
MC:	-45		

4. Informações do equipamento GNSS

4.1. Receptor

4.1.1 Tipo do Receptor - TRIMBLE NETR8
Número de Série - 4923K35601
Versão do Firmware - 4.87 (Principal)
Data de Instalação - 10/03/2015 às 11:15 UTC

4.1.2 Tipo do Receptor - TRIMBLE NETR8
Número de Série - 4923K35622
Versão do Firmware - 4.87 (Principal)
Data de Instalação - 27/02/2015 às 13:45 UTC
Data de Remoção - 10/03/2015 às 11:00 UTC

4.1.3	Tipo do Receptor	- TRIMBLE NETR8
	Número de Série	- 4906K34470
	Versão do Firmware	- 4.70 (Principal)
	Data de Instalação	- 29/04/2013 às 00:00 UTC
	Data de Remoção	- 27/02/2015 às 13:35 UTC

4.2. Antena

4.2.1	Tipo de Antena	- GNSS CHOKE RING (TRM59800.00)
	URL imagem	- http://www.ngs.noaa.gov/ANTCAL/LoadImage?name=TRM59800.00%2BNONE.gif
	Número de Série	- 4940353516
	Altura da Antena (m)	- 0,1365 (distância vertical do topo do marco à base da antena.)
	Data de Instalação	- 17/10/2014 às 14:01 UTC

4.2.2	Tipo de Antena	- GNSS CHOKE RING (TRM59800.00)
	URL imagem	- http://www.ngs.noaa.gov/ANTCAL/LoadImage?name=TRM59800.00%2BNONE.gif
	Número de Série	- 4940353504
	Altura da Antena (m)	- 0,1365 (distância vertical do topo do marco à base da antena.)
	Data de Instalação	- 29/04/2013 às 00:00 UTC
	Data de Remoção	- 17/10/2014 às 14:00 UTC

5. Informações Complementares

5.1. Para informações técnicas contatar:

Nome: IBGE/DGC/Coordenação de Geodésia
Endereço: Av. Brasil, 15.671, CEP 21.241-051, Rio de Janeiro, RJ
Telefone: (21) 2142-4935
FAX: (21) 2142-4859
Home Page: www.ibge.gov.br
Contato: rbmc@ibge.gov.br

5.2. Para informações sobre comercialização e aquisição de dados contatar:

Nome: Centro de Documentação e Disseminação de Informações - CDDI/IBGE
Endereço: Rua General Canabarro, 706, CEP 20271-201, Rio de Janeiro, RJ
Telefone: 0800-721-8181
Contato: ibge@ibge.gov.br

5.3. Instituições participantes

A RBMC conta com o apoio das seguintes instituições:

<http://www.ibge.gov.br/home/geociencias/geodesia/rbmc/parcerias.shtm>

Figura I.1 – Localização dos pontos cujas coordenadas foram levantadas em solo.

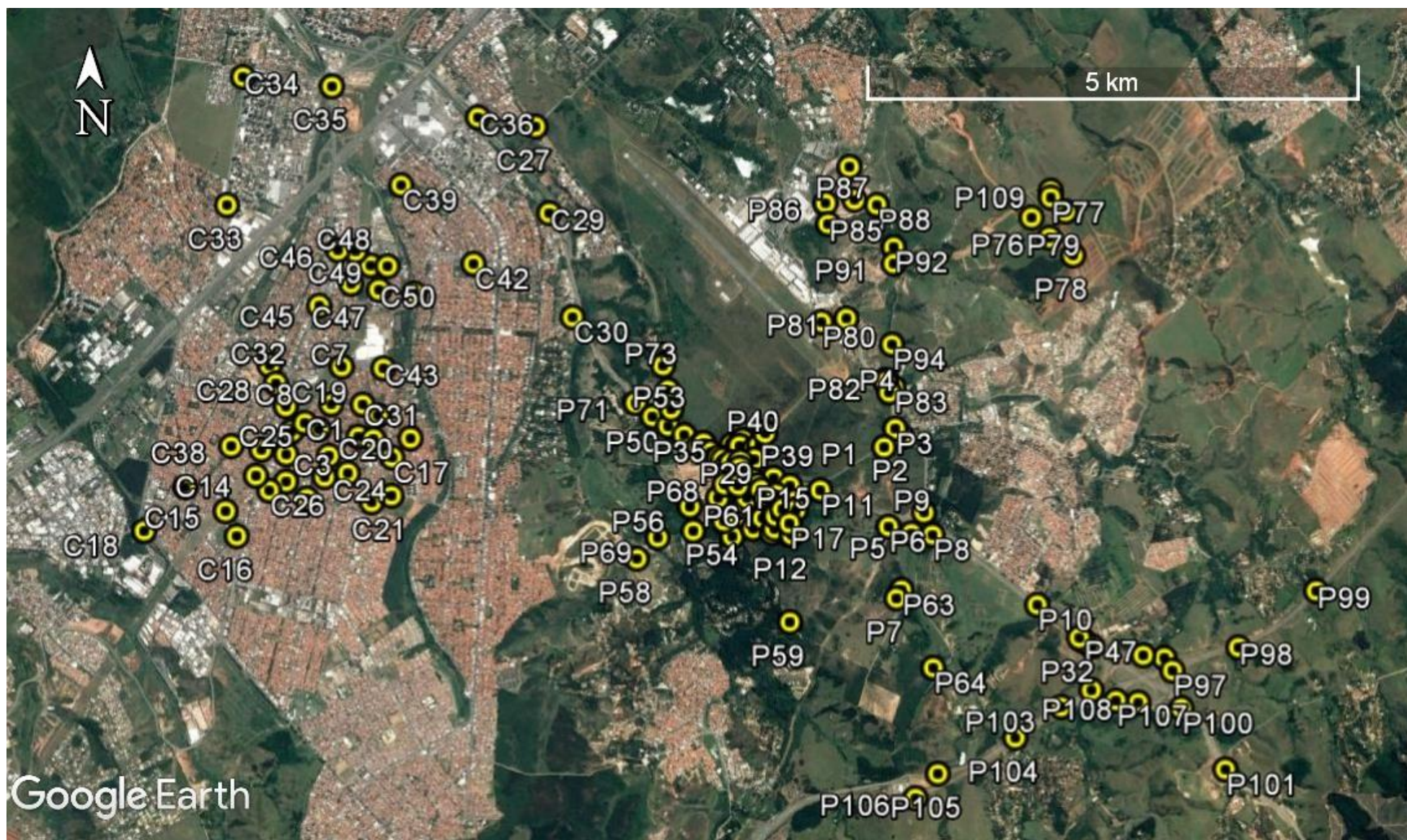


Figura I.2 - Detalhe das feições no terreno escolhidas para levantamento das coordenadas.



Figura I.2 - Detalhe das feições no terreno escolhidas para levantamento das coordenadas. (continuação)



Figura I.2 - Detalhe das feições no terreno escolhidas para levantamento das coordenadas. (continuação)

C25



C26



C27



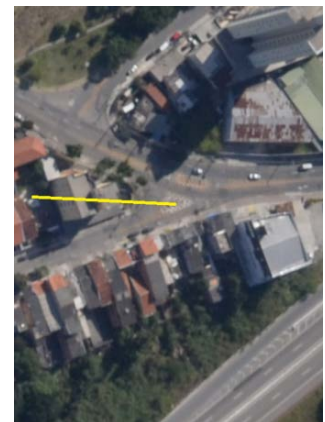
C28



C29



C30



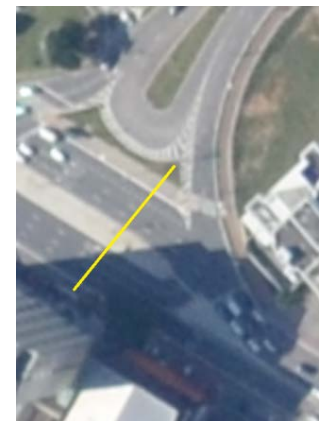
C31



C32



C33



C34



C35



C36



Figura I.2 - Detalhe das feições no terreno escolhidas para levantamento das coordenadas. (continuação)

C38



C39



C41



C42



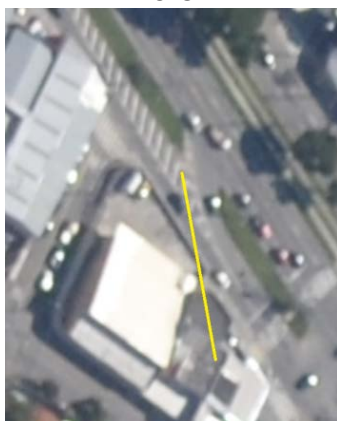
C43



C44



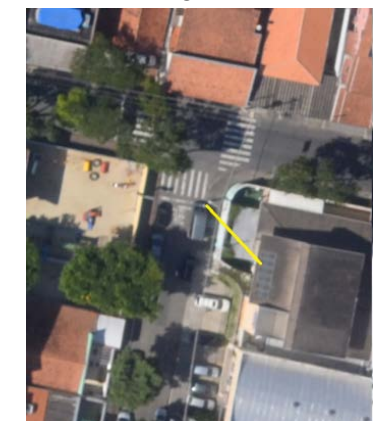
C45



C46



C47



C48



C49



C50



Figura I.3 – Local onde foi posicionado o GNSS para medição da coordenada de cada ponto.

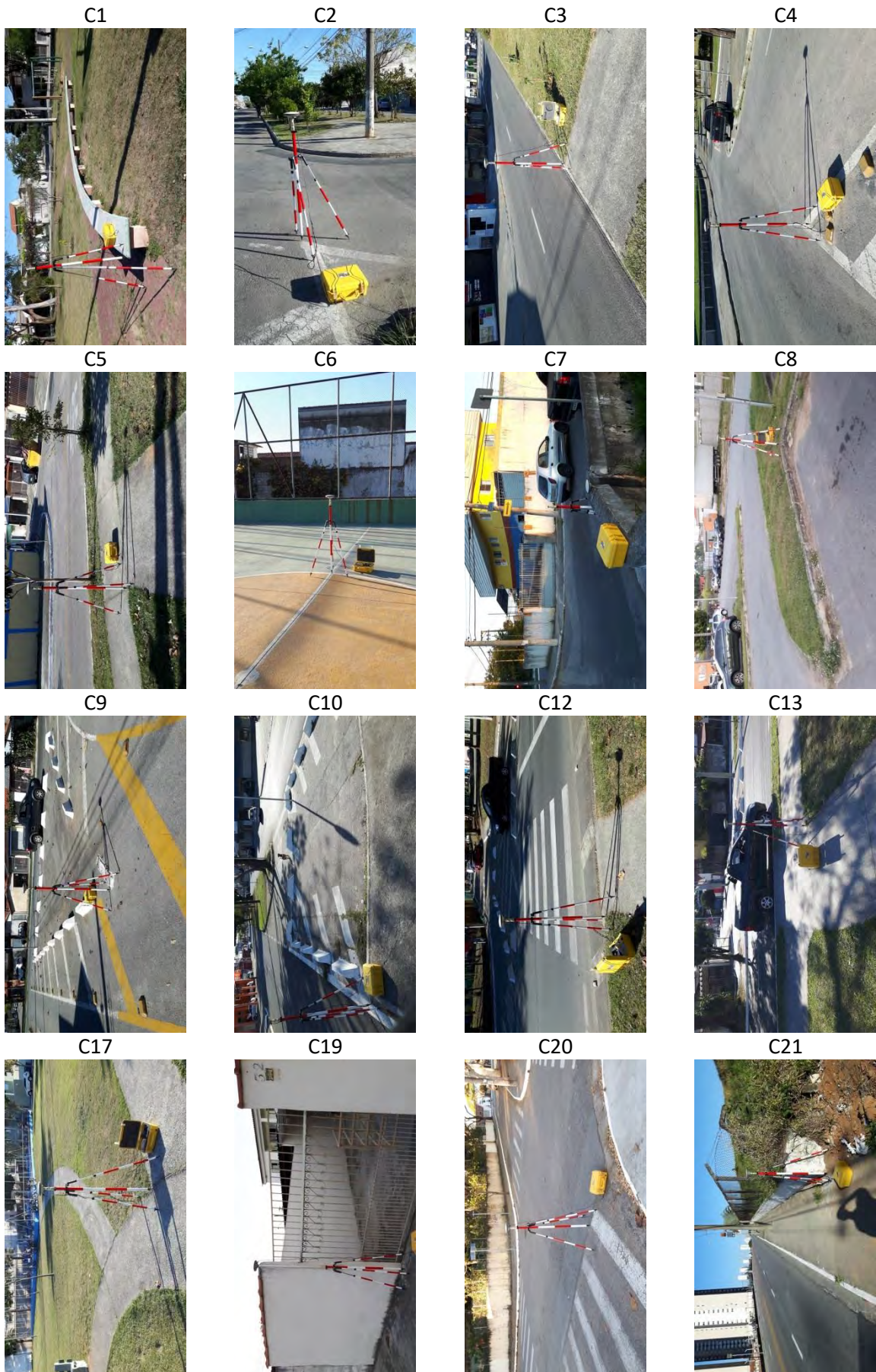


Figura I.3 – Local onde foi posicionado o GNSS para medição da coordenada de cada ponto. (continuação)

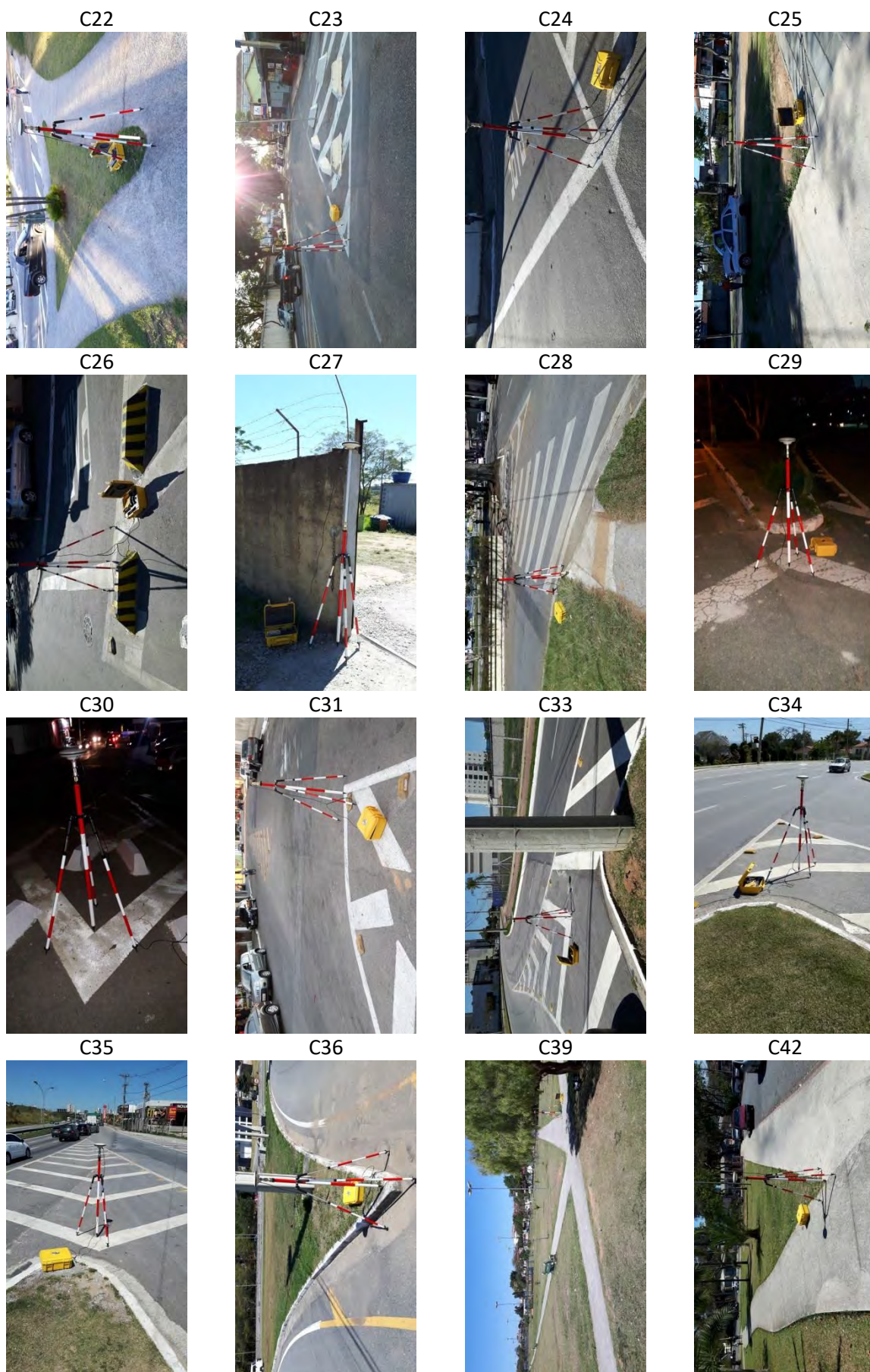


Figura I.3 – Local onde foi posicionado o GNSS para medição da coordenada de cada ponto. (continuação)

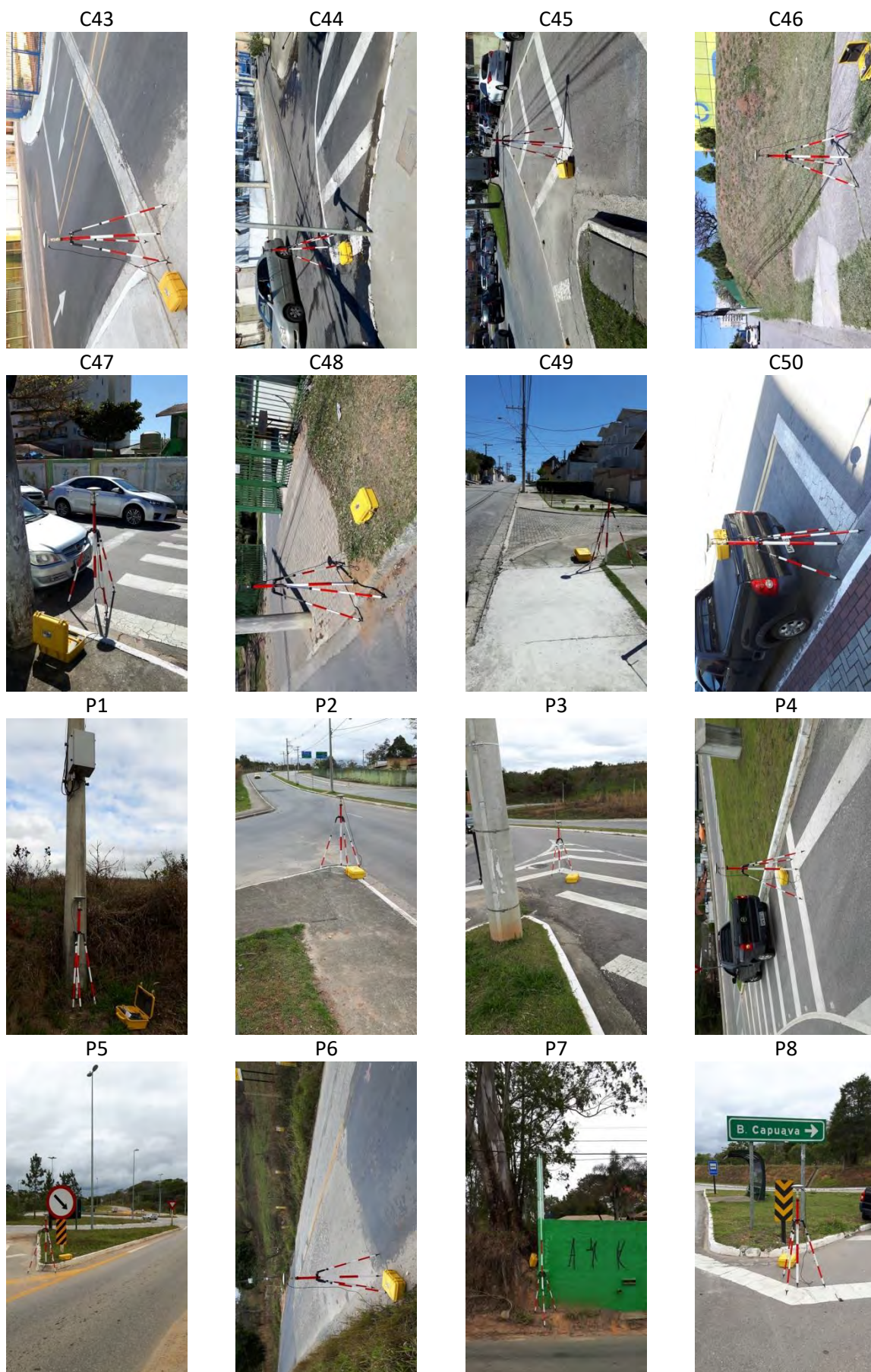


Figura I.3 – Local onde foi posicionado o GNSS para medição da coordenada de cada ponto. (continuação)

P9



P10



P11



P13



P14



P15



P16



P17



P18



P19



P20



P21



P22



P23



P24



P25



Figura I.3 – Local onde foi posicionado o GNSS para medição da coordenada de cada ponto. (continuação)

P26



P27



P29



P31



P32



P33



P34



P35



P36



P37



P38



P39



P40



P41



P42



P43



Figura I.3 – Local onde foi posicionado o GNSS para medição da coordenada de cada ponto. (continuação)

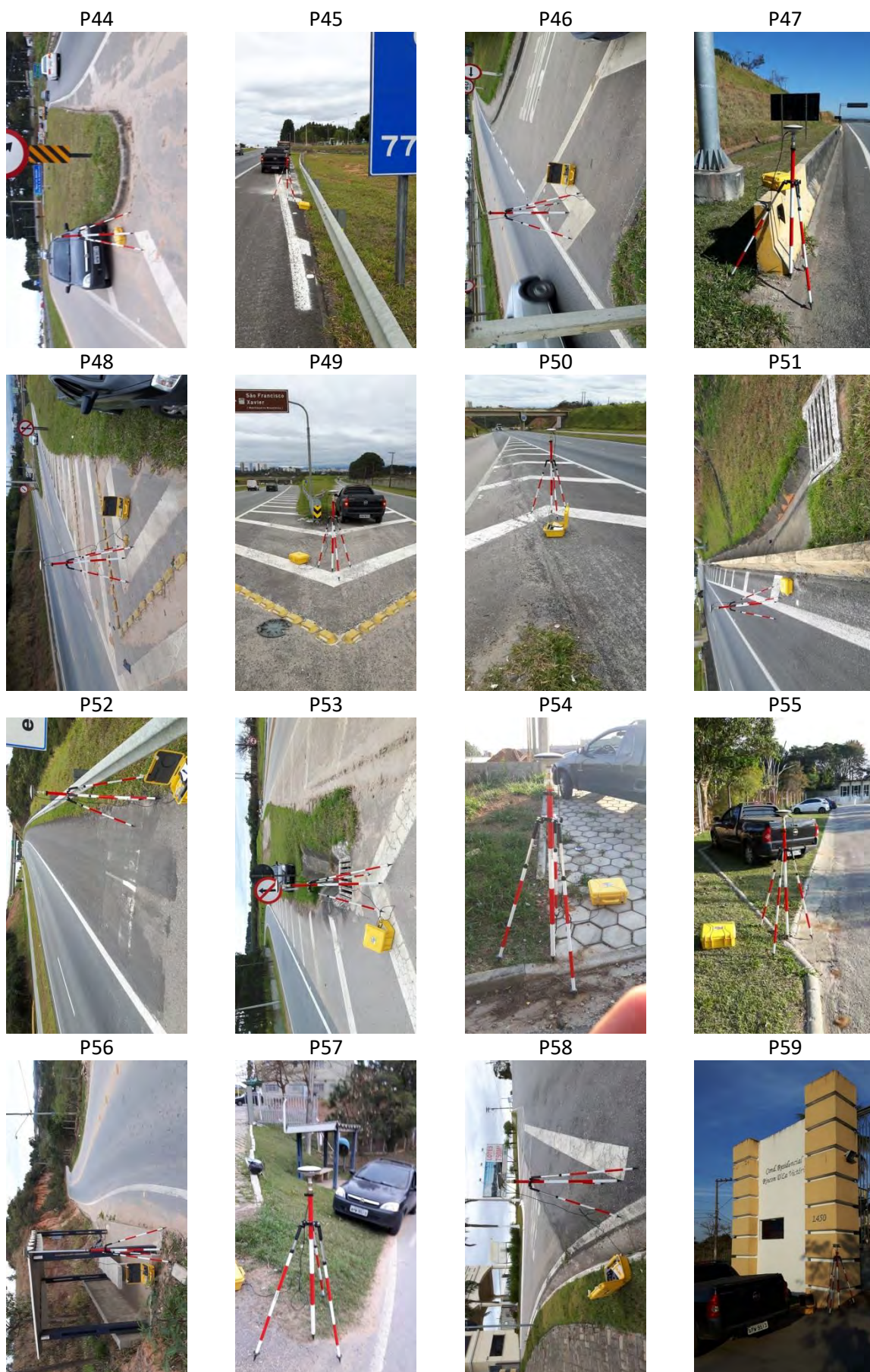


Figura I.3 – Local onde foi posicionado o GNSS para medição da coordenada de cada ponto. (continuação)



Figura I.3 – Local onde foi posicionado o GNSS para medição da coordenada de cada ponto. (continuação)

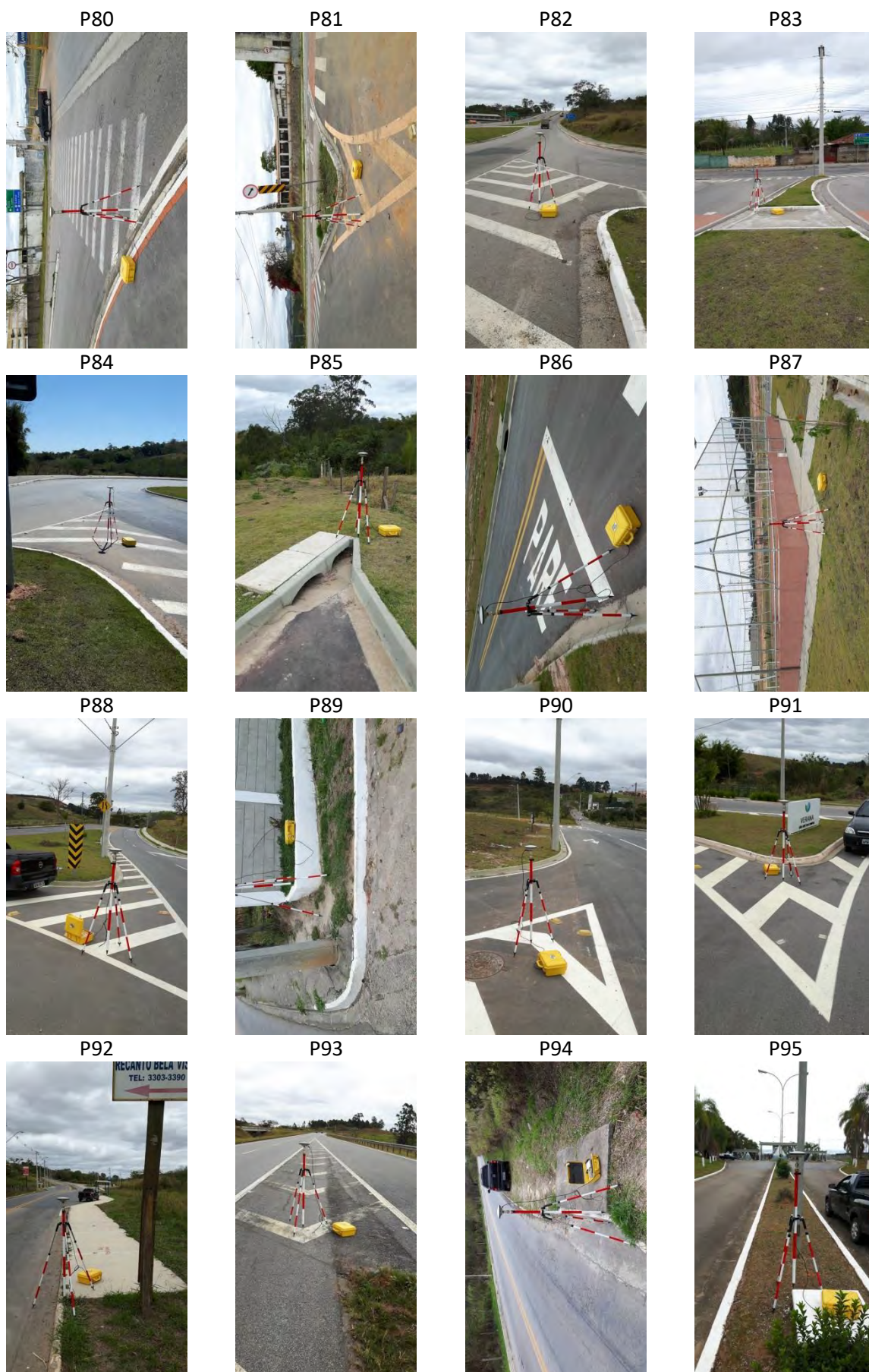


Figura I.3 – Local onde foi posicionado o GNSS para medição da coordenada de cada ponto. (continuação)



Tabela I.1 – Coordenadas dos pontos levantados em solo e seus desvios-padrão.

#	Ponto	Latitude (graus)	Longitude (graus)	h (m)	σ_{Lat} (m)	σ_{Long} (m)	σ_h (m)
1	C1	-23,2439141611111	-45,9035723916667	607,739	0,009	0,010	0,026
2	C2	-23,2469096277778	-45,9011589833333	617,564	0,011	0,010	0,027
3	C3	-23,2488371611111	-45,9015773916667	619,139	0,012	0,010	0,027
4	C4	-23,2446996444444	-45,9049244305556	599,117	0,008	0,010	0,027
5	C5	-23,2467744944444	-45,9054357111111	603,611	0,009	0,011	0,027
6	C6	-23,2453858333333	-45,8967321694444	618,486	0,010	0,011	0,026
7	C7	-23,2388049666667	-45,8999024972222	610,224	0,007	0,010	0,030
8	C8	-23,2424162888889	-45,9054862944444	599,692	0,007	0,010	0,029
9	C9	-23,2497765500000	-45,9154364888889	607,481	0,007	0,011	0,030
10	C10	-23,2484852166667	-45,8992749111111	619,043	0,010	0,011	0,024
11	C11	-23,2463581555556	-45,9078838277778	606,364	0,010	0,012	0,029
12	C12	-23,2507979305556	-45,9033694000000	611,759	0,007	0,010	0,026
13	C13	-23,2492564416667	-45,9054200666667	610,450	0,009	0,010	0,025
14	C14	-23,2487212500000	-45,9084175083333	609,203	0,010	0,012	0,032
15	C15	-23,2519403166667	-45,9114256750000	611,022	0,009	0,012	0,030
16	C16	-23,2542157666667	-45,9103313916667	607,667	0,010	0,012	0,032
17	C17	-23,2470643333333	-45,8948628777778	621,150	0,009	0,010	0,025
18	C18	-23,2537488527778	-45,9195593750000	598,442	0,008	0,011	0,026
19	C19	-23,2422150222222	-45,9009194916667	616,222	0,007	0,010	0,029
20	C20	-23,2432379888889	-45,8962967750000	619,617	0,009	0,011	0,028
21	C21	-23,2505373472222	-45,8949029805556	632,926	0,010	0,010	0,024
22	C22	-23,2453261722222	-45,8930657777778	615,840	0,010	0,011	0,029
23	C23	-23,2451700444444	-45,8982353805556	617,995	0,010	0,010	0,026
24	C24	-23,2511321361111	-45,8968721305556	630,194	0,010	0,010	0,024
25	C25	-23,2445025611111	-45,9021806000000	613,177	0,010	0,010	0,026
26	C26	-23,2500647722222	-45,9070953722222	611,639	0,008	0,010	0,027
27	C27	-23,2169641250000	-45,8807036416667	607,362	0,009	0,010	0,028
28	C28	-23,2403190666667	-45,9064959333333	594,742	0,009	0,012	0,027
29	C29	-23,2247818027778	-45,8794007972222	570,506	0,008	0,011	0,030
30	C30	-23,2342919027778	-45,8770589805556	584,803	0,008	0,011	0,027
31	C31	-23,2422448138889	-45,8978005833333	618,339	0,009	0,011	0,028
32	C32	-23,2386656027778	-45,9071153388889	592,945	0,009	0,012	0,028
33	C33	-23,2240755666667	-45,9113294416667	597,870	0,018	0,010	0,057
34	C34	-23,2124098083333	-45,9097530361111	595,219	0,020	0,009	0,063
35	C35	-23,2132076000000	-45,9010047138889	567,769	0,015	0,012	0,044
36	C36	-23,2160385138889	-45,8865002861111	565,600	0,010	0,011	0,029
37	C38	-23,2460234111111	-45,9108637500000	609,514	0,009	0,011	0,030
38	C39	-23,2222596416667	-45,8940790000000	586,013	0,011	0,011	0,034
39	C41	-23,2321101222222	-45,8927840916667	580,088	0,007	0,010	0,029
40	C42	-23,2294505888889	-45,8868352805556	607,498	0,009	0,010	0,030
41	C43	-23,2389463722222	-45,8957663777778	611,969	0,008	0,011	0,028
42	C44	-23,2295923638889	-45,8970576944444	605,361	0,009	0,010	0,025
43	C45	-23,2332486166667	-45,9021531055556	604,516	0,009	0,011	0,027
44	C46	-23,2281945722222	-45,9003220277778	595,587	0,009	0,011	0,025
45	C47	-23,2312550500000	-45,8989773305556	607,384	0,008	0,013	0,030
46	C48	-23,2282864111111	-45,8985555777778	599,815	0,009	0,010	0,025
47	C49	-23,2296440055556	-45,8954081222222	594,620	0,009	0,010	0,025
48	C50	-23,2318089555556	-45,8962211027778	606,074	0,008	0,011	0,027
49	P1	-23,2461262638889	-45,8461279888889	609,368	0,008	0,014	0,035
50	P2	-23,2451943333333	-45,8443677694444	600,660	0,008	0,011	0,029
51	P3	-23,2444398166667	-45,8450262750000	606,790	0,009	0,010	0,026
52	P4	-23,2411317083333	-45,8456245416667	590,002	0,009	0,011	0,029

Tabela I.1 – Coordenadas dos pontos levantados em solo e seus desvios-padrão. (continuação)

#	Ponto	Latitude (graus)	Longitude (graus)	h (m)	σ_{Lat} (m)	σ_{Long} (m)	σ_h (m)
53	P5	-23,2539868722222	-45,8434149666667	598,551	0,009	0,011	0,027
54	P6	-23,2533662972222	-45,8456875194444	603,064	0,009	0,011	0,027
55	P7	-23,2598760000000	-45,8449078388889	607,044	0,009	0,011	0,026
56	P8	-23,2541222555556	-45,8413201722222	599,460	0,009	0,011	0,027
57	P9	-23,2520702972222	-45,8421564138889	596,743	0,009	0,011	0,027
58	P10	-23,2604372472222	-45,8310111166667	645,950	0,010	0,012	0,029
59	P11	-23,2500369166667	-45,8524749027778	652,682	0,008	0,011	0,027
60	P12	-23,2540713027778	-45,8552842083333	677,979	0,011	0,012	0,028
61	P13	-23,2538813361111	-45,8572328694444	676,923	0,008	0,011	0,028
62	P14	-23,2510237750000	-45,8549471805556	678,198	0,010	0,012	0,030
63	P15	-23,2518236944444	-45,8548998750000	678,940	0,010	0,012	0,030
64	P16	-23,2523833805556	-45,8568807888889	677,880	0,008	0,011	0,028
65	P17	-23,2530464250000	-45,8555201750000	680,045	0,009	0,014	0,030
66	P18	-23,2535200611111	-45,8590939472222	666,280	0,008	0,011	0,029
67	P19	-23,2521988555556	-45,8570535583333	677,359	0,008	0,011	0,029
68	P20	-23,2496271777778	-45,8554620722222	668,297	0,010	0,012	0,030
69	P21	-23,2489123638889	-45,8570690694444	665,342	0,010	0,012	0,029
70	P22	-23,2508037888889	-45,8578188694444	671,578	0,008	0,010	0,026
71	P23	-23,2525589722222	-45,8581716472222	674,031	0,008	0,011	0,029
72	P24	-23,2504295194444	-45,8568140388889	672,887	0,010	0,012	0,031
73	P25	-23,2515203250000	-45,8564640777778	677,268	0,009	0,012	0,030
74	P26	-23,2500151333333	-45,8583225222222	669,127	0,009	0,011	0,026
75	P27	-23,2495977500000	-45,8587241638889	668,165	0,008	0,011	0,027
76	P28	-23,2511324583333	-45,8599016000000	663,141	0,009	0,009	0,026
77	P29	-23,2495934305556	-45,8605822388889	673,231	0,009	0,009	0,026
78	P30	-23,2480103277778	-45,8604073277778	662,781	0,010	0,010	0,027
79	P31	-23,2474111277778	-45,8603605527778	662,007	0,010	0,011	0,025
80	P32	-23,2633960138889	-45,8269068000000	668,043	0,009	0,012	0,028
81	P33	-23,2461323861111	-45,8606733055556	652,740	0,009	0,010	0,026
82	P34	-23,2460100000000	-45,8604305944444	653,477	0,009	0,010	0,024
83	P35	-23,2459306138889	-45,8612153916667	648,257	0,009	0,010	0,024
84	P36	-23,2454974111111	-45,8601408277778	648,290	0,009	0,011	0,024
85	P37	-23,2472406222222	-45,8589957277778	658,002	0,009	0,010	0,024
86	P38	-23,2463161972222	-45,8589484305556	657,006	0,008	0,010	0,025
87	P39	-23,2459519444444	-45,8584890111111	657,270	0,009	0,010	0,025
88	P40	-23,2448674027778	-45,8579155361111	657,686	0,009	0,010	0,025
89	P41	-23,2507354166667	-45,8625616250000	659,764	0,010	0,011	0,027
90	P42	-23,2479506138889	-45,8617817583333	656,998	0,013	0,010	0,027
91	P43	-23,2472668250000	-45,8621063527778	653,176	0,009	0,011	0,028
92	P44	-23,2470562750000	-45,8625020555556	651,241	0,009	0,011	0,027
93	P45	-23,2475101388889	-45,8612666138889	657,129	0,009	0,010	0,025
94	P46	-23,2465804666667	-45,8633808027778	646,417	0,010	0,010	0,024
95	P47	-23,2636601555556	-45,8264949416667	667,514	0,009	0,011	0,027
96	P48	-23,2460843083333	-45,8645107305556	640,843	0,010	0,010	0,024
97	P49	-23,2457561027778	-45,8640166416667	643,078	0,010	0,011	0,025
98	P50	-23,2450278027778	-45,8659317583333	633,218	0,008	0,010	0,025
99	P51	-23,2442185611111	-45,8675190194444	623,794	0,008	0,010	0,025
100	P52	-23,2433497333333	-45,8690950361111	614,188	0,008	0,010	0,025
101	P53	-23,2426740361111	-45,8672093305556	634,483	0,012	0,010	0,027
102	P54	-23,2528227416667	-45,8619890777778	665,786	0,011	0,010	0,027
103	P55	-23,2542369250000	-45,8611615222222	660,627	0,011	0,011	0,027
104	P56	-23,2515252361111	-45,8653631750000	641,680	0,009	0,010	0,025

Tabela I.1 – Coordenadas dos pontos levantados em solo e seus desvios-padrão. (continuação)

#	Ponto	Latitude (graus)	Longitude (graus)	h (m)	σ_{Lat} (m)	σ_{Long} (m)	σ_h (m)
105	P57	-23,2537473444444	-45,8650400527778	618,716	0,008	0,011	0,026
106	P58	-23,2562839305556	-45,8706577027778	594,964	0,010	0,011	0,027
107	P59	-23,2619805500000	-45,8554692000000	660,546	0,012	0,013	0,023
108	P60	-23,2535154861111	-45,8569802361111	677,171	0,008	0,011	0,028
109	P61	-23,2517520750000	-45,8562203777778	678,029	0,008	0,011	0,027
110	P62	-23,2540376388889	-45,8554920916667	675,462	0,010	0,012	0,030
111	P63	-23,2591278861111	-45,8443938333333	601,579	0,009	0,011	0,027
112	P64	-23,2662001527778	-45,8412661333333	610,314	0,008	0,010	0,027
113	P65	-23,2523425833333	-45,8606454722222	660,561	0,010	0,014	0,034
114	P66	-23,2514881111111	-45,8600521944444	662,793	0,010	0,014	0,034
115	P67	-23,2507302777778	-45,8596928888889	667,423	0,010	0,014	0,034
116	P68	-23,2495158944444	-45,8619093388889	664,731	0,010	0,010	0,024
117	P69	-23,2543708944444	-45,8686010250000	585,666	0,009	0,011	0,026
118	P70	-23,2641710250000	-45,8256454055556	665,087	0,009	0,012	0,026
119	P71	-23,2421043805556	-45,8707843416667	603,113	0,008	0,010	0,026
120	P72	-23,2409478638889	-45,8675361000000	633,645	0,010	0,011	0,025
121	P73	-23,2387291222222	-45,8680335833333	631,756	0,010	0,010	0,024
122	P74	-23,2377038777778	-45,8680938555556	630,425	0,010	0,010	0,024
123	P75	-23,2253135583333	-45,8315863555556	651,132	0,009	0,012	0,030
124	P76	-23,2271604916667	-45,8298405027778	664,052	0,009	0,012	0,030
125	P77	-23,2234997611111	-45,8296901027778	654,908	0,009	0,012	0,030
126	P78	-23,2287499333333	-45,8275145972222	668,812	0,010	0,012	0,030
127	P79	-23,2247839444444	-45,8282593583333	666,028	0,009	0,012	0,030
128	P80	-23,2347820027778	-45,8523581333333	644,590	0,009	0,010	0,028
129	P81	-23,2344453666667	-45,8498879027778	646,386	0,009	0,010	0,028
130	P82	-23,2402268277778	-45,8459552222222	588,749	0,009	0,011	0,029
131	P83	-23,2406779166667	-45,8451825583333	586,906	0,008	0,010	0,028
132	P84	-23,2399909472222	-45,8459733555556	588,687	0,009	0,011	0,029
133	P85	-23,2258247277778	-45,8516905138889	601,352	0,011	0,012	0,033
134	P86	-23,2239074916667	-45,8519349888889	595,472	0,012	0,012	0,032
135	P87	-23,2236067750000	-45,8490691083333	592,110	0,012	0,012	0,032
136	P88	-23,2240455194444	-45,8468355111111	576,440	0,015	0,012	0,041
137	P89	-23,2205911083333	-45,8495611250000	589,708	0,010	0,011	0,029
138	P91	-23,2293927555556	-45,8451622222222	575,009	0,015	0,012	0,041
139	P92	-23,2278843305556	-45,8451531361111	572,581	0,015	0,012	0,042
140	P93	-23,2650202111111	-45,8204996638889	636,244	0,010	0,012	0,028
141	P94	-23,2367700555556	-45,8453338833333	583,753	0,015	0,012	0,046
142	P95	-23,2491071027778	-45,8591738361111	667,038	0,009	0,011	0,027
143	P96	-23,2652589166667	-45,8184002694444	631,887	0,009	0,010	0,028
144	P97	-23,2664056027778	-45,8176189138889	641,583	0,009	0,011	0,026
145	P98	-23,2642957750000	-45,8111029638889	643,897	0,008	0,010	0,027
146	P99	-23,2591554916667	-45,8034675222222	659,811	0,009	0,010	0,028
147	P100	-23,2697803388889	-45,8167903166667	659,273	0,009	0,010	0,026
148	P101	-23,2753461666667	-45,8124221861111	654,550	0,009	0,011	0,027
149	P102	-23,2681702527778	-45,8256427555556	645,151	0,009	0,011	0,026
150	P103	-23,2697242972222	-45,8286059916667	626,549	0,009	0,012	0,027
151	P104	-23,2725384000000	-45,8331414555556	622,726	0,009	0,011	0,026
152	P105	-23,2757994888889	-45,8408098611111	624,291	0,009	0,012	0,026
153	P106	-23,2780019583333	-45,8430400388889	635,787	0,009	0,012	0,026
154	P107	-23,2691123000000	-45,8232302083333	650,112	0,009	0,012	0,028
155	P108	-23,2692919833333	-45,8210335222222	650,039	0,010	0,012	0,029
156	P109	-23,2228868972222	-45,8296887083333	651,957	0,009	0,012	0,029

APÊNDICE J
PARÂMETROS DE VOO PARA AS CÂMERAS NIKON E GOPRO

Tabela J.1 – Parâmetros de voo nos instantes das fotos da câmera Nikon.

Foto	Tempo UTC			Latitude (graus)	σ Lat (m)	Longitude (graus)	σ Long (m)	h (m)	σ h (m)	Veast (m/s)	Vnorth (m/s)	Vup (m/s)	ψ (graus)	θ (graus)	ϕ (graus)	ω (graus)	φ (graus)	κ (graus)
	HH	MM	SS															
DSC_0015.JPG	16	1	36,682	-23,24487343	0,024	-45,84491130	0,024	799,301	0,048	61,75	-64,11	4,65	132,37	3,04	-0,19	-2,19	-2,12	-132,42
DSC_0122.JPG	16	5	10,686	-23,25332418	0,024	-45,85531840	0,024	1006,821	0,049	-67,93	41,92	0,68	-60,99	0,39	1,12	-0,80	0,88	61,00
DSC_0123.JPG	16	5	12,686	-23,25256149	0,025	-45,85664875	0,025	1007,014	0,050	-68,25	42,48	-0,57	-60,43	0,01	-0,99	0,87	-0,48	60,44
DSC_0124.JPG	16	5	14,686	-23,25179696	0,025	-45,85798972	0,025	1005,135	0,050	-68,81	42,31	-1,41	-59,46	0,80	0,14	0,29	0,76	59,46
DSC_0125.JPG	16	5	16,686	-23,25103004	0,024	-45,85933395	0,024	1004,271	0,047	-68,75	42,48	0,77	-60,17	1,71	0,62	0,31	1,80	60,17
DSC_0126.JPG	16	5	18,686	-23,25026283	0,024	-45,86067707	0,024	1006,193	0,047	-68,78	42,41	0,86	-60,09	1,24	-0,20	0,79	0,98	60,08
DSC_0127.JPG	16	5	20,686	-23,24949426	0,024	-45,86202150	0,024	1007,571	0,047	-68,82	42,83	0,20	-59,48	0,37	0,86	-0,55	0,76	59,48
DSC_0128.JPG	16	5	22,686	-23,2487169	0,024	-45,86336617	0,024	1006,739	0,047	-68,75	43,38	-0,50	-58,69	0,81	0,27	0,19	0,83	58,69
DSC_0154.JPG	16	6	14,687	-23,24651205	0,024	-45,90098783	0,024	1012,697	0,047	-56,67	-60,62	0,13	-139,17	0,91	-14,86	9,17	11,77	138,10
DSC_0155.JPG	16	6	16,687	-23,24763523	0,024	-45,90206305	0,024	1012,484	0,047	-53,07	-63,92	0,24	-145,27	0,78	-14,69	7,87	12,46	144,31
DSC_0156.JPG	16	6	18,687	-23,24881872	0,024	-45,90305887	0,024	1011,498	0,047	-49,17	-66,96	-0,79	-145,75	1,00	-13,80	7,06	11,93	144,89
DSC_0157.JPG	16	6	20,687	-23,25005051	0,024	-45,90398810	0,024	1008,900	0,047	-45,69	-69,60	-1,34	-150,33	0,60	-13,05	6,03	11,61	149,64
DSC_0228.JPG	16	8	42,689	-23,254405	0,023	-45,86292825	0,023	1003,444	0,047	43,27	66,52	0,16	30,17	1,17	-0,98	0,52	-1,44	-30,18
DSC_0229.JPG	16	8	44,689	-23,25320401	0,023	-45,86208177	0,023	1004,875	0,047	43,55	66,45	1,09	29,66	0,91	0,84	1,20	0,28	-29,66
DSC_0230.JPG	16	8	46,689	-23,25200357	0,023	-45,86123094	0,023	1004,965	0,047	43,86	66,39	-1,19	32,11	0,28	0,27	0,38	0,08	-32,11
DSC_0231.JPG	16	8	48,689	-23,25080463	0,023	-45,86036917	0,023	1003,215	0,047	44,14	66,50	-0,79	30,36	0,77	1,34	1,34	0,77	-30,36
DSC_0232.JPG	16	8	50,690	-23,24960562	0,023	-45,85950026	0,023	1003,009	0,047	44,68	66,43	0,81	30,94	0,68	-0,27	0,45	-0,58	-30,94
DSC_0233.JPG	16	8	52,690	-23,2484039	0,023	-45,85862558	0,023	1003,218	0,047	44,89	66,58	-1,37	32,13	0,23	0,76	0,60	0,52	-32,13
DSC_0234.JPG	16	8	54,690	-23,24720408	0,023	-45,85774100	0,023	1001,142	0,047	45,31	66,47	-0,37	31,12	1,34	-0,04	1,12	-0,73	-31,11
DSC_0235.JPG	16	8	56,690	-23,2460032	0,023	-45,85685632	0,023	1001,204	0,047	45,29	66,56	-0,41	32,86	0,77	-0,79	0,22	-1,08	-32,86
DSC_0300.JPG	16	11	6,692	-23,22664089	0,023	-45,84376267	0,023	1004,085	0,046	-57,16	-52,96	-0,36	-136,43	2,27	-32,36	22,21	24,26	130,94
DSC_0301.JPG	16	11	8,692	-23,22768162	0,023	-45,84479713	0,023	1003,415	0,046	-48,88	-61,79	-0,64	-143,86	2,14	-32,87	19,35	27,18	138,51
DSC_0317.JPG	16	11	40,692	-23,24757606	0,023	-45,85823459	0,023	998,274	0,046	-43,46	-69,27	0,98	-150,25	1,42	-1,23	-0,62	1,77	150,24
DSC_0318.JPG	16	11	42,692	-23,24882641	0,023	-45,85908475	0,023	1000,235	0,046	-43,70	-69,26	0,91	-149,05	0,15	-1,60	0,69	1,45	149,04
DSC_0319.JPG	16	11	44,692	-23,25007954	0,023	-45,85993877	0,023	1001,106	0,046	-43,78	-69,50	-0,27	-149,72	-0,60	-0,29	0,66	-0,06	149,72
DSC_0320.JPG	16	11	46,692	-23,25133559	0,023	-45,86079712	0,023	1000,477	0,046	-44,16	-69,46	-0,56	-149,20	0,05	-0,47	0,20	0,43	149,20
DSC_0321.JPG	16	11	48,692	-23,25258798	0,023	-45,86166044	0,023	998,517	0,046	-44,40	-69,07	-0,92	-149,36	1,35	2,76	-2,57	-1,69	149,35
DSC_0322.JPG	16	11	50,693	-23,25383059	0,023	-45,86252903	0,023	998,068	0,046	-44,33	-68,69	0,17	-148,39	1,24	-1,89	-0,06	2,26	148,37
DSC_0413.JPG	16	14	52,696	-23,25109874	0,023	-45,85547801	0,023	1009,622	0,046	-64,01	45,32	-0,75	-55,57	1,43	1,12	-0,11	1,81	55,58
DSC_0414.JPG	16	14	54,696	-23,25027554	0,023	-45,85672609	0,023	1009,878	0,046	-63,95	45,57	0,55	-56,63	1,26	0,03	0,67	1,07	56,63
DSC_0415.JPG	16	14	56,696	-23,24945147	0,023	-45,85798015	0,023	1010,106	0,046	-64,54	45,58	-0,67	-56,97	0,14	-1,89	1,66	-0,92	56,98
DSC_0416.JPG	16	14	58,696	-23,24862952	0,023	-45,85924680	0,023	1007,004	0,046	-64,87	45,68	-1,19	-55,95	1,25	-0,01	0,71	1,03	55,95
DSC_0417.JPG	16	15	0,696	-23,24780431	0,023	-45,86051668	0,023	1007,761	0,046	-65,15	45,64	0,88	-56,73	0,50	-0,99	1,10	-0,12	56,73
DSC_0418.JPG	16	15	2,696	-23,24698059	0,023	-45,86179414	0,023	1008,581	0,046	-65,62	45,58	-0,52	-56,00	-0,33	-1,54	1,09	-1,13	56,01

Tabela J.1 – Parâmetros de voo nos instantes das fotos da câmera Nikon. (continuação)

Foto	Tempo UTC			Latitude (graus)	σ Lat (m)	Longitude (graus)	σ Long (m)	h (m)	σ h (m)	Veast (m/s)	Vnorth (m/s)	Vup (m/s)	ψ (graus)	θ (graus)	ϕ (graus)	ω (graus)	φ (graus)	κ (graus)
	HH	MM	SS															
DSC_0419.JPG	16	15	4,696	-23,24615584	0,023	-45,86307740	0,023	1006,471	0,046	-65,74	45,58	-0,38	-57,05	1,32	-0,36	1,02	0,91	57,04
DSC_0420.JPG	16	15	6,696	-23,2453329	0,023	-45,86436171	0,023	1006,160	0,046	-65,64	45,60	0,29	-56,10	1,48	-1,09	1,73	0,62	56,08
DSC_0421.JPG	16	15	8,696	-23,2445127	0,023	-45,86564514	0,023	1007,572	0,046	-65,79	45,25	1,00	-57,31	1,15	-2,70	2,89	-0,49	57,29
DSC_0422.JPG	16	15	10,696	-23,24370793	0,023	-45,86693869	0,023	1007,404	0,046	-66,87	43,51	-0,57	-57,95	1,23	-10,09	9,22	-4,30	58,19
DSC_0423.JPG	16	15	12,696	-23,24294751	0,023	-45,86826208	0,023	1006,239	0,046	-68,65	40,47	0,05	-61,94	1,72	-10,89	10,42	-3,60	62,11
DSC_0424.JPG	16	15	14,696	-23,24225038	0,023	-45,86962353	0,023	1006,519	0,046	-70,66	36,68	0,05	-64,06	1,50	-14,77	13,96	-5,09	64,49
DSC_0441.JPG	16	15	48,696	-23,24297298	0,023	-45,89544688	0,023	1006,321	0,046	-77,96	-20,59	0,25	-107,01	2,10	23,62	-23,22	-4,89	106,45
DSC_0442.JPG	16	15	50,696	-23,24326526	0,023	-45,89699142	0,023	1005,873	0,046	-80,04	-10,49	-0,25	-98,26	2,48	33,11	-33,11	-2,45	98,27
DSC_0443.JPG	16	15	52,697	-23,24333142	0,023	-45,89856515	0,023	1006,370	0,046	-80,56	3,45	0,38	-88,99	2,86	38,23	-38,23	2,87	90,98
DSC_0444.JPG	16	15	54,697	-23,2431296	0,023	-45,90012461	0,023	1006,573	0,047	-78,44	19,07	-0,13	-76,34	2,17	40,34	-39,25	10,42	80,86
DSC_0445.JPG	16	15	56,697	-23,24263305	0,026	-45,90160767	0,026	1007,332	0,051	-72,65	35,38	0,49	-63,61	2,48	41,25	-37,49	18,80	70,97
DSC_0446.JPG	16	15	58,697	-23,24185967	0,026	-45,90294343	0,026	1007,522	0,051	-63,39	49,89	-0,23	-52,27	4,10	43,87	-35,69	27,70	62,99
DSC_0447.JPG	16	16	0,697	-23,24083569	0,026	-45,90405868	0,026	1007,710	0,051	-49,73	63,24	1,23	-38,34	4,06	42,18	-26,93	34,01	48,28
DSC_0457.JPG	16	16	20,697	-23,23034269	0,025	-45,89860309	0,025	1008,802	0,051	78,44	10,24	1,34	80,08	2,85	11,42	11,73	-0,79	-79,72
DSC_0458.JPG	16	16	22,697	-23,23018166	0,024	-45,89707060	0,024	1011,108	0,048	78,39	8,24	0,37	81,05	1,33	4,01	4,17	-0,68	-80,97
DSC_0459.JPG	16	16	24,697	-23,23004714	0,024	-45,89553883	0,024	1011,759	0,048	78,34	6,53	0,54	81,86	2,11	5,85	6,09	-1,25	-81,68
DSC_0478.JPG	16	17	2,698	-23,24260983	0,023	-45,86954167	0,023	1013,632	0,046	68,28	-45,56	0,19	121,44	0,98	-2,38	-2,55	0,40	-121,46
DSC_0479.JPG	16	17	4,698	-23,24343093	0,023	-45,86820566	0,023	1012,783	0,046	68,32	-45,64	-0,39	120,84	1,41	2,95	1,81	-2,72	-120,76
DSC_0480.JPG	16	17	6,698	-23,24426092	0,023	-45,86687556	0,023	1012,318	0,046	67,87	-46,23	-0,11	122,11	1,59	-0,60	-1,35	-1,03	-122,13
DSC_0481.JPG	16	17	8,698	-23,2450915	0,023	-45,86554696	0,023	1012,511	0,046	68,08	-45,93	-0,92	122,42	1,10	-0,88	-1,33	-0,46	-122,44
DSC_0482.JPG	16	17	10,698	-23,24592276	0,023	-45,86421880	0,023	1011,966	0,046	67,91	-46,14	0,14	121,43	1,26	0,84	0,06	-1,52	-121,42
DSC_0483.JPG	16	17	12,698	-23,24675951	0,023	-45,86289331	0,023	1012,160	0,046	67,86	-46,44	-0,16	120,81	1,18	-0,50	-1,03	-0,76	-120,82
DSC_0484.JPG	16	17	14,698	-23,24759684	0,023	-45,86156441	0,023	1011,482	0,046	68,09	-46,41	-0,58	121,39	1,40	-0,81	-1,42	-0,77	-121,41
DSC_0485.JPG	16	17	16,698	-23,24843422	0,023	-45,86023174	0,023	1012,686	0,046	68,58	-46,06	1,79	119,59	0,78	-1,93	-2,06	0,28	-119,60
DSC_0486.JPG	16	17	18,698	-23,24926466	0,023	-45,85888660	0,023	1014,798	0,046	68,85	-46,49	0,68	122,32	-0,21	-0,03	0,09	0,19	-122,32
DSC_0487.JPG	16	17	20,698	-23,25010329	0,023	-45,85753651	0,023	1013,238	0,046	69,12	-46,52	-1,50	122,46	0,75	0,29	-0,16	-0,79	-122,46
DSC_0488.JPG	16	17	22,698	-23,25094491	0,023	-45,85618608	0,023	1012,141	0,046	69,14	-46,56	0,16	121,81	0,91	0,48	-0,07	-1,03	-121,80
DSC_0489.JPG	16	17	24,698	-23,25178847	0,023	-45,85483559	0,023	1012,495	0,046	69,08	-46,85	-0,87	122,65	0,54	-1,32	-1,41	0,25	-122,66
DSC_0510.JPG	16	18	6,699	-23,27009145	0,023	-45,82804361	0,023	1009,661	0,046	39,88	-67,77	-0,55	147,77	1,14	24,78	12,92	-21,36	-145,07
DSC_0574.JPG	16	20	14,701	-23,2825016	0,025	-45,89136360	0,025	1007,774	0,051	55,36	55,51	-1,80	42,91	1,07	33,81	25,16	23,39	-47,87
DSC_0575.JPG	16	20	16,701	-23,28157327	0,025	-45,89019470	0,025	1003,565	0,051	63,93	46,97	-1,85	52,29	0,52	29,81	24,65	17,33	-55,96
DSC_0576.JPG	16	20	18,701	-23,28079845	0,024	-45,88888819	0,024	999,732	0,047	69,20	39,21	-1,65	59,69	0,74	21,09	18,75	9,86	-61,19
DSC_0577.JPG	16	20	20,701	-23,28015361	0,024	-45,88749743	0,024	997,672	0,047	73,02	31,92	0,44	65,10	1,39	19,55	18,39	6,90	-65,98
DSC_0578.JPG	16	20	22,701	-23,27963028	0,024	-45,88604484	0,024	998,380	0,047	75,27	26,71	-0,35	68,88	0,57	12,56	11,94	3,97	-69,24
DSC_0579.JPG	16	20	24,701	-23,27918392	0,024	-45,88455914	0,024	997,073	0,047	76,64	22,78	-0,52	71,31	1,37	10,28	10,17	2,00	-71,36

Tabela J.1 – Parâmetros de voo nos instantes das fotos da câmera Nikon. (continuação)

Foto	Tempo UTC			Latitude (graus)	σ Lat (m)	Longitude (graus)	σ Long (m)	h (m)	σ h (m)	Veast (m/s)	Vnorth (m/s)	Vup (m/s)	ψ (graus)	θ (graus)	ϕ (graus)	ω (graus)	φ (graus)	κ (graus)
	HH	MM	SS															
DSC_0605.JPG	16	21	16,702	-23,2540734	0,022	-45,85617254	0,022	995,808	0,045	48,33	63,72	0,25	35,74	-0,38	-2,45	-1,74	-1,76	-35,76
DSC_0606.JPG	16	21	18,702	-23,2529167	0,022	-45,85522867	0,022	995,174	0,045	48,10	64,53	-0,46	34,76	-0,26	-2,68	-1,74	-2,05	-34,78
DSC_0607.JPG	16	21	20,702	-23,25174926	0,022	-45,85428855	0,022	993,134	0,045	48,14	64,69	-0,95	35,01	1,28	-1,83	0,00	-2,23	-35,03
DSC_0608.JPG	16	21	22,702	-23,250581	0,022	-45,85334953	0,022	992,565	0,045	48,14	64,58	0,19	34,71	1,21	0,83	1,47	0,00	-34,70
DSC_0609.JPG	16	21	24,702	-23,24941749	0,022	-45,85240488	0,022	992,770	0,045	48,48	64,39	-0,33	34,65	0,61	-0,61	0,16	-0,84	-34,66
DSC_0610.JPG	16	21	26,702	-23,2482541	0,022	-45,85145880	0,022	991,204	0,045	48,59	64,39	-0,76	36,40	0,43	-0,64	-0,04	-0,77	-36,40
DSC_0611.JPG	16	21	28,702	-23,24708975	0,022	-45,85050780	0,022	990,512	0,045	48,71	64,59	0,02	36,08	0,14	-0,96	-0,45	-0,86	-36,09
DSC_0612.JPG	16	21	30,702	-23,24592284	0,022	-45,84955228	0,022	991,373	0,045	48,76	64,87	0,36	34,08	-0,33	-3,46	-2,22	-2,68	-34,12
DSC_0613.JPG	16	21	32,702	-23,24474651	0,022	-45,84860251	0,022	990,506	0,045	48,76	65,16	-0,75	34,77	-0,07	-1,65	-1,00	-1,31	-34,78
DSC_0614.JPG	16	21	34,702	-23,24356675	0,022	-45,84765076	0,022	988,336	0,045	48,82	65,30	-1,45	34,36	0,87	-0,85	0,24	-1,19	-34,36
DSC_0615.JPG	16	21	36,702	-23,24238611	0,022	-45,84669885	0,022	985,941	0,045	48,45	65,52	-0,50	33,89	1,74	-2,07	0,29	-2,69	-33,92
DSC_0616.JPG	16	21	38,702	-23,24120375	0,022	-45,84575563	0,022	985,941	0,045	48,26	65,28	0,28	33,73	2,05	-1,46	0,89	-2,36	-33,74
DSC_0617.JPG	16	21	40,702	-23,24002481	0,022	-45,84481887	0,022	987,464	0,045	47,69	65,32	0,53	33,43	1,21	-0,86	0,53	-1,38	-33,43
DSC_0630.JPG	16	22	6,703	-23,22712	0,023	-45,83039384	0,023	1039,419	0,047	79,52	22,76	2,96	71,06	2,72	19,51	19,33	3,79	-71,24
DSC_0631.JPG	16	22	8,703	-23,22676703	0,024	-45,82881683	0,024	1044,508	0,047	81,75	16,52	2,64	74,98	2,79	16,76	16,90	1,70	-74,82
DSC_0701.JPG	16	24	28,705	-23,22795062	0,022	-45,84452464	0,022	1541,318	0,045	-46,41	-71,26	-0,18	-147,73	0,72	-15,05	7,58	13,07	146,77
DSC_0705.JPG	16	24	36,705	-23,23315522	0,022	-45,84802097	0,022	1540,122	0,045	-45,70	-71,18	0,01	-147,80	0,88	1,48	-1,53	-0,78	147,80
DSC_0706.JPG	16	24	38,705	-23,23443886	0,022	-45,84891654	0,022	1540,213	0,045	-45,86	-71,05	0,14	-147,65	0,73	-0,60	-0,29	0,89	147,65
DSC_0707.JPG	16	24	40,705	-23,23572339	0,022	-45,84981102	0,022	1540,074	0,045	-45,70	-71,19	-0,23	-147,83	0,58	-0,67	-0,14	0,88	147,82
DSC_0708.JPG	16	24	42,705	-23,23701064	0,023	-45,85070259	0,023	1539,870	0,045	-45,57	-71,36	0,06	-147,87	0,79	-0,47	-0,42	0,81	147,87
DSC_0709.JPG	16	24	44,705	-23,23829926	0,023	-45,85159233	0,023	1539,692	0,047	-45,57	-71,37	-0,16	-147,56	0,75	0,07	-0,67	0,34	147,57
DSC_0710.JPG	16	24	46,705	-23,2395875	0,023	-45,85248373	0,023	1539,665	0,047	-45,62	-71,34	0,15	-148,01	0,83	-0,23	-0,58	0,63	148,01
DSC_0711.JPG	16	24	48,705	-23,24087586	0,023	-45,85337479	0,023	1539,823	0,047	-45,64	-71,31	0,20	-147,66	0,84	-0,21	-0,59	0,63	147,66
DSC_0712.JPG	16	24	50,705	-23,24216327	0,023	-45,85426699	0,023	1540,027	0,047	-45,72	-71,26	-0,09	-147,90	0,55	0,69	-0,83	-0,30	147,90
DSC_0713.JPG	16	24	52,705	-23,24344835	0,023	-45,85516410	0,023	1540,160	0,047	-46,10	-71,12	0,24	-147,41	0,55	0,80	-0,89	-0,38	147,41
DSC_0714.JPG	16	24	54,706	-23,24473111	0,023	-45,85606630	0,023	1540,195	0,047	-46,14	-71,08	-0,07	-147,19	0,58	-0,86	-0,02	1,04	147,18
DSC_0715.JPG	16	24	56,706	-23,24601532	0,023	-45,85696637	0,023	1540,081	0,047	-45,98	-71,14	0,09	-147,66	0,91	-0,60	-0,45	0,99	147,66
DSC_0716.JPG	16	24	58,706	-23,24730035	0,023	-45,85786306	0,023	1540,216	0,047	-45,86	-71,14	-0,07	-147,54	0,83	0,08	-0,74	0,38	147,54
DSC_0717.JPG	16	25	0,706	-23,24858314	0,023	-45,85876033	0,023	1540,330	0,047	-45,95	-70,97	0,06	-147,51	0,87	0,21	-0,84	0,29	147,52
DSC_0718.JPG	16	25	2,706	-23,24986348	0,023	-45,85965875	0,023	1540,498	0,047	-46,03	-70,86	0,11	-147,37	0,92	0,35	-0,97	0,20	147,38
DSC_0719.JPG	16	25	4,706	-23,25114182	0,023	-45,86055889	0,023	1540,613	0,047	-46,14	-70,78	-0,01	-147,18	0,84	0,35	-0,89	0,15	147,18
DSC_0720.JPG	16	25	6,706	-23,25241764	0,023	-45,86146215	0,023	1540,624	0,047	-46,37	-70,54	-0,09	-146,88	0,92	1,36	-1,51	-0,63	146,88
DSC_0721.JPG	16	25	8,706	-23,2536891	0,023	-45,86237113	0,023	1540,554	0,047	-46,59	-70,38	-0,07	-146,71	1,08	-0,05	-0,88	0,63	146,71
DSC_0722.JPG	16	25	10,706	-23,25495919	0,023	-45,86328011	0,023	1540,550	0,047	-46,45	-70,33	0,10	-146,42	1,21	-0,38	-0,80	0,98	146,42
DSC_0723.JPG	16	25	12,706	-23,2562287	0,023	-45,86418704	0,023	1540,801	0,047	-46,33	-70,33	0,12	-146,56	0,92	-0,60	-0,43	1,01	146,55

Tabela J.1 – Parâmetros de voo nos instantes das fotos da câmera Nikon. (continuação)

Foto	Tempo UTC			Latitude (graus)	σ Lat (m)	Longitude (graus)	σ Long (m)	h (m)	σ h (m)	Veast (m/s)	Vnorth (m/s)	Vup (m/s)	ψ (graus)	θ (graus)	ϕ (graus)	ω (graus)	φ (graus)	κ (graus)
	HH	MM	SS															
DSC_0724.JPG	16	25	14,706	-23,25749869	0,023	-45,86509159	0,023	1540,726	0,047	-46,20	-70,35	-0,03	-146,91	1,20	-0,70	-0,62	1,24	146,91
DSC_0738.JPG	16	25	42,706	-23,27555521	0,023	-45,87727999	0,023	1536,969	0,047	-36,42	-76,65	0,48	-154,26	1,87	-21,21	7,92	19,82	152,53
DSC_0739.JPG	16	25	44,706	-23,27697139	0,023	-45,87792005	0,023	1537,875	0,047	-28,71	-80,21	0,33	-160,49	1,59	-25,71	7,67	24,66	158,45
DSC_0740.JPG	16	25	46,706	-23,27844956	0,023	-45,87839390	0,023	1538,403	0,047	-19,61	-83,34	0,31	-167,22	1,71	-26,79	4,73	26,45	165,70
DSC_0741.JPG	16	25	48,706	-23,27997506	0,023	-45,87868229	0,023	1539,016	0,047	-9,79	-85,41	0,20	-174,18	1,54	-28,23	1,59	28,23	173,40
DSC_0742.JPG	16	25	50,706	-23,28152866	0,023	-45,87877200	0,023	1539,210	0,047	0,73	-86,38	0,01	178,24	1,58	-29,19	-2,56	29,13	-177,99
DSC_0804.JPG	16	27	54,709	-23,26635204	0,023	-45,81613728	0,023	1548,116	0,046	-64,88	50,86	-1,16	-54,44	0,52	-25,50	21,47	-14,11	57,01
DSC_0805.JPG	16	27	56,709	-23,26549599	0,023	-45,81745722	0,023	1546,013	0,046	-69,97	44,04	-1,12	-59,67	0,46	-22,90	20,23	-10,96	61,54
DSC_0812.JPG	16	28	10,709	-23,26304782	0,023	-45,82837728	0,023	1539,868	0,046	-83,53	2,61	0,39	-90,57	1,47	10,02	-10,04	1,35	90,81
DSC_0813.JPG	16	28	12,709	-23,26294938	0,023	-45,83000347	0,023	1540,284	0,046	-82,63	10,16	-0,14	-84,52	1,79	31,40	-31,17	4,38	86,25
DSC_0822.JPG	16	28	30,709	-23,25697267	0,023	-45,84295008	0,023	1538,503	0,046	-71,64	41,07	0,12	-62,65	0,71	0,09	0,24	0,68	62,65
DSC_0823.JPG	16	28	32,709	-23,25622885	0,023	-45,84434911	0,023	1538,698	0,046	-71,56	41,38	-0,06	-61,96	0,51	0,07	0,18	0,49	61,96
DSC_0824.JPG	16	28	34,709	-23,25548051	0,023	-45,84574719	0,023	1538,776	0,046	-71,59	41,40	0,13	-61,80	0,79	-0,78	1,05	0,33	61,79
DSC_0825.JPG	16	28	36,709	-23,25473259	0,023	-45,84714601	0,023	1539,066	0,046	-71,60	41,40	0,05	-61,92	0,67	-1,13	1,32	0,06	61,91
DSC_0826.JPG	16	28	38,709	-23,25398681	0,023	-45,84854664	0,023	1538,746	0,046	-71,72	41,22	-0,10	-61,81	1,10	-1,34	1,69	0,34	61,79
DSC_0827.JPG	16	28	40,709	-23,25324512	0,023	-45,84994804	0,023	1538,776	0,046	-71,74	40,98	0,06	-62,30	0,87	-0,69	1,02	0,44	62,29
DSC_0828.JPG	16	28	42,709	-23,252506	0,023	-45,85134921	0,023	1538,653	0,046	-71,68	40,94	-0,01	-62,01	1,00	-0,73	1,12	0,54	61,99
DSC_0829.JPG	16	28	44,709	-23,25176742	0,023	-45,85274928	0,023	1538,601	0,046	-71,54	41,02	-0,05	-61,87	0,85	0,45	0,01	0,96	61,87
DSC_0830.JPG	16	28	46,709	-23,25102432	0,023	-45,85414591	0,023	1538,631	0,046	-71,39	41,35	-0,01	-61,44	0,61	0,62	-0,26	0,83	61,44
DSC_0831.JPG	16	28	48,709	-23,25027471	0,023	-45,85553934	0,023	1538,565	0,046	-71,34	41,58	-0,03	-61,42	0,65	-0,73	0,95	0,22	61,41
DSC_0832.JPG	16	28	50,709	-23,24952497	0,023	-45,85693388	0,023	1538,644	0,046	-71,47	41,42	0,00	-61,55	0,59	-1,77	1,84	-0,32	61,55
DSC_0833.JPG	16	28	52,709	-23,24878009	0,023	-45,85833303	0,023	1538,479	0,046	-71,73	41,11	-0,22	-61,88	0,51	-1,42	1,49	-0,22	61,88
DSC_0834.JPG	16	28	54,710	-23,24803965	0,023	-45,85973631	0,023	1538,112	0,046	-71,93	40,84	-0,08	-62,21	0,80	-1,98	2,12	-0,21	62,20
DSC_0835.JPG	16	28	56,710	-23,24730679	0,023	-45,86114423	0,023	1537,947	0,046	-72,21	40,31	-0,09	-62,40	0,78	-2,73	2,78	-0,57	62,39
DSC_0836.JPG	16	28	58,710	-23,24658498	0,023	-45,86255847	0,023	1537,970	0,046	-72,54	39,67	0,06	-63,04	0,75	-2,14	2,25	-0,30	63,03
DSC_0837.JPG	16	29	0,710	-23,24587286	0,023	-45,86397797	0,023	1537,970	0,046	-72,75	39,20	0,02	-63,39	0,73	-2,05	2,16	-0,26	63,38
DSC_0838.JPG	16	29	2,710	-23,24516943	0,023	-45,86540237	0,023	1537,996	0,046	-73,05	38,71	0,00	-63,84	0,76	-2,24	2,35	-0,30	63,84
DSC_0839.JPG	16	29	4,710	-23,24447618	0,023	-45,86683199	0,023	1538,031	0,046	-73,31	38,10	0,01	-64,28	0,72	-2,33	2,41	-0,36	64,28
DSC_0840.JPG	16	29	6,710	-23,24379357	0,023	-45,86826723	0,023	1538,147	0,046	-73,62	37,49	0,07	-64,66	0,64	-2,56	2,59	-0,51	64,65
DSC_0841.JPG	16	29	8,710	-23,2431233	0,023	-45,86970938	0,023	1538,341	0,046	-74,03	36,66	0,22	-65,27	0,87	-3,86	3,87	-0,83	65,27
DSC_0842.JPG	16	29	10,710	-23,24247226	0,023	-45,87116077	0,023	1539,001	0,046	-74,55	35,46	0,33	-66,18	0,99	-4,19	4,23	-0,78	66,17
DSC_0858.JPG	16	29	42,710	-23,23866325	0,023	-45,89567350	0,023	1593,243	0,046	-77,59	-30,70	3,52	-111,76	3,21	-23,30	20,79	11,21	109,04
DSC_0859.JPG	16	29	44,710	-23,2392853	0,023	-45,89716220	0,023	1599,684	0,046	-74,70	-38,07	3,15	-116,84	3,11	-22,20	18,79	12,44	114,17
DSC_0860.JPG	16	29	46,710	-23,24003523	0,023	-45,89859008	0,023	1605,623	0,046	-71,42	-44,80	2,84	-121,91	2,80	-20,54	16,31	12,96	119,53
DSC_0861.JPG	16	29	48,710	-23,24089975	0,023	-45,89995047	0,023	1611,852	0,046	-67,78	-50,73	3,64	-126,86	3,56	-17,26	11,95	13,03	124,95

Tabela J.1 – Parâmetros de voo nos instantes das fotos da câmera Nikon. (continuação)

Foto	Tempo UTC			Latitude (graus)	σ Lat (m)	Longitude (graus)	σ Long (m)	h (m)	σ h (m)	Veast (m/s)	Vnorth (m/s)	Vup (m/s)	ψ (graus)	θ (graus)	ϕ (graus)	ω (graus)	φ (graus)	κ (graus)
	HH	MM	SS															
DSC_0862.JPG	16	29	50,710	-23,24185952	0,023	-45,90123972	0,023	1620,077	0,046	-64,30	-55,36	4,66	-130,57	4,36	-14,47	8,36	12,62	129,09
DSC_0863.JPG	16	29	52,710	-23,24289913	0,023	-45,90246121	0,023	1631,067	0,046	-60,57	-59,76	6,22	-134,55	5,44	-15,64	7,61	14,72	132,82
DSC_0864.JPG	16	29	54,710	-23,24401689	0,023	-45,90360363	0,023	1644,973	0,046	-56,39	-63,96	7,56	-138,52	6,12	-15,06	5,65	15,24	136,95
DSC_0865.JPG	16	29	56,711	-23,24520619	0,023	-45,90466704	0,023	1660,999	0,046	-52,60	-67,67	8,38	-142,27	6,31	-12,94	3,09	14,04	141,17
DSC_0866.JPG	16	29	58,711	-23,24645679	0,023	-45,90566126	0,023	1678,558	0,046	-49,29	-70,68	9,30	-145,32	6,76	-10,78	0,67	12,69	144,61
DSC_0867.JPG	16	30	0,711	-23,24775615	0,023	-45,90659604	0,023	1697,485	0,046	-46,53	-73,09	9,69	-147,76	6,91	-8,36	-1,35	10,75	147,38
DSC_0868.JPG	16	30	2,711	-23,2490922	0,023	-45,90748358	0,023	1717,090	0,046	-44,45	-74,78	9,98	-149,40	7,22	-5,85	-3,23	8,70	149,28
DSC_0869.JPG	16	30	4,711	-23,25045382	0,023	-45,90833452	0,023	1737,919	0,046	-42,70	-75,96	10,93	-150,92	7,83	-4,72	-4,56	7,93	150,91
DSC_0870.JPG	16	30	6,711	-23,25183246	0,023	-45,90915256	0,023	1760,397	0,046	-41,18	-76,66	11,45	-151,55	8,10	-3,13	-5,64	6,61	151,65
DSC_0871.JPG	16	30	8,711	-23,25322021	0,023	-45,90994925	0,023	1783,602	0,046	-40,37	-77,02	11,55	-152,01	8,06	-2,84	-5,80	6,29	152,13
DSC_0872.JPG	16	30	10,711	-23,25461441	0,023	-45,91073127	0,023	1806,559	0,046	-39,76	-77,37	11,42	-152,51	7,96	-1,90	-6,20	5,35	152,67
DSC_0928.JPG	16	32	2,713	-23,22919964	0,023	-45,90583676	0,023	2508,384	0,047	84,41	27,90	-0,16	71,10	0,75	16,84	16,21	4,71	-71,66
DSC_0929.JPG	16	32	4,713	-23,22875104	0,023	-45,90417143	0,023	2507,966	0,047	86,07	21,43	-0,16	75,59	1,00	20,14	19,77	4,01	-76,11
DSC_0930.JPG	16	32	6,713	-23,2284307	0,023	-45,90247701	0,023	2507,737	0,047	87,32	14,01	-0,25	80,38	0,78	21,29	21,13	2,76	-80,75
DSC_0931.JPG	16	32	8,713	-23,22824727	0,023	-45,90076341	0,023	2507,095	0,047	87,96	6,30	-0,26	85,34	0,91	20,68	20,69	0,79	-85,32
DSC_0932.JPG	16	32	10,713	-23,22820001	0,023	-45,89904361	0,023	2506,721	0,047	87,95	-0,97	-0,12	90,07	1,02	19,16	19,16	-0,99	-89,73
DSC_0933.JPG	16	32	12,713	-23,228279	0,023	-45,89732972	0,023	2506,696	0,047	87,37	-7,76	0,08	94,37	1,08	18,79	18,67	-2,43	-93,79
DSC_0934.JPG	16	32	14,713	-23,22848103	0,023	-45,89563283	0,023	2506,984	0,047	86,21	-14,68	0,23	98,89	1,20	19,52	19,14	-4,08	-98,00
DSC_0935.JPG	16	32	16,713	-23,22880836	0,023	-45,89396446	0,023	2507,401	0,047	84,48	-21,53	0,25	103,38	1,09	19,44	18,73	-5,42	-102,30
DSC_0936.JPG	16	32	18,713	-23,2292553	0,023	-45,89233276	0,023	2507,150	0,047	82,46	-27,95	-0,28	107,86	0,73	18,45	17,42	-6,23	-106,79
DSC_0937.JPG	16	32	20,713	-23,22981433	0,025	-45,89074377	0,025	2506,275	0,050	80,19	-33,81	-0,43	111,92	0,67	16,36	15,00	-6,63	-110,95
DSC_0938.JPG	16	32	22,713	-23,23046906	0,023	-45,88919935	0,023	2505,563	0,047	78,11	-38,27	-0,14	115,29	0,69	9,41	8,23	-4,62	-114,90
DSC_0939.JPG	16	32	24,713	-23,2311846	0,023	-45,88768766	0,023	2505,291	0,047	76,67	-40,95	0,03	116,87	0,87	8,32	7,04	-4,52	-116,53
DSC_0940.JPG	16	32	26,713	-23,23194869	0,023	-45,88620467	0,023	2504,918	0,047	75,05	-43,91	-0,45	119,28	0,33	10,57	9,09	-5,43	-118,82
DSC_0941.JPG	16	32	28,713	-23,2327723	0,023	-45,88475837	0,023	2503,635	0,047	72,90	-47,48	-0,57	121,96	0,66	12,70	10,49	-7,24	-121,22
DSC_0942.JPG	16	32	30,713	-23,233664	0,023	-45,88335994	0,023	2503,156	0,047	70,32	-51,19	-0,12	124,91	0,72	11,75	9,28	-7,28	-124,25
DSC_0947.JPG	16	32	40,713	-23,238694	0,023	-45,87684510	0,023	2501,801	0,047	67,92	-54,44	-0,02	127,29	0,77	-5,95	-5,21	2,99	-127,20
DSC_0948.JPG	16	32	42,713	-23,23966821	0,023	-45,87550848	0,023	2501,526	0,047	68,72	-53,67	-0,11	126,45	0,78	-1,17	-1,40	0,07	-126,46
DSC_0949.JPG	16	32	44,713	-23,24063758	0,023	-45,87416507	0,023	2501,486	0,047	68,78	-53,77	0,01	126,86	0,82	-1,01	-1,30	-0,04	-126,87
DSC_0950.JPG	16	32	46,713	-23,24160797	0,023	-45,87282030	0,023	2501,641	0,047	68,80	-53,87	0,21	126,64	0,87	1,17	0,42	-1,39	-126,63
DSC_0951.JPG	16	32	48,713	-23,24258549	0,023	-45,87147931	0,023	2501,766	0,047	68,52	-54,43	0,16	127,14	0,88	0,64	-0,02	-1,09	-127,14
DSC_0952.JPG	16	32	50,713	-23,24357087	0,023	-45,87014219	0,023	2501,987	0,047	68,42	-54,74	0,06	127,26	0,69	0,08	-0,36	-0,59	-127,26
DSC_0953.JPG	16	32	52,713	-23,24456029	0,023	-45,86880525	0,023	2502,155	0,047	68,53	-54,83	0,11	127,26	0,87	-1,14	-1,43	0,00	-127,26
DSC_0954.JPG	16	32	54,713	-23,24554926	0,023	-45,86746412	0,023	2502,315	0,047	68,78	-54,77	-0,01	127,28	0,76	-1,18	-1,40	0,11	-127,28
DSC_0955.JPG	16	32	56,714	-23,24653739	0,023	-45,86611832	0,023	2502,417	0,047	68,97	-54,77	-0,09	127,12	0,53	-0,37	-0,62	-0,20	-127,12

Tabela J.1 – Parâmetros de voo nos instantes das fotos da câmera Nikon. (continuação)

Foto	Tempo UTC			Latitude (graus)	σ Lat (m)	Longitude (graus)	σ Long (m)	h (m)	σ h (m)	Veast (m/s)	Vnorth (m/s)	Vup (m/s)	ψ (graus)	θ (graus)	ϕ (graus)	ω (graus)	φ (graus)	κ (graus)
	HH	MM	SS															
DSC_0956.JPG	16	32	58,714	-23,24752817	0,023	-45,86477020	0,023	2502,058	0,047	69,04	-55,04	-0,07	127,22	0,72	-0,21	-0,60	-0,45	-127,22
DSC_0957.JPG	16	33	0,714	-23,2485226	0,023	-45,86342143	0,023	2502,187	0,047	69,00	-55,18	0,19	127,34	0,76	0,07	-0,41	-0,64	-127,34
DSC_0958.JPG	16	33	2,714	-23,24952123	0,023	-45,86207319	0,023	2502,443	0,047	69,02	-55,43	0,00	127,66	0,60	-0,58	-0,82	-0,12	-127,67
DSC_0959.JPG	16	33	4,714	-23,25052259	0,023	-45,86072373	0,023	2502,576	0,047	69,12	-55,47	0,12	127,60	0,76	-0,80	-1,10	-0,11	-127,60
DSC_0960.JPG	16	33	6,714	-23,25152458	0,023	-45,85937232	0,023	2503,124	0,047	69,17	-55,55	0,45	127,61	0,98	-0,38	-0,90	-0,55	-127,62
DSC_0961.JPG	16	33	8,714	-23,25252805	0,023	-45,85802153	0,023	2504,332	0,047	69,08	-55,59	0,76	127,70	1,18	-0,21	-0,89	-0,81	-127,71
DSC_0962.JPG	16	33	10,714	-23,25353299	0,023	-45,85667305	0,023	2506,097	0,047	68,96	-55,71	0,98	127,79	1,30	-0,44	-1,14	-0,76	-127,80
DSC_0963.JPG	16	33	12,714	-23,25453814	0,023	-45,85532639	0,023	2507,824	0,047	68,94	-55,71	0,53	127,94	0,77	-0,96	-1,23	-0,02	-127,95
DSC_0964.JPG	16	33	14,714	-23,25554342	0,023	-45,85397837	0,023	2508,421	0,047	69,12	-55,61	0,16	127,73	0,63	-1,60	-1,66	0,48	-127,73
DSC_0965.JPG	16	33	16,714	-23,25654594	0,023	-45,85262527	0,023	2508,613	0,047	69,42	-55,42	0,22	127,44	0,85	-1,86	-1,99	0,45	-127,44
DSC_0966.JPG	16	33	18,714	-23,25754361	0,023	-45,85126615	0,023	2509,093	0,047	69,69	-55,13	0,30	127,04	0,85	-1,34	-1,58	0,13	-127,05
DSC_0967.JPG	16	33	20,714	-23,2585388	0,023	-45,84990379	0,023	2509,662	0,047	69,64	-55,26	0,36	127,04	0,87	1,23	0,45	-1,44	-127,03
DSC_0968.JPG	16	33	22,714	-23,25954282	0,023	-45,84854782	0,023	2510,031	0,047	69,01	-56,12	0,04	127,79	0,69	4,01	2,75	-3,00	-127,70
DSC_0969.JPG	16	33	24,714	-23,26056808	0,023	-45,84720915	0,023	2510,243	0,047	67,94	-57,47	0,25	128,91	0,92	4,83	3,18	-3,75	-128,77
DSC_0970.JPG	16	33	26,714	-23,26161854	0,024	-45,84589377	0,024	2511,129	0,047	66,68	-58,87	0,65	130,08	1,17	5,19	3,23	-4,23	-129,91
DSC_0976.JPG	16	33	38,714	-23,26871982	0,023	-45,83900735	0,023	2525,693	0,047	47,54	-73,66	1,25	145,43	1,83	14,08	6,62	-12,58	-144,47
DSC_0977.JPG	16	33	40,714	-23,27007149	0,023	-45,83812174	0,023	2528,402	0,047	43,10	-76,03	1,45	148,67	1,94	14,17	5,85	-13,08	-147,75
DSC_0978.JPG	16	33	42,714	-23,27146443	0,023	-45,83732472	0,023	2531,454	0,047	38,47	-78,24	1,46	151,85	2,07	14,50	5,15	-13,72	-150,97
DSC_0979.JPG	16	33	44,714	-23,27289389	0,023	-45,83661962	0,023	2534,670	0,047	33,72	-80,08	1,53	155,21	2,05	14,59	4,39	-14,08	-154,40
DSC_0980.JPG	16	33	46,714	-23,27435541	0,023	-45,83600855	0,023	2537,713	0,047	28,84	-81,77	1,54	158,41	2,09	14,26	3,41	-14,01	-157,73

Tabela J.2 – Parâmetros de voo nos instantes das fotos da câmera GoPRO.

Foto	Tempo UTC			Latitude (graus)	σ Lat (m)	Longitude (graus)	σ Long (m)	h (m)	σ h (m)	Veast (m/s)	Vnorth (m/s)	Vup (m/s)	ψ (graus)	θ (graus)	ϕ (graus)	ω (graus)	φ (graus)	κ (graus)
	HH	MM	SS															
G0017267.JPG	16	4	57,418	-23,25825742	0,025	-45,84659420	0,025	1006,037	0,050	-66,97	41,28	-0,52	-60,82	-1,37	0,42	-1,04	-0,99	60,81
G0017269.JPG	16	4	59,418	-23,25751575	0,024	-45,84790423	0,024	1005,914	0,047	-67,02	41,04	0,18	-60,56	-1,87	1,34	-2,09	-0,96	60,52
G0017283.JPG	16	5	13,417	-23,25228187	0,025	-45,85713667	0,025	1006,426	0,050	-68,53	42,38	-1,05	-61,63	-3,05	-0,09	-1,38	-2,73	61,60
G0017285.JPG	16	5	15,417	-23,25151752	0,025	-45,85848039	0,025	1004,212	0,050	-68,77	42,49	-0,87	-59,57	-1,83	0,36	-1,24	-1,39	59,55
G0017287.JPG	16	5	17,417	-23,25074994	0,024	-45,85982384	0,024	1005,011	0,047	-68,73	42,49	1,20	-61,08	-1,89	0,66	-1,49	-1,34	61,06
G0017289.JPG	16	5	19,417	-23,24998355	0,024	-45,86116749	0,024	1007,009	0,047	-68,82	42,48	1,03	-60,08	-2,60	1,11	-2,26	-1,70	60,02
G0017291.JPG	16	5	21,416	-23,24921232	0,024	-45,86251226	0,024	1007,455	0,047	-68,87	42,92	-0,55	-59,34	-2,95	2,07	-3,28	-1,48	59,25
G0017293.JPG	16	5	23,416	-23,24843131	0,024	-45,86385614	0,024	1006,306	0,047	-68,80	43,35	-0,66	-59,94	-2,22	0,27	-1,35	-1,79	59,92
G0017295.JPG	16	5	25,416	-23,24764800	0,024	-45,86520185	0,024	1006,428	0,047	-68,98	43,43	0,54	-60,52	-2,48	-0,35	-0,92	-2,33	60,51
G0017297.JPG	16	5	27,416	-23,24686702	0,024	-45,86655353	0,024	1006,062	0,047	-69,20	43,40	-0,95	-59,59	-2,79	1,00	-2,28	-1,90	59,53
G0017299.JPG	16	5	29,416	-23,24608498	0,024	-45,86790937	0,024	1004,936	0,047	-69,65	42,99	-0,46	-60,10	-2,31	-0,97	-0,31	-2,49	60,11
G0017301.JPG	16	5	31,416	-23,24531048	0,024	-45,86927287	0,024	1004,793	0,047	-70,04	42,58	0,56	-61,29	-2,10	-2,76	1,41	-3,17	61,38
G0017304.JPG	16	5	34,416	-23,24418782	0,024	-45,87134656	0,024	1005,618	0,047	-71,48	40,34	0,06	-61,91	-2,25	-4,86	3,24	-4,26	62,12
G0017306.JPG	16	5	36,416	-23,24347441	0,024	-45,87275257	0,024	1006,062	0,047	-72,43	38,60	0,66	-63,53	-1,69	-6,22	4,82	-4,27	63,80
G0017343.JPG	16	6	13,414	-23,24582903	0,024	-45,90026544	0,024	1012,693	0,047	-59,24	-58,17	0,34	-137,11	-2,26	-13,90	11,17	8,63	136,54
G0017345.JPG	16	6	15,413	-23,24691289	0,024	-45,90138584	0,024	1012,598	0,047	-55,54	-61,74	-0,34	-139,16	-2,22	-15,80	12,11	10,47	138,36
G0017347.JPG	16	6	17,413	-23,24805820	0,024	-45,90243298	0,024	1012,410	0,047	-51,42	-65,23	-0,30	-146,06	-2,66	-13,50	9,80	9,69	145,54
G0017349.JPG	16	6	19,413	-23,24926015	0,024	-45,90340332	0,024	1010,778	0,047	-48,12	-67,80	-1,43	-147,05	-2,66	-12,39	9,01	8,94	146,63
G0017353.JPG	16	6	23,413	-23,25180551	0,024	-45,90513488	0,024	1006,523	0,047	-40,49	-72,91	-0,38	-154,03	-2,19	-11,03	6,83	8,95	153,71
G0017354.JPG	16	6	24,413	-23,25246800	0,024	-45,90552160	0,024	1006,397	0,047	-38,70	-73,81	0,08	-155,47	-2,07	-10,64	6,33	8,82	155,18
G0017355.JPG	16	6	25,413	-23,25313824	0,024	-45,90589128	0,024	1006,444	0,047	-37,03	-74,61	0,26	-157,10	-1,97	-8,94	5,31	7,47	156,91
G0017356.JPG	16	6	26,413	-23,25381542	0,024	-45,90624481	0,024	1006,651	0,047	-35,64	-75,27	-0,31	-157,22	-2,68	-7,17	5,25	5,58	157,13
G0017357.JPG	16	6	27,413	-23,25449743	0,024	-45,90658818	0,024	1006,403	0,047	-34,72	-75,75	0,16	-158,02	-2,06	-4,87	3,74	3,74	157,98
G0017493.JPG	16	8	43,405	-23,25397537	0,023	-45,86262641	0,023	1003,707	0,047	43,25	66,55	0,66	29,92	-2,16	0,52	-1,61	1,53	-29,91
G0017495.JPG	16	8	45,405	-23,25277506	0,023	-45,86177822	0,023	1005,376	0,047	43,38	66,56	0,21	29,31	-2,87	1,59	-1,72	2,79	-29,31
G0017497.JPG	16	8	47,405	-23,25157520	0,023	-45,86092361	0,023	1004,152	0,047	44,13	66,33	-0,99	30,55	-2,51	1,05	-1,63	2,18	-30,54
G0017499.JPG	16	8	49,405	-23,25037584	0,023	-45,86006036	0,023	1002,761	0,047	44,33	66,44	-0,30	31,11	-2,34	1,47	-1,24	2,47	-31,11
G0017501.JPG	16	8	51,405	-23,24917667	0,023	-45,85918846	0,023	1003,698	0,047	44,73	66,53	0,91	30,17	-3,35	1,00	-2,39	2,55	-30,15
G0017503.JPG	16	8	53,405	-23,24797489	0,023	-45,85831074	0,023	1002,295	0,047	45,23	66,46	-1,20	32,06	-2,50	0,82	-1,69	2,02	-32,05
G0017505.JPG	16	8	55,405	-23,24677548	0,023	-45,85742495	0,023	1001,172	0,047	45,32	66,51	0,24	30,72	-2,18	0,77	-1,49	1,77	-30,71
G0017637.JPG	16	11	7,398	-23,22698944	0,023	-45,84414562	0,023	1003,836	0,046	-54,11	-56,39	-0,26	-138,29	-1,07	-30,12	21,80	21,34	134,42
G0017639.JPG	16	11	9,398	-23,22808375	0,023	-45,84512305	0,023	1002,791	0,046	-45,95	-64,37	-0,86	-145,95	-1,03	-29,33	18,24	23,39	142,41
G0017640.JPG	16	11	10,398	-23,22868105	0,023	-45,84555098	0,023	1001,856	0,046	-42,35	-67,41	-1,14	-150,48	-2,35	-19,15	11,69	15,45	149,28
G0017641.JPG	16	11	11,397	-23,22929965	0,023	-45,84595115	0,023	1000,799	0,046	-40,16	-69,21	-0,52	-152,71	-1,21	-7,86	4,70	6,43	152,53
G0017651.JPG	16	11	21,397	-23,23555980	0,023	-45,84999620	0,023	999,941	0,046	-43,11	-68,67	-0,36	-149,27	-1,84	0,91	1,11	-1,72	149,27

Tabela J.2 – Parâmetros de voo nos instantes das fotos da câmera GoPRO. (continuação)

Foto	Tempo UTC			Latitude (graus)	σ Lat (m)	Longitude (graus)	σ Long (m)	h (m)	σ h (m)	Veast (m/s)	Vnorth (m/s)	Vup (m/s)	ψ (graus)	θ (graus)	ϕ (graus)	ω (graus)	φ (graus)	κ (graus)
	HH	MM	SS															
G0017653.JPG	16	11	23,397	-23,23679894	0,023	-45,85084024	0,023	1000,092	0,046	-43,23	-68,65	0,76	-149,69	-1,80	-0,19	1,65	-0,74	149,70
G0017671.JPG	16	11	41,396	-23,24801536	0,023	-45,85853240	0,023	999,043	0,046	-43,41	-69,28	0,90	-149,75	-2,52	0,21	2,07	-1,45	149,78
G0017673.JPG	16	11	43,396	-23,24926584	0,023	-45,85938448	0,023	1000,843	0,046	-43,74	-69,36	0,84	-150,51	-3,67	0,12	3,14	-1,91	150,56
G0017675.JPG	16	11	45,396	-23,25052055	0,023	-45,86023942	0,023	1000,932	0,046	-43,82	-69,62	-0,34	-149,77	-3,63	0,33	2,97	-2,11	149,81
G0017677.JPG	16	11	47,396	-23,25177575	0,023	-45,86110004	0,023	999,901	0,046	-44,16	-69,38	-1,23	-150,88	-2,88	0,72	2,16	-2,03	150,90
G0017679.JPG	16	11	49,395	-23,25302469	0,023	-45,86196579	0,023	997,952	0,046	-44,43	-68,88	-0,70	-149,47	-1,67	0,26	1,30	-1,07	149,48
G0017681.JPG	16	11	51,395	-23,25426574	0,023	-45,86283245	0,023	998,058	0,046	-44,17	-68,67	-0,37	-149,53	-2,11	-1,00	2,33	-0,21	149,56
G0017683.JPG	16	11	53,395	-23,25550387	0,023	-45,86369315	0,023	997,649	0,046	-44,03	-68,40	0,30	-150,05	-1,56	1,64	0,53	-2,20	150,04
G0017820.JPG	16	14	10,388	-23,26909046	0,023	-45,82975261	0,023	1012,002	0,046	-44,51	66,93	-0,18	-35,80	-3,13	-4,50	0,10	-5,47	35,93
G0017821.JPG	16	14	11,388	-23,26848833	0,023	-45,83019077	0,023	1011,668	0,046	-45,41	66,30	-0,91	-34,29	-3,20	-8,78	2,35	-9,04	34,72
G0017822.JPG	16	14	12,388	-23,26789224	0,023	-45,83063772	0,023	1010,380	0,046	-46,59	65,32	-1,14	-35,34	-1,55	-15,97	8,17	-13,85	36,55
G0017847.JPG	16	14	37,386	-23,25732009	0,023	-45,84594138	0,023	1008,206	0,046	-63,47	45,61	0,45	-56,94	-2,18	0,07	-1,25	-1,79	56,92
G0017849.JPG	16	14	39,386	-23,25649549	0,023	-45,84718303	0,023	1008,341	0,046	-63,77	45,55	-0,19	-56,85	-2,42	-1,02	-0,47	-2,58	56,86
G0017863.JPG	16	14	53,385	-23,25081562	0,023	-45,85590799	0,023	1009,478	0,046	-63,83	45,62	0,15	-55,99	-1,59	0,64	-1,42	-0,96	55,97
G0017865.JPG	16	14	55,385	-23,24999186	0,023	-45,85715676	0,023	1010,303	0,046	-64,10	45,66	0,43	-57,23	-2,83	-0,57	-1,06	-2,68	57,22
G0017867.JPG	16	14	57,385	-23,24916853	0,023	-45,85841532	0,023	1009,298	0,046	-64,81	45,46	-1,61	-56,76	-3,12	-1,36	-0,57	-3,36	56,78
G0017869.JPG	16	14	59,385	-23,24834536	0,023	-45,85968348	0,023	1006,767	0,046	-64,96	45,73	0,32	-57,71	-1,86	1,28	-2,08	-0,89	57,68
G0017871.JPG	16	15	1,385	-23,24752055	0,023	-45,86095510	0,023	1008,200	0,046	-65,26	45,66	0,40	-56,91	-3,27	-0,84	-1,08	-3,20	56,91
G0017873.JPG	16	15	3,385	-23,24669732	0,023	-45,86223569	0,023	1007,720	0,046	-65,62	45,68	-1,71	-56,42	-2,86	0,03	-1,60	-2,37	56,39
G0017875.JPG	16	15	5,385	-23,24587278	0,023	-45,86351949	0,023	1006,224	0,046	-65,79	45,51	-0,20	-57,00	-1,84	0,19	-1,16	-1,44	56,98
G0017877.JPG	16	15	7,385	-23,24505015	0,023	-45,86480295	0,023	1006,607	0,046	-65,70	45,45	0,92	-57,32	-1,95	-0,60	-0,55	-1,96	57,32
G0017879.JPG	16	15	9,385	-23,24423264	0,023	-45,86608753	0,023	1008,008	0,046	-66,04	44,75	0,03	-58,04	-2,60	-5,32	3,15	-5,02	58,30
G0017880.JPG	16	15	10,385	-23,24383133	0,023	-45,86673504	0,023	1007,598	0,046	-66,64	43,90	-0,67	-57,75	-2,25	-9,00	6,45	-6,68	58,31
G0017883.JPG	16	15	13,384	-23,24270049	0,023	-45,86872563	0,023	1006,495	0,046	-69,39	39,10	0,36	-63,23	-2,26	-10,58	8,48	-6,74	63,94
G0017884.JPG	16	15	14,384	-23,24235485	0,023	-45,86940810	0,023	1006,511	0,046	-70,37	37,29	0,07	-63,23	-1,93	-14,23	11,93	-8,04	64,31
G0017885.JPG	16	15	15,384	-23,24202750	0,023	-45,87010085	0,023	1006,602	0,046	-71,47	35,07	0,25	-65,58	-1,83	-15,00	13,00	-7,76	66,71
G0017886.JPG	16	15	16,384	-23,24172099	0,023	-45,87080441	0,023	1006,590	0,046	-72,55	32,74	-0,27	-67,96	-2,04	-15,68	13,88	-7,66	69,18
G0017887.JPG	16	15	17,384	-23,24143818	0,023	-45,87151936	0,023	1006,588	0,046	-73,76	29,92	-0,33	-69,87	-2,39	-18,28	16,49	-8,34	71,47
G0017919.JPG	16	15	49,382	-23,24309291	0,023	-45,89597083	0,023	1006,357	0,046	-78,66	-17,91	-0,19	-106,85	-0,70	28,84	-27,63	-8,63	104,54
G0017920.JPG	16	15	50,382	-23,24323224	0,023	-45,89674523	0,023	1005,957	0,046	-79,72	-12,49	-0,39	-102,00	-0,26	32,32	-31,71	-6,60	100,05
G0017921.JPG	16	15	51,382	-23,24331605	0,023	-45,89752888	0,023	1005,876	0,046	-80,46	-5,85	0,07	-97,73	0,58	35,24	-35,05	-3,98	96,65
G0017922.JPG	16	15	52,382	-23,24333775	0,023	-45,89831672	0,023	1006,229	0,046	-80,59	1,23	0,48	-93,14	0,72	37,49	-37,47	-1,34	92,93
G0017923.JPG	16	15	53,382	-23,24329408	0,023	-45,89910320	0,023	1006,686	0,046	-80,15	8,70	0,39	-87,67	0,47	41,28	-41,25	1,89	88,56
G0017924.JPG	16	15	54,382	-23,24318036	0,023	-45,89988173	0,023	1006,666	0,046	-78,97	16,46	-0,31	-81,21	0,13	41,93	-41,59	5,96	83,52
G0017927.JPG	16	15	57,382	-23,24239822	0,026	-45,90208478	0,026	1007,710	0,051	-69,82	40,55	0,37	-62,50	0,89	44,01	-40,36	19,31	70,01

Tabela J.2 – Parâmetros de voo nos instantes das fotos da câmera GoPRO. (continuação)

Foto	Tempo UTC			Latitude (graus)	σ Lat (m)	Longitude (graus)	σ Long (m)	h (m)	σ h (m)	Veast (m/s)	Vnorth (m/s)	Vup (m/s)	ψ (graus)	θ (graus)	ϕ (graus)	ω (graus)	φ (graus)	κ (graus)
	HH	MM	SS															
G0017928.JPG	16	15	58,382	-23,24199887	0,026	-45,90274503	0,026	1007,658	0,051	-65,03	47,74	-0,39	-57,02	2,09	44,92	-39,26	23,95	66,53
G0017929.JPG	16	15	59,382	-23,24153665	0,026	-45,90335418	0,026	1007,313	0,051	-59,40	54,46	-0,20	-49,96	1,44	43,76	-35,65	27,31	59,48
G0017930.JPG	16	16	0,382	-23,24101339	0,026	-45,90390113	0,026	1007,414	0,051	-52,16	61,24	0,73	-42,74	1,58	42,51	-31,05	30,67	52,06
G0017933.JPG	16	16	3,382	-23,23914925	0,026	-45,90510243	0,026	1012,246	0,052	-30,14	74,48	0,96	-25,14	1,16	42,90	-20,63	38,50	32,87
G0017950.JPG	16	16	20,381	-23,23037249	0,025	-45,89884640	0,025	1008,510	0,051	78,41	11,02	0,76	78,35	-0,26	15,38	15,03	3,32	-78,82
G0017951.JPG	16	16	21,381	-23,23028469	0,024	-45,89807975	0,024	1009,817	0,048	78,43	9,18	1,66	79,45	-1,23	5,91	5,59	2,28	-79,62
G0017952.JPG	16	16	22,381	-23,23020577	0,024	-45,89731373	0,024	1010,951	0,048	78,41	8,43	0,65	80,14	-2,05	3,72	3,31	2,65	-80,28
G0017995.JPG	16	17	5,378	-23,24371146	0,023	-45,86775255	0,023	1012,667	0,046	68,19	-45,82	-0,08	120,42	-1,99	3,44	3,97	-0,02	-120,47
G0017997.JPG	16	17	7,378	-23,24454397	0,023	-45,86642493	0,023	1012,475	0,046	67,95	-46,06	0,60	121,53	-1,96	-0,75	0,39	2,07	-121,52
G0017999.JPG	16	17	9,378	-23,24537329	0,023	-45,86509536	0,023	1011,995	0,046	67,96	-46,07	-0,58	121,00	-1,61	1,88	2,44	0,41	-121,04
G0018001.JPG	16	17	11,378	-23,24620625	0,023	-45,86376850	0,023	1012,139	0,046	67,86	-46,27	0,39	121,24	-2,03	0,43	1,43	1,51	-121,27
G0018003.JPG	16	17	13,378	-23,24704387	0,023	-45,86244275	0,023	1012,041	0,046	67,98	-46,33	-0,21	120,04	-2,24	0,16	1,26	1,86	-120,07
G0018005.JPG	16	17	15,378	-23,24788150	0,023	-45,86111272	0,023	1011,260	0,046	68,11	-46,48	-0,05	120,43	-1,55	-0,23	0,59	1,45	-120,43
G0018007.JPG	16	17	17,378	-23,24871557	0,023	-45,85977624	0,023	1013,738	0,046	68,86	-45,82	1,27	120,58	-3,31	-0,88	0,92	3,30	-120,58
G0018009.JPG	16	17	19,378	-23,24954937	0,023	-45,85842945	0,023	1014,972	0,046	69,03	-46,47	-0,34	119,92	-3,71	1,12	2,82	2,66	-120,02
G0018011.JPG	16	17	21,377	-23,25038904	0,023	-45,85707866	0,023	1012,518	0,046	69,07	-46,67	-0,65	121,96	-2,33	-0,62	0,71	2,30	-121,96
G0018013.JPG	16	17	23,377	-23,25123030	0,023	-45,85572783	0,023	1012,382	0,046	69,15	-46,67	0,65	121,45	-2,63	1,59	2,73	1,41	-121,52
G0018015.JPG	16	17	25,377	-23,25207543	0,023	-45,85437794	0,023	1011,885	0,046	69,01	-46,89	-0,74	121,54	-2,09	-0,05	1,06	1,81	-121,55
G0018245.JPG	16	21	15,365	-23,25484090	0,022	-45,85680450	0,022	995,766	0,045	48,18	63,49	-0,12	34,85	-3,26	0,96	-2,13	2,65	-34,83
G0018247.JPG	16	21	17,365	-23,25369223	0,022	-45,85585997	0,022	995,810	0,045	48,37	63,86	-0,55	35,11	-3,98	-2,21	-4,52	0,48	-35,02
G0018249.JPG	16	21	19,365	-23,25253070	0,022	-45,85491813	0,022	994,665	0,045	48,03	64,66	-1,00	35,05	-3,14	-1,20	-3,25	0,82	-34,99
G0018251.JPG	16	21	21,364	-23,25136269	0,022	-45,85397789	0,022	992,598	0,045	48,07	64,71	-0,60	33,88	-1,72	-0,14	-1,50	0,84	-33,87
G0018253.JPG	16	21	23,364	-23,25019574	0,022	-45,85303805	0,022	992,857	0,045	48,20	64,52	0,47	34,70	-2,55	0,13	-2,03	1,56	-34,67
G0018296.JPG	16	22	6,362	-23,22719179	0,023	-45,83065862	0,023	1038,429	0,047	79,06	23,88	2,95	68,62	-0,04	21,27	19,91	7,63	-69,96
G0018297.JPG	16	22	7,362	-23,22699110	0,023	-45,82987990	0,023	1041,266	0,047	80,32	20,65	2,63	71,23	-0,60	19,55	18,41	6,71	-72,42
G0018298.JPG	16	22	8,362	-23,22681949	0,023	-45,82908939	0,023	1043,664	0,047	81,43	17,49	2,43	72,84	-0,29	17,94	17,11	5,48	-73,71
G0018300.JPG	16	22	10,362	-23,22655443	0,024	-45,82748116	0,024	1049,196	0,047	83,06	11,89	2,89	78,41	-0,48	16,00	15,60	3,63	-78,97
G0018301.JPG	16	22	11,362	-23,22645951	0,024	-45,82666651	0,024	1051,972	0,047	83,67	9,26	2,76	80,39	-0,45	14,00	13,74	2,74	-80,78
G0018426.JPG	16	24	16,355	-23,22107541	0,022	-45,83746745	0,022	1540,652	0,045	-62,42	-59,03	-0,04	-134,03	-2,32	4,61	-1,71	-4,87	133,86
G0018431.JPG	16	24	21,355	-23,22369212	0,022	-45,84053694	0,022	1541,548	0,045	-62,47	-57,94	0,13	-133,12	-2,57	-4,06	4,72	0,91	133,18
G0018432.JPG	16	24	22,355	-23,22421769	0,022	-45,84114434	0,022	1541,636	0,045	-61,58	-58,83	-0,02	-133,45	-2,57	-10,62	9,49	5,44	133,23
G0018433.JPG	16	24	23,355	-23,22475454	0,022	-45,84173946	0,022	1541,639	0,045	-59,95	-60,41	-0,01	-134,61	-2,27	-16,56	13,48	9,97	133,75
G0018434.JPG	16	24	24,355	-23,22530917	0,022	-45,84231491	0,022	1541,684	0,045	-57,67	-62,60	0,14	-137,18	-2,09	-19,31	14,85	12,66	135,88
G0018436.JPG	16	24	26,354	-23,22647941	0,022	-45,84339153	0,022	1541,455	0,045	-52,56	-66,92	-0,32	-141,90	-2,42	-18,85	13,72	13,27	140,70
G0018439.JPG	16	24	29,354	-23,22837044	0,022	-45,84481386	0,022	1541,200	0,045	-45,23	-72,06	-0,23	-148,97	-2,86	-10,09	7,67	7,17	148,75

Tabela J.2 – Parâmetros de voo nos instantes das fotos da câmera GoPRO. (continuação)

Foto	Tempo UTC			Latitude (graus)	σ Lat (m)	Longitude (graus)	σ Long (m)	h (m)	σ h (m)	Veast (m/s)	Vnorth (m/s)	Vup (m/s)	ψ (graus)	θ (graus)	ϕ (graus)	ω (graus)	φ (graus)	κ (graus)
	HH	MM	SS															
G0018443.JPG	16	24	33,354	-23,23098839	0,022	-45,84654218	0,022	1540,476	0,045	-44,60	-72,10	-0,08	-149,50	-2,53	2,59	0,86	-3,52	149,46
G0018445.JPG	16	24	35,354	-23,23228457	0,022	-45,84741968	0,022	1540,182	0,045	-45,28	-71,52	-0,08	-149,06	-2,45	3,00	0,56	-3,83	149,02
G0018447.JPG	16	24	37,354	-23,23357105	0,022	-45,84831061	0,022	1540,140	0,045	-45,80	-71,11	0,02	-148,29	-2,49	1,17	1,50	-2,30	148,30
G0018449.JPG	16	24	39,354	-23,23485441	0,022	-45,84920640	0,022	1540,274	0,045	-45,81	-71,11	-0,04	-148,37	-2,84	-0,17	2,51	-1,35	148,40
G0018451.JPG	16	24	41,354	-23,23613972	0,022	-45,85009995	0,022	1540,005	0,045	-45,66	-71,27	-0,15	-148,30	-2,80	-0,32	2,55	-1,20	148,34
G0018457.JPG	16	24	47,353	-23,24000434	0,023	-45,85277176	0,023	1539,775	0,047	-45,55	-71,37	0,14	-148,42	-2,67	0,48	2,02	-1,81	148,44
G0018459.JPG	16	24	49,353	-23,24129220	0,023	-45,85366325	0,023	1539,948	0,047	-45,67	-71,31	0,24	-148,44	-2,60	0,41	2,00	-1,70	148,46
G0018461.JPG	16	24	51,353	-23,24257925	0,023	-45,85455612	0,023	1539,963	0,047	-45,84	-71,21	-0,08	-148,42	-2,55	1,77	1,24	-2,84	148,41
G0018463.JPG	16	24	53,353	-23,24386293	0,023	-45,85545571	0,023	1540,252	0,047	-46,19	-71,04	0,07	-147,97	-2,84	0,55	2,12	-1,97	147,99
G0018465.JPG	16	24	55,353	-23,24514592	0,023	-45,85635752	0,023	1540,167	0,047	-46,11	-71,10	-0,05	-147,86	-2,71	-0,40	2,50	-1,10	147,89
G0018467.JPG	16	24	57,353	-23,24643054	0,023	-45,85725638	0,023	1540,148	0,047	-45,91	-71,18	0,11	-148,25	-2,40	0,00	2,05	-1,26	148,27
G0018469.JPG	16	24	59,353	-23,24771512	0,023	-45,85815266	0,023	1540,225	0,047	-45,89	-71,06	0,05	-148,20	-2,38	0,99	1,50	-2,10	148,20
G0018471.JPG	16	25	1,352	-23,24899682	0,023	-45,85905044	0,023	1540,411	0,047	-45,97	-70,95	0,11	-147,97	-2,50	0,30	1,96	-1,58	148,00
G0018473.JPG	16	25	3,352	-23,25027640	0,023	-45,85994918	0,023	1540,582	0,047	-46,04	-70,82	0,09	-148,05	-2,50	0,93	1,63	-2,12	148,06
G0018475.JPG	16	25	5,352	-23,25155407	0,023	-45,86084998	0,023	1540,620	0,047	-46,19	-70,68	0,03	-147,79	-2,36	1,30	1,30	-2,36	147,79
G0018477.JPG	16	25	7,352	-23,25282838	0,023	-45,86175502	0,023	1540,611	0,047	-46,47	-70,44	-0,01	-147,35	-2,36	1,44	1,21	-2,48	147,35
G0018479.JPG	16	25	9,352	-23,25409888	0,023	-45,86266465	0,023	1540,563	0,047	-46,54	-70,36	-0,04	-147,38	-2,26	0,44	1,67	-1,59	147,39
G0018481.JPG	16	25	11,352	-23,25536879	0,023	-45,86357288	0,023	1540,624	0,047	-46,42	-70,32	0,14	-146,98	-2,15	0,22	1,68	-1,36	147,00
G0018638.JPG	16	27	48,343	-23,26986068	0,023	-45,81273822	0,023	1550,081	0,046	-44,81	69,04	0,13	-35,19	-2,24	-15,46	7,27	-13,86	36,38
G0018639.JPG	16	27	49,343	-23,26924423	0,023	-45,81318741	0,023	1550,199	0,046	-47,38	67,31	-0,08	-36,80	-2,20	-20,51	10,95	-17,58	38,89
G0018640.JPG	16	27	50,343	-23,26864618	0,023	-45,81366506	0,023	1550,100	0,046	-50,56	64,94	-0,10	-39,65	-1,92	-24,00	14,49	-19,43	42,55
G0018641.JPG	16	27	51,343	-23,26807247	0,023	-45,81417638	0,023	1550,041	0,046	-54,08	62,05	-0,11	-42,82	-2,02	-24,99	16,23	-19,37	46,05
G0018642.JPG	16	27	52,343	-23,26752620	0,023	-45,81472130	0,023	1549,852	0,046	-57,42	58,96	-0,41	-45,80	-2,18	-25,85	17,80	-19,18	49,33
G0018643.JPG	16	27	53,343	-23,26700859	0,023	-45,81529826	0,023	1549,343	0,046	-60,67	55,62	-0,64	-49,11	-2,42	-26,25	19,06	-18,56	52,81
G0018646.JPG	16	27	56,343	-23,26564389	0,023	-45,81720822	0,023	1546,414	0,046	-69,12	45,25	-1,06	-58,26	-2,90	-22,04	17,65	-13,72	60,97
G0018649.JPG	16	27	59,343	-23,26455890	0,023	-45,81933122	0,023	1543,103	0,046	-75,61	34,22	-0,64	-67,15	-2,44	-23,33	20,87	-10,94	69,67
G0018653.JPG	16	28	3,343	-23,26358733	0,023	-45,82240581	0,023	1540,189	0,046	-81,11	19,60	-0,33	-77,60	-1,94	-20,68	19,88	-6,13	79,03
G0018655.JPG	16	28	5,343	-23,26330298	0,023	-45,82400689	0,023	1540,236	0,046	-82,61	12,06	0,13	-82,74	-2,18	-19,44	19,06	-4,45	83,86
G0018656.JPG	16	28	6,342	-23,26320893	0,023	-45,82481604	0,023	1540,197	0,046	-83,02	8,90	-0,19	-85,02	-2,67	-17,73	17,48	-4,05	86,06
G0018657.JPG	16	28	7,342	-23,26314239	0,023	-45,82562903	0,023	1539,793	0,046	-83,36	6,09	-0,48	-87,25	-2,68	-13,99	13,87	-3,26	87,97
G0018658.JPG	16	28	8,342	-23,26309865	0,023	-45,82644448	0,023	1539,450	0,046	-83,52	3,82	-0,14	-89,13	-2,44	-9,96	9,93	-2,55	89,56
G0018659.JPG	16	28	9,342	-23,26307213	0,023	-45,82726094	0,023	1539,463	0,046	-83,59	2,34	0,10	-90,31	-2,40	-5,71	5,73	-2,35	90,55
G0018660.JPG	16	28	10,342	-23,26305476	0,023	-45,82807744	0,023	1539,707	0,046	-83,54	2,21	0,43	-91,52	-1,90	5,31	-5,26	-2,03	91,33
G0018661.JPG	16	28	11,342	-23,26303068	0,023	-45,82889279	0,023	1540,198	0,046	-83,36	4,02	0,30	-91,39	-1,50	19,65	-19,61	-1,88	90,80
G0018662.JPG	16	28	12,342	-23,26297925	0,023	-45,82970585	0,023	1540,316	0,046	-82,94	8,12	-0,13	-88,26	-0,90	29,76	-29,77	0,08	88,04

Tabela J.2 – Parâmetros de voo nos instantes das fotos da câmera GoPRO. (continuação)

Foto	Tempo UTC			Latitude (graus)	σ Lat (m)	Longitude (graus)	σ Long (m)	h (m)	σ h (m)	Veast (m/s)	Vnorth (m/s)	Vup (m/s)	ψ (graus)	θ (graus)	ϕ (graus)	ω (graus)	φ (graus)	κ (graus)
	HH	MM	SS															
G0018683.JPG	16	28	33,341	-23,25599276	0,023	-45,84478996	0,023	1538,670	0,046	-71,52	41,47	-0,03	-62,52	-2,65	0,22	-1,42	-2,25	62,49
G0018685.JPG	16	28	35,341	-23,25524472	0,023	-45,84618840	0,023	1538,903	0,046	-71,60	41,41	0,21	-62,24	-2,54	0,07	-1,25	-2,21	62,21
G0018687.JPG	16	28	37,341	-23,25449699	0,023	-45,84758733	0,023	1539,053	0,046	-71,65	41,33	-0,21	-62,62	-2,72	-0,63	-0,69	-2,70	62,62
G0018689.JPG	16	28	39,341	-23,25375245	0,023	-45,84898832	0,023	1538,725	0,046	-71,69	41,13	-0,03	-62,52	-2,26	-0,99	-0,16	-2,46	62,53
G0018691.JPG	16	28	41,341	-23,25301214	0,023	-45,85038973	0,023	1538,757	0,046	-71,73	40,91	-0,02	-62,67	-2,52	-0,17	-1,00	-2,31	62,66
G0018693.JPG	16	28	43,340	-23,25227332	0,023	-45,85179047	0,023	1538,709	0,046	-71,68	40,88	0,08	-62,65	-2,49	-0,13	-1,03	-2,27	62,63
G0018695.JPG	16	28	45,340	-23,25153394	0,023	-45,85318961	0,023	1538,594	0,046	-71,49	41,12	0,01	-62,54	-2,48	1,25	-2,25	-1,63	62,49
G0018697.JPG	16	28	47,340	-23,25078877	0,023	-45,85458487	0,023	1538,645	0,046	-71,32	41,47	0,00	-62,04	-2,77	0,91	-2,10	-2,02	61,98
G0018699.JPG	16	28	49,340	-23,25003834	0,023	-45,85597810	0,023	1538,601	0,046	-71,35	41,55	0,05	-61,93	-2,69	-0,57	-0,77	-2,64	61,93
G0018701.JPG	16	28	51,340	-23,24928988	0,023	-45,85737375	0,023	1538,670	0,046	-71,55	41,32	0,06	-62,21	-2,83	-1,17	-0,28	-3,05	62,23
G0018703.JPG	16	28	53,340	-23,24854661	0,023	-45,85877432	0,023	1538,368	0,046	-71,78	41,04	-0,16	-62,49	-2,78	-0,74	-0,63	-2,81	62,49
G0018705.JPG	16	28	55,340	-23,24780810	0,023	-45,86017870	0,023	1538,103	0,046	-72,00	40,68	-0,07	-62,74	-2,66	-1,57	0,17	-3,08	62,78
G0018707.JPG	16	28	57,340	-23,24707840	0,023	-45,86158839	0,023	1537,953	0,046	-72,31	40,11	0,02	-63,08	-2,55	-2,23	0,83	-3,28	63,15
G0018709.JPG	16	28	59,340	-23,24636018	0,023	-45,86300444	0,023	1538,002	0,046	-72,61	39,54	0,01	-63,66	-2,63	-1,34	0,03	-2,95	63,69
G0018711.JPG	16	29	1,339	-23,24565061	0,023	-45,86442529	0,023	1537,987	0,046	-72,83	39,06	-0,03	-64,03	-2,61	-1,59	0,29	-3,05	64,07
G0018713.JPG	16	29	3,339	-23,24495039	0,023	-45,86585119	0,023	1538,041	0,046	-73,11	38,52	0,02	-64,42	-2,64	-1,84	0,52	-3,18	64,48
G0018715.JPG	16	29	5,339	-23,24426049	0,023	-45,86728246	0,023	1538,064	0,046	-73,42	37,93	0,02	-64,90	-2,65	-1,72	0,43	-3,12	64,95
G0018717.JPG	16	29	7,339	-23,24358133	0,023	-45,86871949	0,023	1538,199	0,045	-73,72	37,25	0,08	-65,17	-2,68	-2,51	1,16	-3,49	65,26
G0018719.JPG	16	29	9,339	-23,24291645	0,023	-45,87016430	0,023	1538,517	0,045	-74,18	36,27	0,34	-65,96	-2,45	-3,55	2,25	-3,68	66,11
G0018721.JPG	16	29	11,339	-23,24227233	0,023	-45,87161858	0,023	1539,299	0,046	-74,68	35,06	0,48	-66,81	-2,33	-3,52	2,33	-3,53	66,95
G0018751.JPG	16	29	41,337	-23,23831593	0,023	-45,89462047	0,023	1588,327	0,046	-79,29	-25,23	3,53	-107,10	0,28	-22,80	21,81	6,79	105,73
G0018754.JPG	16	29	44,337	-23,23915892	0,023	-45,89688803	0,023	1598,530	0,046	-75,27	-36,74	3,14	-115,23	-0,17	-21,76	19,92	8,94	113,69
G0018756.JPG	16	29	46,337	-23,23988581	0,023	-45,89832774	0,023	1604,560	0,046	-72,05	-43,61	2,89	-120,39	-0,49	-20,36	17,97	9,73	118,93
G0018757.JPG	16	29	47,337	-23,24029405	0,023	-45,89902328	0,023	1607,412	0,046	-70,33	-46,74	2,90	-122,91	-0,35	-19,08	16,36	9,95	121,53
G0018758.JPG	16	29	48,337	-23,24072991	0,023	-45,89970128	0,023	1610,536	0,046	-68,47	-49,72	3,40	-125,58	0,09	-17,30	14,16	10,04	124,31
G0018759.JPG	16	29	49,337	-23,24119098	0,023	-45,90036089	0,023	1614,266	0,046	-66,60	-52,29	4,03	-127,77	0,29	-15,59	12,26	9,70	126,68
G0018760.JPG	16	29	50,337	-23,24167371	0,023	-45,90100314	0,023	1618,404	0,046	-64,94	-54,54	4,36	-129,60	0,65	-13,92	10,42	9,31	128,67
G0018762.JPG	16	29	52,337	-23,24269832	0,023	-45,90223797	0,023	1628,793	0,046	-61,30	-58,95	6,00	-133,53	1,82	-14,85	9,67	11,47	132,32
G0018763.JPG	16	29	53,337	-23,24324048	0,023	-45,90282719	0,023	1635,150	0,046	-59,26	-61,09	6,71	-135,44	2,32	-15,15	9,16	12,34	134,14
G0018766.JPG	16	29	56,337	-23,24497817	0,023	-45,90447317	0,023	1657,891	0,046	-53,24	-67,00	8,30	-141,48	2,89	-12,74	5,79	11,72	140,56
G0018767.JPG	16	29	57,336	-23,24559107	0,023	-45,90498464	0,023	1666,288	0,046	-51,52	-68,71	8,51	-143,05	3,16	-11,63	4,56	11,16	142,28
G0018768.JPG	16	29	58,336	-23,24621823	0,023	-45,90547958	0,023	1675,136	0,046	-49,89	-70,21	9,07	-144,71	3,45	-10,48	3,31	10,53	144,09
G0018769.JPG	16	29	59,336	-23,24685808	0,023	-45,90595922	0,023	1684,362	0,046	-48,39	-71,52	9,35	-146,29	3,48	-9,42	2,38	9,75	145,80
G0018770.JPG	16	30	0,336	-23,24750924	0,023	-45,90642467	0,023	1693,867	0,046	-46,99	-72,65	9,68	-147,51	3,58	-8,18	1,40	8,82	147,14
G0018771.JPG	16	30	1,336	-23,24817004	0,023	-45,90687767	0,023	1703,576	0,046	-45,83	-73,70	9,70	-148,53	3,56	-6,96	0,62	7,79	148,27

Tabela J.2 – Parâmetros de voo nos instantes das fotos da câmera GoPRO. (continuação)

Foto	Tempo UTC			Latitude (graus)	σ Lat (m)	Longitude (graus)	σ Long (m)	h (m)	σ h (m)	Veast (m/s)	Vnorth (m/s)	Vup (m/s)	ψ (graus)	θ (graus)	ϕ (graus)	ω (graus)	φ (graus)	κ (graus)
	HH	MM	SS															
G0018772.JPG	16	30	2,336	-23,24883914	0,023	-45,90731992	0,023	1713,387	0,046	-44,80	-74,49	9,92	-149,36	3,68	-5,66	-0,27	6,74	149,19
G0018773.JPG	16	30	3,336	-23,24951516	0,023	-45,90775297	0,023	1723,388	0,046	-43,89	-75,21	10,20	-150,18	3,95	-4,74	-1,07	6,08	150,07
G0018774.JPG	16	30	4,336	-23,25019667	0,023	-45,90817733	0,023	1733,858	0,046	-42,99	-75,77	10,73	-150,99	4,36	-4,22	-1,77	5,81	150,92
G0018775.JPG	16	30	5,336	-23,25088270	0,023	-45,90859307	0,023	1744,832	0,046	-42,15	-76,24	11,12	-151,59	4,59	-3,82	-2,22	5,54	151,55
G0018776.JPG	16	30	6,336	-23,25157251	0,023	-45,90900100	0,023	1756,120	0,046	-41,40	-76,58	11,35	-152,07	4,67	-2,94	-2,76	4,78	152,06
G0018777.JPG	16	30	7,336	-23,25226506	0,023	-45,90940295	0,023	1767,600	0,046	-40,94	-76,81	11,56	-151,88	4,88	-2,41	-3,17	4,43	151,90
G0018778.JPG	16	30	8,336	-23,25295895	0,023	-45,90980071	0,023	1779,267	0,046	-40,53	-76,98	11,56	-152,26	4,71	-2,46	-3,03	4,37	152,27
G0018779.JPG	16	30	9,336	-23,25365467	0,023	-45,91019466	0,023	1790,802	0,046	-40,16	-77,18	11,48	-152,71	4,65	-2,06	-3,19	3,97	152,73
G0018891.JPG	16	32	1,330	-23,22957167	0,023	-45,90696980	0,023	2508,398	0,047	83,31	31,38	0,08	67,48	-2,33	13,33	11,50	7,17	-68,47
G0018892.JPG	16	32	2,330	-23,22929840	0,023	-45,90615257	0,023	2508,425	0,047	84,09	28,94	-0,06	68,89	-2,28	16,46	14,66	7,91	-70,24
G0018893.JPG	16	32	3,330	-23,22904923	0,023	-45,90532730	0,023	2508,304	0,047	84,93	26,10	-0,19	70,74	-2,29	18,56	16,91	8,09	-72,32
G0018894.JPG	16	32	4,330	-23,22882786	0,023	-45,90449370	0,023	2508,057	0,047	85,76	22,78	-0,29	73,04	-2,03	20,15	18,82	7,61	-74,66
G0018895.JPG	16	32	5,330	-23,22863815	0,023	-45,90365226	0,023	2507,919	0,047	86,51	19,18	-0,06	75,26	-1,86	21,36	20,31	7,00	-76,87
G0018896.JPG	16	32	6,329	-23,22848182	0,023	-45,90280426	0,023	2507,825	0,047	87,12	15,45	-0,18	77,65	-2,05	21,84	21,01	6,43	-79,24
G0018899.JPG	16	32	9,329	-23,22821865	0,023	-45,90023410	0,023	2506,949	0,047	88,03	4,02	-0,19	85,10	-1,98	20,80	20,59	3,58	-86,11
G0018901.JPG	16	32	11,329	-23,22821147	0,023	-45,89851506	0,023	2506,710	0,047	87,84	-3,08	-0,03	89,73	-1,96	19,27	19,27	1,94	-90,40
G0018902.JPG	16	32	12,329	-23,22825449	0,023	-45,89765836	0,023	2506,701	0,047	87,53	-6,44	0,00	91,94	-1,95	19,04	19,10	1,21	-92,47
G0018905.JPG	16	32	15,329	-23,22856855	0,023	-45,89511608	0,023	2507,128	0,047	85,74	-16,79	0,18	98,56	-1,72	20,24	20,27	-1,36	-98,63
G0018909.JPG	16	32	19,329	-23,22941585	0,023	-45,89183946	0,023	2506,927	0,047	81,78	-29,82	-0,36	107,50	-2,25	18,58	18,40	-3,46	-107,31
G0018910.JPG	16	32	20,329	-23,22969859	0,025	-45,89104625	0,025	2506,476	0,050	80,62	-32,76	-0,47	109,58	-2,34	17,62	17,39	-3,71	-109,38
G0018911.JPG	16	32	21,329	-23,23000667	0,025	-45,89026449	0,025	2505,994	0,050	79,48	-35,40	-0,47	111,68	-2,37	15,50	15,28	-3,53	-111,53
G0018913.JPG	16	32	23,329	-23,23068400	0,023	-45,88873205	0,023	2505,474	0,047	77,66	-39,11	-0,26	114,83	-2,59	8,35	8,67	-1,17	-114,93
G0018915.JPG	16	32	25,328	-23,23141386	0,023	-45,88722870	0,023	2505,294	0,047	76,21	-41,77	-0,01	116,29	-2,50	9,64	9,75	-2,05	-116,33
G0018916.JPG	16	32	26,328	-23,23179716	0,023	-45,88648804	0,023	2505,091	0,047	75,41	-43,24	-0,34	117,58	-2,79	10,72	10,79	-2,51	-117,61
G0018917.JPG	16	32	27,328	-23,23219488	0,023	-45,88575610	0,023	2504,596	0,047	74,46	-44,95	-0,63	118,73	-2,83	11,91	11,80	-3,25	-118,69
G0018919.JPG	16	32	29,328	-23,23303901	0,023	-45,88432344	0,023	2503,354	0,047	72,09	-48,70	-0,34	121,65	-2,25	13,00	12,26	-4,90	-121,38
G0018922.JPG	16	32	32,328	-23,23442897	0,023	-45,88226776	0,023	2503,005	0,047	68,25	-53,80	-0,11	125,83	-2,36	11,92	11,06	-5,06	-125,59
G0018923.JPG	16	32	33,328	-23,23492172	0,023	-45,88160732	0,023	2502,913	0,047	67,08	-55,26	-0,18	127,19	-2,62	9,91	9,48	-3,91	-127,09
G0018924.JPG	16	32	34,328	-23,23542637	0,023	-45,88095756	0,023	2502,686	0,047	66,01	-56,49	-0,27	128,48	-2,65	8,50	8,30	-3,22	-128,44
G0018925.JPG	16	32	35,328	-23,23594129	0,023	-45,88031709	0,023	2502,410	0,047	65,21	-57,45	-0,30	129,45	-2,65	6,01	6,33	-1,78	-129,50
G0018943.JPG	16	32	53,327	-23,24486327	0,023	-45,86839508	0,023	2502,263	0,047	68,60	-54,78	0,16	126,66	-2,64	-0,54	1,15	2,44	-126,67
G0018945.JPG	16	32	55,327	-23,24585185	0,023	-45,86705250	0,023	2502,368	0,047	68,86	-54,72	0,11	126,69	-2,58	-0,62	1,04	2,44	-126,70
G0018947.JPG	16	32	57,327	-23,24684018	0,023	-45,86570571	0,023	2502,354	0,047	69,01	-54,84	-0,19	126,61	-2,85	0,39	2,01	2,05	-126,66
G0018949.JPG	16	32	59,327	-23,24783218	0,023	-45,86435747	0,023	2502,059	0,047	69,04	-55,09	0,05	126,60	-2,57	0,36	1,82	1,84	-126,64
G0018951.JPG	16	33	1,326	-23,24882772	0,023	-45,86300883	0,023	2502,306	0,047	69,02	-55,28	0,24	126,78	-2,60	0,71	2,13	1,66	-126,82

Tabela J.2 – Parâmetros de voo nos instantes das fotos da câmera GoPRO. (continuação)

Foto	Tempo UTC			Latitude (graus)	σ Lat (m)	Longitude (graus)	σ Long (m)	h (m)	σ h (m)	Veast (m/s)	Vnorth (m/s)	Vup (m/s)	ψ (graus)	θ (graus)	ϕ (graus)	ω (graus)	φ (graus)	κ (graus)
	HH	MM	SS															
G0018953.JPG	16	33	3,326	-23,24982743	0,023	-45,86166064	0,023	2502,482	0,047	69,05	-55,47	0,02	127,10	-2,71	-0,12	1,54	2,23	-127,13
G0018955.JPG	16	33	5,326	-23,25082893	0,023	-45,86031051	0,023	2502,707	0,047	69,17	-55,50	0,26	127,05	-2,52	-0,11	1,43	2,08	-127,08
G0018957.JPG	16	33	7,326	-23,25183126	0,023	-45,85895911	0,023	2503,419	0,047	69,15	-55,60	0,51	127,03	-2,28	0,33	1,63	1,62	-127,06
G0018959.JPG	16	33	9,326	-23,25283512	0,023	-45,85760902	0,023	2504,848	0,047	69,05	-55,64	0,90	127,14	-2,14	0,35	1,57	1,49	-127,17
G0018961.JPG	16	33	11,326	-23,25384022	0,023	-45,85626141	0,023	2506,717	0,047	68,94	-55,70	0,97	127,18	-2,14	0,06	1,34	1,67	-127,20
G0018963.JPG	16	33	13,326	-23,25484531	0,023	-45,85491475	0,023	2508,109	0,047	68,98	-55,70	0,34	127,43	-2,58	-0,48	1,19	2,34	-127,44
G0018965.JPG	16	33	15,326	-23,25585010	0,023	-45,85356570	0,023	2508,484	0,047	69,19	-55,54	0,07	127,20	-2,68	-1,24	0,63	2,89	-127,18
G0018967.JPG	16	33	17,326	-23,25685120	0,023	-45,85221081	0,023	2508,750	0,047	69,50	-55,32	0,21	126,70	-2,47	-1,12	0,58	2,65	-126,69
G0018969.JPG	16	33	19,326	-23,25784741	0,023	-45,85085015	0,023	2509,260	0,047	69,75	-55,11	0,23	126,48	-2,48	-0,28	1,25	2,16	-126,50
G0018972.JPG	16	33	22,325	-23,25934592	0,023	-45,84881088	0,023	2510,017	0,047	69,19	-55,92	0,09	126,79	-2,61	4,20	4,93	-0,43	-126,86
G0018975.JPG	16	33	25,325	-23,26088596	0,023	-45,84680516	0,023	2510,428	0,047	67,55	-57,92	0,39	128,35	-2,24	5,52	5,72	-1,67	-128,37
G0018978.JPG	16	33	28,325	-23,26248280	0,023	-45,84485414	0,023	2512,352	0,047	65,49	-60,10	0,79	130,24	-1,94	6,58	6,28	-2,77	-130,20
G0018979.JPG	16	33	29,325	-23,26302863	0,023	-45,84421874	0,023	2513,326	0,047	64,54	-60,95	1,12	130,84	-1,64	8,12	7,23	-4,07	-130,70
G0018982.JPG	16	33	32,325	-23,26472456	0,023	-45,84238369	0,023	2517,484	0,047	60,25	-64,65	1,43	134,14	-1,34	13,44	10,64	-8,37	-133,52
G0018984.JPG	16	33	34,325	-23,26591790	0,023	-45,84124219	0,023	2520,398	0,047	56,50	-67,60	1,34	137,12	-1,41	14,52	11,00	-9,64	-136,37
G0018994.JPG	16	33	44,324	-23,27261171	0,023	-45,83675021	0,023	2534,052	0,047	34,61	-79,74	1,63	153,14	-1,01	15,17	7,88	-13,05	-152,37
G0018997.JPG	16	33	47,324	-23,27480579	0,023	-45,83584133	0,023	2538,645	0,047	27,41	-82,15	1,52	157,95	-1,02	14,60	6,52	-13,13	-157,33
G0019000.JPG	16	33	50,324	-23,27705602	0,023	-45,83513928	0,023	2543,001	0,047	20,53	-83,95	1,29	162,69	-1,14	13,76	5,25	-12,79	-162,24
G0019147.JPG	16	36	17,316	-23,26114563	0,025	-45,86430356	0,025	2496,427	0,049	49,58	74,99	0,38	32,27	-2,22	-0,01	-1,89	1,18	-32,25
G0019149.JPG	16	36	19,316	-23,25979164	0,025	-45,86333406	0,025	2497,192	0,049	49,67	75,00	0,32	32,23	-2,36	0,22	-1,87	1,45	-32,21
G0019151.JPG	16	36	21,316	-23,25843814	0,025	-45,86236219	0,025	2497,737	0,049	49,82	74,93	0,15	32,21	-2,50	0,75	-1,71	1,97	-32,20
G0019153.JPG	16	36	23,316	-23,25708607	0,025	-45,86138507	0,025	2497,967	0,049	50,19	74,82	0,25	32,59	-2,26	0,83	-1,45	1,92	-32,58
G0019155.JPG	16	36	25,315	-23,25573636	0,025	-45,86040271	0,025	2498,445	0,049	50,33	74,74	0,21	32,72	-2,35	-0,12	-2,04	1,17	-32,70
G0019157.JPG	16	36	27,315	-23,25438626	0,025	-45,85941939	0,025	2498,881	0,049	50,33	74,80	0,23	32,72	-2,40	-0,08	-2,06	1,23	-32,70
G0019159.JPG	16	36	29,315	-23,25303631	0,025	-45,85843468	0,025	2499,325	0,049	50,50	74,74	0,20	32,81	-2,40	0,67	-1,66	1,86	-32,80
G0019161.JPG	16	36	31,315	-23,25168913	0,025	-45,85744595	0,025	2499,822	0,049	50,70	74,53	0,35	32,91	-2,21	0,48	-1,59	1,60	-32,90
G0019163.JPG	16	36	33,315	-23,25034474	0,025	-45,85645465	0,025	2500,635	0,049	50,79	74,40	0,40	33,00	-2,29	0,46	-1,67	1,63	-32,99
G0019165.JPG	16	36	35,315	-23,24900265	0,025	-45,85546124	0,025	2501,272	0,049	50,85	74,33	0,20	33,03	-2,41	-0,23	-2,15	1,12	-33,01
G0019167.JPG	16	36	37,315	-23,24765997	0,025	-45,85446895	0,025	2501,566	0,049	50,69	74,46	0,19	32,83	-2,39	-0,82	-2,45	0,61	-32,80
G0019169.JPG	16	36	39,315	-23,24631447	0,025	-45,85348098	0,025	2501,780	0,049	50,47	74,63	0,09	32,72	-2,42	-0,95	-2,55	0,51	-32,69
G0019171.JPG	16	36	41,315	-23,24496536	0,025	-45,85249743	0,025	2501,743	0,049	50,15	74,91	-0,29	31,85	-2,76	-1,34	-3,05	0,32	-31,81
G0019173.JPG	16	36	43,314	-23,24360912	0,025	-45,85152137	0,025	2500,947	0,049	49,81	75,35	-0,47	31,73	-2,85	-1,09	-3,00	0,57	-31,69
G0019175.JPG	16	36	45,314	-23,24224527	0,025	-45,85055176	0,025	2499,490	0,049	49,46	75,82	-1,02	31,40	-3,32	-1,54	-3,63	0,42	-31,34
G0019177.JPG	16	36	47,314	-23,24087152	0,025	-45,84958870	0,025	2497,059	0,049	49,14	76,39	-1,26	30,96	-3,28	-1,33	-3,50	0,55	-30,90
G0019179.JPG	16	36	49,314	-23,23948763	0,025	-45,84863209	0,025	2494,628	0,049	48,72	76,98	-1,22	30,61	-3,33	-2,31	-4,04	-0,30	-30,55

Tabela J.2 – Parâmetros de voo nos instantes das fotos da câmera GoPRO. (continuação)

Foto	Tempo UTC			Latitude (graus)	σ Lat (m)	Longitude (graus)	σ Long (m)	h (m)	σ h (m)	Veast (m/s)	Vnorth (m/s)	Vup (m/s)	ψ (graus)	θ (graus)	ϕ (graus)	ω (graus)	φ (graus)	κ (graus)
	HH	MM	SS															
G0019180.JPG	16	36	50,314	-23,23879109	0,025	-45,84815772	0,025	2493,432	0,049	48,32	77,42	-1,21	30,48	-3,36	-3,96	-4,90	-1,71	-30,44
G0019181.JPG	16	36	51,314	-23,23809016	0,025	-45,84768833	0,025	2492,219	0,049	47,72	77,97	-1,29	30,03	-3,43	-5,32	-5,63	-2,89	-30,01
G0019182.JPG	16	36	52,314	-23,23738373	0,025	-45,84722597	0,025	2490,939	0,049	46,86	78,63	-1,35	29,46	-3,49	-7,06	-6,50	-4,43	-29,49
G0019183.JPG	16	36	53,314	-23,23667038	0,025	-45,84677284	0,025	2489,588	0,049	45,81	79,47	-1,38	28,69	-3,40	-8,62	-7,12	-5,93	-28,81
G0019184.JPG	16	36	54,314	-23,23594906	0,025	-45,84633162	0,025	2488,367	0,049	44,42	80,40	-0,92	27,60	-2,96	-9,72	-7,14	-7,24	-27,80
G0019185.JPG	16	36	55,314	-23,23521935	0,025	-45,84590541	0,025	2487,504	0,049	42,75	81,36	-0,84	26,65	-3,21	-11,98	-8,27	-9,26	-26,99
G0019186.JPG	16	36	56,314	-23,23448066	0,025	-45,84549639	0,025	2486,476	0,049	40,91	82,36	-1,26	25,57	-3,32	-13,75	-8,98	-10,96	-26,03
G0019187.JPG	16	36	57,314	-23,23373215	0,025	-45,84510706	0,025	2485,321	0,049	38,69	83,45	-1,08	23,78	-3,07	-14,60	-8,77	-12,11	-24,32
G0019188.JPG	16	36	58,314	-23,23297346	0,025	-45,84474029	0,025	2484,278	0,049	36,29	84,64	-1,08	22,11	-3,20	-15,85	-9,02	-13,47	-22,73
G0019190.JPG	16	37	0,314	-23,23142634	0,025	-45,84407984	0,025	2482,029	0,049	31,14	86,73	-1,14	18,64	-3,06	-17,37	-8,58	-15,46	-19,34
G0019191.JPG	16	37	1,313	-23,23063836	0,025	-45,84378995	0,025	2480,985	0,049	27,86	87,90	-0,99	17,03	-2,57	-22,45	-9,32	-20,67	-18,22
G0019192.JPG	16	37	2,313	-23,22983940	0,025	-45,84353697	0,025	2480,131	0,049	23,66	89,08	-0,66	13,91	-2,11	-25,17	-8,46	-23,88	-15,24
G0019193.JPG	16	37	3,313	-23,22903003	0,025	-45,84332951	0,025	2479,700	0,049	18,64	90,17	-0,35	10,58	-2,10	-28,10	-7,64	-27,20	-11,91
G0019194.JPG	16	37	4,313	-23,22821160	0,025	-45,84317278	0,025	2479,357	0,049	13,35	91,08	-0,37	7,32	-2,05	-29,38	-6,12	-28,86	-8,36
G0019195.JPG	16	37	5,313	-23,22738578	0,025	-45,84306831	0,025	2478,787	0,049	8,02	91,84	-1,01	3,99	-2,86	-30,83	-5,22	-30,55	-4,63
G0019196.JPG	16	37	6,313	-23,22655379	0,025	-45,84301618	0,025	2477,456	0,049	2,54	92,43	-1,65	0,51	-3,18	-31,36	-3,49	-31,33	-0,60
G0019197.JPG	16	37	7,313	-23,22571758	0,025	-45,84301884	0,025	2475,426	0,049	-3,16	92,77	-2,39	-2,96	-3,57	-32,46	-1,68	-32,59	3,51
G0019202.JPG	16	37	12,313	-23,22158148	0,025	-45,84393596	0,025	2458,140	0,049	-31,20	90,07	-3,64	-23,20	-5,02	-5,77	-2,34	-7,28	23,31

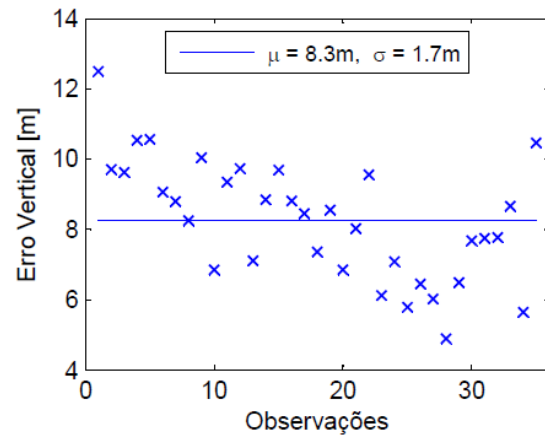
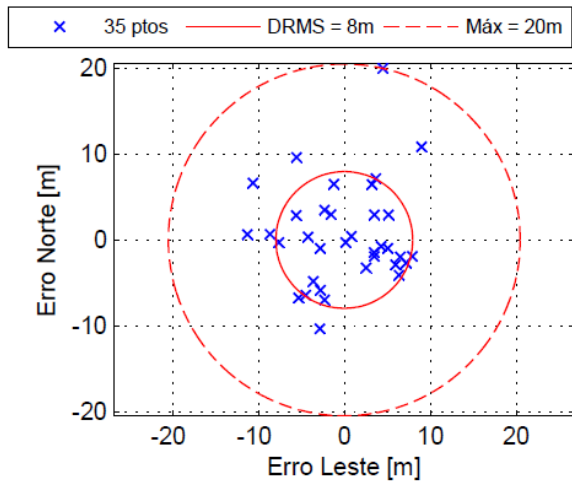
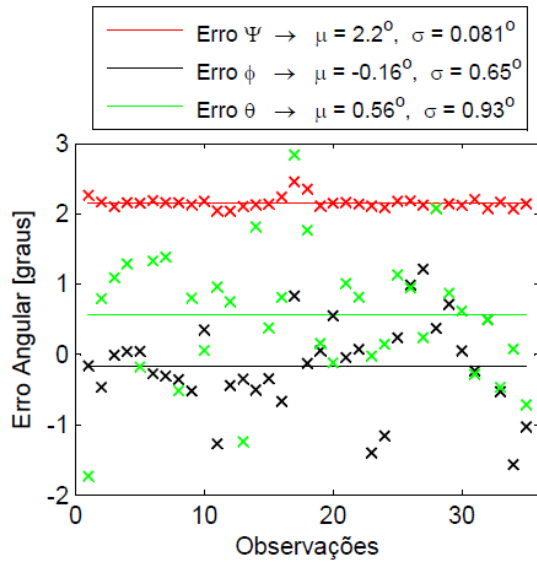
APÊNDICE K
GRÁFICOS COM OS ERROS DA RESSECÇÃO ESPACIAL PARA CADA
CONDIÇÃO ANALISADA

CÂMERA NIKON

SEM CORREÇÃO DAS DISTORÇÕES

Altura Média $H = 344$ m

Visada Nadir (Inclinações $< 3^\circ$)

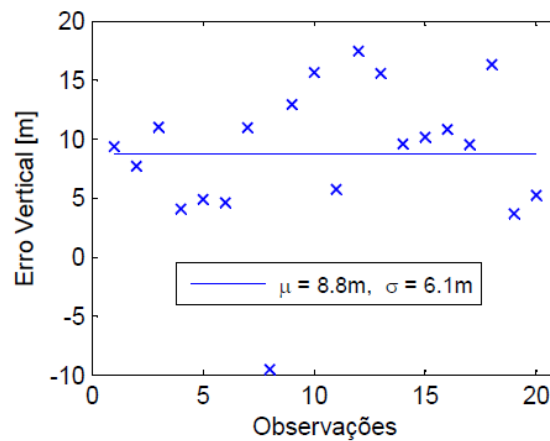
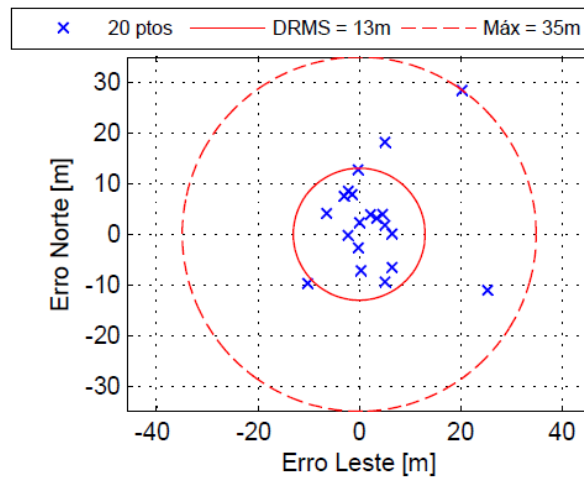
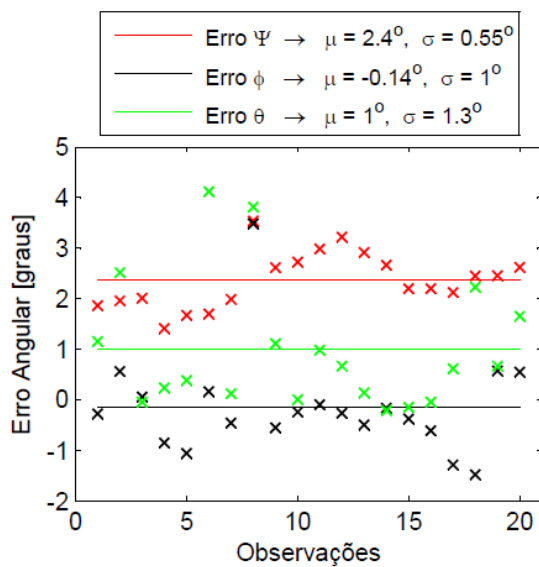


CÂMERA NIKON

SEM CORREÇÃO DAS DISTORÇÕES

Altura Média $H = 396$ m

Visada Off-Nadir (Inclinações até 44°)

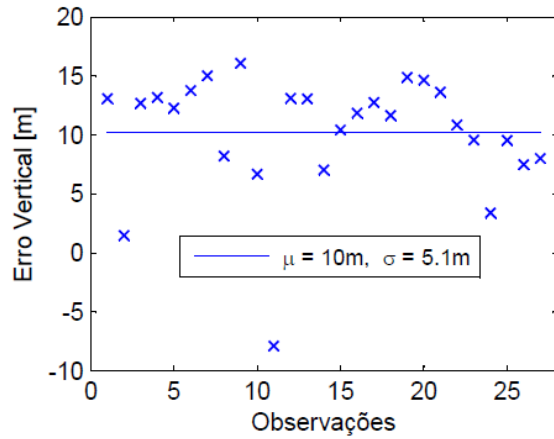
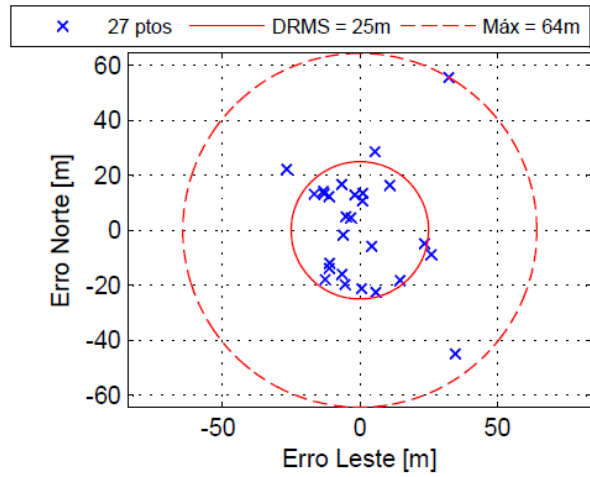
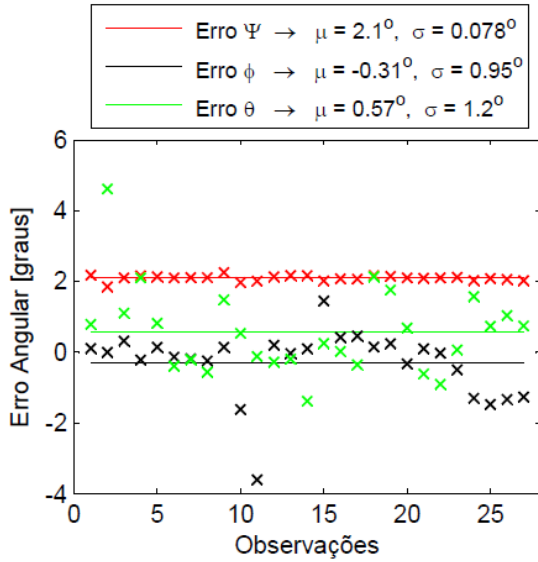


CÂMERA NIKON

SEM CORREÇÃO DAS DISTORÇÕES

Altura Média $H = 897$ m

Visada Nadir (Inclinações $< 3^\circ$)

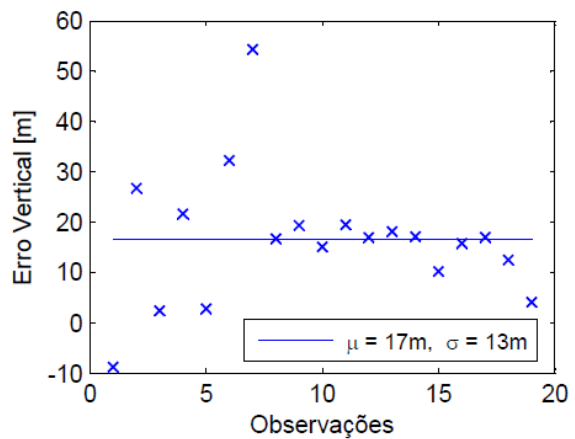
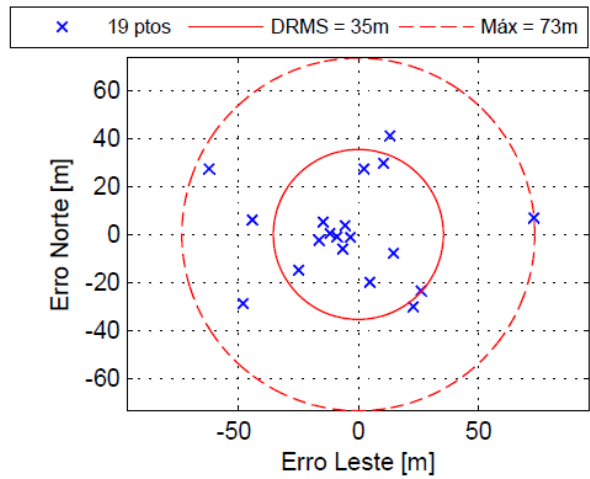
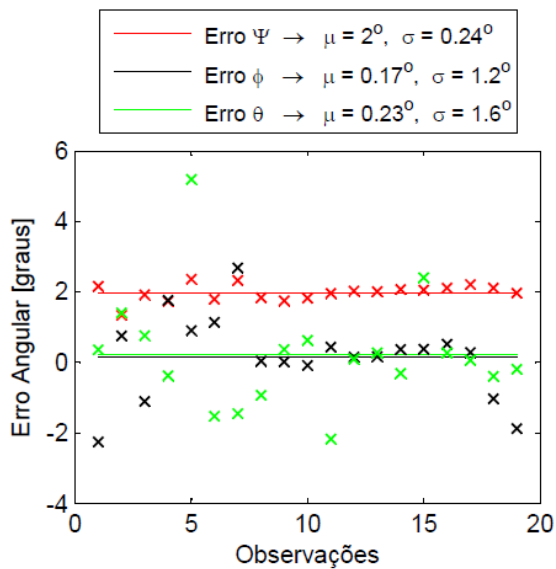


CÂMERA NIKON

SEM CORREÇÃO DAS DISTORÇÕES

Altura Média $H = 1028$ m

Visada Off-Nadir (Inclinações até 26°)

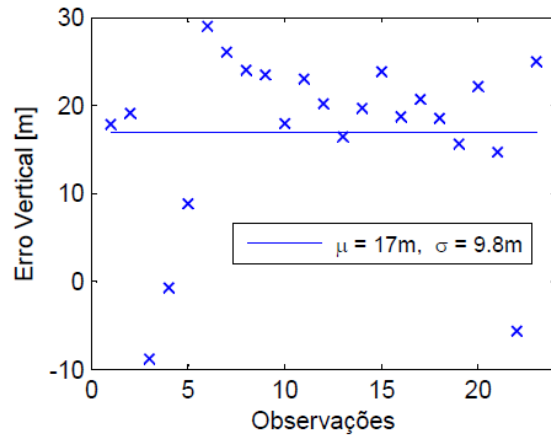
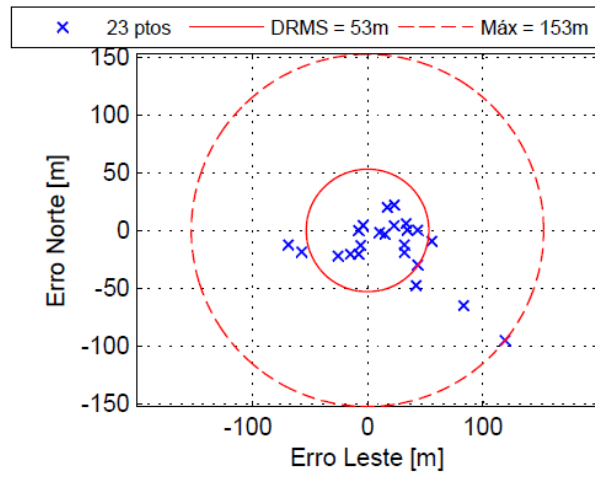
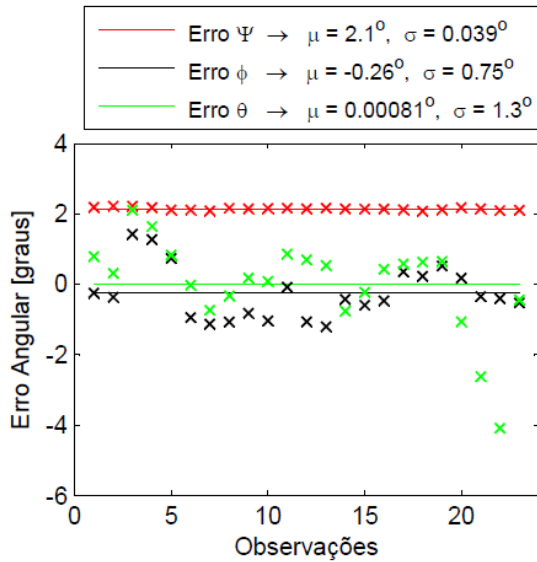


CÂMERA NIKON

SEM CORREÇÃO DAS DISTORÇÕES

Altura Média $H = 1874$ m

Visada Nadir (Inclinações $< 3^\circ$)

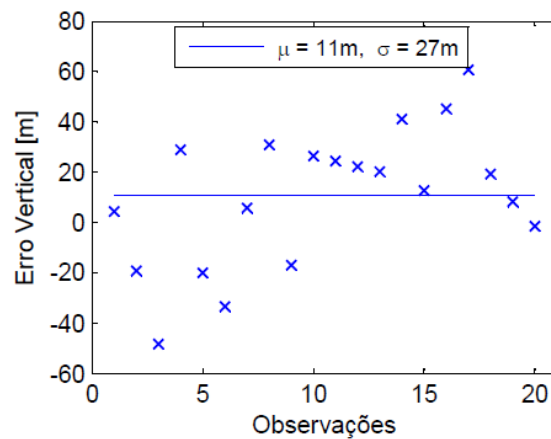
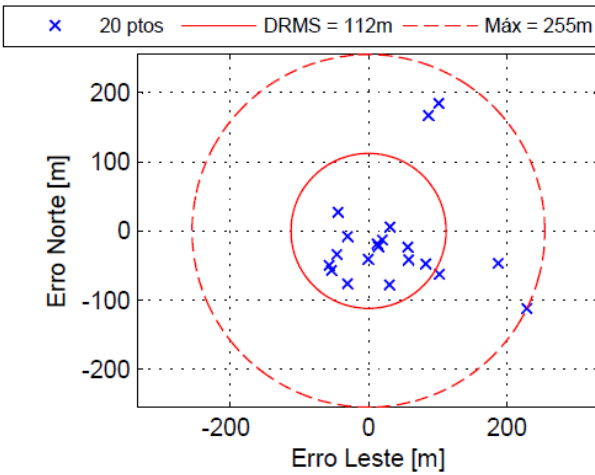
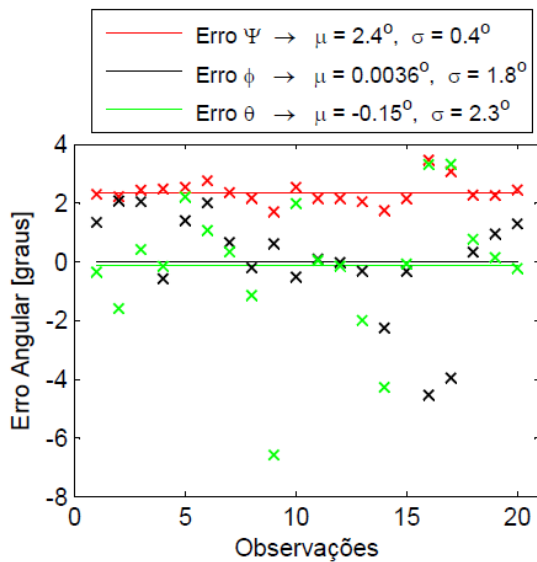


CÂMERA NIKON

SEM CORREÇÃO DAS DISTORÇÕES

Altura Média $H = 1912$ m

Visada Off-Nadir (Inclinações até 21°)

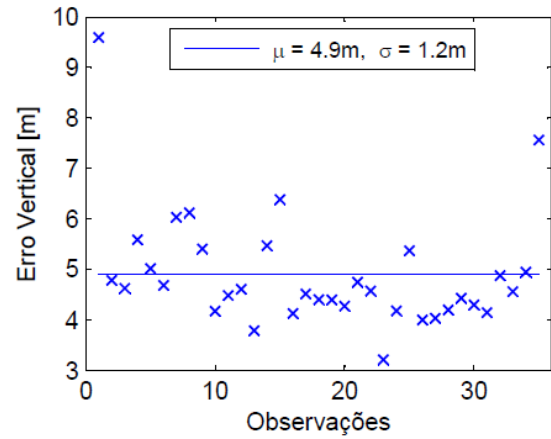
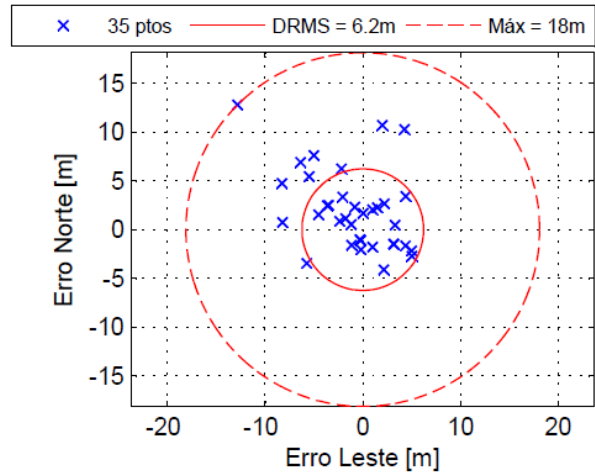
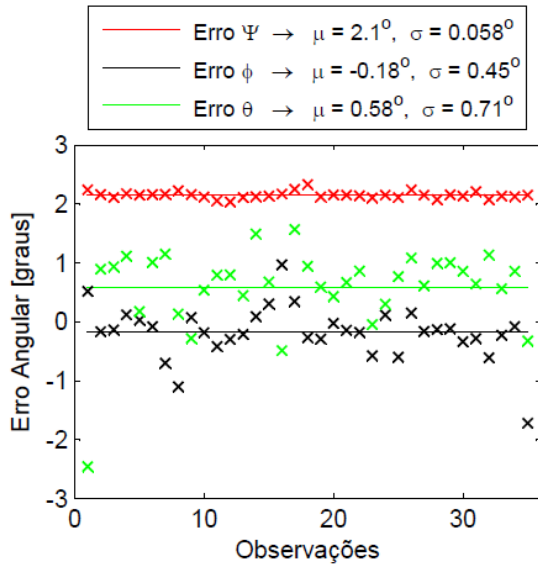


CÂMERA NIKON

COM CORREÇÃO DAS DISTORÇÕES

Altura Média $H = 344$ m

Visada Nadir (Inclinações $< 3^\circ$)

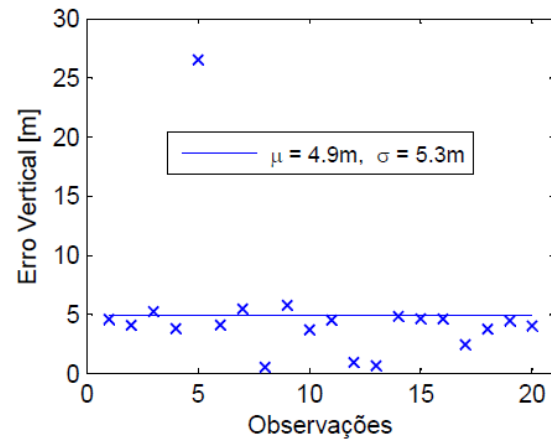
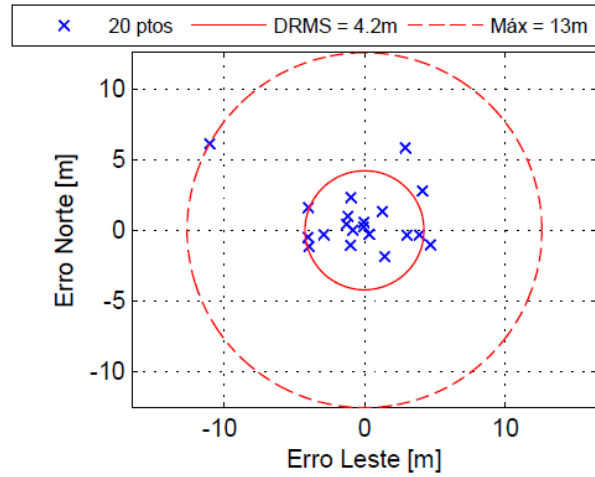
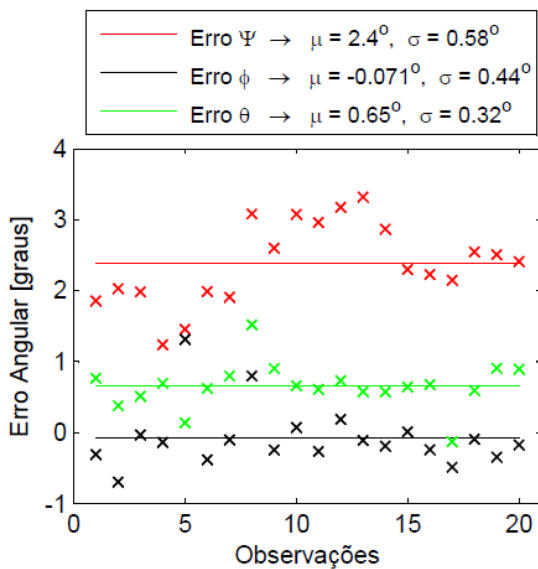


CÂMERA NIKON

COM CORREÇÃO DAS DISTORÇÕES

Altura Média $H = 396$ m

Visada Off-Nadir (Inclinações até 44°)

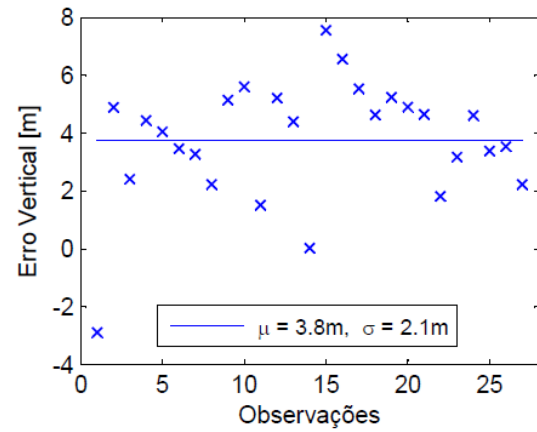
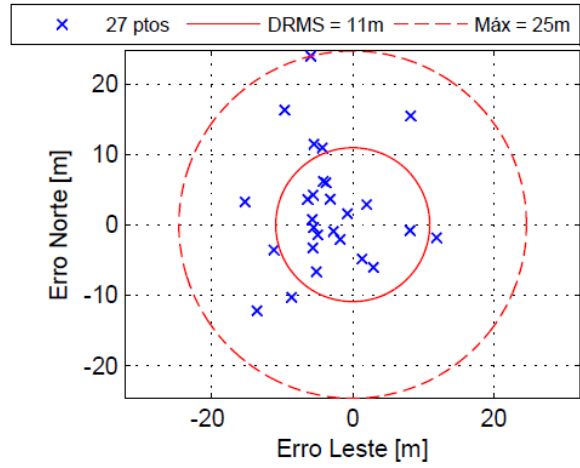
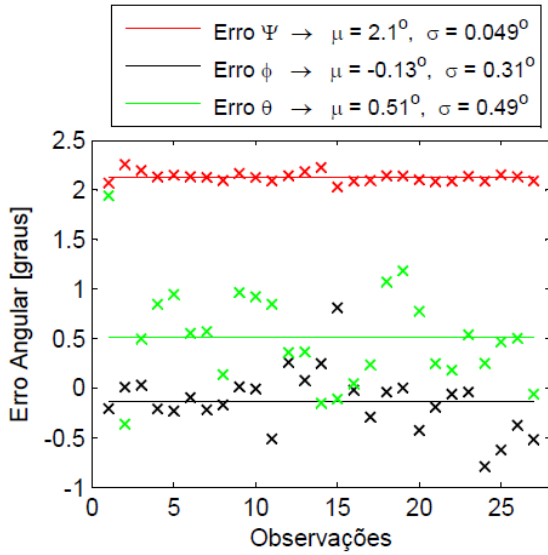


CÂMERA NIKON

COM CORREÇÃO DAS DISTORÇÕES

Altura Média $H = 897$ m

Visada Nadir (Inclinações $< 3^\circ$)

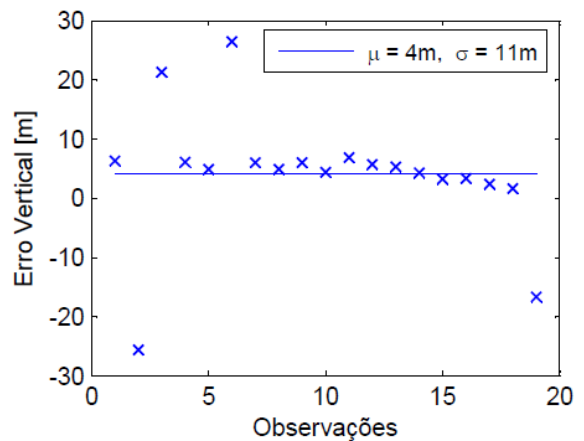
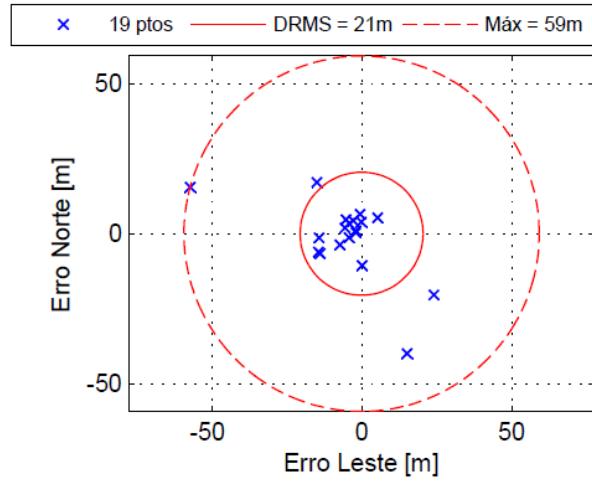
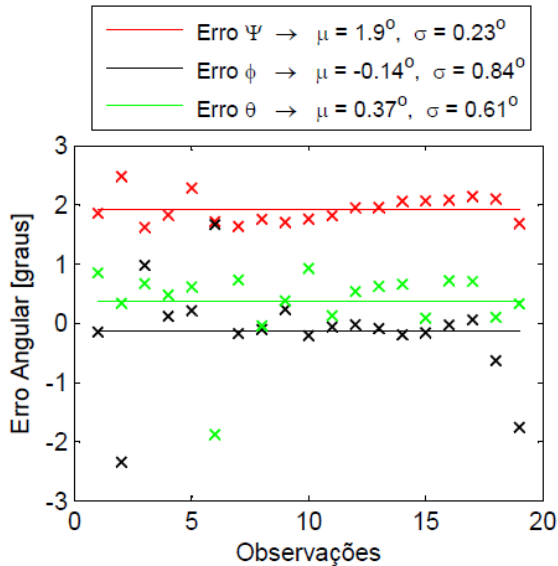


CÂMERA NIKON

COM CORREÇÃO DAS DISTORÇÕES

Altura Média $H = 1028$ m

Visada Off-Nadir (Inclinações até 26°)

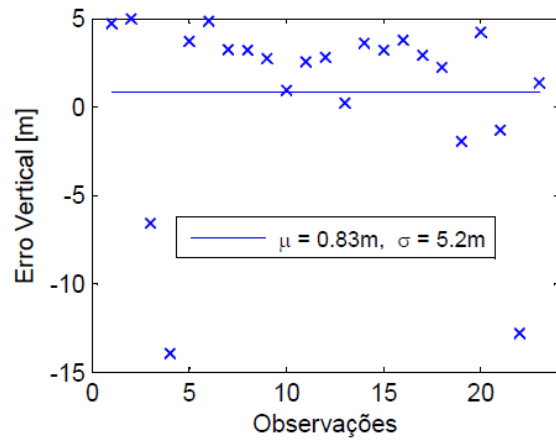
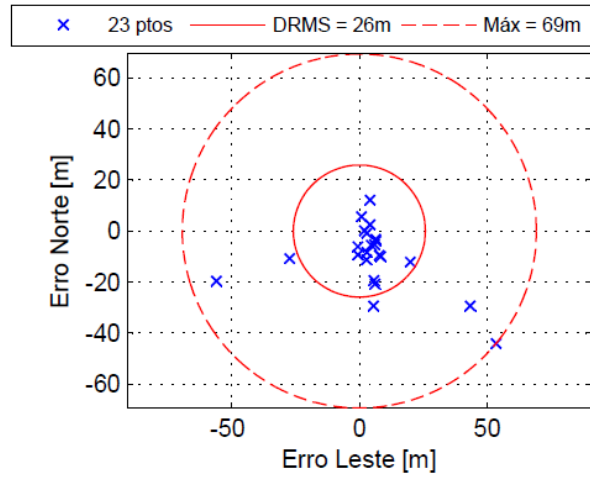
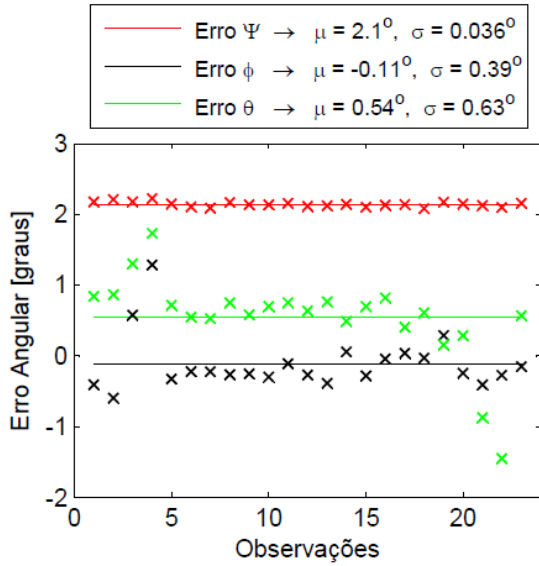


CÂMERA NIKON

COM CORREÇÃO DAS DISTORÇÕES

Altura Média $H = 1874$ m

Visada Nadir (Inclinações $< 3^\circ$)

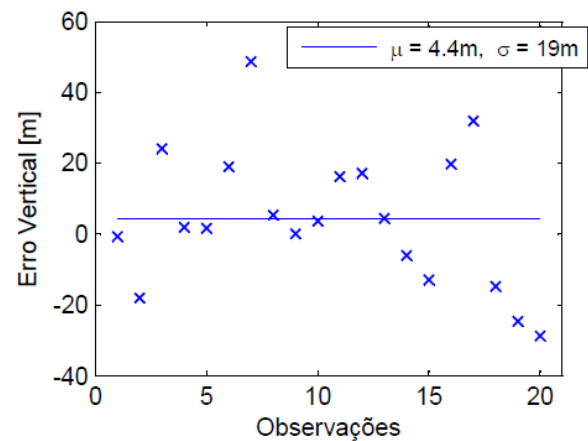
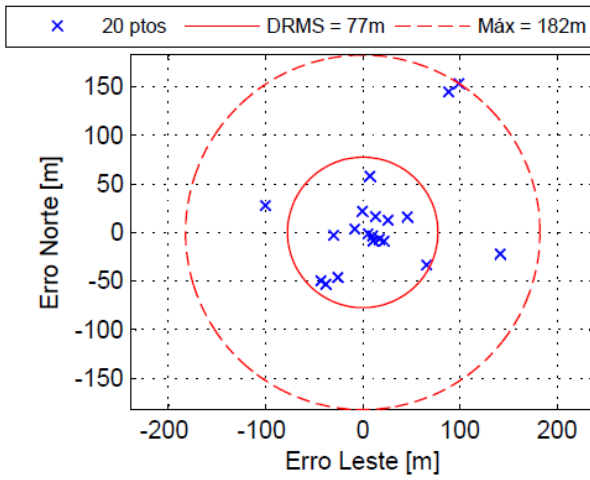
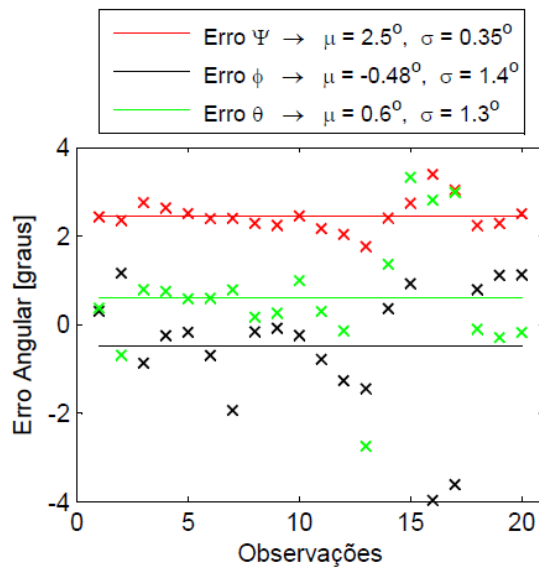


CÂMERA NIKON

COM CORREÇÃO DAS DISTORÇÕES

Altura Média $H = 1912$ m

Visada Off-Nadir (Inclinações até 21°)

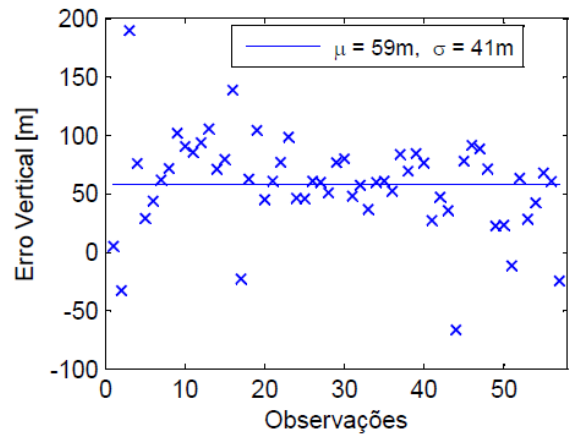
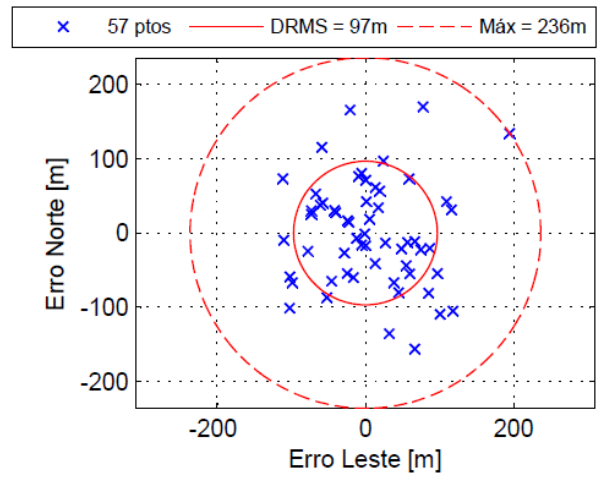
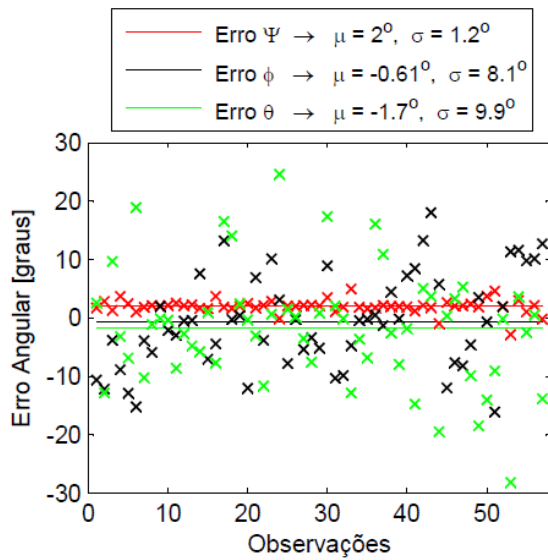


CÂMERA GoPRO

SEM CORREÇÃO DAS DISTORÇÕES

Altura Média $H = 353$ m

Visada Nadir (Inclinações $< 3^\circ$)

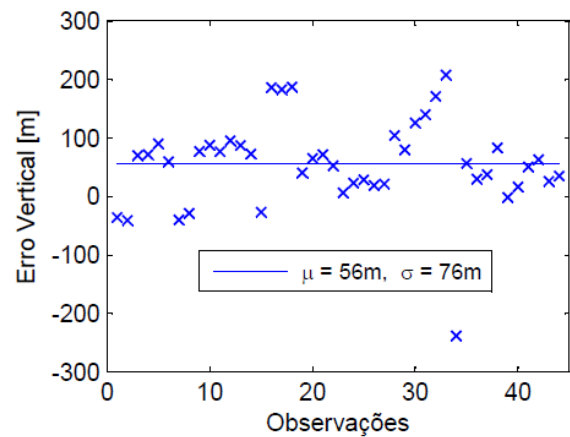
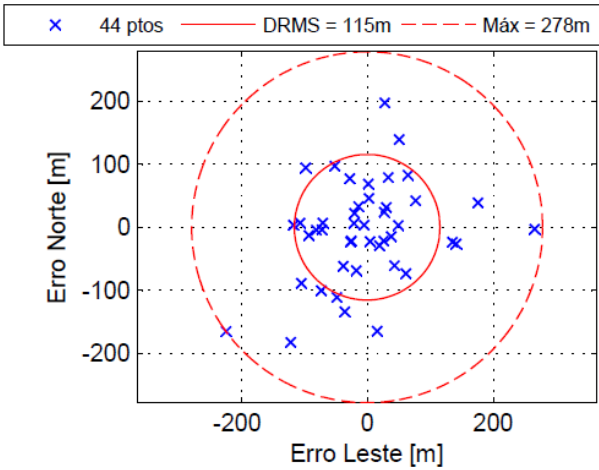
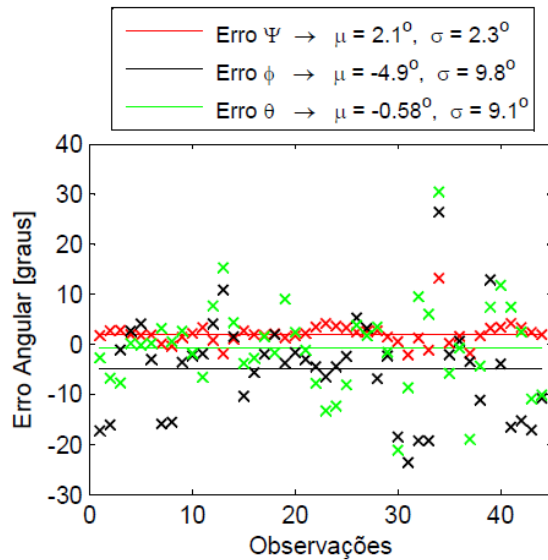


CÂMERA GoPRO

SEM CORREÇÃO DAS DISTORÇÕES

Altura Média $H = 392$ m

Visada Off-Nadir (Inclinações até 45°)

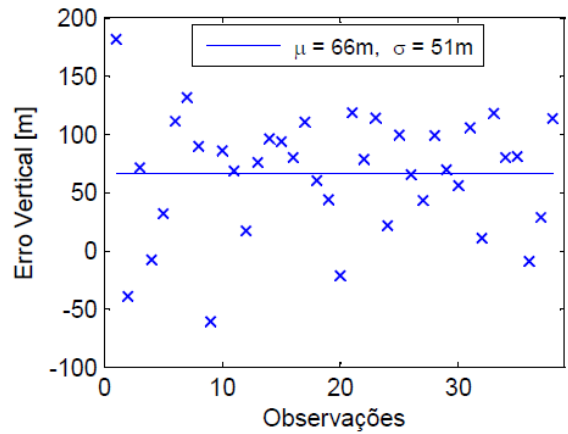
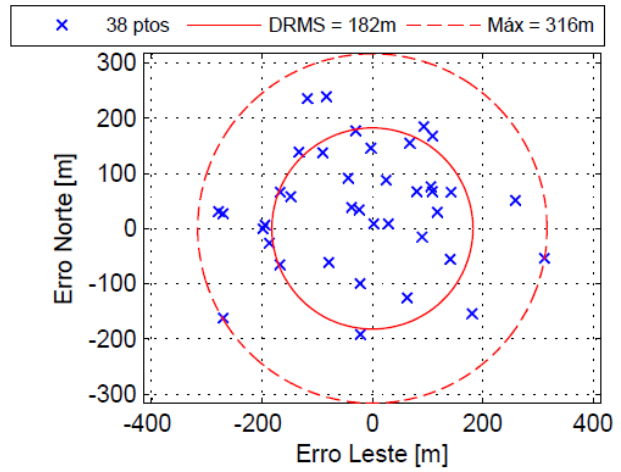
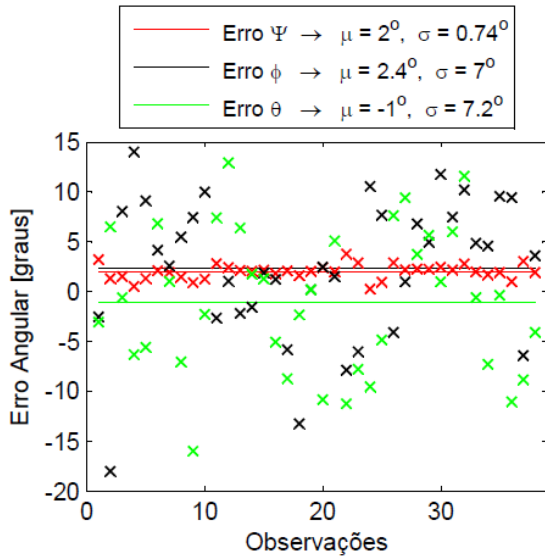


CÂMERA GoPRO

SEM CORREÇÃO DAS DISTORÇÕES

Altura Média $H = 907$ m

Visada Nadir (Inclinações $< 3^\circ$)

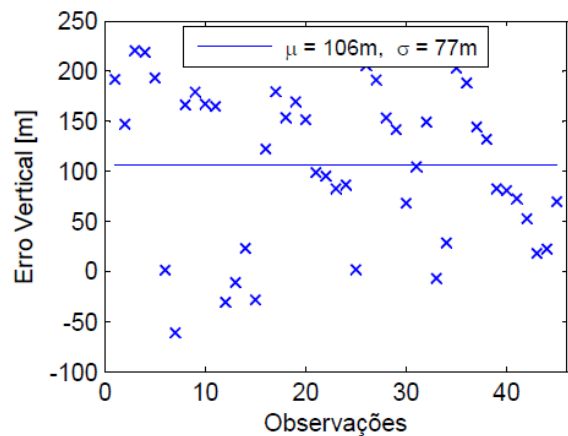
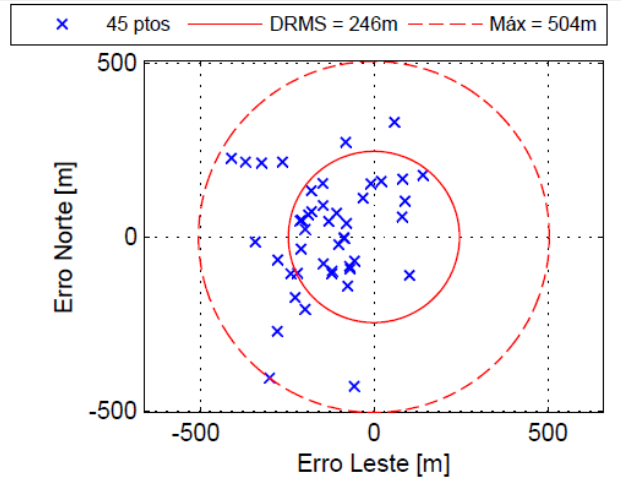
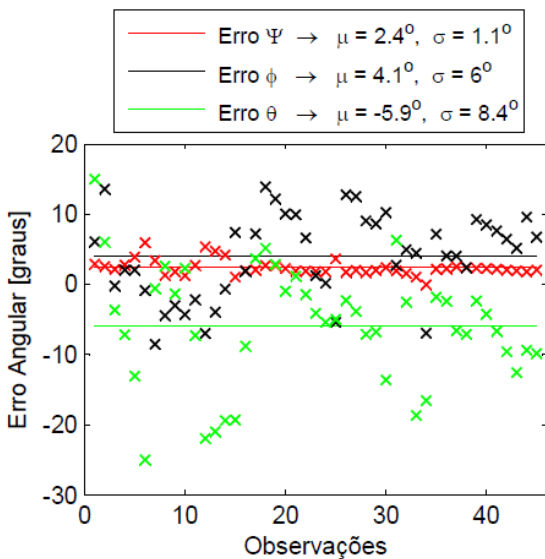


CÂMERA GoPRO

SEM CORREÇÃO DAS DISTORÇÕES

Altura Média $H = 984$ m

Visada Off-Nadir (Inclinações até 26°)

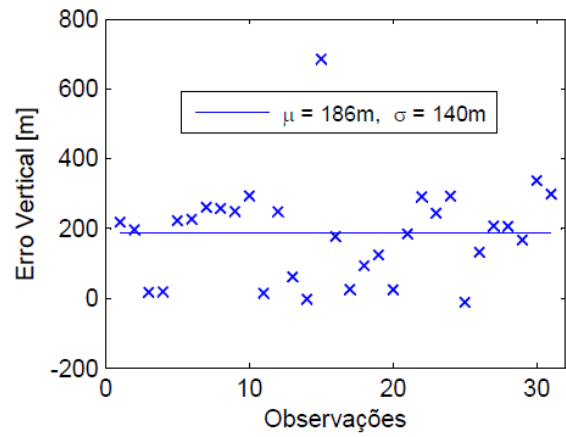
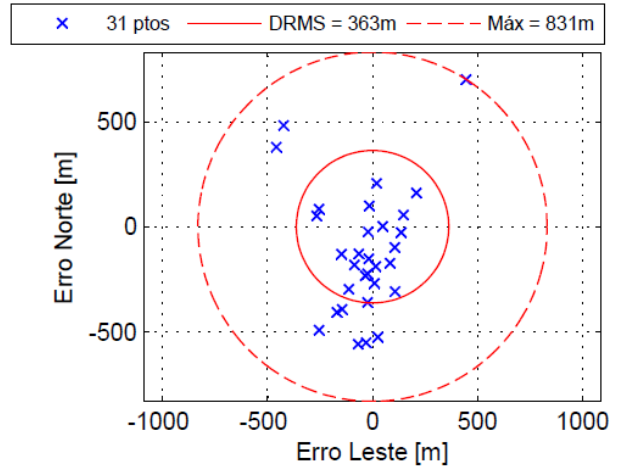
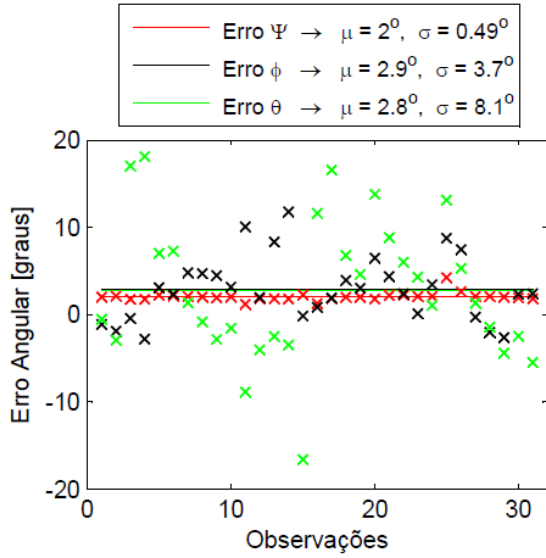


CÂMERA GoPRO

SEM CORREÇÃO DAS DISTORÇÕES

Altura Média $H = 1882$ m

Visada Nadir (Inclinações $< 3^\circ$)

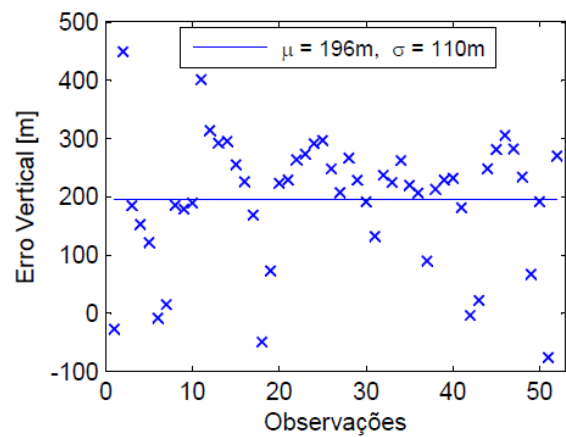
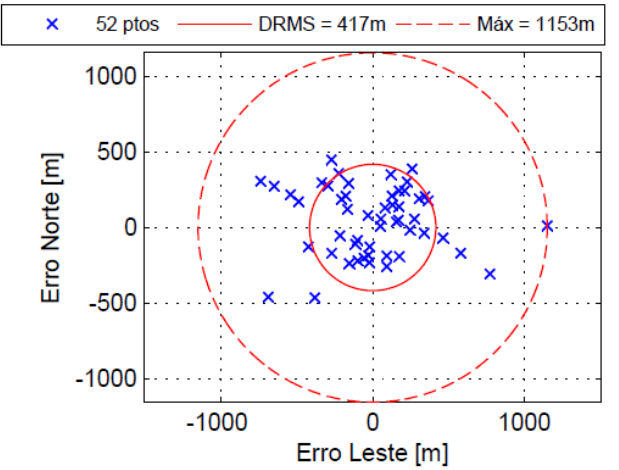
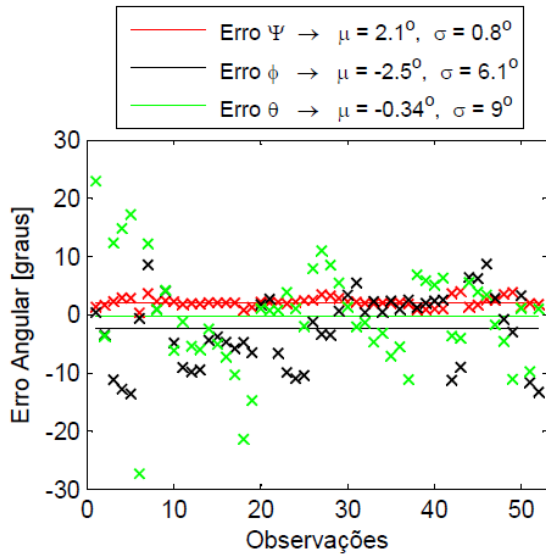


CÂMERA GoPRO

SEM CORREÇÃO DAS DISTORÇÕES

Altura Média $H = 1891$ m

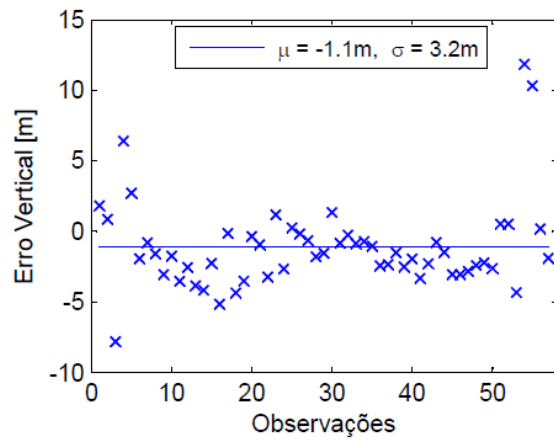
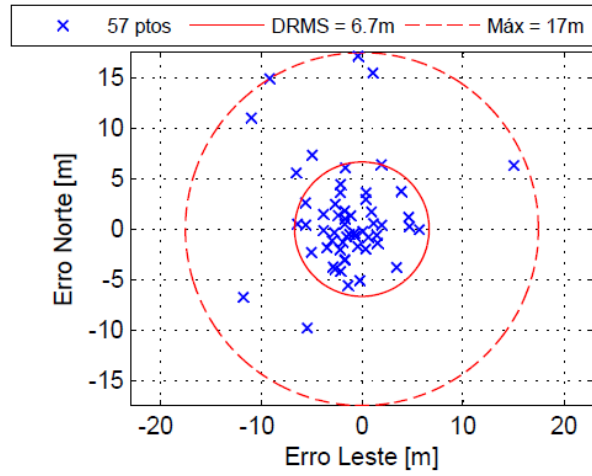
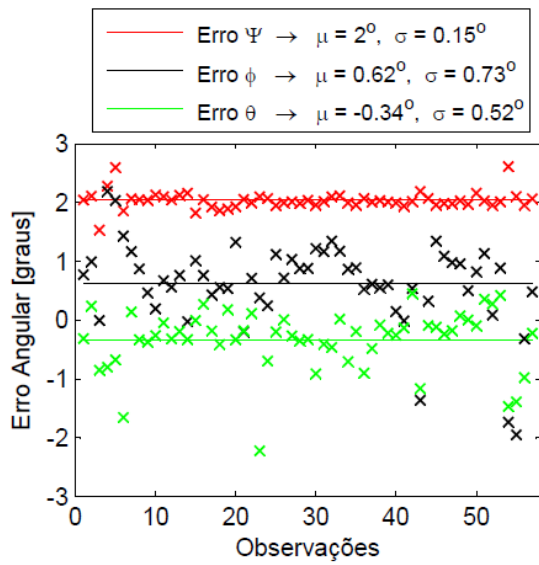
Visada Off-Nadir (Inclinações até 32°)



CÂMERA GoPRO
COM CORREÇÃO DAS DISTORÇÕES

Altura Média $H = 353$ m

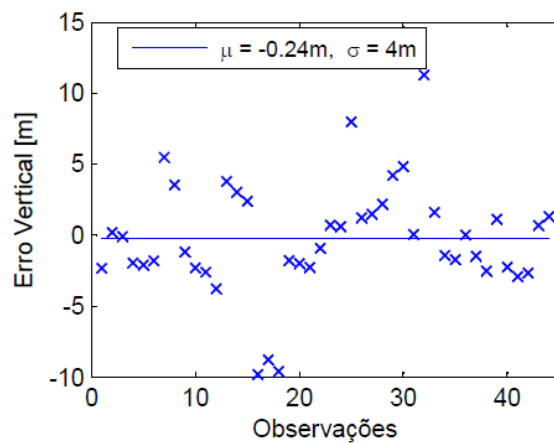
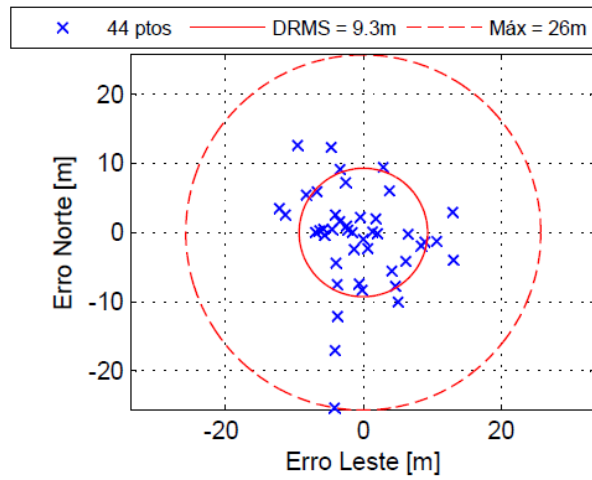
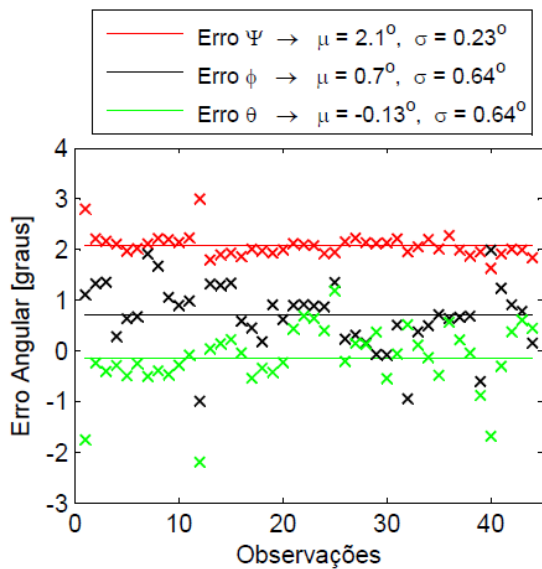
Visada Nadir (Inclinações $< 3^\circ$)



CÂMERA GoPRO
COM CORREÇÃO DAS DISTORÇÕES

Altura Média $H = 392$ m

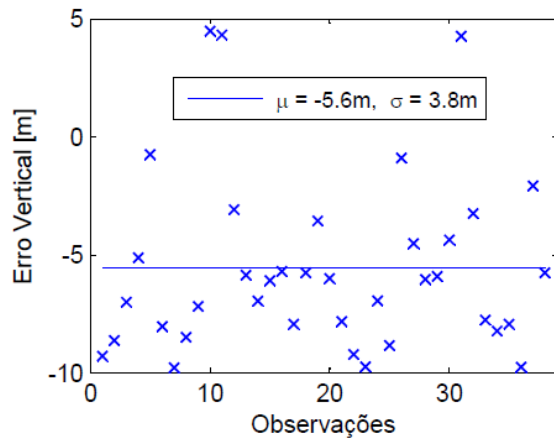
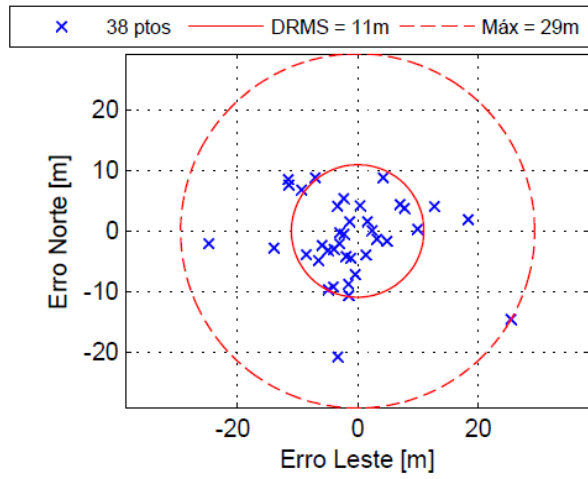
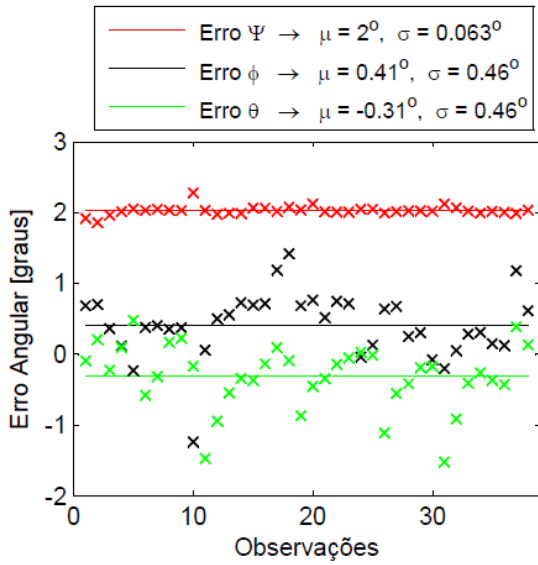
Visada Off-Nadir (Inclinações até 45°)



CÂMERA GoPRO
COM CORREÇÃO DAS DISTORÇÕES

Altura Média $H = 907$ m

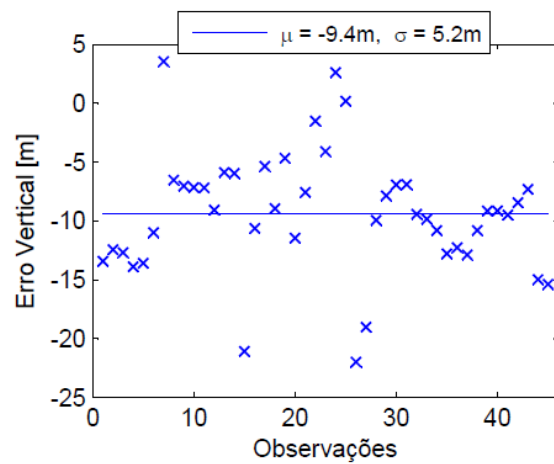
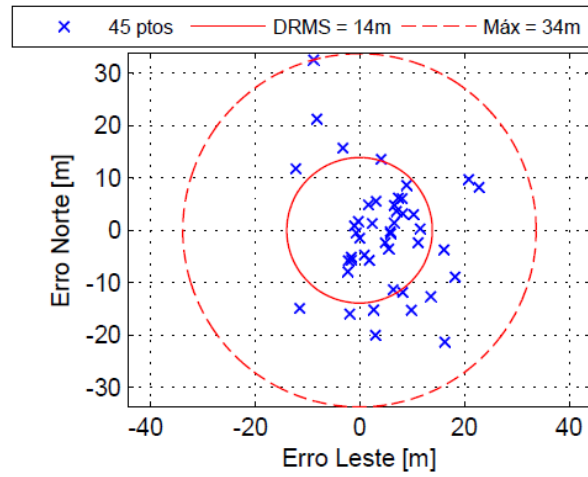
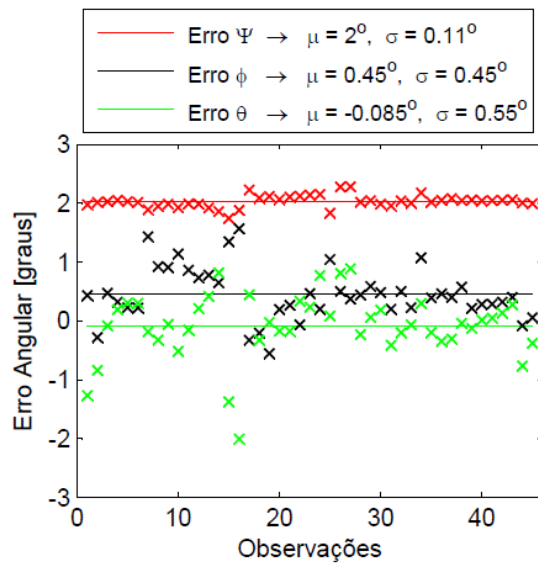
Visada Nadir (Inclinações $< 3^\circ$)



CÂMERA GoPRO
COM CORREÇÃO DAS DISTORÇÕES

Altura Média $H = 984$ m

Visada Off-Nadir (Inclinações até 26°)

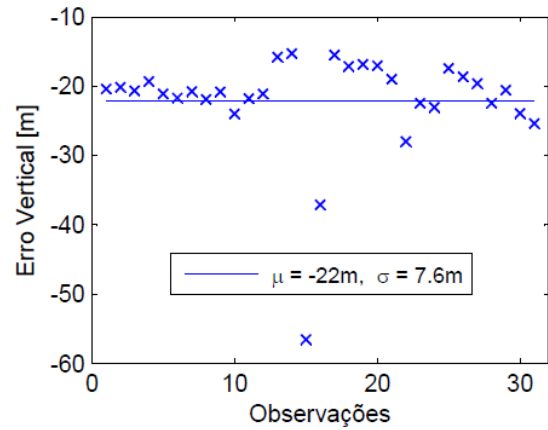
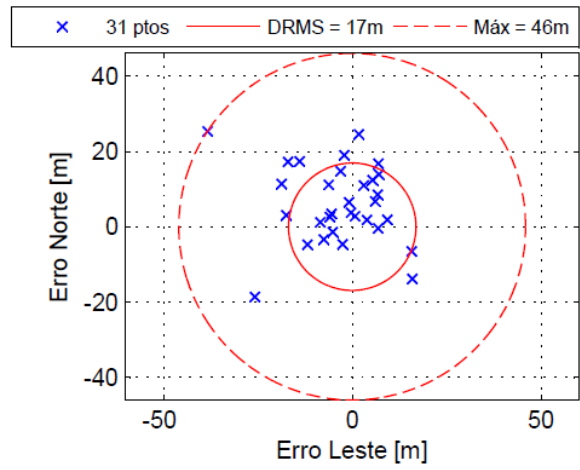
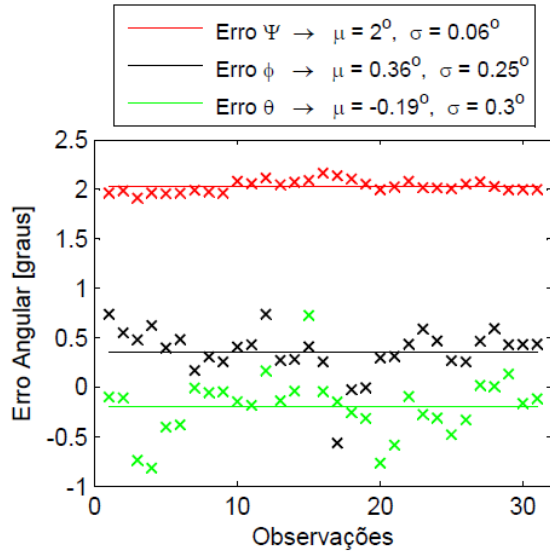


CÂMERA GoPRO

COM CORREÇÃO DAS DISTORÇÕES

Altura Média $H = 1882$ m

Visada Nadir (Inclinações $< 3^\circ$)

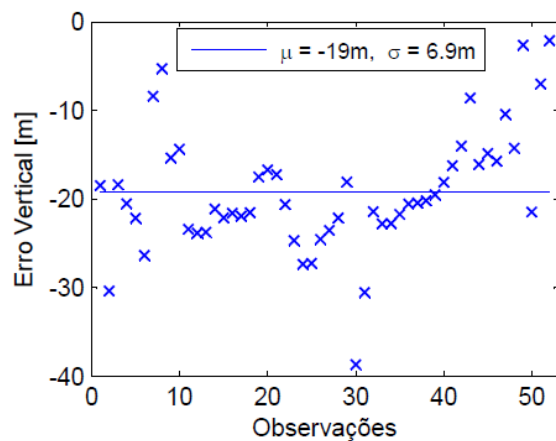
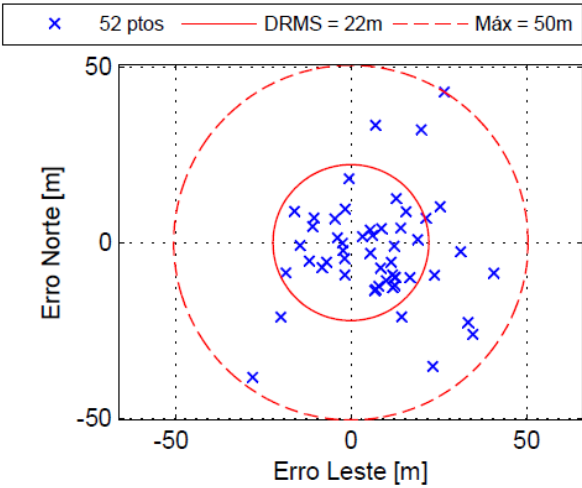
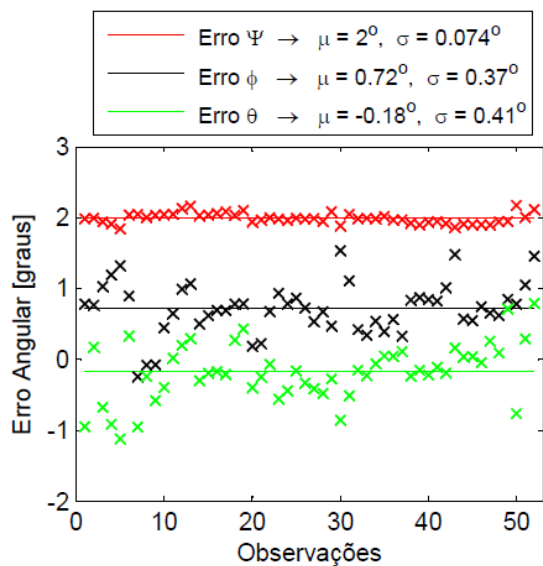


CÂMERA GoPRO

COM CORREÇÃO DAS DISTORÇÕES

Altura Média $H = 1891$ m

Visada Off-Nadir (Inclinações até 32°)

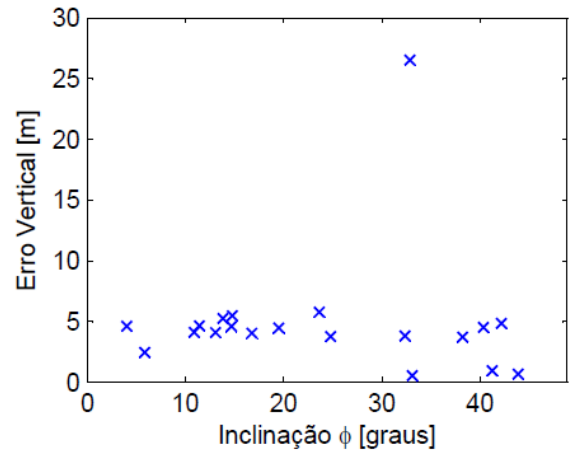
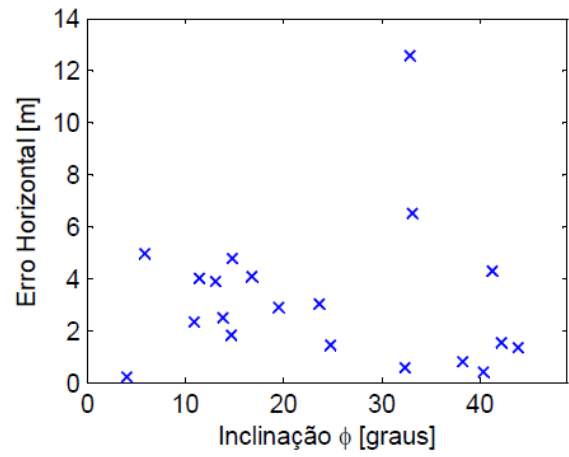
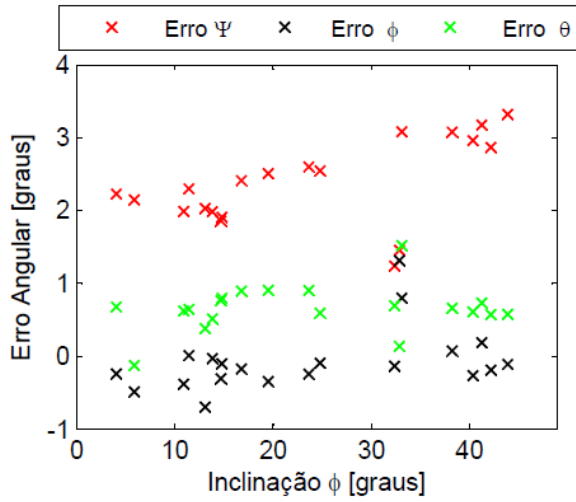


APÊNDICE L
GRÁFICOS COM OS ERROS DA RESSECÇÃO ESPACIAL EM FUNÇÃO DA
INCLINAÇÃO LATERAL

CÂMERA NIKON

COM CORREÇÃO DAS DISTORÇÕES

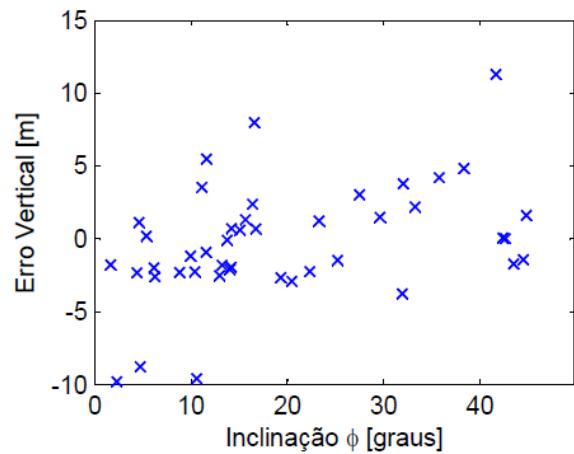
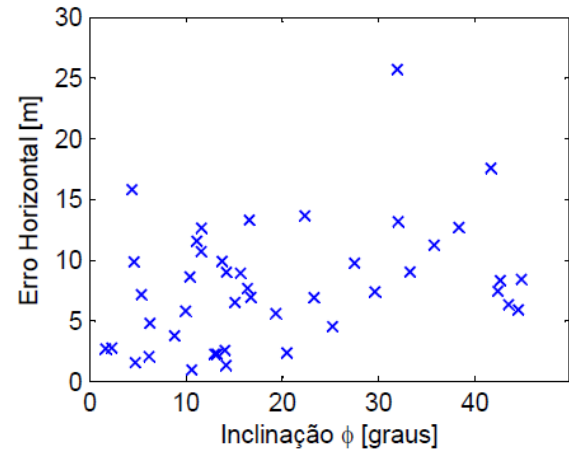
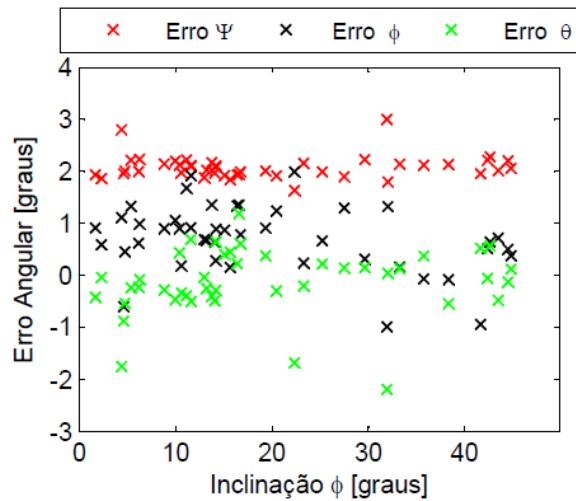
Altura Média $H = 396$ m



CÂMERA GoPRO

COM CORREÇÃO DAS DISTORÇÕES

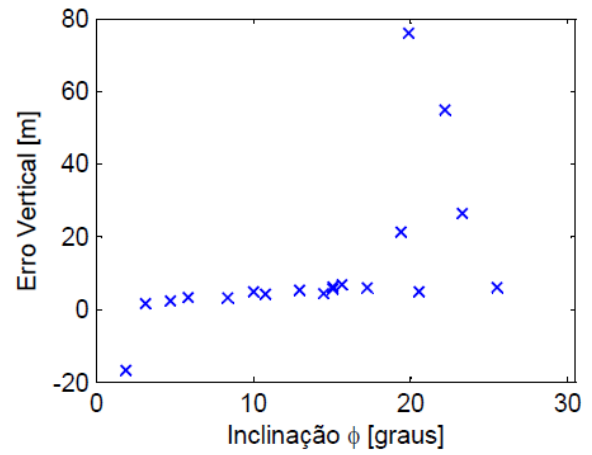
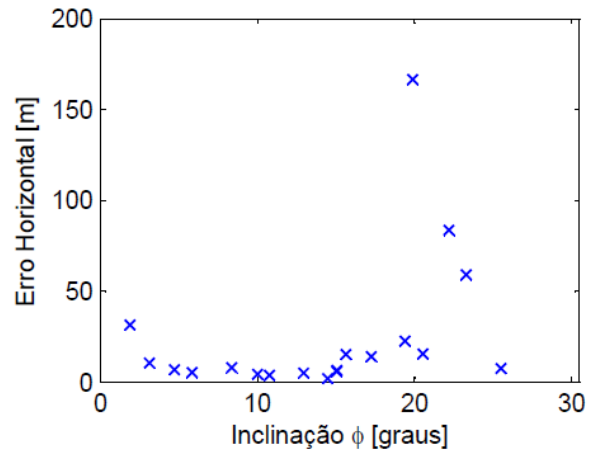
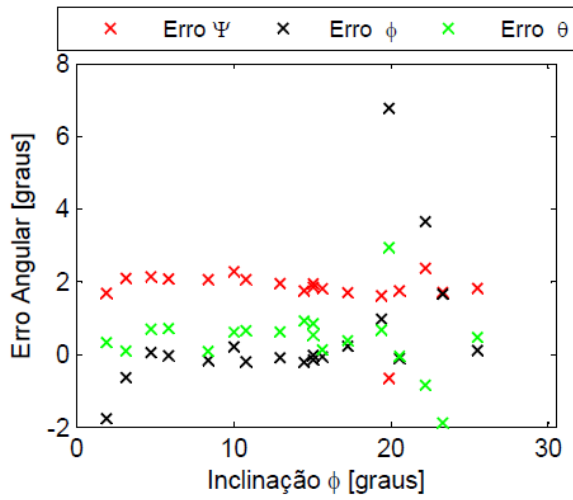
Altura Média $H = 392$ m



CÂMERA NIKON

COM CORREÇÃO DAS DISTORÇÕES

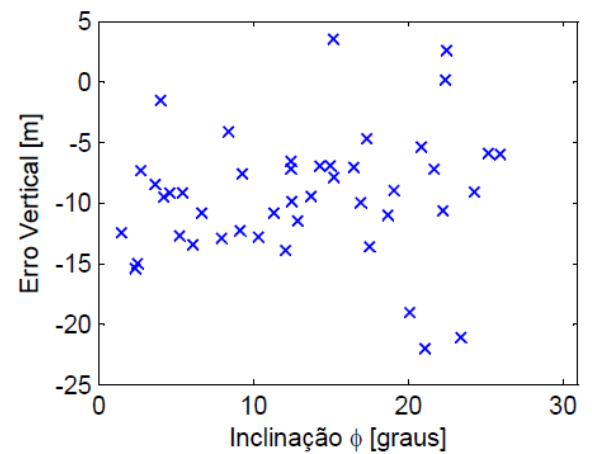
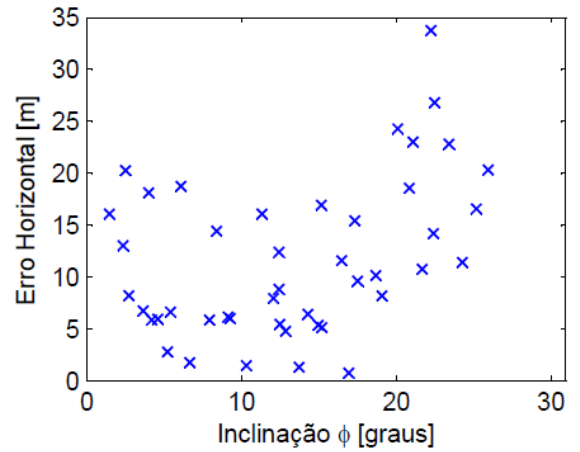
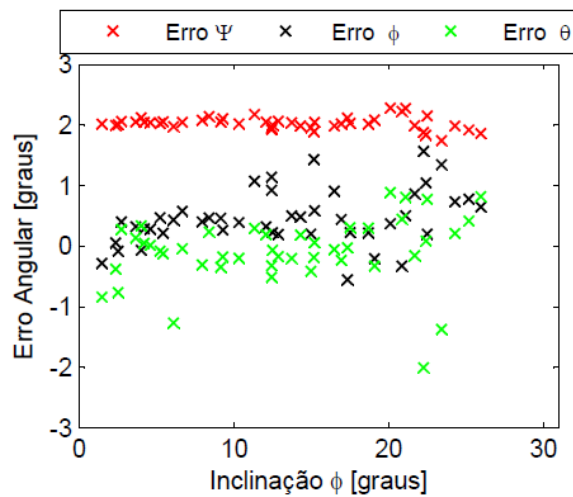
Altura Média $H = 1028$ m



CÂMERA GoPRO

COM CORREÇÃO DAS DISTORÇÕES

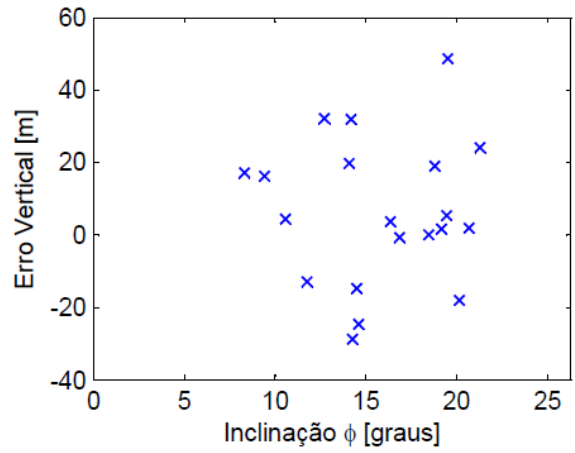
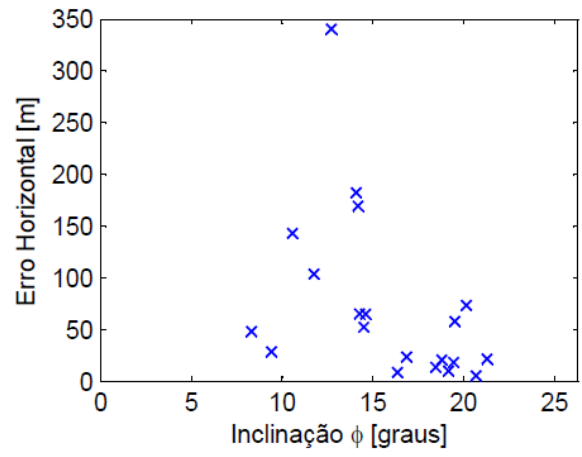
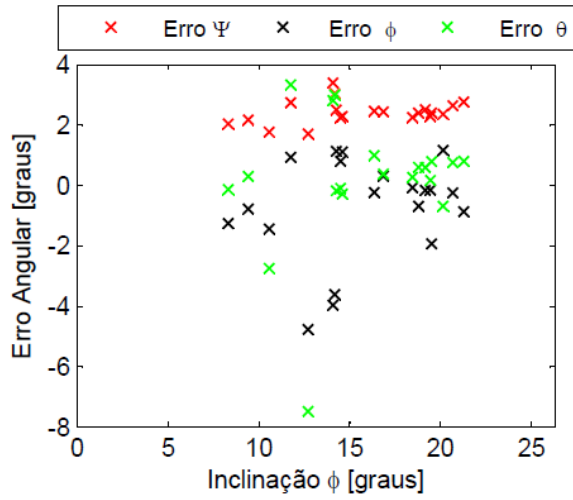
Altura Média $H = 984$ m



CÂMERA NIKON

COM CORREÇÃO DAS DISTORÇÕES

Altura Média $H = 1912$ m



CÂMERA GoPRO

COM CORREÇÃO DAS DISTORÇÕES

Altura Média $H = 1891$ m

