

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PAMPA

RENAN MANZONI VIANA

**SISTEMA DE CALIBRAÇÃO DE IMAGENS DIGITAIS ADQUIRIDAS DE
CÂMERAS NÃO MÉTRICAS ACOPLADAS EM DRONES**

Itaqui

2022

RENAN MANZONI VIANA

**SISTEMA DE CALIBRAÇÃO DE IMAGENS DIGITAIS ADQUIRIDAS DE
CÂMERAS NÃO MÉTRICAS ACOPLADAS EM DRONES**

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao Curso de Engenharia Cartográfica e de Agrimensura da Universidade Federal do Pampa, como requisito parcial para obtenção do Título de Bacharel.

Orientador: Rolando Larico Mamani

Coorientador: Eng. Vinicius Kuczynski

Itaqui

2022

Ficha catalográfica elaborada automaticamente com os dados fornecidos
pelo(a) autor(a) através do Módulo de Biblioteca do
Sistema GURI (Gestão Unificada de Recursos Institucionais) .

V393s Viana, Renan Manzoni
Sistema De Calibração De Imagens Digitais Adquiridas De
Câmeras Não Métricas Acopladas Em Drones / Renan Manzoni Viana.
51 p.

Trabalho de Conclusão de Curso(Graduação)-- Universidade
Federal do Pampa, ENGENHARIA CARTOGRÁFICA E DE AGRIMENSURA,
2022.

"Orientação: Rolando Larico Mamani".

1. Fotogrametria. 2. Calibração de Câmeras. 3. ARP. 4.
Parâmetros. I. Título.

RENAN MANZONI VIANA

**SISTEMA DE CALIBRAÇÃO DE IMAGENS DIGITAIS ADQUIRIDAS DE
CÂMERAS NÃO MÉTRICAS ACOPLADAS EM DRONES**

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao
Curso de Engenharia Cartográfica e de
Agrimensura da Universidade Federal do
Pampa, como requisito parcial para obtenção
do Título de Bacharel.

Orientador: Rolando Larico Mamani

Coorientador: Eng. Vinicius Kuczynski

Trabalho de Conclusão de Curso defendido e aprovado em: 08 de fevereiro de 2023.

Banca examinadora:

Prof. Rolando Larico Mamani
Orientador
UNIPAMPA - Itaqui/RS

Prof. Elaine Cristina Ferreira Silva Fortes
UNIPAMPA - Itaqui/RS

Prof. Me. Leonard Niero da Silveira
UNIPAMPA - Itaqui/RS

Eng. Vinicius Kuczynski
Vk Agrimensura e Cartografia

AGRADECIMENTO

Queria agradecer primeiramente a minha mãe que não mediu esforços para que eu conclui-se a graduação...

Ao meu avô que hoje infelizmente não pode compartilhar comigo este momento, mas de alguma forma está vendo tudo....

Aos meus familiares que de alguma forma me fortaleceram ...

Meu orientador Rolando por ter aceito o convite...

Ao meu coorientador e colega Eng. Vinicius...

Professor Leonard que sempre me ajudou em diversas matérias e nunca deixou de estar presente...

Aos diversos professores que tive na graduação ...

E não poderia esquecer dos meus colegas que cruzaram em minha vida durante a faculdade...

RESUMO

Com o avanço constante da tecnologia, atualmente a Aerofotogrametria e os mapeamentos aéreos vem possibilitando uma maior aplicação da fotogrametria digital na obtenção de informações mais detalhadas da superfície terrestre. Nos processos de fotogrametria, é notório da importância de conhecer os parâmetros de calibração das câmeras, tendo em vista que, são fundamentais para a aquisição dos produtos cartográficos com precisão e confiabilidade. O fácil acesso a equipamentos Aeronave Remotamente Pilotada (ARP), com seu baixo custo, vem possibilitando o uso desse tipo de equipamento, por muitas empresas. Este estudo visa a calibração da câmera integrada na Phantom 4 Pro na cidade de Antônio Prado Rio Grande do Sul, onde será aplicado o método matemático da Equação de Colinearidade ajustada para o Método de BROWN (1971) para determinar os parâmetros internos da câmera e gerar um certificado de calibração. Para a realização do trabalho em si, os equipamentos utilizados foram: ARP Phantom 4 Pro com câmera integrada da DJI, Receptor GNSS Emlid Reach RS2 e alvos materializados em campo. A metodologia aplicada para obtenção dos dados gerados foram: A localização da área de estudo, conhecimento prévio do local, planejamento de voo, foram utilizados 10 pontos de controle, levantamento geodésico com o receptor GNSS Emlid Reach RS2, voo aerofotogramétrico com a Phantom 4 Pro, processamento dos dados obtidos pelo GNSS, processamento fotogramétrico e calibração da câmera utilizando o método matemático da Equação de colinearidade ajustada para o Método de BROWN (1971) no software Agisofty Metashape, onde será utilizada para determinar os parâmetros internos da câmera gerando assim um laudo técnico para atividades de aerolevantamento com uso de RPAS.

Palavras-chaves: Fotogrametria, Calibração de Câmeras, ARP, Parâmetros.

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANAC	Agência Nacional de Aviação Civil
ANATEL	Agência Nacional de Telecomunicação
ARP	Aeronave Remotamente Pilotada
BVLOS	Beyond Visual Line Of Sight
CCD	Charged Complred Device
CMOS	Complementary Metal-Oxide Semiconductor
CP	Centro Perspectivo
DECEA	Departamento de Espaço Aéreo
DJI	Dà-Jiang Innovations Science and Tecnology
ESA	Agência Espacial Européia
EVLOS	Entended Visual Line Of Sight
FPS	Frames Por Segundo
GBAS	Ground Based Augmentation System
GB	Giga Byte
GCP	Ground Control Points
GHz	Giga Hertz
GLONASS	Sistema de Navegação Global por Satélite
GNSS	Global Navigation Satellite System
IMU's	Unidades de Medida Inercial
ITRF	International Terrestrial Reference Frame
m	Metros
MDS	Modelo Digital de Superfície
MDT	Modelo Digital de Terreno
mm	Milímetros

NAVISTAR GPS	Sistema de Navegação com Posicionamento Global de Tempo e variação
O	Centro de Projeção
P	Ponto-objeto
p	Ponto-imagem
PCD	Produtos Cartográficos Digitais
PEC	Padrão de Exatidão Cartográfica
POI	Parâmetros de Orientação Interior
PMD	Peso Máximo de Decolagem
PPP	Posicionamento Por Ponto Preciso
RAM	Random Access Memory
REQM	Raiz Quadrada do Erro Quadrático Médio
RPA	Remotely Piloted Aircraft
RPAS	Remotely Piloted Aircraft System
RTK	Real Time Kinematic
SBAS	Satellite Based Augmentation System
SIG	Sistema de Informação Geográfica
SIRGAS2000	Sistema de Referência geocêntrico para as Americas
UE	União Européia
USB	Universal serial Bus
VANT	Veículo Aéreo Não Tripulado
VLOS	Visual Line Of Sight
VMC	Condições Meteorológicas Visuais

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	10
2 JUSTIFICATIVA.....	11
3 OBJETIVOS.....	11
3.1 Objetivos geral.....	11
3.2 Objetivos específicos.....	11
4 REVISÃO DE LITERATURA.....	11
4.1 Câmeras digitais.....	12
4.2 Equações de colineariedade.....	13
4.3 Etapas de calibração e processamento de dados	18
4.4 ARP OU VANT	23
4.5 Posicionamento GNSS.....	26
4.6 PEC-PCD.....	28
4.7 Legislação nacional.....	29
5 Materiais e métodos.....	30
6 Resultado e discussões.....	35
7 Considerações finais.....	41
8 Referências.....	43
Anexos.....	46
Anexo A.....	46

1 INTRODUÇÃO

A Fotogrametria pode ser definida como a arte, ciência e tecnologia que a partir do registro, medição e interpretação de imagens fotográficas obtém informação geométrica e semântica viável sobre os objetos físicos fotografados (GONÇALVES, 2006).

O desenvolvimento constante da informática, disponibilizando computadores cada vez mais eficientes quando à velocidade de processamento e capacidade de armazenamento. Assim, possibilita-se uma maior aplicação da fotogrametria digital na obtenção de informações da superfície terrestre (MITISHITA; OLIVAS, 2001).

Segundo (Tomaselli, 1999) a Fotogrametria aérea, ou Aerofotogrametria, são capturas de imagens por uma câmera acoplada há uma aeronave. Tem-se dois termos utilizados na fotogrametria; Fotogrametria terrestre e Fotogrametria Espacial.

Fotogrametria terrestre é aplicado quando as fotografias são adquiridas de uma localização fixa no terreno geralmente conhecida (TOMASELLI, 1999).

O segundo termo é a Fotogrametria Espacial, onde a câmera estiver fixada no espaço aéreo, ou num satélite artificial (TOMASELLI, 1999).

Nos processos de fotogrametria, é notório a importância de conhecer os parâmetros de calibração das câmeras, tendo em vista que, são fundamentais para a aquisição dos produtos cartográficos com precisão e confiabilidade. Atualmente é fácil o acesso aos equipamentos Aeronave Remotamente Pilotada (ARP), podendo ser utilizados em um amplo leque de opções no mercado de trabalho devido ao seu valor de aquisição relativamente baixo comparado a aeronaves tripuladas, sendo que muitas empresas vêm utilizando esse tipo de equipamento.

Em processos para calibração de câmeras normalmente são utilizados métodos analíticos, o que torna necessário a utilização de computadores para o processamento destes dados. O processo envolve um número muito grande de dados matriciais, que felizmente, devido ao grande avanço tecnológico ocorrido nos últimos anos, principalmente da informática, tem agilizado o processo diminuindo bastante o tempo de processamento dos dados (DIAS, 2004).

O presente trabalho tem como objetivo a Calibração em Serviço da Câmera DJI Phantom 4 Pro e elaborar um certificado de calibração da câmera, através do método Brown.

2 JUSTIFICATIVA

As imagens digitais ou convencionais na Aerofotogrametria são adquiridas por câmeras (sensores) que são acoplados em aeronaves. A metodologia de calibração de câmeras embarcadas em ARP são de suma importância para os profissionais que utilizam esses equipamentos.

A calibração da câmera ou de qualquer instrumento, é essencial e um dos processos mais importantes para a qualidade e confiabilidade das imagens adquiridas pela ARP , tendo em vista que, para calibrar a câmera necessita-se de um campo de calibração com o intuito de refletir as condições reais do ambiente semelhantes ao local do aerolevante tais como: umidade, temperatura e pressão do ar. As condições ambientais são importantes pois influenciam nos parâmetros utilizados para calibração das imagens digitais na etapa de processamento (Orientações e Ortorectificação). Visto que, há necessidade de calibração para regularização no Ministério da Defesa.

3 OBJETIVOS

3.1 Objetivo geral

O principal objetivo deste trabalho é realizar a calibração da Câmera DJI Phantom 4 Pro, por meio do método de Brown, e elaborar um laudo de calibração.

3.2 Objetivos específicos

- ✓ Especificar a metodologia aplicada na calibração da câmera (sensor)da câmera integrada na ARP Phantom 4 Pro;
- ✓ Caracterizar os parâmetros de calibração da câmera não métrica acoplada na ARP;
- ✓ Gerar um Certificado de calibração da câmera da ARP;
- ✓ Abordar a legislação quanto a operação de veículos aéreos não tripulados.

4 REVISÃO DE LITERATURA

4.1 Câmeras digitais

Segundo Brito e Coelho Filho (2009), a primeira revolução da fotogrametria foi marcada pela invenção do estereocomparador, aparelho feito por Pullfrich, o qual substituiu os imensos cálculos matemáticos por aparelhos óptico-mecânicos, dessa forma, reduzindo o trabalho de usuários.

No ano de 1911, um austríaco chamado Theodore Scheimpflug teve a ideia de criar um método de retificação de fotografias aéreas com o intuito de utilizá-las para mapeamento de grandes extensões de terra. Estes retificadores analógicos passaram a ser utilizados com frequência, porém, foram substituídos pelos restituidores analógicos, os quais permitiam a visão estereoscópica a partir do uso de um aparelho chamado estereoscópio. (Brito e Coelho Filho, 2009).

Com o início do processo de foto triangulação analógica, o trabalho em campo começou a ser realizado de forma mais fácil, pois este processo permitia, em laboratório, o adensamento dos pontos de campo (Brito e Coelho Filho, 2009).

Com o avanço da tecnologia, surgiram câmaras destinadas a determinados trabalhos, as quais são denominadas de câmaras métricas, onde as mesmas possuem tecnologia para imprimir nas fotos informações sobre o sistema de coordenadas da imagem, dessa forma, aumentando a precisão das medições efetuadas (Brito e Coelho Filho, 2009).

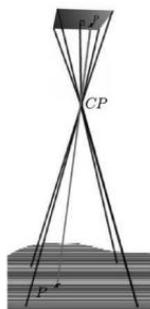
As câmeras digitais são dispositivos nos quais a superfície sensor é constituída de elementos fotodetectores ao invés de uma película fotográfica sensível, como é o caso das câmeras convencionais (GALO, 1993).

Apesar da rápida aceitação da tecnologia fotogramétrica digital no mercado mundial, um longo período de transição foi necessário até que as câmeras fotogramétricas digitais pudessem substituir definitivamente as câmeras analógicas. Um aspecto fundamental das câmeras digitais que contribuiu sobremaneira para que essa substituição ocorresse mais rapidamente foi o fato de que o método de aquisição de imagens passou a ser feito com sensores de estado sólido tipo CCD (*Charged Coupled Device*) e CMOS (*Complementary Metal-Oxide Semiconductor*), instalados diretamente no plano focal da câmera, substituindo o filme fotográfico (FILHO, 2017).

4.2 Equações de colinearidade

Segundo Brito e Coelho Filho (2009), as duas equações de colinearidade podem ser consideradas a base da fotogrametria analógica e digital, uma vez que relacionam os parâmetros da orientação exterior, as coordenadas fotográficas de um ponto e as coordenadas tridimensionais do mesmo ponto no sistema referencial do terreno ou do espaço-objeto. A demonstração dessa formulação decorre da condição de colinearidade, que pode ser enunciada da seguinte forma: no momento da tomada da fotografia, o ponto-objeto P, o centro de projeção O e o ponto-imagem p formam uma linha reta. A figura X oferece uma descrição gráfica dessa condição. Nela, podemos ver um ponto-objeto (P), marcado com uma cruz, e a linha reta que o une ao seu respectivo ponto-imagem (p), também marcado com uma cruz, sobre a foto. Na linha reta que une os dois, encontra-se o centro de perspectiva (CP):

Figura 1 – Condição de colinearidade.

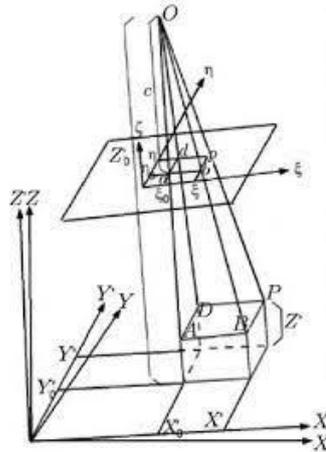


Fonte: Brito e Coelho filho (2009).

A aplicação das equações de colinearidade faz-se necessária, devido à necessidade de tomadas inclinadas das imagens, para então realizar a correção da inclinação da imagem (retificação) no processo de determinação das coordenadas de pontos no espaço objeto (KOYAMA, HASEGAWA, 2002).

A figura 2 ilustra o princípio da colinearidade, que estabelece que no momento de tomada da fotografia, o ponto-objeto P, o centro de projeção O e o ponto-imagem p formam uma linha reta. A demonstração dessa formulação pode ser encontrada em (Brito & Coelho Filho, 2009).

Figura 2 - Condição de colinearidade para uma imagem.



Fonte: Brito e Coelho filho (2009).

A partir de um ponto 3D, é possível reprojeter este ponto no espaço-objeto a partir das equações de colinearidade, a Equação 1, determina-se as coordenadas x de um ponto na imagem e a Equação 2, determina-se as coordenadas y de um ponto na imagem.

Equação 1 – Determinação das coordenadas x de um ponto na imagem.

$$\xi = \xi_0 - c \frac{r_{11}(X - X_0) + r_{21}(Y - Y_0) + r_{31}(Z - Z_0)}{r_{13}(X - X_0) + r_{23}(Y - Y_0) + r_{33}(Z - Z_0)} \quad (1)$$

Equação 2 – Determinação das coordenadas y de um ponto na imagem.

$$\eta = \eta_0 - c \frac{r_{12}(X - X_0) + r_{22}(Y - Y_0) + r_{32}(Z - Z_0)}{r_{13}(X - X_0) + r_{23}(Y - Y_0) + r_{33}(Z - Z_0)} \quad (2)$$

Onde:

- ξ é coordenada x de um ponto na imagem;
- ξ_0 é coordenada x do centro de perspectiva da câmara na imagem;
- η é coordenada y de um ponto na imagem;
- η_0 é coordenada y do centro de perspectiva da câmara na imagem;
- (Φ, ω, K) – elementos da matriz de rotação R;
- (X, Y, Z) – coordenadas do espaço-imagem;
- (X_0, Y_0, Z_0) – coordenadas do objeto paralelo ao sistema-imagem;
- η – coordenada y de um ponto na imagem;

- η_0 – coordenada y do centro de perspectiva da câmara da imagem.

Segundo Teixeira Junior (2010), para localizar geograficamente algum objeto é necessário conhecer o sistema de referência no qual o corpo está inserido. Um sistema de referência inercial é um sistema no qual as leis de Newton se aplicam. A origem deste sistema é arbitrária e os eixos coordenados devem ser perpendiculares entre si. Esse Sistema não acelera e nem rotaciona, todos os sensores inerciais produzem medições relativas a esse sistema.

Navegação inercial é o processo pelo qual se estabelecem informações sobre a posição, velocidade, altitude e direção de um veículo com relação a um referencial, utilizando informações fornecidas por sensores inerciais que se baseiam nas leis de movimento de Newton. Os sensores de um sistema de navegação inercial do tipo solidário (strapdown), acelerômetros e girômetros, são montados em forma de tríades chamamos de unidades de medida inercial (IMU's). Um sistema de navegação inercial é composto, em geral, por: uma IMU; a plataforma em que são montados incluindo os mecanismos de estabilização caso existam, e um computador de plataforma. O computador realiza os cálculos necessários para transformar as informações obtidas a partir dos sensores em informações de navegação: posição, velocidade e altitude (De Souza, Leite Filho, 2012).

É comum o uso de sensores inerciais no sentido de fornecer, num determinado momento, a posição (X,Y,Z).

A partir das equações de colinearidade é possível realizar uma série de cálculos que serão descritos a seguir.

Visto que, toda resseção espacial serve basicamente para a transformação da projeção cônica em projeção plana. A partir da resseção espacial segundo o Brito e Coelho Filho (2009), é capaz determinar equações de colinearidade, é possível determinar os seis elementos de orientação exterior de uma fotografia ($X_0, Y_0, Z_0, \Phi, \omega, K$) a partir de três pontos de controle não colineares. Como os pontos de controle foram identificados na imagem, são conhecidas as coordenadas interior, chega-se às coordenadas no sistema-imagem analógico (fotográfico) ξ_1 e η_1 , ξ_2 e η_2 , ξ_3 e η_3 , e assim por diante. Como dados, também encontram-se disponíveis suas coordenadas tridimensionais (pois se trata de pontos de controle ou de campo) X_1, Y_1 e Z_1 ; X_2, Y_2 e Z_2 ; X_3, Y_3 e Z_3 ; e assim por diante.

A distância focal já é conhecida, visto que se acha no certificado de calibração da câmara métrica, entretanto na câmara não métrica, vem do fabricante podendo haver um leve erro. As coordenadas do ponto principal ξ_0 e η_0 (no espaço-imagem) também estão no

mesmo documento; porém, caso não estejam descritas, podem ser adotados os valores das médias das coordenadas em ξ e η das marcas fiduciais.

Com todos esses valores conhecidos, resta apenas determinar as incógnitas. Um exemplo abaixo, considerando quatro pontos de controle.

- distância principal (ou focal, ou focal calibrada): c ;
- coordenadas do ponto principal: ξ_0 e η_0 ;
- coordenadas de quatro pontos de controle no espaço-imagem: η_1 e ξ_1 ; ξ_2 e η_2 ; ξ_3 e η_3 ; ξ_4 e η_4 ;
- Coordenadas de quatro pontos de controle no espaço-objeto: X_1, Y_1 e Z_1 ; X_2, Y_2 e Z_2 ; X_3, Y_3 e Z_3 ; X_4, Y_4 e Z_4 .

Formulas:

$$\xi_1 = \xi_0 - c \frac{r_{11}(X_1 - X_0) + r_{21}(Y_1 - Y_0) + r_{31}(Z_1 - Z_0)}{r_{13}(X_1 - X_0) + r_{23}(Y_1 - Y_0) + r_{33}(Z_1 - Z_0)};$$

$$\eta_1 = \eta_0 - c \frac{r_{12}(X_1 - X_0) + r_{22}(Y_1 - Y_0) + r_{32}(Z_1 - Z_0)}{r_{13}(X_1 - X_0) + r_{23}(Y_1 - Y_0) + r_{33}(Z_1 - Z_0)};$$

$$\xi_2 = \xi_0 - c \frac{r_{11}(X_2 - X_0) + r_{21}(Y_2 - Y_0) + r_{31}(Z_2 - Z_0)}{r_{13}(X_2 - X_0) + r_{23}(Y_2 - Y_0) + r_{33}(Z_2 - Z_0)};$$

$$\eta_2 = \eta_0 - c \frac{r_{12}(X_2 - X_0) + r_{22}(Y_2 - Y_0) + r_{32}(Z_2 - Z_0)}{r_{13}(X_2 - X_0) + r_{23}(Y_2 - Y_0) + r_{33}(Z_2 - Z_0)};$$

$$\xi_3 = \xi_0 - c \frac{r_{11}(X_3 - X_0) + r_{21}(Y_3 - Y_0) + r_{31}(Z_3 - Z_0)}{r_{13}(X_3 - X_0) + r_{23}(Y_3 - Y_0) + r_{33}(Z_3 - Z_0)};$$

$$\eta_3 = \eta_0 - c \frac{r_{12}(X_3 - X_0) + r_{22}(Y_3 - Y_0) + r_{32}(Z_3 - Z_0)}{r_{13}(X_3 - X_0) + r_{23}(Y_3 - Y_0) + r_{33}(Z_3 - Z_0)};$$

$$\xi_4 = \xi_0 - c \frac{r_{11}(X_4 - X_0) + r_{21}(Y_4 - Y_0) + r_{31}(Z_4 - Z_0)}{r_{13}(X_4 - X_0) + r_{23}(Y_4 - Y_0) + r_{33}(Z_4 - Z_0)};$$

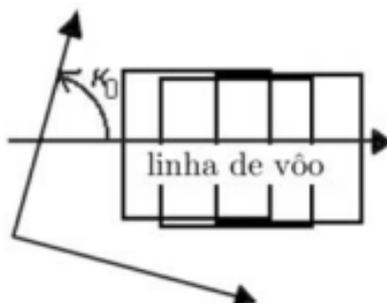
$$\eta_4 = \eta_0 - c \frac{r_{12}(X_4 - X_0) + r_{22}(Y_4 - Y_0) + r_{32}(Z_4 - Z_0)}{r_{13}(X_4 - X_0) + r_{23}(Y_4 - Y_0) + r_{33}(Z_4 - Z_0)}.$$

Verifica-se então que, para que seja realizado um ajustamento, são necessárias aproximações iniciais para as incógnitas, uma vez que o modelo matemático é não-linear. Esses valores, chamados de $X_0, Y_0, Z_0, \Phi_0, \omega_0, K_0$, podem ser estimados de diferentes formas, como enunciado por Kraus (1999): por intermédio do ajustamento por modelos

independentes, da transformação linear direta (geometria projetiva) ou adotando-se os valores $\phi_0 = 0$, $\omega_0 = 0$ e κ_0 dados pela direção de voo (ângulo, no sentido anti-horário, necessário para fazer coincidir a linha de voo com o eixo X do sistema de coordenadas de terreno, conforme a figura).

Os valores X_{00} , Y_{00} e Z_{00} ainda podem ser obtidos de duas maneiras: uma é realizando a ressecção espacial considerando ϕ_0 , ω_0 e κ_0 valores, e a outra é promovendo uma transformação afim, nos mesmos moldes da realizada para a orientação interior, mas desta vez relacionando coordenadas fotográficas com coordenadas planimétricas. Ao obter esses parâmetros de transformação, os mesmos são utilizados para calcular X_{00} e Y_{00} a partir de ξ_0 e η_0 . Z_{00} , é a soma da altura de voo e o plano médio do terreno, que são previstos desde o planejamento da cobertura fotogramétrica (Brito e Coelho Filho, 2009).

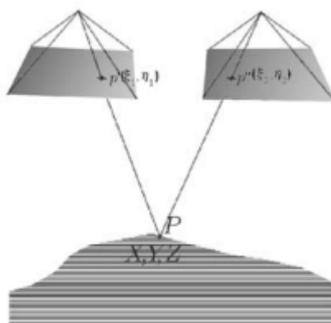
Figura 3 – Linhas de voo.



Fonte: Brito e Coelho filho (2009).

De acordo com Brito e Coelho Filho (2009), conhecendo os parâmetros da orientação exterior para um par de fotografias com superposição (X_{01} , Y_{01} , Z_{01} , ϕ_1 , ω_1 e κ_1 ; X_{02} , Y_{02} , Z_{02} , ϕ_2 , ω_2 e κ_2), pode-se, a partir das mesmas equações de colinearidade, gerar as coordenadas tridimensionais de um ponto, referidas ao sistema do espaço objeto (terreno) (Figura 4) a seguir.

Figura 4 – Interseção espacial.



Fonte: Brito e Coelho filho (2009).

Como o ponto em questão é o mesmo, as incógnitas passam a ser suas coordenadas tridimensionais no espaço-objeto (X, Y e Z). Ao todo, o número de equações é igual a quatro. Logo, há superabundância de dados e um ajustamento por mínimos quadrados, nos moldes da ressecção espacial, pode ser aplicado, mostrado nas equações a seguir.

Equação 3 - Ajustamento por Mínimos Quadrados, nos moldes da ressecção espacial.

$$\begin{aligned}
 X &= X_{0_1} + (Z - Z_{0_1}) \frac{r_{11_1}(\xi_1 - \xi_{0_1}) + r_{12_1}(\eta_1 - \eta_{0_1}) - r_{13_1}c}{r_{31_1}(\xi_1 - \xi_{0_1}) + r_{32_1}(\eta_1 - \eta_{0_1}) - r_{33_1}c} ; \\
 Y &= Y_{0_1} + (Z - Z_{0_1}) \frac{r_{21_1}(\xi_1 - \xi_{0_1}) + r_{22_1}(\eta_1 - \eta_{0_1}) - r_{23_1}c}{r_{31_1}(\xi_1 - \xi_{0_1}) + r_{32_1}(\eta_1 - \eta_{0_1}) - r_{33_1}c} ; \\
 X &= X_{0_2} + (Z - Z_{0_2}) \frac{r_{11_2}(\xi_2 - \xi_{0_2}) + r_{12_2}(\eta_2 - \eta_{0_2}) - r_{13_2}c}{r_{31_2}(\xi_2 - \xi_{0_2}) + r_{32_2}(\eta_2 - \eta_{0_2}) - r_{33_2}c} ; \\
 Y &= Y_{0_2} + (Z - Z_{0_2}) \frac{r_{21_2}(\xi_2 - \xi_{0_2}) + r_{22_2}(\eta_2 - \eta_{0_2}) - r_{23_2}c}{r_{31_2}(\xi_2 - \xi_{0_2}) + r_{32_2}(\eta_2 - \eta_{0_2}) - r_{33_2}c} ; \\
 Z &= \frac{X_{0_2} - Z_{0_2}k_{x_2} + Z_{0_1}k_{x_1} - X_{0_1}}{k_{x_1} - k_{x_2}} ;
 \end{aligned}$$

Em caso mais genérico da utilização das equações de colinearidade é a foto triangulação com ajustamento por feixes perspectivais (*bundle adjustment*). Nesse caso, ajusta-se um bloco inteiro, simultaneamente, recorrendo às diversas possibilidades de superposição, que podem localizar um determinado ponto em até seis imagens, considerando-se as clássicas superposições longitudinal e lateral de 70% e 60%, respectivamente – o que adicionará mais injunções ao modelo. O resultado final são os parâmetros da orientação exterior para todas as imagens do bloco, mais as coordenadas tridimensionais dos diversos pontos fotogramétricos selecionados pelo operador (Brito e Coelho Filho, 2009).

4.3 Etapas de calibração e processamento de dados

A calibração pode ser entendida como sendo o procedimento para determinação de um conjunto de parâmetros inerentes à câmera, os quais permitem a reconstituição do feixe perspectivo que deu origem a imagem. A partir da definição pode-se observar que a calibração de câmeras ocupa um espaço fundamental na fotogrametria (GALO, 1993).

Segundo Olivas (1980), calibrar envolve, de início, a ideia de medir. Daí fixar-se, preliminarmente, o conceito de que calibração está diretamente ligada à operação de medição.

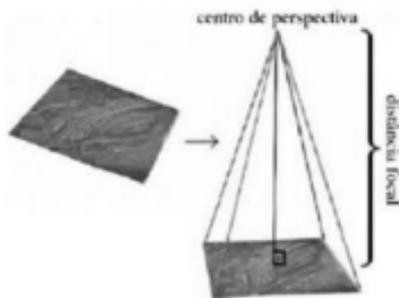
Procedimentos para calibração objetivam, em última análise, a obtenção das características individuais de um instrumento. Tais características são indicadas através de valores obtidos com a calibração, os quais fornecem informações sobre a qualidade do instrumento.

De acordo com Galo (et al, 2008), a calibração das câmaras é realizada antes de sua utilização nas coberturas aéreas. Os parâmetros de orientação interior podem ser determinados tanto por métodos de laboratório quanto por métodos de campo, e então fixados durante o processo de foto triangulação. Com isso, assume-se que as coordenadas de pontos medidos nas imagens foram corrigidas dos efeitos sistemáticos (distorções das lentes e deformações do sensor) antes da realização da foto triangulação. Isso permite o uso de um modelo mais simplificado no ajustamento em bloco por feixes de raios, com um número menor de incógnitas e sem parâmetros altamente correlacionados.

Opcionalmente, os parâmetros de orientação interior da câmara (distância focal, coordenadas do ponto principal e parâmetros de distorção das lentes) podem ser determinados como parte da solução durante o ajustamento em bloco, introduzindo parâmetros adicionais às equações de colinearidade e considerando esses parâmetros como incógnitas. Embora a inclusão de parâmetros adicionais possa resultar em correlações indesejáveis, é relevante considerar que o ambiente em que a calibração foi realizada (laboratório ou outros) é diferente do ambiente de coleta das imagens. Além disso, a operação com as câmeras durante a coleta de imagens e o período de tempo decorrido desde a calibração podem alterar os parâmetros de orientação interior, dependendo da estabilidade do sistema óptico e da câmara, afetando a reconstrução tridimensional precisa dos pontos.

De acordo com Brito e Coelho filho (2009), considera-se orientação interior a reconstrução do feixe perspectivo, ou seja, referenciar uma imagem em relação à câmera. Pelo fato das imagens obtidas se encontrarem isoladas em relação às outras e salvas como arquivos digitais, sem nenhuma informação métrica, utilizando apenas o sistema de coordenadas em pixels, há necessidade de reconstituir o sistema interno câmera-imagem correspondente ao momento que as fotografias foram obtidas à fim de se efetuar medidas com precisão sobre as imagens fotográficas. A figura 5, demonstrará a reconstrução da geometria do feixe perspectivo, ou seja, posição do plano de imagem em relação ao eixo óptico).

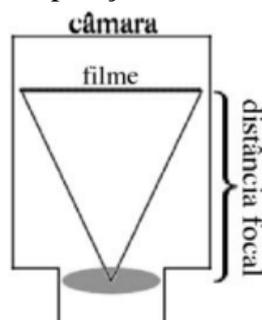
Figura 5 – Conceito de orientação interior.



Fonte: Brito e Coelho filho (2009).

Simultaneamente, a orientação interior consiste apenas em colocar as imagens, uma a uma, em posição semelhante à que exerciam dentro da câmara, no momento em que foram obtidas.

Figura 6 - Representação da posição do filme na tomada da fotografia.

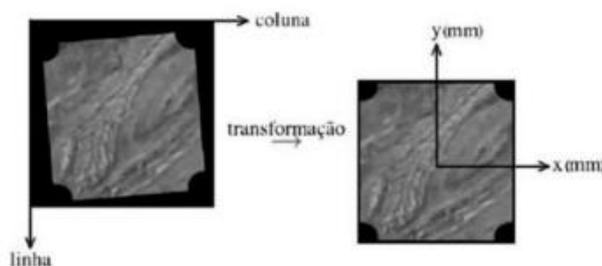


Fonte: Brito e Coelho filho (2009).

Na fotogrametria digital, o próprio software realiza as medições das coordenadas das marcas fiduciais no sistema de pixel, podendo haver intervenção do operador ou não e a partir daí o processo é semelhante à fotogrametria analítica, com a entrada dos valores constantes do certificado de calibração e o ajustamento para definição dos parâmetros de transformação entre um sistema e outro. O sistema pixel da fotografia possui uma uniformização em relação às suas unidades utilizadas, tendo em mente que o sistema fotográfico é expresso em milímetros (unidade métrica), geralmente, o terreno também está expresso em unidades métricas, assim, a associação entre esses sistemas torna-se muito mais fácil. Leva-se em conta que a formulação existente também considerava um sistema métrico para a imagem, definido pelo certificado de calibração da câmara. A transformação entre pixels e milímetros (representada na Figura 7) serve para correção de vários erros de aquisição das imagens, como má colocação do dia filme no scanner, efeitos atmosféricos não modelados, deformações no

filme, distorção na digitalização via scanner ou aquisição de imagem digital via câmera causando distorções de rotação translação e fatores de escala (Brito e Coelho Filho, 2009).

Figura 7 - Sistemas de pixel e fotográfico (métrico) em que pode ser observado claramente as distorções existentes na imagem do primeiro sistema.

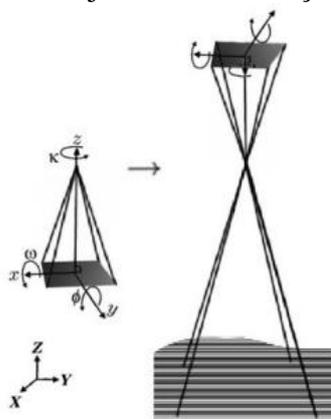


Fonte: Brito e Coelho filho (2009).

Até então, se informados os dados complementares constantes do certificado de calibração, como as coordenadas do ponto de menor distorção e os parâmetros de aberração das lentes é possível eliminar erros sistemáticos causados pela refração atmosférica e pela curvatura da Terra. No fim do processo de transformação (Figura 7), é obtido não apenas uma simples transformação entre sistemas de imagem analógica e digital, mas um modo de ter suas coordenadas no sistema métrico da câmera, que é rígido e preciso, pois baseia-se em sua própria calibração (Brito e Coelho Filho, 2009).

Segundo Brito e Coelho Filho (2009), a base do objetivo da orientação exterior é a obtenção da posição e da atitude do sensor ao coletar cada imagem fotográfica em relação ao referencial do espaço-objeto. Como mostra na (Figura 8), a seguir:

Figura 8 – Objetivo da orientação exterior.



Fonte: Brito e Coelho filho (2009).

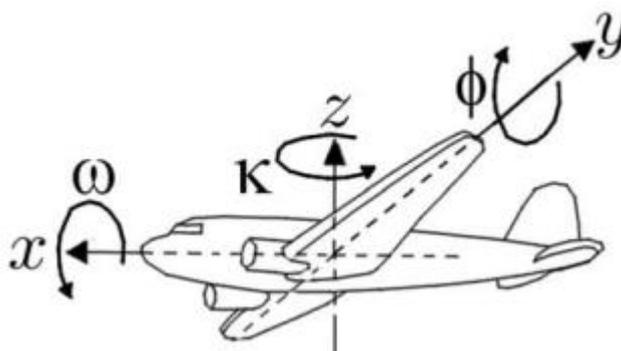
Pode-se dizer, então, que uma imagem está orientada exteriormente se são conhecidos seus seis parâmetros de orientação exterior: as coordenadas no espaço-objeto para o centro de perspectiva e os ângulos de rotação ou de atitude do sensor (φ , ω e κ). Com a orientação

exterior, não há a necessidade de se realizarem duas etapas diferentes (orientação relativa e absoluta). Sabendo-se os seis parâmetros já enumerados, para cada uma das imagens de um voo, pode-se reconstruí-lo totalmente. Obviamente, algumas restrições se aplicam (Brito e Coelho Filho, 2009). Dentre essas, destacam-se:

- A suposição de continuidade do espaço-objeto (prédios e construções em geral podem ser vistos como descontinuidades);
- O fato de o problema em questão pertencer à classe dos problemas “mal condicionados”, isto é, uma pequena variação no cálculo de parâmetros pode implicar soluções totalmente diferentes e inconsistentes.

Há seis parâmetros que localizam a imagem no espaço. Segue uma explicação mais detalhada de cada um deles. X_0 , Y_0 e Z_0 representam a posição do centro de perspectiva nos eixos X , Y e Z (respectivamente) do sistema de coordenadas do espaço-objeto. Os ângulos de Euler ϕ (Arfagem), ω (Rolagem) e κ (Deriva), por seu turno, significam rotações sofridas pelo sistema local de coordenadas x , y e z (de cada câmara) em relação ao referencial do terreno (X , Y e Z). Rotacionando x , y e z de $-\phi$, $-\omega$ e $-\kappa$, pode-se torná-lo paralelo a X , Y e Z . A matriz de rotação equivalente a cada ângulo expressa a transformação necessária para rotacionar um sistema em relação a outro de tal ângulo. Multiplicando-se todas, pode-se obter a matriz de rotação R , que equivale aos três movimentos simultaneamente (Brito e Coelho Filho, 2009).

Figura 9 - Parâmetros de atitude de um sensor fotogramétrico colocado em plataforma aérea.



Fonte: Brito e Coelho filho(2009).

De forma simplificada pode-se dizer que:

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

R rotaciona um terno de coordenadas do espaço-imagem para o espaço objeto. Já M, que é igual a R-1 ou RT, rotaciona um terno de coordenadas do espaço-objeto para o espaço-imagem. Note que a igualdade R-1 = RT é válida se, e somente se, a matriz R for ortogonal, o que é o caso. R é o produto de três matrizes ortogonais (Rφ, Rω e Rκ). Logo, R é ortogonal e, portanto, vale tal igualdade (Brito e Coelho Filho, 2009).

4.4 ARP OU VANT

O termo as Aeronave Remotamente Tripulada (ARP) ou veículo aéreo não tripulado (VANT) é internacionalmente reconhecido e engloba uma grande variedade de aeronaves autônomas, semiautônomas ou remotamente operadas. Nos últimos anos, vem ocorrendo um significativo aumento nas aplicações de aerolevantamentos a partir de VANT em diversificadas áreas, como arqueologia, geologia, monitoramento ambiental, engenharia civil, aplicações militares e em mapeamento topográfico. Nestes segmentos de atuação também estão sendo incluídos o atendimento às necessidades das empresas e profissionais em mapeamentos de pequenas áreas, para os estudos de projetos, monitoramento de obras de engenharia, estudos ambientais e cálculo de volumes (ALMEIDA, 2016).

De acordo com a (ANAC 2017), as aeronaves remotamente pilotadas são denominadas RPA (*Remotely-Piloted Aircraft*), as estações de pilotagem remota são chamadas RPS (*Remote Pilot Station*) e todo o sistema de aeronaves remotamente pilotadas é denominado de RPAS (*Remotely-Piloted Aircraft System*), o qual significa todo o conjunto de elementos abrangendo uma RPA, o RPS correspondente, os dispositivos de comando e controle e quaisquer outros elementos envolvidos na operação.

De acordo com a (ANAC, 2017), os RPAS e a RPA são classificados de acordo com o peso máximo de decolagem (PMD) da RPA da seguinte maneira:

- As RPA de classe 1 com PMD maior que 150 quilos;
- As RPA de classe 2 com PMD maior que 25 quilos e menor ou igual a 150 quilos;
- As RPA de classe 3 com PMD menor ou igual a 25 quilos;

Os módulos de pilotagem são definidos em 3 categorias:

- Operação Além da Linha de Visada Visual (*Beyond Visual Line of Sight – BVLOS operation*) quando não atendida às condições VLOS ou EVLOS;
- Operação em Linha de Visada Visual (*Visual Line of Sight – VLOS operation*);
- Operação em Linha de Visada Visual Estendida (*Visual Line of Sight – VLOS operation*);

A partir do VLOS, na qual o operador não precisa de auxílio de observadores de RPA, mantendo a visualização do equipamento sem o auxílio de qualquer equipamento, tendo a responsabilidade de conduzir a aeronave com segurança visando não colidir com outros tipos de aeronaves ou obstáculos. Entretanto a operação EVLOS, o operador sem auxílio de qualquer equipamento, não é apto de manter o contato visual direto com a RPA, precisando do auxílio de observadores de RPA para com segurança pilotar a aeronave com responsabilidade e não colidir com outras aeronaves ou obstáculos, aderindo as mesmas regras de uma operação VLOS.

Dois tipos principais de modelos de ARP são comumente encontrados: os multirotores e os de asa fixa. Ambos são utilizados para levantamentos de dados geoespaciais, cada um com sua capacidade de acordo com sua arquitetura.

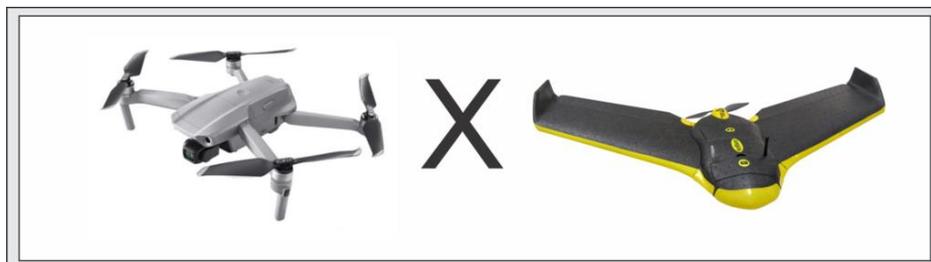
As ARP de acordo com a legislação brasileira, os drones são classificados como aeromodelos. Os objetivos deles podem ser para o uso em competições, ou recreativo. Visto que o intuito é exclusivamente recreativo, as leis brasileiras afirmam que aquele equipamento é um aeromodelo. Apesar de tecnicamente os VANTs sejam a mesma coisa que os drones, ou seja, possuem os mesmos formatos como hélices ou de asa fixa e são veículos não tripulados, a única diferença é o seu propósito de uso. O seu objetivo é unicamente para o uso comercial ou para fins de pesquisa científica e experimentos.

Os VANTs multirotores, possuem fácil operação e capacidade de voos em baixas velocidades ou até mesmo parados no ar, a aplicabilidade deste equipamento geralmente são utilizados para geração de imagens, vídeos e vigilância. Contudo, o mapeamento aéreo tem limitações, pois só serve para mapeamentos de pequenas áreas.

Os VANTs de asa fixa, a aparência normalmente utilizadas para VANTs de asa fixa com acabamentos são do tipo convencional (Fuselagem, motor, asa e cauda) ou do tipo asa voadora (apenas uma asa e motor) para fins de mapeamento. A parte de operação exige um nível maior de atenção e capacidade técnica do operador, pois voam mais rápidos e em atitudes maiores que os multirotores. Além da necessidade de autonomia de voo ou carga maiores, depois de atingida a velocidade e atitude do aerolevante, o consumo de energia

se torna muito baixo se comparado aos multirotores, e tendo vista que, o mapeamento é em grande escala.

Figura 10 - VANT multirotores e asa fixa.



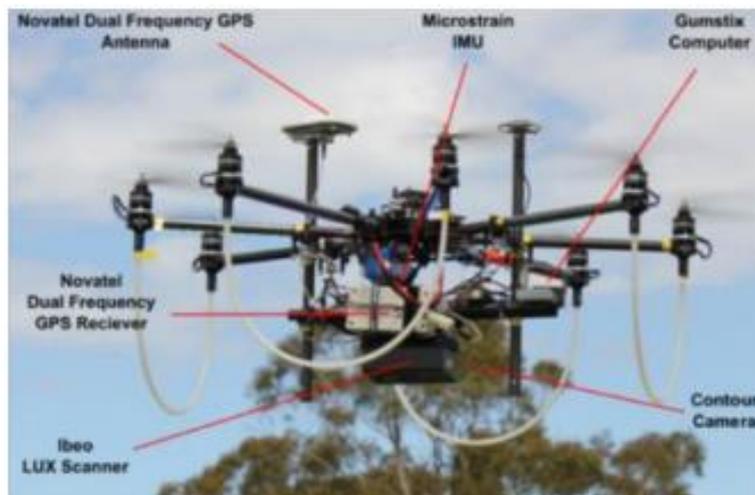
Fonte: Giovanini (2021).

De acordo com Moutinho (2015), possivelmente o melhor ARP é o multirotores, pois graças a habilidade de planar e levantar voo verticalmente, tem facilidade de levantar voo em locais de difícil acesso para aplicações em fotogrametria terrestre em especial para levantamentos arquitetônicos.

Apesar disso, segundo Moutinho (2015), os ARP de asa fixa Também tem suas vantagens, pois conseguem realizar voos mais longos, podendo assim concluir levantamentos aerofotogramétricos de cidades ou em aplicações de agricultura de precisão.

Há sete tipos de sensores, que já são usados nestes veículos, que foram apontados por Munaretto (2015): sensores na faixa do visível (RGB) muito usados para monitoramento de obras, agricultura e mineração; sensores infravermelhos (IV), que são capazes de identificar, por exemplo, estresses hídricos e alguns parâmetros envolvidos no cálculo da biomassa; sensores multiespectrais, que conseguem auxiliar na detecção de determinados aspectos das plantas água ou do terreno; sensores hiperspectrais, que podem capturar centenas de imagens da região do visível ao infravermelho de ondas médias; sensores de monitoramento do espectro de frequência, que monitoram e caracterizam sinais emitidos por aeronaves, navios e outros emissores de interesse de uma força armada ou órgão de espionagem; radar, capaz de mapear terrenos, florestas e edifícios emitindo ondas eletromagnéticas e coletando a energia retroespalhada (retornos do solo); e lidar, que permite a aquisição de uma nuvem de pontos mais densa e detalhada.

Figura 11- Exemplo de VANT com sistema lidar a bordo.



Fonte: Wallace et al (2012).

Dentre estes, os mais empregados nos VANTs são os RGBs, conforme ressaltado Munaretto (2015). Estes instrumentos trabalham na mesma faixa de frequência visível ao olho humano. Na aquisição são usadas desde câmeras comuns até as mais profissionais (que são mais estáveis e tem melhores resoluções). Contudo, de acordo com a capacidade de cada sensor, outros propósitos podem ser atendidos como no caso dos sensores IV; ou dos multiespectrais.

4.5 Posicionamento GNSS

De acordo com Seeber (2003), o NAVSTAR GPS (Sistema de Navegação com Posicionamento Global de Tempo e Variação) é um sistema de rádio navegação baseado em satélite que fornece informações tridimensionais precisas de posição, navegação e tempo para usuários adequadamente equipados. O GPS não é o único sistema de navegação baseado em satélite, a União Soviética construiu em 1976 o Sistema de Navegação Global por Satélite (*Global Navigation Satellite System - GLONASS*). Posteriormente a União Europeia (UE) em parceria com a Agência Espacial Europeia (ESA) foi estruturado o programa Galileo que é um sistema de posicionamento global proposto para atuar no mercado GNSS (*Global Navigation Satellite Infrastructure*), e também temos os sistemas regionais baseados em satélites geostacionários como o sistema chinês Beidou.

O Posicionamento por Ponto Preciso (PPP-IBGE) é uma plataforma online e gratuita para realização do pós-processamento de dados GNSS, utiliza-se o software CSRS – PPP (GPS Precise Point Positioning) criado pelo NRCan (Geodetic Survey Division of Natural

Resources of Canada), sendo possível que os usuários de receptor GLONASS e GPS possam referenciar as coordenadas do SIRGAS2000 (Sistema de Referência Geocêntrico para as Américas) e ITRF (International Terrestrial Reference Frame) para seu levantamento geodésico por meio do método de PPP. Assim, os dados GNSS para serem processados deverão ser no formato RINEX ou HATANAKA, onde deve-se especificar qual modelo e altura de antena foi utilizada e um e-mail válido (sendo disponibilizado um link para o acesso para o resultado final do processamento), quanto aos receptores são de uma ou duas frequências (L1 e L2) e os tipos de posicionamento estático ou cinemático (IBGE, 2009).

De acordo com Giovanini (2021), o posicionamento relativo cinemático como o próprio nome diz, é um posicionamento do tipo relativo. Ou seja, um receptor fica parado em uma posição de coordenada conhecidas, enquanto o profissional faz o rastreamento dos dados dos demais pontos. A acurácia possibilitada pelo método cinemático costuma ficar acima dos 50 cm, podendo chegar a 2 metros ou mais, cinemático DGPS alcança estas precisões. O cinemático usando a fase das ondas portadoras alcança precisões de poucos centímetros.

Segundo o Giovanini (2021), por causa de sua acurácia, no georreferenciamento de imóveis rurais, este método de posicionamento pelo GNSS pode ser utilizado para o levantamento de trechos sinuosos, como é o caso de córregos, topo de morro, crista de encosta e grotas. Porém, em locais de mata fechada ou com morros altos, a acurácia dos dados levantados com a utilização do método cinemático costuma ficar alta. Por causa disso, este método não é indicado para levantamento de dados em locais com muita obstrução.

A aplicação mais rotineira do método cinemático acaba sendo para o levantamento de áreas úteis de lavouras e demais aplicações cuja acurácia exigida não é alta. Contudo, este é um método de posicionamento que possibilita uma ótima produtividade no levantamento de dados que não exijam grande acurácia, pois o profissional pode configurar o receptor GNSS para armazenar dados por tempo ou por distância. Este método de posicionamento possibilita uma altíssima velocidade de trabalho, podendo ser utilizado para mapeamentos diversos, como:

- Delimitação da área útil de propriedades rurais;
- Delimitação de talhões de culturas exóticas;
- Mapeamentos diversos para processos de licenciamento ambiental;
- Mapeamento de estradas, método estático e RTK.

Por meio de, o método Differential Global Positioning System (DGPS) que tem o intuito de corrigir os diferentes erros inerentes ao posicionamento pelo GNSS. De acordo com

Giovanini (2021), é muito parecido com o funcionamento do método RTK. Isso porque ambos os métodos utilizam um receptor de base instalado sobre um ponto de coordenadas ajustadas e outro receptor rover. A grande diferença se encontra no método utilizado para a determinação da distância, pois o método RTK utiliza a fase da onda portadora, enquanto que o método DGPS utiliza a pseudodistância. Com isso enquanto o método RTK consegue uma acurácia centimétrica, a acurácia gerada pelo método DGPS normalmente fica no entorno de 60 a 1 metro.

4.6 PEC-PCD

O Padrão de Exatidão Cartográfica (PEC), foi definido pelo Decreto nº 89.817 de 20 de junho de 1984, onde estabelece as normas a serem observadas por todas as entidades públicas e privadas produtoras e usuárias de serviços cartográficos, de natureza cartográfica e atividades correlatas, sob a denominação de Instruções Reguladoras das Normas Técnicas da Cartografia Nacional. As Instruções Reguladoras das Normas Técnicas da Cartografia Nacional se destinam a estabelecer procedimentos e padrões a serem obedecidos na elaboração e apresentação de normas da Cartografia Nacional, bem como padrões mínimos a serem adotados no desenvolvimento das atividades cartográficas, apresentadas na (tabela 1).

Padrão de Exatidão Cartográfico é um indicador estatístico de dispersão, relativo a 90% de probabilidade, que define a exatidão de trabalhos cartográficos. A probabilidade de 90% corresponde a 1,6449 vezes o Erro Padrão - PEC. O Erro-Padrão isolado num trabalho cartográfico, não ultrapassará 60,8% do Padrão de Exatidão Cartográfico.

Tabela 1 - Classificações das cartas pelas PEC.

Carta (Classes)	PEC Planimétrico	Erro Padrão Planimétrico	PEC Batimétrico	Erro Padrão Altimétrico
Classe A	0,5 mm x Escala	0,3 mm x Escala	1/2 Equidistância	1/3 Equidistância
Classe B	0,8 mm x Escala	0,5 mm x Escala	3/5 Equidistância	2/5 Equidistância
Classe C	1,0 mm x Escala	0,6 mm x Escala	3/4 Equidistância	1/2 Equidistância

Fonte: Adaptado de Decreto – Lei 89.817 de 1984.

4.7 Legislação brasileira

No cenário nacional, a regulamentação da operação e uso civil são determinadas por três órgãos, sendo eles: Agência Nacional de Aviação Civil (ANAC), Departamento de Controle de Espaço Aéreo (DECEA) e a Agência Nacional de Telecomunicações (ANATEL).

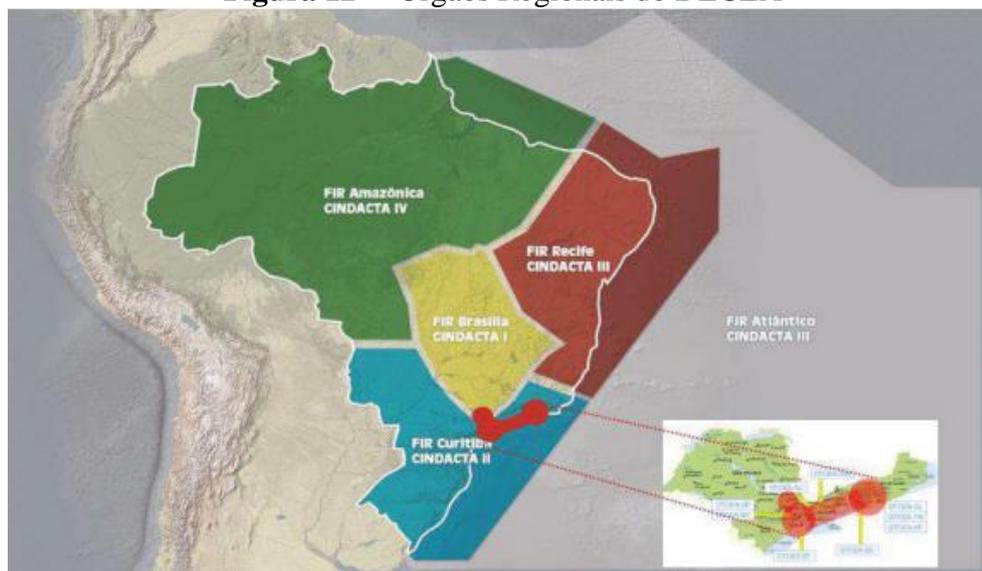
Um resumo de acordo com a regulamentação da ANAC segundo as Classes 1, 2, 3 e aeromodelo:

- ✓ Registro da aeronave apenas: Classe 1, Classe 2, Classe 3 e aeromodelo;
- ✓ Aprovação ou autorização do projeto: Classe 1, Classe 2, Classe 3 apenas BVLOS ou acima de 400 pés;
- ✓ Limite de idade para operação: Classe 1, Classe 2, Classe 3;
- ✓ Certificado médico: Classe 1 e Classe 2;
- ✓ Licença e habilitação: Classe 1, Classe 2, Classe 3 e aeromodelo se tiver acima de 400 pés;
- ✓ Seguro: Classe 1, Classe 2, Classe 3 (RPA acima de 250g);
- ✓ Avaliação de risco: Classe 1, Classe 2;
- ✓ Todas as classes devem estar distante de terceiros;

Segundo o DECEA (2020), tem por missão planejar, gerenciar e controlar as atividades relacionadas ao controle do espaço aéreo, à proteção ao voo, ao serviço de busca e salvamento e às telecomunicações do Comando da Aeronáutica. Como órgão central do Sistema de Controle do Espaço Aéreo Brasileiro, compete ainda ao DECEA, por meio da Portaria nº 913/GC3, de 21 de setembro de 2009, prover os meios necessários para o gerenciamento e controle do espaço aéreo e o serviço de navegação aérea, de modo seguro e eficiente, conforme estabelecido nas normas nacionais e nos acordos e tratados internacionais de que o Brasil seja parte. Além de possuir, na sua estrutura, Órgãos Regionais que desenvolvem atividades na Circulação Aérea Geral (CAG) e na Circulação Operacional Militar (COM), coordenando ações de gerenciamento e controle do espaço aéreo e de navegação aérea nas suas áreas de jurisdição.

Os Órgãos Regionais do DECEA são os CINDACTA I, II, III e IV e o SRPV-SP, com suas áreas de jurisdição definidas, como ilustrado na Figura .

Figura 12 – Órgãos Regionais do DECEA



Fonte: Ministério da Defesa Comando da Aeronáutica (2020).

5 MATERIAIS E MÉTODOS

A metodologia do laudo constitui na utilização de um par de receptores GNSS RTK de dupla frequência (L1/L2) Emlid Reach RS2; aplicativo DJI Pilot; aplicativo do PPP – IBGE; aeronave remotamente tripulada Phantom 4 Pro e o software Agisoft Metashape.

O campo teste de calibração foi no município de Antônio Prado, localizado no Estado do Rio Grande do Sul, com área de 348 km² e cerca de 12.833 mil habitantes.

Para iniciar o processo de calibração da câmera, a etapa inicial consistiu em criação dos pontos de controle do aerofotolevanteamento. Dessa forma, os alvos materializados em campo consistem em pontos de apoio de referência do terreno com precisão posicional e confiabilidade, assim, obtêm-se acurácia posicional dos elementos contidos na área de estudo, bem como as coordenadas de feições, pontos, linhas e poligonais. Em seguida, realizou-se o rastreamento dos pontos do alvo para determinação das coordenadas geodésicas. Nesse momento, utilizou-se os receptores de GNSS no modo Real Time Kinematic (RTK). Além dos receptores, utilizou-se o aplicativo Posicionamento por Ponto Preciso (PPP) para pós-processamento dos dados oriundos do rastreamento. Após rastreamento os pontos de apoio, efetuou-se o planejamento de voo mediante ao aplicativo da DJI Pilot. O planejamento consistiu nas tomadas das fotos com sobreposição de 70% longitudinalmente e 60% lateralmente. Obtidas as coordenadas geodésicas e as tomadas das fotos, esses elementos foram inseridos no software Metashape Agisoft. Para o trabalho, no geral o software é bem mais abrangente do que só calibrar a câmera, o software metashape faz uso do modelo de Brown (1971), cuja

metodologia é a utilização de parâmetros para calibração de câmaras em Fotogrametria. Para aplicação do modelo de Brown, inicialmente, aplicou-se o alinhamento das fotos que é a etapa de identificação de pontos comuns nas imagens após o processo de tomadas as fotos com sobreposição em que tem-se a posição da câmara em cada foto e a análise dos parâmetros de calibração. Dessa forma, ajustou-se os parâmetros: ponto principal em relação ao centro de imagem (C_x, C_y), distância focal (f) e os coeficientes do polinômio de distorção radial simétrica (K_1, K_2, K_3) e da distorção descentrada (P_1, P_2). Com esses dados, gerou-se a nuvem tie points, ou seja, pontos fotogramétricos, com a finalidade de materializar o sistema de coordenadas do terreno. Assim, ocorreu a ligação entre as ortofotos no processo mosaico e geração do mosaico de ortofotos. Então, foram inseridos os pontos de apoio coletados em campo com o receptor Emlid Reach RS2, para melhorar a precisão posicional da nuvem de pontos, dessa maneira, filtrando as fotos com marcadores nos alvos em campo. Para a geração do mosaico de ortofotos, inicialmente ocorre o processo de ortorretificação das imagens, em que as feições são projetadas ortogonalmente com escala constante, sem que ocorra o deslocamento provocados pelo relevo ou a inclinação da câmara, corrigindo as imagens da câmara. Após isso, é realizada o mosaico das ortofotos e geração de produto final. Para isso, faz se necessário os parâmetros de geração, bem como: a superfície, modo de mesclagem, ativação de correção de cor, tamanho do pixel e máxima dimensão do pixel.

Os principais materiais que foram utilizados no desenvolvimento do trabalho são:

- Drone;
- Câmera;
- Receptor GNSS;
- Notebook;
- Softwares como: Agisoft Metashape, Topcon tools;
- Pontos de controle;

Os comandos Tapfly e ActiveTrack atualizados no aplicativo DJI GO 4 fazem com que o Phantom 4 Pro modelo DJI GL300 (figura 13) sobrevoe qualquer lugar visível na tela ou rastreie objetos em movimento de forma simples, O controle remoto do Phantom 4 Pro inclui um monitor de alta luminosidade de 5,5 polegadas com DJI GO integrado para controle total. Com uma nova bateria de voo inteligente DJI de 5.870 mAh possui células atualizadas e um sistema de gerenciamento de energia avançado para proporcionar voos de até 30 minutos.

Fabricado na china pela empresa DJI (*Dà-Jiāng Innovations Science and Technology*), fundada em 2006 por Frank Wang.

As características da ARP ou RPA - Phantom 4 Pro:

- Dimensão 35 cm;
- Peso 1388g
- Altura máxima 6000m;
- Quantidade de Helices 4;
- Distância máxima 7000m;
- Bateria 5870mAh;
- Modelo de bateria LiPo 4S;
- Velocidade linear máxima 72 km/h;
- Velocidade angular máxima 250o/s;
- Ângulo máximo de inclinação 45°;
- Resistência máxima ao vento 10 km/h;
- Sistema de posicionamento GPS/GLONASS;

As características do sensor - Phantom 4 Pro:

- Sensor CMOS;
- Pixel efetivos 20 MP;
- Distância focal 1/2.8;

Figura 13 – Drone DJI Phrantom 4 Pro.



Fonte: O autor (2022).

O DJI Phantom 4 pro é uma câmera aérea com detecção de obstáculos em cinco direções, composta por sensores de visão e infravermelho, capazes de evitar obstáculos de

forma inteligente durante o voo. A compatibilidade com frequência dupla no controle remoto torna o downlink de vídeo HD mais estável e eficiente.

Um dos principais recursos são a câmera e estabilizador, além de gravar vídeos 4K de até 60 FPS (Frames por segundo), registra fotos de 20 megapixels com nitidez e clareza, graças ao novo sensor CMOS de 1 polegada. O obturador mecânico e o foco automático criam uma experiência ainda melhor ao registrar imagens aéreas.

Contendo um novo gravador de voo armazena dados de cada voo, com um sistema de sensores visuais melhora a precisão da planagem durante voos em ambientes internos ou ambientes onde o GPS estiver indisponível. Um design duplo de IMUs e bússolas proporciona a redundância.

O downlink do DJI LIGHTBRIDGE, apoio de 2,4 GHz e 5,8 GHz garante uma conexão mais confiável em ambientes com muitas interferências.

Figura 14 – Câmera DJI Phantom 4 pro.



Fonte: O autor (2022).

O receptor GNSS Emlid Reach RS2 obtém solução fixa em segundos. Precisões centimétricas podem ser alcançadas em distâncias de até 60 km no modo RTK e 100 km no modo PPK. Os dados brutos RINEX são compatíveis com os serviços de PPP, obtendo posição com precisão absoluta, possui um modem 3.5G HSPA com baixo consumo de energia, com alternativa 2G e cobertura global, as correções podem ser acessadas ou transmitidas por NTRIP de forma independente, sem depender da conexão com a internet de qualquer smarthphone.

Podendo registrar até 22 horas de dados brutos, e até 16 horas como um rover 3G, mesmo em clima frio não é necessário carregar baterias sobressalentes. O Reach RS2 pode ser carregado a partir de um cabo USB e um adaptador de parede ou através de um powerbank USB-C.

Figura 15 – Receptor GNSS Emlid Reach RS2.



Fonte: Site Loja emlid (2022).

O modelo de notebook a ser usado para todo desenvolvimento dos parâmetros de calibração das imagens digitais será um notebook Acer Intel® Core(TM) i3-7100U CPU (Central Process Unit) de 2.40 GHz (Giga-hertz) memória RAM (Random Access Memory) de 4,0 GB (Gigabyte) e sistema operacional de 64 bits.

Figura 16 – Notebook Acer i3.



Fonte: O autor (2022).

O Agisoft Metashape é um software pago e independente, com alto valor agregado no processamento de imagens digitais, é um software fotogramétrico que gera dados espaciais tridimensionais para serem usados em aplicativos de Sistema de Informação Geográfica (SIG), desenvolvimento de jogos, documentação de patrimônio cultural, efeitos visuais, e medições indiretas de objetos de várias escalas.

O software Topcon tools é um software avançado que fornece tecnologia de posicionamento, solução de pós-processamento, análise de rede e ajustes com interface de dados levantados em campo para topógrafos, engenheiros civis, empreiteiros de construção, proprietários de equipamentos e operadores.

Os pontos de controle são objetos, alvos identificáveis que irão aparecer nas imagens aéreas para auxiliar no levantamento aerofotogramétrico. São usados com intuito de fazer a

relação entre o sistema de coordenadas da imagem com o sistema de coordenadas do terreno, são pontos de apoio de referência utilizados no pós-processamento das imagens com precisão posicional e confiabilidade dos produtos finais gerados.

Figura 17 – Pontos de controle.



Fonte: Geosense (2021).

6 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Através do processamento das imagens obtidas pela ARP, atingiu-se os seguintes resultados para a área de estudo de Antônio Prado, Rio Grande do Sul (RS): O deslocamento Lineares e Angulares entre o receptor GNSS e o IMU, Parâmetros da Orientação Interior (POI), Calibração da Câmera Integrada na ARP, Resíduos gerados na imagem após a calibração da câmera, Localizações da câmera e estimativa de erros, Distribuições dos GCPS e estimativa de erros, Matriz de Correlação entre os Parâmetros de Orientação Interior, Resíduos das foto coordenadas no espaço imagem, Resíduos das coordenadas dos pontos de verificação no espaço objeto.

Figura 18 - Localização da área de estudo na cidade de Antônio Prado.



Fonte: O autor (2022).

Figura 19 - Deslocamento Lineares e Angulares entre o receptor GNSS e o IMU.

Parâmetros			Descrição dos parâmetros
$dX - \sigma dX$	1,6734911	0,1748463	Desloc. linear no eixo X em centímetros (cm), com respectivo desvio padrão
$dY - \sigma dY$	1,5078943	3,1715423	Desloc. linear no eixo Y em centímetros (cm), com respectivo desvio padrão
$dZ - \sigma dZ$	5,7230301	1,5515599	Desloc. linear no eixo Z em centímetros (cm), com respectivo desvio padrão
$d\omega - \sigma d\omega$	0,0000000	2,0000000	Desalinhamento ang. eixo X em arcos de grau (°), com respectivo desvio padrão
$d\phi - \sigma d\phi$	0,0000000	2,0000000	Desalinhamento ang. eixo Y em arcos de grau (°), com respectivo desvio padrão
$d\kappa - \sigma d\kappa$	0,0000000	2,0000000	Desalinhamento ang. eixo Z em arcos de grau (°), com respectivo desvio padrão

Fonte: O autor (2022).

Figura 20 - Parâmetros de Orientação Interior (POI).

Parâmetros			Descrição dos parâmetros
$f_{ou c} - \sigma f_{ou c}$	3673,03	0,28	Distância focal calibrada em (mm), com respectivo desvio padrão
$x_0 - \sigma x_0$	-2,3621	0,015	Coordenada "x" do ponto principal em (mm), com respectivo desvio padrão
$y_0 - \sigma y_0$	-14,7955	0,013	Coordenada "y" do ponto principal em (mm), com respectivo desvio padrão
$K1 - \sigma K1$	1,15868000E-02	3,00000000E-05	1º parâmetro de distorção radial simétrica (mm-2), com respectivo desvio padrão
$K2 - \sigma K2$	-5,74271000E-02	1,50000000E-04	2º parâmetro de distorção radial simétrica (mm-4), com respectivo desvio padrão
$K3 - \sigma K3$	1,02937000E-01	2,90000000E-04	3º parâmetro de distorção radial simétrica (mm-6), com respectivo desvio padrão
$P1 - \sigma P1$	7,76097000E-07	1,00000000E-06	1º parâmetro de distorção tangencial ou descentrada (mm-1), com respectivo desvio padrão
$P2 - \sigma P2$	-1,91316000E-03	7,90000000E-07	2º parâmetro de distorção tangencial ou descentrada (mm-1), com respectivo desvio padrão

Fonte: O autor (2022).

A Calibração da Câmera Phantom 4 Pro integrada na ARP, aplicou-se a metodologia de BROWN (1971) com as propriedades mostradas e todas informações empregadas para calibração da câmera Tabela (2).

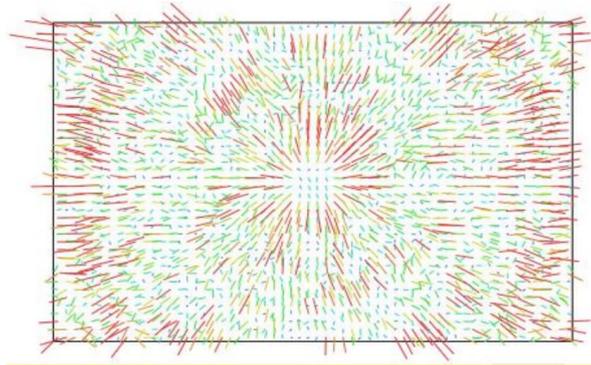
Tabela 2- Calibração da Phantom 4 Pro

Calibração da Phantom 4 Pro	
Método de Calibração	Método BROWN (1971)
Campo de Teste	Antônio Prado - RS
Tomada das Imagens	Câmera Phantom 4 Pro
Número de Fotos Utilizadas	240
Altura de Voo (m)	100 m
Resolução do Terreno em (GSD em cm)	3,17 cm
Distância Focal Calibrada (mm)	8,8 mm
Sensibilidade (ISO)	ISO - 100
Tempo de Exposição	0,01 s
Número de Alvos Utilizados	10
Número de Leituras	10
Programa Licenciado Utilizado para Leituras Fotogramétricas	Agisoft Metashape

Fonte: O autor (2022).

Conforme a distribuição das linhas e sobreposição das fotografias no local de estudo, a partir dos pontos representados a cada foto tirada durante o voo com a ARP e dependendo da coloração são apresentadas a quantidade de sobreposição longitudinal e lateral das fotos em uma determinada posição, sendo o total de 240 fotos com criação de 475,521 pontos para a criação da nuvem com finalidade de melhor visualização com a resolução de 3,17 cm/pix. Além de tudo obtiveram-se também os resíduos encontrados na imagem após a calibração da câmara (Figura 21), localização da câmara com a estimativa de erros (Figura 22), distribuição dos GCP (Ground Control Points) e os erros estimados (Figura 23).

Figura 21 - Resíduos gerados na imagem após a calibração da câmera.



Fonte: O autor (2022).

Figura 22 - Localizações da câmera e estimativa de erros.



Fonte: O autor (2020).

Figura 23 - Distribuições dos GCPs e estimativa de erros.



Fonte: O autor (2022).

Através do Software Agisoft Metashape foram calculados os valores dos coeficientes de calibração (Tabela 3) de acordo com Coelho e Brito (2009) entende-se a reconstrução do feixe perspectivo, ou seja, o referenciamento da imagem em relação á câmara. A partir das coordenadas fotográficas de uma imagem (x e y), são eles: distância focal (f), posição do ponto principal em relação ao centro da imagem (Cx, Cy), coeficientes da distorção radial simétrica (K1, K2 e K3) e coeficientes de distorção descentrada (P1, P2).

Tabela 3 - Matriz de Correlação entre os Parâmetros de Orientação Interior.

	Valor	Error	F	Cx	Cy	K1	K2	K3	P1	P2
F	3673,03	0,28	1	-0,11	0,03	-0,02	-0,1	0,15	0,09	-0,14
Cx	-2,3621	0,015		1	-0,02	-0,01	0,02	-0,02	0,56	-0,01
Cy	-14,7955	0,013			1	0,01	0,02	-0,06	0	0,03
K1	1,15868000E-02	3,0000000E-05				1	0,96	0,91	0	0
K2	-5,74271000E-01	1,50000000E-04					1	-0,99	-0,01	0,02
K3	1,02937000E-01	2,90000000E-06						1	-0,02	0,03
P1	7,76097000E-07	1,00000000E-07							1	-0,05
P2	-1,91316000E-03	7,90000000E-07								1

Fonte: O autor (2022).

Figura 24 - Resíduos das foto coordenadas no espaço imagem.

Escolher na lista ↓	X (mm)	Y (mm)
REQM	0,00081	0,0004623

Fonte: O autor (2022).

Figura 25 - Resíduos das coordenadas dos pontos de verificação no espaço objeto

	Planimetria (cm)
Tamanho 1 pixel	3,17
Escolher na lista ↓	1,02
REQM	1,02
Referência	3,170

Fonte: O autor (2022).

Devido ao avanço da tecnologia, a automação de softwares vem crescendo na medida que, o mercado de trabalho adquire novas metodologias e softwares mais completos e autônomos. Com isso, os softwares não tem muita ação manual humana, fazendo com que possa passar despercebidos alguns erros em que o operador conseguiria conter se visualizasse, sendo que a maioria dos softwares fazem de forma direta.

A criação de um buffer influencia bastante no resultado final da rede de ajustamento, pois a imagem é distorcida nas bordas. A estimativa de erros das localizações da câmera ficou entre 2 m e -10 m no intervalo de cada fotografia e as distribuições dos GCPS a estimativa de erros ficaram entre 2,4 cm até -3 cm. A partir dos resíduos gerados na imagem após a calibração da câmera, tende a distorcer mais nos cantos das imagens do que no centro, pois a distribuição pontos de controle geralmente favorecem ao centro da imagem. A raiz quadrada do erro quadrático médio (REQM) dos resíduos das foto coordenadas dos pontos fotogramétricos no espaço imagem (em mm), após a calibração da câmera, foram aceitáveis, pois o valor do tamanho de 1 pixel (em mm) que é de $2,41 \times 10^{-6}$ mm, logo os resultados obtidos dos resíduos em x e y sucessivamente foram de $8,10 \times 10^{-4}$ mm e $4,60 \times 10^{-4}$ mm. Dentre os pontos fotogramétricos, devem existir os pontos de verificação ou check (pontos que possuem 1 coordenadas tridimensionais determinadas por levantamento GNSS), visando a avaliação da exatidão posicional da calibração no espaço objeto. Assim, os resíduos das coordenadas dos pontos de verificação no espaço objeto são obtidos pela diferença entre as coordenadas calculadas pela calibração e determinadas pelo levantamento GNSS. Para o espaço objeto, a REQM dos resíduos das coordenadas dos pontos de verificação planimétricas não pode ser superior ao tamanho de 1 pixel (em cm) que é 3,17 cm, sendo assim o REQM com valor de 1,02 cm atendendo o valor estimado. A partir da tabela da PEC-PCD, pode-se afirmar que a classe obtida nos resultados finais devido a qualidade posicional dos dados cartográficos gerados, a classificação quanto a planimetria e altimetria classificou como Classe A. Deste modo, os resultados foram satisfatórios para a calibração da câmera da ARP Phantom 4 Pro usando o método de BROWN (1971) e assim o laudo de calibração foi aceitável dentro dos valores limites na planimetria.

7 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A aplicação de Aeronaves Remotamente Pilotadas tem sido mais constante, à proporção em que avançaram os estudos de fotogrametria. Primeiramente uma das principais mudanças, foram os custos, tanto de operação, quanto de manutenção do equipamento. Uma vez que os drones apresentam valor de mercado muito inferior quando comparadas às aeronaves tripuladas, e, uma manutenção simplificada devido à qualidade do material (polímero e placas eletrônicas). Além disso, a utilização de baterias utilizado pelas RPA diminuem o consumo de combustíveis fósseis das aeronaves tripuladas.

A fotogrametria consiste em todo o processo desde a elaboração do plano de voo, por meio de cuidados aéreos e sobreposições de imagem, até a geração da base cartográfica, por meio de Modelo Digital de Superfície (MDS), Modelo Digital de Terreno (MDT). A utilização da RPA consiste no plano de voo e na tomada das fotos. Por outro lado, a qualidade do sensor utilizado implica na qualidade do produto gerado pelo processamento das fotos. Como fator intrínseco ao sistema, dados de altura de voo e distância focal é possível estimar a qualidade do produto a ser gerado. Como fatores extrínsecos, a temperatura do ambiente, iluminação solar e umidade influenciam no aerolevantamento, e pode, às vezes inviabilizar o aerolevantamento. Os sistemas GNSS integrados ao RPA facilitam o planejamento de voo e tomada das fotografias em modo autônomo.

Analisando os resíduos resultantes da calibração, é possível aplicar a PEC-PCD para avaliar o nível de qualidade do trabalho. Apesar do alto custo benefício para os mapeamentos dependendo da qualidade do produto gerado, o sistema de calibração de câmeras de pequeno formato é de grande importância para o alcance dos melhores resultados para o desenvolvimento de produtos cartográficos. Contudo, as aplicações no levantamento topográfico com drones é a obtenção de trabalhos mais eficientes, minuciosos e precisos, o que viabiliza relatórios mais detalhados, conseguindo um nível de precisão mais detalhado do terreno, podendo ser aplicado na cartografia em grandes e médias escalas e nos diversos setores como: ambiental, industrial, agropecuário e urbanista.

A calibração em serviço da câmera acoplada na ARP Phantom 4 Pro feita na localização de Antônio Prado (RS), com a aplicação das equações de colinearidade pelo método de BROWN (1971), permitiu aferir a geometria interna da câmera (POI) dos seguintes parâmetros para a obter a calibração da câmera: Distância focal, coordenadas do centro de projeção da imagem - ponto principal, coeficientes de distorção da lente, onde as

variáveis k_i são os coeficientes de distorção radial da lente e os coeficientes de distorção descentrada.

É de extrema importância ter um buffer em relação a rede de ajustamento, pois o produto gerado distorce nas bordas da imagem, coloca-se um buffer exatamente para deixar a borda mais longe do polígono. A quantidade de pontos de controle e verificação também influenciam na qualidade dos dados, pois dependendo da área e se possível colocar mais pontos de controle para auxiliar no levantamento e no ajustamento dos dados, e analisar os resíduos dos pontos de verificação altimétrica.

A realização deste estudo e a metodologia aplicada foi de grande importância para a tomada das imagens, uma vez que a calibração afeta diretamente a qualidade do produto final. Deste modo, é recomendado observar o planejamento, execução e processamento dos dados adquiridos pela ARP. O intuito deste trabalho é que possa ser utilizado no auxílio de futuros estudos sobre calibração de câmeras em ARP.

8 REFERÊNCIAS

AGISOFT. **Metashape**. [S. l.], 2020. Disponível em: <https://www.agisoft.com/>. Acesso em: 8 jul. 2022.

ANAC. **Regulamentos Brasileiros da Aviação Civil. Brasília - DF, 2017**. Disponível em: https://www.anac.gov.br/assuntos/legislacao/legislacao-1/rbha-e-rbac/rbac/rbac-e94/@@display-file/arquivo_norma/RBACE94EMD00.pdf. Acesso em: 15 jun. 2022.

ALMEIDA, C. S. M ., et al. **Estudo sobre o uso de veículo aéreo não tripulado (VANT) para mapeamento aéreo com fins de elaboração de projetos viários**. VI Simpósio Brasileiro de Ciências Geodésicas e Tecnologias da Geoinformação, Recife – PE, 2016.

BRITO, J.L.N.S; COELHO FILHO, L.C.T. **Fotogrametria digital**. Editora da UERJ – Rio de Janeiro – 2007.

BRASIL. **Decreto nº 89.817, de 20 de junho de 1984. Estabelece as Instruções Reguladoras das Normas Técnicas da Cartografia Nacional**. Diário Oficial da União: seção 1, Brasília, DF, 20 jun. 1984. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/decreto/1980-1989/D89817.htm#:~:text=%C2%A7%201%C2%BA%20%2D%20Padr%C3%A3o%20de%20Exatid%C3%A3o,PEC%20%3D%201%2C6449%20EP. Acesso em: 20 jul. 2022

DE SOUZA, J. LEITE FILHO, C, W. **Sistema de Navegação Inercial SISNAV - Mécânica Eletrônica Embarcada**. São Paulo, Brazil. 2012.

DIAS, SYDNEY DE OLIVEIRA. **Calibração da câmera digital não métrica – Kodak DCS – 460**. Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto, área de concentração em Geoprocessamento), Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 127p, 2004.

FILHO, L.E. **Calibração de um sistema fotogramétrico multicâmeras para o uso de aplicações de mapeamento com georreferenciamento direto**. 2017. 99 f. Tese (Programa de Pós-graduação em Ciências geodésicas) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2017.

GALO, M. **Calibração e aplicação de Câmaras Digitais**. Dissertação (Mestrado em Ciências Geodésicas), Universidade Federal do Paraná- Dissertação de Mestrado, Curitiba, 151p, 1993.

GIOVANINI, A. **Posicionamento Cinemático**. Adenilsongiovanini.com.br. Disponível em:<<https://adenilsongiovanini.com.br/blog/posicionamento-cinematico/>> Acesso em: 15 de nov 2022.

GIOVANINI, A. **Quando Utilizar o Método DGPS** . Adenilsongiovanini.com.br. Disponível em:<<https://adenilsongiovanini.com.br/blog/quando-utilizar-o-metodo-dgps/>> Acesso em: 15 de nov 2022.

GONÇALVES, G.A. **Deteção automática de alterações na cartografia cadastral com base em imagens de câmeras digitais**. 2006 Tese (Programa de Pós-graduação em Ciências geodésicas) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2006.

GEOSENSE. (2021). **geosense.net.br**. Acesso em 11 de 07 de 2022, disponível: <https://geosense.net.br/2021/05/03/pontos-de-controle-gcp-um-guia-completo-para-usuarios-de-drones/>

INCRA. 2013. **Manual técnico de posicionamento: Georreferenciamento de imóveis rurais**. Brasília.

IBGE. 2013. **Manual do Usuário Posicionamento Por Ponto Preciso**. Diretoria de Geociências. Disponível em: http://www.ibge.gov.br/home/geociencias/geodesia/ppp/manual_ppp.pdf.

KOYAMA, Carlos Shigueyuki; HASEGAWA, Júlio Kiyoshi. **Radar fotogramétrico: cálculo da velocidade de um objeto a partir de uma sequência de imagens digitais**. Revista Brasileira de Cartografia, v. 54, n. 1, p. 1-9, 2002.

MITISHITA, EDSON A., OLIVAS, A. A. MARY. **Calibração de Câmaras Aerofotogramétricas a Partir de Aérofotos Digitalizadas**. Boletim de Ciências Geodésicas, Curitiba, v. 7, no 1, p.64-76, 2001.

MOUTINHO, O. **Evaluation of Photogrammetric Solutions for RPAS: Commercial vs Open Source**. 2015. 120f. Dissertação (Mestrado) – Engenharia Geográfica, Universidade Do Porto, Porto, 2015.

MUNARETTO, L. **VANT e drones: a aeronáutica ao alcance de todos**. São José dos Campos: Edição independente, 2015.

SEEBER, G. **Satellite Geodesy**. 2.ed. Berlin: Walter de Gruyter, 2003.

TEIXEIRA JUNIOR, B. J. **Sistema de Georeferenciamento Direto Para Câmera de Pequeno Formato Com Sincronismo GPS**. 2015 Tese (Programa de Pós-graduação em Ciências Geodésicas e Tecnologias da Geoinformação) Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2010.

TOMMASELLI, A. M. G.; SILVA, J. F.C da; HASEGAWA, J.K.; GALO, M.; DAL POZ, A. P. **Fotogrametria: aplicações a curta distância**. In: MENEGUETTE Jr, M.; ALVES, N. (Organizadores), FCT 40 anos, Perfil Científico – Educacional, Presidente Prudente SP, p. 147-159, 1999.

TOPCON. **Hiper V**: Especificações. [S.I].2022. Disponível em: www.topconpositioning.com/site/default/files/product_files/hiper_v_broch_7010_2121_rev_d_ptbr_sm.pdf. Acesso em: 20 jul. 2022.

WALLACE, L. et al. Development of a UAV-LiDAR System with Application to Forest Inventory. **Remote Sensing**, [s.l.], v. 4, n. 12, p.1519-1543, 25 maio 2012. MDPI AG. DOI: 10.3390/rs4061519.

ANEXOS

ANEXO A - Laudo Técnico Para Atividades de Aerolevanteamento Com Uso de RPA

LAUDO TÉCNICO PARA ATIVIDADES DE AEROLEVANTAMENTO COM USO DE RPAS

(PREENCHIMENTO OBRIGATÓRIO CAMPOS AMARELOS - assinar, imprimir em PDF e encaminhar por email)

A veracidade e correção das informações prestadas é de total responsabilidade do responsável assinante

Valores calculados nas tabelas do item 2, alíneas "q" e "r" considerados dentro dos parâmetros limites:

ACEITÁVEL

NOVA CALIBRAÇÃO DEVERÁ SER EFETUADA CASO HAJA VALORES FORA DOS PARÂMETROS LIMITES ACIMA

(O conteúdo do Laudo descreve as principais características dos sistemas sensores de médio e pequeno formato que devem ser apresentadas pelas empresas interessadas em se inscrever como Entidades Executantes de aerolevanteamento ou, se já inscritas, utilizar esse tipo de sensores, atentando para o disposto no Padrão de Exatidão Cartográfica dos Produtos Cartográficos Digitais – PEC-PCD e na Especificação Técnica para Aquisição de Dados Geospaciais Vetoriais – ET-ADGV)

1. CARACTERÍSTICAS DOS SISTEMAS SENSORES

(A empresa deve apresentar as características dos principais sistemas sensores integrantes dos RPAS que serão utilizados para os seus projetos de aerolevanteamento. Estes sistemas sensores compreendem a câmera digital integrada a um Sistema de Navegação Global por Satélites – GNSS e Navegação Inercial – INS)

1.1 CARACTERÍSTICAS DA CÂMERA

(A empresa deve apresentar as características da câmera utilizada pelo RPAS, conforme abaixo)

- a) Modelo:
- b) Fabricante:
- c) Número de Série:
- d) Tipo de Lentes:
- e) Número de Série:

Phantom 4 Pro

DJI

0AXDE1P0A30814

FC6310

0AXDE1P0A30814

- f) Tipo de Sensor:
 g) Dimensão do Sensor em mm:
 h) Número Efetivo de Pixels:
 i) Dimensão do Pixel em mm (no espaço imagem):
 j) Distância Focal Nominal em mm:
 k) Orientação da Imagem e Referenciais Envolvidos, conforme a figura 1 abaixo:

CMOS	
35	mm
20 M	
0,0241	mm
8,8	mm

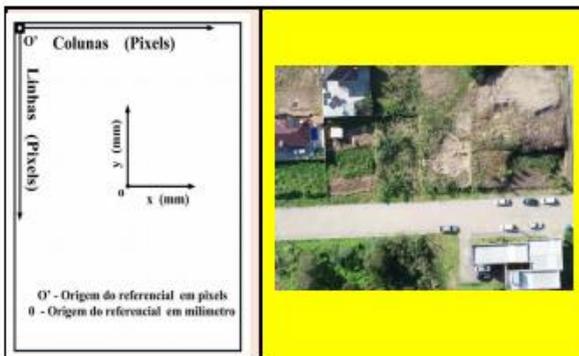


Figura 1: Modelo para Orientação da Imagem e Referenciais Envolvidos

Dimensões da Imagem			
X =	127,25	mm	5280 pixels
Y =	95,34	mm	3956 pixels

Coordenadas dos cantos				
Ponto	Coluna	Linha	X (mm)	Y (mm)
1	0	0	-63,624	47,6698
2	0	5280	-63,624	-47,6698
3	3956	5280	63,624	-47,6698
4	3956	0	63,624	47,6698

1.2 CARACTERÍSTICAS DOS SISTEMAS – GNSS/INS

(A empresa deve apresentar as características do receptor GNSS integrado a uma Unidade de Medição Inercial – IMU e que será utilizado no SARP para aplicações de aerolevantamento com Georreferenciamento Direto – DG ou Georreferenciamento Integrado de Sensores – ISO)

(Para a aplicação de aerolevantamento com uso de DG, a empresa deve apresentar os valores dos Deslocamentos Lineares – Lever Arms e Desalinhamentos Angulares – Boresight Misalignment Angles entre a antena do receptor GNSS e o corpo da IMU, conforme Tabela 1)

(Para voos com altitudes inferiores a 150m, é desejável a utilização do método de posicionamento Real Time Kinematic – RTK do receptor GNSS do RPAS, visando a melhoria da exatidão posicional das imagens do DG)

1.2.1 DESCRIÇÃO RESUMIDA DOS SISTEMAS GNSS/INS

Os sistemas Global Positioning System (GPS) e GLONASS integrados ao RPA facilitam o planejamento de voo e tomada das fotografias em modo autônomo. O sistema GNSS/INS consiste na determinação da posição, velocidade e orientação absoluta do ARP. Assim, o posicionamento horizontal e vertical, velocidade e orientação são determinadas com alta precisão tanto para aplicações sem movimento como para aplicações dinâmicas.

Parâmetros			Descrição dos parâmetros
$dX - \sigma dX$	1,6734911	0,1748463	Desloc. linear no eixo X em centímetros (cm), com respectivo desvio padrão
$dY - \sigma dY$	1,5078943	3,1715423	Desloc. linear no eixo Y em centímetros (cm), com respectivo desvio padrão
$dZ - \sigma dZ$	5,7230301	1,5515599	Desloc. linear no eixo Z em centímetros (cm), com respectivo desvio padrão
$d\omega - \sigma d\omega$	0,0000000	2,0000000	Desalinhamento ang. eixo X em arcos de grau ($^{\circ}$), com respectivo desvio padrão
$d\phi - \sigma d\phi$	0,0000000	2,0000000	Desalinhamento ang. eixo Y em arcos de grau ($^{\circ}$), com respectivo desvio padrão
$d\kappa - \sigma d\kappa$	0,0000000	2,0000000	Desalinhamento ang. eixo Z em arcos de grau ($^{\circ}$), com respectivo desvio padrão

Tabela 1: Deslocamentos Lineares e Desalinhamentos Angulares entre o receptor GNSS e o corpo IMU

2. CARACTERÍSTICAS DA CALIBRAÇÃO DA CÂMERA

(A empresa deve apresentar as características da calibração da câmera utilizada pelo RPAS para imageamento, após voo em campo de teste à sua

escolha. No relatório, deve constar pelo menos a calibração geométrica da câmera, sendo desejável também a calibração radiométrica, que poderá constar num anexo em separado)

Parâmetros da calibração geométrica realizada:

a) Método da Calibração:

Método de Brown

b) Campo de Teste:

Antônio Prado

Vértice	Latitude	Longitude
A1	-28,85339	-51,29396
A2	-28,85172	-51,29483
A3	-28,85312	-51,29598
A4	-28,85446	-51,29588
A5	-28,85586	-51,29575
A6	-28,8554	-51,29408
A7	-28,85499	-51,29476
A8	-28,85385	-51,29487
A9	-28,85211	-51,29357
A10	-28,85368	-51,29339



c) Tomada das Imagens:

Camera Phantom 4 PRO

d) Número de Fotos utilizadas:

240

e) Altura de Voo (m):

100 m

f) Resolução no Terreno (GSD em cm):

3,17 cm

g) Abertura Focal, ou Distância Focal Calibrada (mm):

8,8 mm

h) Sensibilidade (ISO):

ISO - 100

i) Tempo de Exposição:

0,01 s

j) Número de Alvos utilizados:

10

k) Número de Leituras:

10

l) Programa Licenciado utilizado para as Medidas Fotogramétricas:

Agisoft Metashape

m) Parâmetros de Orientação Interior (POI) determinados, contendo pelo menos as informações, conforme Tabela 2:

Parâmetros			Descrição dos parâmetros
f ou $c - \sigma f$ ou c	3673,03	0,28	Distância focal calibrada em (mm), com respectivo desvio padrão
$x_0 - \sigma x_0$	-2,3621	0,015	Coordenada "x" do ponto principal em (mm), com respectivo desvio padrão
$y_0 - \sigma y_0$	-14,7955	0,013	Coordenada "y" do ponto principal em (mm), com respectivo desvio padrão
$K1 - \sigma K1$	1,15868000E-02	3,00000000E-05	1º parâmetro de distorção radial simétrica (mm-2), com respectivo desvio padrão
$K2 - \sigma K2$	-5,74271000E-02	1,50000000E-04	2º parâmetro de distorção radial simétrica (mm-4), com respectivo desvio padrão
$K3 - \sigma K3$	1,02937000E-01	2,90000000E-04	3º parâmetro de distorção radial simétrica (mm-6), com respectivo desvio padrão
$P1 - \sigma P1$	7,76097000E-07	1,00000000E-06	1º parâmetro de distorção tangencial ou descentrada (mm-1), com respectivo desvio padrão
$P2 - \sigma P2$	-1,91316000E-03	7,90000000E-07	2º parâmetro de distorção tangencial ou descentrada (mm-1), com respectivo desvio padrão

Tabela 2: Descrição dos POI

(Caso a modelagem matemática utilizada na calibração da câmera seja diferente do modelo Conrad-Brown, a empresa deve apresentar os parâmetros determinados e seus desvios padrões, analogamente à Tabela 2)

n) Aerobase (m) obtida:

158,4 m

o) Matriz de Correlação entre os POI, apresentada com valores numéricos das correlações entre os POI, conforme a Figura 2:

<i>f</i>	1								
<i>x_o</i>	-0,11	1							
<i>y_o</i>	0,03	-0,02	1						
<i>K1</i>	-0,02	-0,01	0,01	1					
<i>K2</i>	-0,1	0,02	0,02	0,96	1				
<i>K3</i>	0,15	-0,02	-0,06	0,91	-0,99	1			
<i>P1</i>	0,09	0,56	0	0	-0,01	-0,02	1		
<i>P2</i>	-0,14	-0,01	0,03	0	0,02	0,03	-0,05	1	

Figura 2: Modelo de Matriz Correlação entre POI

p) Gráfico dos Resíduos dos Pontos Fotogramétricos, contendo as tendências dos resíduos das fotocoordenadas dos pontos fotogramétricos, após a calibração da câmera, ao longo de toda a imagem em (mm), conforme Figura 3:

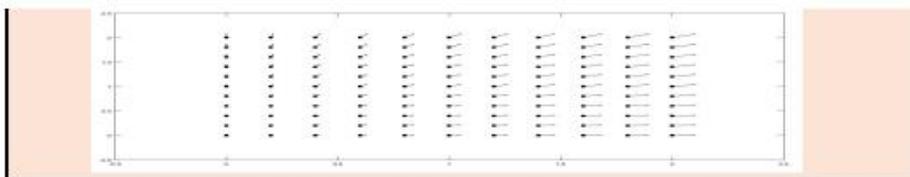
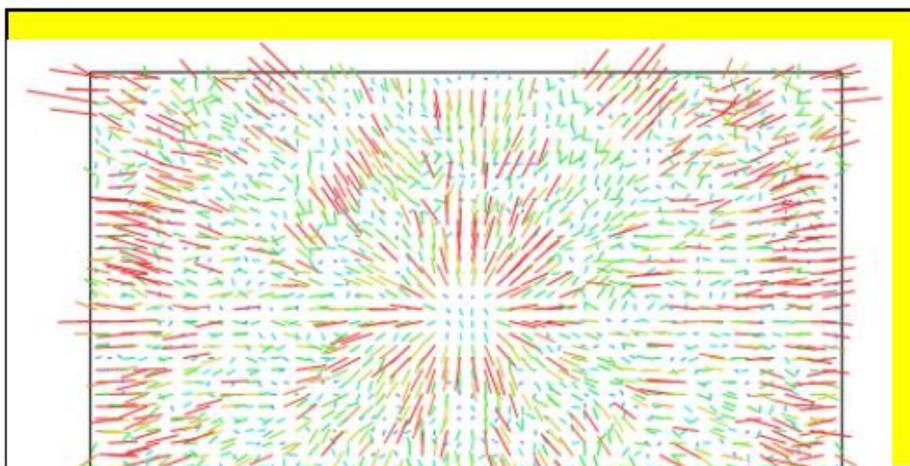
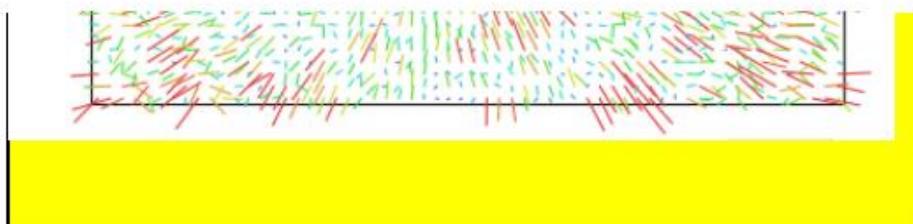


Figura 3: Exemplo hipotético de Resíduos das Fotocoordenadas dos Pontos Fotogramétricos utilizados na calibração da câmera





q) Apresentar a Raiz Quadrada do Erro Quadrático Médio (REQM) ou Erro Quadrático Médio (EQM) dos **Resíduos das Fotocoordenadas dos Pontos Fotogramétricos no espaço imagem** (em mm, obtidos da alínea "p"), após a calibração da câmera:

Escolher na lista ↓	X (mm)	Y (mm)	Tamanho de 1 (um) pixel (em mm), constante na alínea "f", item 1.1
REQM	0,00081	0,00046	0,0241

Obs.: Para o espaço imagem, a REQM ou EQM dos Resíduos das Fotocoordenadas dos Pontos Fotogramétricos não pode ser superior ao tamanho de 1 (um) pixel (em mm), constante na alínea "f", item 1.1 (valor retirado do manual da câmera, fabricante, etc.)

r) Dentre os Pontos Fotogramétricos (constantes da alínea "p"), devem existir os Pontos de Verificação ou Check (Pontos que possuem Coordenadas Tridimensionais determinadas por levantamento GNSS – Global Navigation Satellite System), visando a avaliação da exatidão posicional da calibração no espaço objeto. Assim, os Resíduos das coordenadas dos Pontos de Verificação no espaço objeto são obtidos pela diferença entre as Coordenadas calculadas pela calibração e determinadas pelo levantamento GNSS. Do exposto, a empresa deve apresentar a REQM ou EQM dos **Resíduos das coordenadas dos Pontos de Verificação no espaço objeto** (em cm), após a calibração da câmera:

	Planimetria (cm)	
Tamanho 1 pixel	3,17	tamanho de 1 (um) pixel em (cm), constante na alínea "f" acima
Escolher na lista ↓	1,02	REQM ou EQM (cm) dos Resíduos das coordenadas dos Pontos de Verificação planimétricas
Referência	3,170	Em (cm)

Obs. i: Para o espaço objeto, a REQM ou EQM dos Resíduos das coordenadas dos Pontos de Verificação **planimétricas** não pode ser superior ao tamanho de 1 (um) pixel (em cm), constante na alínea "f" acima (valor GSD calculado, no processo de calibração, de acordo com a escala do voo)

$H =$	100	Altura de Voo (m), obtida da alínea "e" acima
$B =$	158,4	Aerobase (m), obtida da alínea "n" acima
$f =$	8,8	Abertura Focal, ou Distância Focal Calibrada (mm), obtida da alínea "g" acima
$\sigma =$	0,0241	tamanho do pixel no espaço imagem (em mm), obtido da alínea "f", subitem 1.1, item 1
$dz =$	24,45086	exatidão altimétrica esperada (cm), $dz = [(v2 * H^2) / (B * ff)] * \sigma * 100$
Escolher na lista ↓	1,44	REQM ou EQM (cm) dos Resíduos das coordenadas dos Pontos de Verificação altimétricas
Referência	24,45086	Em (cm)

Obs. ii: Para o espaço objeto, a REQM ou EQM dos Resíduos das coordenadas dos Pontos de Verificação **altimétricas** não pode ser superior ao valor de "dz" (exatidão altimétrica esperada em metros)

3. PARÂMETROS DE ORIENTAÇÃO EXTERIOR (POE)

(A empresa deve fornecer a qualidade da posição X, Y, Z e da orientação ω , ϕ , κ dos POE das imagens após a calibração da câmera. Deve ser utilizado o REQM ou EQM e o valor médio das discrepâncias entre os valores originais e calibrados dos POE, conforme apresentado na Tabela 3)

Métricas das discrepâncias	X (m)	Y (m)	Z (m)	ω (")	φ (")	κ (")
Escolher na lista ↓	0,00213	0,00264	0,00898	0,00000	0,00000	0,00000
REQM						
Média	0,001	0,001	0,001	0,000	0,000	0,000

Tabela 3: Consolidado da qualidade da posição e orientação das imagens

4. COMENTÁRIOS GERAIS QUE SE FAÇAM NECESSÁRIOS PELO RESPONSÁVEL NA CONFEÇÃO DO LAUDO:

A fotogrametria consiste em todo o processo desde a elaboração do plano de voo, por meio de cuidados aéreos e sobreposições de imagem, até a geração da base cartográfica, por meio de Modelo Digital de Superfície (MDS), Modelo Digital de Terreno (MDT). A utilização da RPA consiste no plano de voo e na tomada das fotos. Por outro a qualidade do sensor utilizado implica na qualidade do produto gerado pelo processado das fotos. Como fator intrínseco ao sistema, dados de altura de voo e distância focal é possível estimar a qualidade do produto a ser gerado. Como fatores extrínsecos, a temperatura do ambiente, iluminação solar e umidade influenciam no aerolevanteamento, e pode, às vezes inviabilizar o aerolevanteamento. A calibração da câmara de pequeno formato é importante para o monitoramento geométrico do equipamento e contribuir na tomada de decisão: necessidade de calibração, correção, medição, validação e confiabilidade final do produto gerado. Atenta-se que a câmara seja calibrada periodicamente.

(O presente modelo de laudo técnico se concentrou na descrição dos principais sistemas sensores que constituem o RPAS. Porém, é desejável que a empresa forneça outras informações técnicas em anexo que julgar necessárias para evidenciar sua capacidade técnica. É recomendável que a empresa apresente sua estratégia para a minimização dos erros sistemáticos oriundos dos sistemas sensores. Além disso, a empresa deve realizar uma avaliação posicional de todos os produtos gerados a partir do imageamento com uso de RPAS)

5. DOCUMENTAÇÃO DE REFERÊNCIA:

PADRONIZADA PARA ELABORAÇÃO DO MODELO:

- [1] Estratégia Nacional de Defesa (END) – Decreto no 6703, de 18DEZ08.
- [2] Portaria Normativa nº 101/GM-MD, de 26DEZ18.
- [3] Manual de Geoinformação (EB20-MC-10.209), 1ª Edição, 2014.
- [4] Manual of Photogrammetry, 5th Edition, 2004.

UTILIZADA PELA EMPRESA:

- [1] BROWN, D.C., 1971. Close-range camera calibration. Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, Vol. 37(8), pp.855-866.
- [2] LIMA, L. A., 2021. CALIBRAÇÃO EM SERVIÇO DA CÂMARA EMBARCADA NO MAVIC 2 PRO. Trabalho de conclusão de curso. Universidade de Uberlândia. Instituto de Geografia.
- [3] MIKHAIL, E. M.; BETHEL J. S. e J. C. McGlone. Introduction to Modern Photogrammetry. John Wiley & Sons, Inc.- New York, 2001
- [4] GHILANI, C.D; WOLF, P.R. Geomática. Tradução de Daniel Vieira. Ed 13. Editora Person Education do Brasil – São Paulo, 2013.

Nova Roma do Sul, 19 de janeiro de 2023

Local / Data

Identificação do responsável pelo laudo:

Assinatura

Diego Zulian
Técnico em Agrimensura
CREA RS 165712
ART: 12377766