

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA  
“JÚLIO DE MESQUITA FILHO”  
Faculdade de Ciências e Tecnologia  
Campus de Presidente Prudente  
Programa de Pós-Graduação em Ciências Cartográficas

**GUILHERME GOMES PESSOA**

**ANÁLISE DA ESTABILIDADE E INFLUÊNCIA DOS PARÂMETROS DE  
CALIBRAÇÃO DE UMA CÂMARA DIGITAL NÃO MÉTRICA NA  
FOTOTRIANGULAÇÃO**



**PRESIDENTE PRUDENTE**

**2017**

**GUILHERME GOMES PESSOA**

**ANÁLISE DA ESTABILIDADE E INFLUÊNCIA DOS PARÂMETROS DE  
CALIBRAÇÃO DE UMA CÂMARA DIGITAL NÃO MÉTRICA NA  
FOTOTRIANGULAÇÃO**

Dissertação de mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Cartográficas da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Estadual Paulista.

**Orientador: Prof. Dr. Amilton Amorim.**

**Coorientador: Prof. Dr. Maurício Galo.**

**PRESIDENTE PRUDENTE**

**2017**

## FICHA CATALOGRÁFICA

P567a Pessoa, Guilherme Gomes.  
Análise da estabilidade e influência dos parâmetros de calibração de uma câmara digital não métrica na fototriangulação / Guilherme Gomes Pessoa. - Presidente Prudente : [s.n], 2017  
111 f.

Orientador: Amilton Amorim  
Coorientador: Maurício Galo  
Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Ciências e Tecnologia  
Inclui bibliografia

1. Calibração. 2. Câmara digital. 3. RPAS. I. Amorim, Amilton. II. Galo, Maurício. III Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Ciências e Tecnologia. IV. Título.



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA

Câmpus de Presidente Prudente

**CERTIFICADO DE APROVAÇÃO**

TÍTULO DA DISSERTAÇÃO: Análise da estabilidade e influência dos parâmetros de calibração de uma câmara digital não métrica na fototriangulação

**AUTOR: GUILHERME GOMES PESSOA**

**ORIENTADOR: AMILTON AMORIM**

**COORIENTADOR: MAURICIO GALO**

Aprovado como parte das exigências para obtenção do Título de Mestre em CIÊNCIAS CARTOGRÁFICAS, área: AQUISIÇÃO, ANÁLISE E REPRESENTAÇÃO DE INFORMAÇÕES ESPACIAIS pela Comissão Examinadora:

Prof. Dr. AMILTON AMORIM  
Departamento de Cartografia / Faculdade de Ciências e Tecnologia de Presidente Prudente

Prof. Dr. JULIO KIYOSHI HASEGAWA  
Departamento de Cartografia / Faculdade de Ciências e Tecnologia de Presidente Prudente

Prof. Dr. DANIEL RODRIGUES DOS SANTOS  
Departamento de Geomática / Universidade Federal do Paraná

Presidente Prudente, 24 de fevereiro de 2017

## DADOS CURRICULARES

Guilherme Gomes Pessoa

Nascimento 23/06/1991 - São Paulo - SP

Filiação João Carlos Pessoa  
Dora Alice Gomes Pessoa

2006 - 2009 Curso de Nível Médio  
Técnico Integrado em Geomensura  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná - UTFPR, câmpus Pato Branco

2010 - 2014 Curso de Graduação  
Engenharia Cartográfica  
Faculdade de Ciências e Tecnologia - UNESP, câmpus Presidente Prudente

2015 - 2017 Curso de Pós-Graduação  
Mestrado em Ciências Cartográficas  
Faculdade de Ciências e Tecnologia - UNESP, câmpus Presidente Prudente

## DEDICATÓRIA

*Aos meus pais que sempre me apoiaram,  
incentivaram e acreditaram em meu potencial.*

*Ao meu irmão pelo incentivo e apoio.*

## AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus em primeiro lugar por iluminar meus caminhos e guiar meus passos para que eu pudesse chegar até aqui, peço que Ele continue me iluminando e guiando pela estrada da vida.

Agradeço ao meu orientador, Prof. Dr. Amilton Amorim, lá se vão aproximadamente 5 anos de trabalho juntos, por me ensinar os primeiros passos na vida científica. Agradeço também ao meu Coorientador, Prof. Dr. Maurício Galo, o qual foi de extrema importância no desenvolvimento da pesquisa de mestrado.

Aos desenvolvedores do software de identificação automática de alvos do tipo ARUCO, Sergio Leandro Alves da Silva, Antonio Maria Garcia Tommaselli e Almir Olivette Artero.

Ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Cartográficas e à instituição UNESP, pelo suporte ao desenvolvimento da pesquisa, disponibilizando laboratórios, equipamentos e softwares.

À CAPES pela concessão da bolsa de pesquisa e à FAPESP pelo apoio auxílio financeiro para a compra de equipamentos e licenças de softwares.

Aos meus amigos da Graduação e companheiros de grupo do Trabalho de Graduação Guilherme Bazan, João Rafael e Luis Otávio. Em especial ao meu grande amigo Maumau.

Aos meus amigos da Graduação que continuaram me acompanhando no mestrado Lucas Jamiro e Luiz Eduardo. Um agradecimento especial ao Gabriel Jerez pelos anos de amizade.

Aos amigos de república João Antunes, Vitor Sato, Victor Kaneshiro, Mineiro, Tonho, Emerson, Tobias, Valdir e 51, por tornarem a estadia na cidade de Prudente em algo que me lembrarei pelo resto da vida.

Aos colegas de Pós pelas conversas e discussões esclarecedoras sobre os mais variados assuntos. Em especial aos amigos André, Mari Campos, Marcus, Raquel, Renan e Stuani

Ao Érico pelas piadas sempre bem colocadas e pelas boas risadas.

Por fim, com muito amor, quero agradecer mais uma vez à minha família, sem a qual nada disso seria possível.

## EPÍGRAFE

*"Ama-se mais o que se conquista com  
esforço"*

*Benjamin Disraeli*



## RESUMO

O avanço tecnológico ocorrido nas últimas décadas, no que diz respeito à resolução e a qualidade de câmaras digitais, bem como o desenvolvimento das plataformas denominadas *Remotely Piloted Aircraft Systems* (RPAS), possibilitou o uso de tais equipamentos em atividades de Fotogrametria. Tradicionalmente, em trabalhos fotogramétricos, são empregadas câmaras com características fotogramétricas, tal equipamento é construído com maior rigor geométrico se comparado às câmaras digitais convencionais. Em se tratando de mapeamento com melhores níveis de precisão, é importante que os parâmetros internos da câmara sejam determinados com precisão, uma vez que a qualidade dos produtos finais gerados está diretamente relacionada à precisão geométrica dos equipamentos utilizados. Tais parâmetros podem ser determinados a partir de métodos de calibração consagrados. No caso de câmaras digitais convencionais é importante verificar a estabilidade dos parâmetros em função do uso do equipamento. Neste sentido, este trabalho teve como objetivo avaliar os dados obtidos por meio de uma câmara digital convencional, transportada por um RPAS, com o intuito de possibilitar o uso em mapeamentos planialtimétricos e geração de MDT. Para tanto, foram realizadas calibrações da câmara e os parâmetros foram então analisados com base em distribuições estatísticas, com a finalidade de se verificar a significância dos mesmos. Em seguida, os conjuntos de parâmetros foram analisados utilizando métodos de análise de similaridade de feixe de raios. Foram feitas ainda, análises de tendência e precisão dos pontos de verificação com relação aos Parâmetros de Orientação Interior (POI) utilizados na fototriangulação. Os resultados das análises de significância dos parâmetros apontaram para a eliminação do parâmetro  $K_3$ , mas tal parâmetro não foi eliminado devido a sua importância verificada pela magnitude da correção proporcionada pelo mesmo. As análises de similaridades constataram diferenças consideráveis, para os dois limiares considerados, entre os feixes reconstruídos, fato que pôde ser verificado nos experimentos de fototriangulação, que apontaram para influência dos parâmetros, principalmente, na estimativa da componente Z dos pontos de verificação. Por fim, pode-se concluir que a câmara analisada não deve ser considerada como um equipamento estável. Sendo assim, o processo prévio ou periódico de calibração, separadamente da tomada de fotos para o levantamento fotogramétrico, não é justificável. No caso deste equipamento, o ideal é que seja realizado o processo de calibração em serviço.

**Palavras-chave:** Calibração, câmara digital, RPAS.

## ABSTRACT

Technological advances in recent decades with regard to the resolution and quality of off-the-shelf cameras, as well as the development of platforms called Remotely Piloted Aircraft Systems (RPAS), allowed the use of such equipment in photogrammetry activities. Traditionally in photogrammetric activities cameras with high geometric accuracy characteristics are used, such equipment is built with the highest geometric accuracy when compared to off-the-shelf camera. In the case of precision mapping, it is important that the internal camera parameters are determined with precision, since the quality of the generated product is directly related to the geometric accuracy of the equipment used, such parameters can be determined from calibration methods. In the case of off-the-shelf cameras it is important that the stability of the parameters as a function of equipment use be verified. Thus, this study aimed to evaluate the data obtained from a off-the-shelf digital camera, carried by a RPAS, in order to enable the use in 3D mapping and generation of MDT. To this end, calibrations of the camera parameters were performed and were then analyzed based on statistical distributions in order to determine the significance of the parameters, then sets of parameters were studied using methods of bundle similarity analysis. Also, analyzes of bias and precision of the check points with respect to the Internal Orientation Parameters (IOP) used in phototriangulation. The results of the analysis of significance of the parameters pointed to the elimination of parameter  $K_3$ , but this parameter was not eliminated due to its importance verified by the magnitude of the correction provided. The similarity bundle analysis considering two thresholds pointed to differences between the reconstructed bundles, which could be verified in the phototriangulation experiments, which pointed to influence of the interior orientation parameters mainly on the Z component of the checkpoints. Finally, it can be concluded that the analyzed camera should not be considered as a stable equipment. Therefore, the previous or periodic calibration process separately from the photogrammetric survey is not justified. In the case of this equipment the ideal is to carry out the calibration process in service.

**Key words:** Calibration, digital cameras, RPAS.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Sistema de imagem .....	23
Figura 2 - Relação entre o Sistema imagem e o Sistema intermediário .....	24
Figura 3 - Sistema fotogramétrico e Sistema intermediário .....	25
Figura 4 - Exemplos de distorção radial simétrica. (a) distorção negativa. (b) distorção positiva.....	26
Figura 5 - Feixe de raios construídos considerando a condição de colinearidade entre pontos no espaço imagem, o centro perspectivo e pontos no espaço objeto .....	30
Figura 6 - Feixes de raios reconstruídos pelos conjuntos de POI.....	36
Figura 7 - Grid com as representação das posições dos pontos não corrigidos das distorções e dos pontos corrigidos pelos POI (I) e pelos POI (II) .....	36
Figura 8 - Grid com pontos originais, pontos corrigidos pelos POI (I) e pontos corrigidos pelos POI (II) .....	38
Figura 9 - Visão lateral dos dois feixes de raios.....	39
Figura 10 - Projeção dos pontos corrigidos pelos POI (II) para o plano definido pelos POI (I) .....	40
Figura 11 - Feixes de raios sobrepostos e rotacionados .....	41
Figura 12 - Feixes de raios considerando translações e rotações entre os centros perspectivos (CP).....	43
Figura 13 - Câmera Canon ELPH 110 HS .....	50
Figura 14 - RPAS modelo eBee .....	50
Figura 15 - Análise dos POI .....	52
Figura 16 - Determinação da área teste .....	53
Figura 17 - Geração e análise dos produtos finais.....	54
Figura 18 - Campo de calibração 3D.....	55
Figura 19 - Alvo do tipo ARUCO (código 662).....	56
Figura 20 - Configuração das tomadas de fotos .....	57
Figura 21 - Sequência de rotações adotada .....	57
Figura 22 - Configuração dos parâmetros de calibração. ....	58
Figura 23 - Injunções de distância (linhas vermelhas) e pontos (pontos vermelhos).....	60
Figura 24 - Valores de K2 e seus respectivos desvios-padrão .....	64
Figura 25 - Valores de K3 e seus respectivos desvios-padrão .....	64
Figura 26 - Valores de B e seus respectivos desvios-padrão.....	64

Figura 27 - Valores da distância focal calibrada estimada em cada uma das calibrações.....	67
Figura 28 - Valores da posição do ponto principal estimada em cada uma das calibrações ....	68
Figura 29 - Valores do coeficiente K1 estimado em cada uma das calibrações.....	68
Figura 30 - Valores dos coeficientes K2 e K3 estimados em cada uma das calibrações .....	68
Figura 31 - Valores dos coeficientes da distorção descentrada estimados em cada uma das calibrações .....	69
Figura 32 - Valores dos parâmetros de afinidade estimados em cada uma das calibrações.....	69
Figura 33 - Posição do ponto principal estimado nas calibrações.....	71
Figura 34 - Gráfico da distorção radial simétrica (K1 e K2).....	72
Figura 35 - Gráfico da distorção radial simétrica (K1, K2 e K3).....	72
Figura 36 - Gráfico da distorção descentrada.....	73
Figura 37 - Gráfico dos valores de correção para o modelo de afinidade .....	74
Figura 38 - Gráfico dos valores das distorções das lentes (radial simétrica e descentrada).....	74
Figura 39 - Pontos na posição original e nas posições após as orientações interiores. ....	76
Figura 40 - Área teste e distribuição dos pontos determinados. ....	82
Figura 41 - Marco de concreto. ....	83
Figura 42 - Linhas de base para o processamento do ponto Base M16.....	88
Figura 43 - Linhas de base para o processamento dos pontos de controle/verificação. ....	89
Figura 44 - Plano de voo sobre a área teste. ....	92
Figura 45 - Blocos fotogramétricos (bloco à direita com 167 imagens, bloco à esquerda com 76 imagens).....	93
Figura 46 - Distribuição dos pontos de controle (esquerda) e verificação (direita) .....	95
Figura 47 - Distribuição dos pontos de controle e verificação .....	95
Figura 48 - Valores de REMQ (m).....	98
Figura 49 - Valores de REMQ (m) corrigidos da tendência.....	99
Figura 50 - Valores de REMQ para fototriangulações com diferentes POI.....	101
Figura 51 - Valores de REMQ para fototriangulações com diferentes POI.....	101
Figura 52 - Valores de REMQ para fototriangulações com diferentes POI.....	102
Figura 53 - Valores de REMQ para fototriangulações com diferentes POI (POI_7 comparado com os demais) .....	102

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - PEC-PCD para planimetria.....	44
Tabela 2 - PEC-PCD para .....	44
Tabela 3 - Dados da câmara.....	49
Tabela 4 - Precisão das injunções.....	59
Tabela 5 - resultado do ajustamento da calibração.....	61
Tabela 6 - POI e desvios-padrão resultantes das calibrações dos conjuntos 1 e 2.....	62
Tabela 7 - POI e desvios-padrão resultantes das calibrações dos conjuntos 3 e 4.....	62
Tabela 8 - POI e desvios-padrão resultantes das calibrações dos conjuntos 5 e 6.....	63
Tabela 9 - POI e desvios-padrão resultantes da calibração do conjunto 7.....	63
Tabela 10 - Valores da distribuição F para os parâmetros.....	66
Tabela 11 - Valores da distribuição F para os grupos de parâmetros.....	66
Tabela 12 - Matriz de correlação dos POI (conjunto 1).....	70
Tabela 13 - Valores de REMQ para o método ZROT.....	77
Tabela 14 - Valores da raiz quadrada da variância à posteriori para o método ROT.....	78
Tabela 15 - Valores da raiz quadrada da variância à posteriori para o método SPR.....	78
Tabela 16 - Valores da raiz quadrada da variância à posteriori o método SPR (II).....	78
Tabela 17 - Coordenadas UTM (fuso 22) e altitudes dos pontos materializados na área teste.....	90
Tabela 18 - Desvios-padrão dos parâmetros utilizados no processo de fototriangulação (refinamento dos POE).....	94
Tabela 19 - Desvios-padrão dos parâmetros utilizados no processo de fototriangulação (testes com POI).....	94
Tabela 20 - REMQ dos parâmetros de orientação exterior.....	96
Tabela 21 - Resíduos dos pontos fotogramétricos.....	97
Tabela 22 - Valores de REMQ dos pontos de verificação.....	97
Tabela 23 - Valores de t-student dos pontos de verificação.....	98
Tabela 24 - Valores de REMQ dos pontos de verificação corrigidos da tendência.....	99
Tabela 25 - Valores de REMQ (em m) da comparação entre as coordenadas estimadas para os pontos de verificação, à esquerda POI_1 com os demais e à direita POI_2 com os demais.....	100

Tabela 26 - Valores de REMQ (em m) da comparação entre as coordenadas estimadas para os pontos de verificação, à esquerda POI_3 com os demais e à direita POI_4 com os demais.....	100
Tabela 27 -Valores de REMQ (em m) da comparação entre as coordenadas estimadas para os pontos de verificação, à esquerda POI_5 com os demais e à direita POI_6 com os demais.....	100
Tabela 28 - Valores de REMQ (em m) da comparação entre as coordenadas estimadas para os pontos de verificação, POI_7 com os demais.....	101

## LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Parâmetros da câmara Canon ELPH 110 HS .....	49
Quadro 2 - Data das coletas de dados para calibração .....	57
Quadro 3 - POE iniciais.....	59
Quadro 4 - Dados do ajustamento das calibrações.....	61
Quadro 5 - Tempo de observação em função da precisão do posicionamento relativo, equipamento utilizado e comprimento da linha de base.....	87

## SUMÁRIO

### CAPÍTULO 1

1 INTRODUÇÃO.....	17
1.1 OBJETIVOS.....	18
<b>1.1.1 Objetivos específicos.....</b>	<b>18</b>
1.2 JUSTIFICATIVA E RELEVÂNCIA DO TEMA.....	18
1.3 ESTRUTURA DO RELATÓRIO.....	19

### CAPÍTULO 2

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA .....	21
2.1 RPAS ( <i>REMOTELY PILOTED AIRCRAFT SYSTEMS</i> ).....	21
2.2 FOTOGRAMETRIA .....	22
<b>2.2.1 Orientação interior de imagens digitais .....</b>	<b>22</b>
2.2.1.1 Sistemas envolvidos .....	23
2.2.1.2 Distorções das lentes .....	26
2.2.1.3 Modelo de afinidade .....	28
<b>2.3.4 Orientação exterior.....</b>	<b>28</b>
2.4 CALIBRAÇÃO DE CÂMARA.....	30
<b>2.4.1 Métodos de campo .....</b>	<b>31</b>
2.4.1.1 Método de campos mistos .....	32
2.4.1.2 Método das câmaras convergentes .....	32
2.4.1.3 Auto calibração.....	33
2.4.1.4 Calibração em serviço ( <i>on-the-job</i> ).....	33
<b>2.4.2 Análise de significância dos parâmetros.....</b>	<b>34</b>
<b>2.4.3 Análise de estabilidade dos parâmetros .....</b>	<b>35</b>
2.4.3.1 <i>Misclosure method</i> .....	37
2.4.3.2 <i>Zero rotation method</i> .....	39
2.4.3.3 <i>Rotation method</i> .....	41
2.4.3.4 <i>Single Photo Resection Method</i> .....	42
2.6 CONTROLE DE QUALIDADE .....	44



<b>2.6.1 Análise de tendências utilizando teste estatístico <i>t-student</i> .....</b>	<b>45</b>
<b>2.6.2 Análise da precisão utilizando o teste estatístico qui-quadrado.....</b>	<b>47</b>

### CAPÍTULO 3

<b>3 MATERIAIS E MÉTODOS.....</b>	<b>48</b>
3.1 INFRAESTRUTURA DE APOIO DISPONÍVEL .....	48
3.2 MATERIAIS E EQUIPAMENTOS .....	48
3.3 MÉTODO .....	51
<b>3.3.1 Calibração e análises dos POI .....</b>	<b>51</b>
<b>3.3.2 Análise da influência dos POI nas fototriangulações .....</b>	<b>52</b>

### CAPÍTULO 4

<b>4 CALIBRAÇÃO DA CÂMARA, ANÁLISE DA SIGNIFICÂNCIA E ESTABILIDADE DOS POI.....</b>	<b>55</b>
4.1 RESULTADOS E ANÁLISES.....	60
<b>4.1.1 Análises de significância.....</b>	<b>65</b>
<b>4.1.2 Análises de estabilidade baseadas na magnitude dos parâmetros .....</b>	<b>67</b>
<b>4.1.3 Análises de estabilidade baseadas nos métodos de similaridade de feixe de raios.....</b>	<b>75</b>
4.2 CONSIDERAÇÕES SOBRE AS ANÁLISES DA CALIBRAÇÃO .....	80

### CAPÍTULO 5

<b>5 INFLUÊNCIA DA VARIAÇÃO DOS POI NA FOTOTRIANGULAÇÃO.....</b>	<b>82</b>
5.1 DETERMINAÇÃO DA ÁREA TESTE .....	82
5.2 FOTOTRIANGULAÇÕES E ANÁLISES .....	91
<b>5.2.1 Plano de voo e aquisição das imagens.....</b>	<b>91</b>
<b>5.2.2 Variação dos POI na fototriangulação .....</b>	<b>93</b>
5.3 CONSIDERAÇÕES SOBRE AS ANÁLISES DA FOTOTRIANGULAÇÃO.....	103

## CAPÍTULO 6

6. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES .....	105
6.1 CONCLUSÕES .....	105
6.2 RECOMENDAÇÕES.....	106
BIBLIOGRAFIA .....	107

## 1 INTRODUÇÃO

O forte desenvolvimento tecnológico, possibilitou, nos últimos anos, que houvesse uma tendência de miniaturização dos sensores e dos equipamentos de aquisição de dados. Dentre os quais, o desenvolvimento de sensores de georreferenciamento, como chip GNSS ou sistemas inerciais baseados em MEMS (sistemas micro eletromecânicos). A miniaturização de sensores foi fundamental para o desenvolvimento dos *Remotely Piloted Aircraft Systems* (RPAS) para fins de mapeamento, uma vez que a principal limitação deste tipo de plataforma está na sua capacidade de carga reduzida. Esse avanço possibilitou o desenvolvimento de RPAS cada vez mais leves e também a utilização de mais sensores na mesma plataforma.

Em se tratando de mapeamento, um fator importante a ser considerado é a precisão almejada. Para Harwin et al. (2015) a qualidade dos dados 3D resultantes dependerá da qualidade geométrica e radiométrica da imagem, dos parâmetros de orientação interior da câmara, da acurácia da calibração, da geometria do bloco de imagens utilizadas e da quantidade dos pontos de controle.

Considerando o exposto pelo autor citado anteriormente, no caso da plataforma RPAS, a principal limitação está relacionada à qualidade dos sensores embarcados, em especial a qualidade do sensor de imageamento. Neste sentido, destaca-se que as câmaras digitais comumente utilizadas nos RPAS não foram desenvolvidas para fins fotogramétricos. Isso faz com que, ainda que a estimação seja realizada por métodos consagrados, como é o caso dos métodos de calibração apresentados na literatura, por vezes não é possível garantir a estabilidade dos parâmetros de orientação interior da câmara.

No processo fotogramétrico de fototriangulação, quando se leva em consideração a equação de colinearidade com parâmetros adicionais, fica evidente a relação entre os parâmetros de orientação interior e os parâmetros de orientação exterior. Neste caso, a correlação entre os parâmetros citados pode ser calculada a partir da matriz variância-covariância resultante do processo de ajustamento da fototriangulação. O grau de correlação entre os parâmetros é dependente da geometria do bloco, das características da cena, dentre outros aspectos.

Alguns autores têm voltado esforços para o desenvolvimento de técnicas de calibração para câmaras, em especial as digitais. Como exemplo de trabalhos voltados para a calibração deste tipo de equipamento tem-se: Fraser (2012) que realizou estudo sobre a relação entre a variação dos parâmetros de distorção das lentes em função da variação das

configurações de zoom e foco. Destaca-se que, diferente das câmaras fotogramétricas, a estabilidade deste tipo de equipamento não é garantida, pesquisadores da área de fotogrametria têm desenvolvido pesquisas com o intuito de investigar a significância e a estabilidade dos parâmetros de orientação interior de câmaras digitais, dentre eles destacam-se os estudos de: Pulivelli (2005), Habib et al. (2005), Habib e Morgan (2005) e Habib et al. (2008).

Diante do exposto, este trabalho apresenta um estudo da estabilidade dos parâmetros de calibração de uma câmara digital e uma análise da influência da variação de tais parâmetros no ajustamento da fototriangulação.

## 1.1 OBJETIVOS

Avaliar a estabilidade dos parâmetros de calibração de uma câmara digital convencional, embarcada em um RPAS, bem como a influência de tais parâmetros na fototriangulação.

### 1.1.1 Objetivos específicos

Como objetivos específicos têm-se:

- Analisar a qualidade da calibração, e avaliar a estabilidade dos parâmetros de orientação interior em decorrência do uso do equipamento;
- Avaliar a influência dos POI na estimativa de posição de pontos no terreno, resultantes do processo de fototriangulação; e
- Avaliar a qualidade posicional planimétrica e altimétrica dos dados obtidos a partir de câmaras digitais a bordo de RPAS.

## 1.2 JUSTIFICATIVA E RELEVÂNCIA DO TEMA

O RPAS é uma ferramenta que possibilita a obtenção de imagens de baixo custo e de alta resolução geométrica, radiométrica e temporal. Essas características tem popularizado o uso deste tipo de plataforma, principalmente para a atualização e elaboração de mapas, sobretudo em áreas de difícil acesso ou pequenas, onde o uso da Fotogrametria a

partir de plataformas convencionais, como é o caso do avião, torna a execução do trabalho economicamente inviável. Para áreas de pequena dimensão o RPAS é uma alternativa que possibilita a geração de MDT e MDS com um custo inferior e com um detalhamento maior, quando comparado ao aerolevante convencional e aos métodos topográficos.

Considerando a resolução geométrica das imagens adquiridas a partir de sensores embarcados neste tipo de plataforma é possível a geração de produtos com alto nível de detalhamento. Porém, características de operação desta plataforma, como é o caso do pouso, podem acarretar degradação dos sensores, principalmente em casos de sensores de baixo custo, adaptados para o acoplamento à plataforma e não projetados para absorver os impactos e vibrações da aeronave.

Assim, este trabalho justifica-se pela necessidade da investigação da precisão dos produtos gerados a partir de RPAS e câmaras digitais convencionais, uma vez que é interessante conhecer a influência dos movimentos mecânicos do foco retrátil da câmara e dos impactos sofridos pelo equipamento no momento do pouso sobre os parâmetros de orientação interior da câmara. Tais parâmetros influenciam o resultado dos produtos finais gerados.

### 1.3 ESTRUTURA DO RELATÓRIO

Este relatório está estruturado em seis capítulos, sendo eles: Introdução; Fundamentação teórica; Materiais e métodos; Calibração da câmara e análise da significância e da estabilidade; Influência da variação dos POI na fototriangulação; e Conclusões e recomendações. A seguir estão descritos os conteúdos de cada um dos capítulos.

No Capítulo 1 estão apresentados: a introdução, em que o tema do trabalho é contextualizado; os objetivos, geral e específicos; e também a justificativa e relevância do tema.

O Capítulo 2 traz a revisão teórica sobre os assuntos envolvidos, direta e indiretamente, com o desenvolvimento do trabalho. Neste, estão expostos conceitos de fotogrametria, métodos de calibração e de análises dos parâmetros e métodos de análises dos produtos finais.

No Capítulo 3 estão apresentadas a relação de materiais e métodos que foram utilizados no desenvolvimento do trabalho e a infraestrutura de apoio ao qual o mestrando teve acesso.

No Capítulo 4 estão apresentados os experimentos de calibração realizados, bem como os resultados e análises.

No Capítulo 5 estão apresentados os experimentos sobre a influência da variação dos POI na fototriangulação.

Por fim, no Capítulo 6 estão apresentadas as conclusões do trabalho e as recomendações para trabalhos futuros.

## 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

### 2.1 RPAS (*REMOTELY PILOTED AIRCRAFT SYSTEMS*)

O termo RPAS, segundo Eisenbeiss (2004), se refere a qualquer veículo que possa voar e ser controlado remotamente, sem a necessidade de uma pessoa a bordo. O aumento do uso destes equipamentos na última década, motivado pela possibilidade de aquisição de imagens com alta resolução espacial, tem aumentado a insegurança no espaço aéreo. Sendo assim, surge necessidade de uma regulamentação detalhada e métodos que auxiliem na integração segura desses veículos ao espaço aéreo controlado. No Brasil o Departamento de Controle do Espaço Aéreo (DECEA) define, na Instrução do Comando da Aeronáutica (ICA 100-40), como RPAS aqueles em que é possível a intervenção de um piloto a qualquer momento durante o voo em que a mesma seja necessária, sendo que o voo utilizando aeronave totalmente autônoma ainda não é regulamentado.

Diferentes critérios podem ser adotados para a classificação da plataforma, peso máximo de decolagem, capacidade de voo sem contato visual, tipo de operação realizada etc. Destaca-se que, não existe um consenso sobre as categorias de RPAS e nem sobre quais aspectos devem ser considerados para classificá-los. Outro ponto ainda não resolvido na temática dos RPAS está na questão legal de seu uso. Não existe nenhuma organização internacional que regule sua utilização, ficando a cargo de cada país definir e regulamentar o uso.

A Agência Federal de Aviação dos Estados Unidos (FAA) define em documento datado de 21 de junho de 2016 regras básicas para a operação de *Unmanned Aerial Vehicle* (UAV), termo sinônimo de RPAS. No Brasil a Instrução do Comando da Aeronáutica ICA-100-40-DECEA, publicada pelo Departamento de Controle do Espaço Aéreo – DECEA, Órgão Central do Sistema de Controle do Espaço Aéreo Brasileiro (SISCEAB), que tem a competência de legislar acerca dos procedimentos para o acesso ao Espaço Aéreo, tem como objetivo regulamentar os procedimentos e responsabilidades necessários para o acesso seguro ao espaço aéreo por RPAS. A referida ICA 100-40-DECEA estabelece três classes para os RPAS (até 2 kg, acima de 2 kg até 25 kg e acima de 25 kg) e fixa critérios para o acesso seguro ao Espaço Aéreo Brasileiro. (Brasil, 2015).

Além das diversas aplicações militares, o uso dessas plataformas em aplicações civis está ficando cada vez mais diversificado. Para Sarris (2001), alguns dos possíveis usos civis dos RPAS são: sensoriamento remoto, detecção e monitoramento de

queimadas, auxílio em situações de emergência e desastre, monitoramento de estruturas lineares, como gasodutos e linhas de transmissão, pesquisa, monitoramento ambiental e segurança pública.

## 2.2 FOTOGRAMETRIA

O conceito de Fotogrametria está apresentado no manual de fotogrametria como:

“Fotogrametria é a arte, ciência e tecnologia para obtenção de informações confiáveis sobre objetos físicos e seu meio ambiente através de processos de armazenamento, medição e interpretação de imagens fotográficas” (THOMPSON e GRUNER, 1980, p. 1, tradução nossa).

Fazendo uso da Fotogrametria, aliada a outras ciências como a Cartografia e a Geodésia, é possível a determinação de pontos sobre a superfície física. Outro conteúdo das fotografias, não menos importante que a reconstrução geométrica dos objetos, são as informações semânticas que podem ser recuperadas pelo processo de fotointerpretação que classifica os objetos em várias classes de feições.

Através de métodos fotogramétricos pode-se formar uma rede de pontos no terreno que, por sua vez, podem servir de base para outros levantamentos, como o levantamento cadastral, determinando os pontos limítrofes das propriedades, sendo que a precisão necessária depende da escala das fotos.

Segundo Mikhail et al. (2001) “A função fundamental da Fotogrametria é estabelecer uma rigorosa relação geométrica entre a imagem e a forma do objeto no momento do imageamento”. Tal relação rigorosa é possível através dos processos fotogramétricos de orientação interior e exterior.

### 2.2.1 Orientação interior de imagens digitais

De acordo com Andrade (1998), a orientação interior consiste na recuperação da posição da fotografia em relação à câmara. Basicamente, consiste na reconstrução do feixe perspectivo que deu origem à imagem.

Para realizar a orientação interior nas imagens provenientes de câmaras digitais, as transformações de referenciais resumem-se a transformar do sistema imagem para o sistema intermediário, em seguida para o sistema fotogramétrico e por fim aplicar as correções.



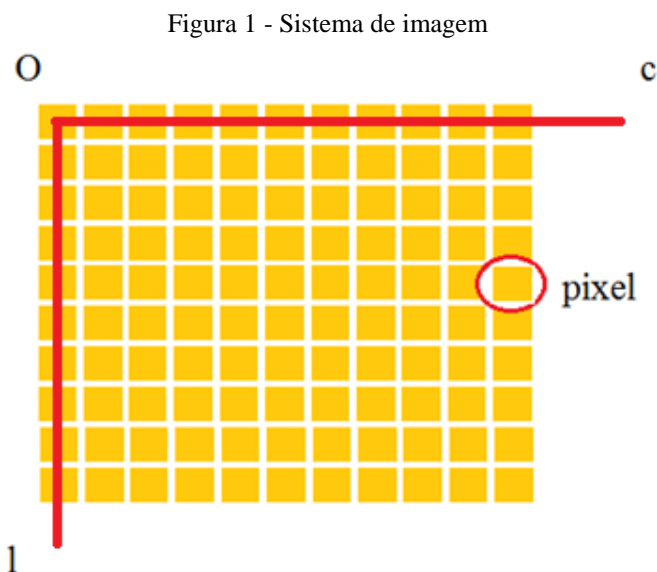
Após as transformações de sistemas referenciais é necessário realizar as correções das distorções. Para isso, deve-se conhecer os parâmetros inerentes à câmara, que normalmente são: a distância focal do conjunto de lentes ( $f$ ), é basicamente a distância entre o ponto nodal posterior e o ponto principal do sensor de captura ( $x_0, y_0$ ), os coeficientes de distorção radial, os parâmetros de distorção descentrada e a posição do ponto principal. Estes parâmetros são obtidos durante o processo de calibração da câmara, descrito posteriormente, e são utilizados para a correção de distorções nas imagens.

### 2.2.1.1 Sistemas envolvidos

O relacionamento entre o espaço imagem e o espaço objeto é modelado de acordo com os sistemas envolvidos nas observações. No caso dos sistemas adotados em fotogrametria, os mais usados são:

- Sistema imagem;
- Sistema intermediário; e
- Sistema fotogramétrico.

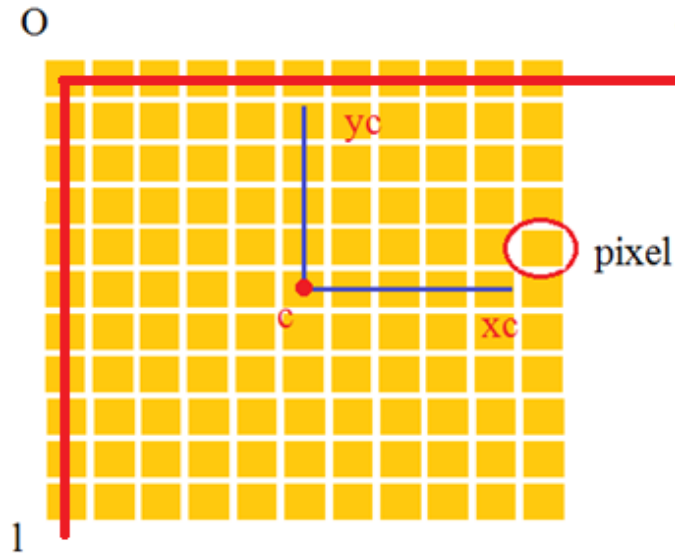
O Sistema imagem (Figura 1) é definido com origem no canto superior esquerdo da imagem, o eixo “c” positivo para a direita e o eixo “l” como um ângulo de 90° no sentido horário.



Fonte: Adaptado de Kraus (2007).

O Sistema intermediário tem como origem o centro da imagem, tal sistema pode ser considerado equivalente ao sistema referencial fiducial. A relação entre o Sistema imagem e o Sistema intermediário é mostrada na Figura 2.

Figura 2 - Relação entre o Sistema imagem e o Sistema intermediário



Fonte: Adaptado de Kraus (2007).

A transformação entre o sistema imagem e o sistema intermediário é feita considerando a reflexão do eixo “l”, translação para coincidir as origens e fator de escala. O modelo matemático de tal transformação é dado pela Equação 1.

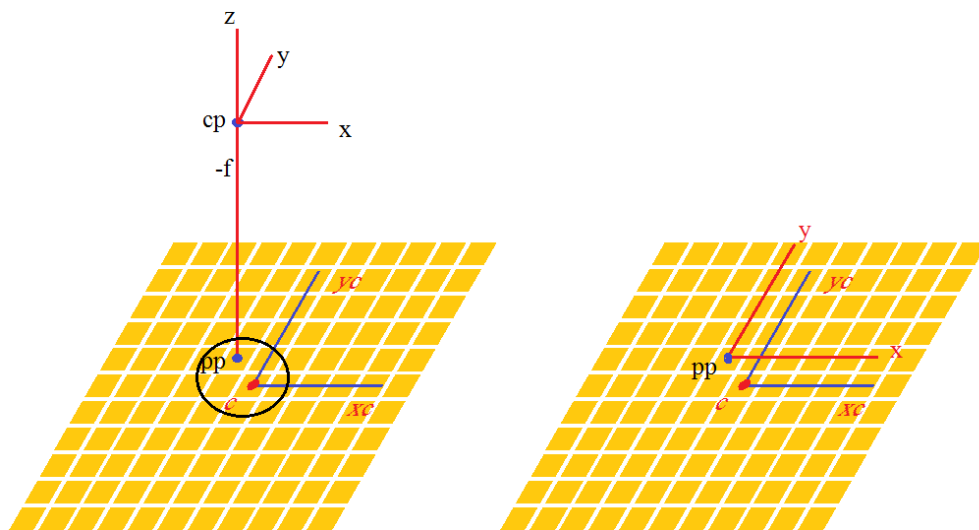
$$\begin{aligned} xc^i &= Tp_x * \left( c^i - \frac{nc - 1}{2} \right) \\ yc^i &= -Tp_y * \left( l^i - \frac{nl - 1}{2} \right) \end{aligned} \quad (1)$$

sendo:

- $(xc^i, yc^i)$  – as coordenadas do ponto considerado no sistema intermediário;
- $Tp_x$  e  $Tp_y$  – o valor da escala que relaciona os dois sistemas, normalmente é considerado igual ao tamanho do pixel;
- $(c^i, l^i)$  – as coordenadas do ponto no sistema imagem; e
- $(nc, nl)$  – número de colunas e de linhas da imagem.

O sistema fotogramétrico (Figura 3) consiste em um sistema cartesiano tridimensional dextrógiro, cuja orientação dos eixos “x” e “y” é paralela aos eixos definidos pelos sistemas fiducial ou intermediário, e o eixo “z” é coincidente com o eixo óptico da câmara. A origem do Sistema fotogramétrico é o centro perspectivo (cp) do conjunto de lentes, este por sua vez ao ser projetado de maneira ortogonal sobre o plano focal, ou plano da imagem, constitui o ponto principal (pp).

Figura 3 - Sistema fotogramétrico e Sistema intermediário



Fonte: Adaptado de Kraus (2007).

A transformação entre os sistemas mostrada na Figura 3 consiste apenas de uma translação dada pela posição do ponto principal no Sistema intermediário. O modelo matemático desta transformação é dado pela Equação 2.

$$\begin{aligned} x^i &= xc^i - x_0 \\ y^i &= yc^i - y_0 \end{aligned} \quad (2)$$

sendo:

- $(x^i, y^i)$  – coordenadas do ponto no Sistema fotogramétrico; e
- $(x_0, y_0)$  – coordenadas do ponto principal.

Vale ressaltar que após as transformações entre os sistemas, as coordenadas no sistema fotogramétrico ainda apresentarão erros sistemáticos advindos de desvios na trajetória do feixe de raios que forma a imagem. A correção destes erros é feita através da

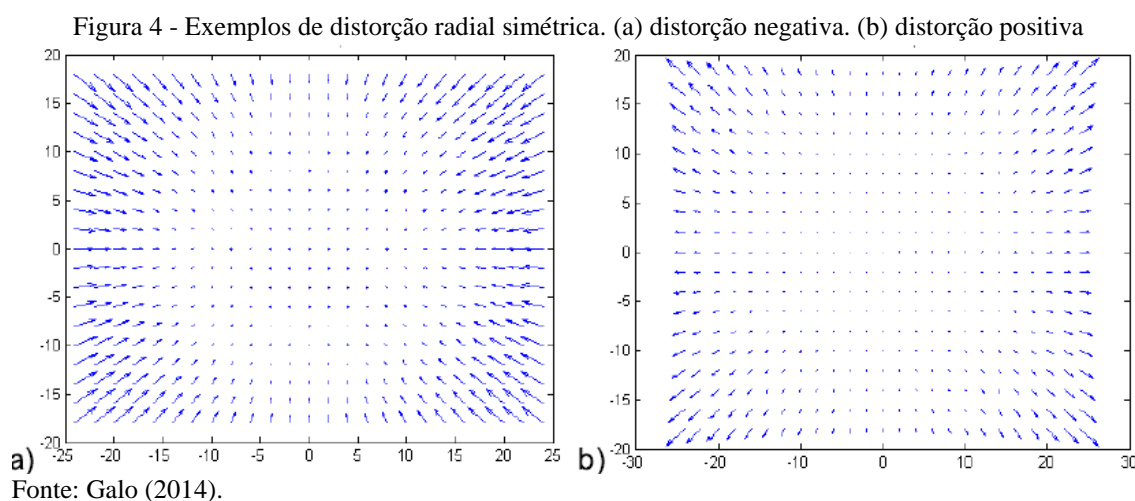
aplicação das correções das distorções, calculadas com base nos parâmetros de orientação interior.

### 2.2.1.2 Distorções das lentes

As distorções ópticas advindas de imperfeições na construção do conjunto de lentes provocam desvios na trajetória do raio incidente. Tais desvios afetam a acurácia métrica das imagens. As distorções das lentes são basicamente duas: distorção radial simétrica e distorção descentrada.

#### 2.2.1.2.1 Distorções radial simétrica

Segundo Wolf (2000), a distorção radial é a distorção que ocorre ao longo de linhas radiais partindo do ponto principal da fotografia, ou a coordenada central da imagem. Tal distorção está presente em todas as fotografias por ser inerente à utilização de lentes para a formação da imagem, mesmo quando o sistema de lentes é produzido com o mais alto rigor geométrico. A distorção radial pode ter valores positivos e negativos (Figura 4) e tende a aumentar à medida que se afasta do ponto principal da fotografia, sendo este o único ponto livre desta distorção.



Os efeitos da distorção radial simétrica foram modelados inicialmente por Conrady, e então adaptados por Brown (1966). Tal modelo matemático está apresentado em Wolf (2000).

$$\delta r = k_1 * r^2 + k_2 * r^4 + k_3 * r^6 + \dots \quad (3)$$

sendo:

- $\delta r$  – valor da distorção radial simétrica;
- $k_1, k_2, k_3$  – os coeficientes da distorção radial simétrica; e
- $r$  – distância radial ao ponto principal.

Tal modelo corresponde ao valor radial da distorção, podendo este ser decomposto nos eixos x e y do sistema fotogramétrico:

$$\begin{aligned} \delta r_x &= (xc - x_0) * (k_1 * r^2 + k_2 * r^4 + k_3 * r^6 + \dots) \\ \delta r_y &= (yc - y_0) * (k_1 * r^2 + k_2 * r^4 + k_3 * r^6 + \dots) \end{aligned} \quad (4)$$

A correção dos efeitos da distorção radial simétrica em um ponto na imagem é feita pela subtração das componentes  $\delta r_x$  e  $\delta r_y$  das coordenadas x e y respectivamente.

#### 2.2.1.2.2 Distorções descentrada

A distorção descentrada ocorre por imperfeições durante a construção e montagem do sistema de lentes nas câmaras (Wolf, 2000). Os motivos para ocorrência de tal distorções são variados, podem ser citados aqui a possível ocorrência de deslocamentos e desalinhamentos na montagem dos componentes da câmara e mesmo devido à deformações na fabricação da lente. Procedimentos rigorosos de fabricação tendem a diminuir este efeito em câmaras fotogramétricas.

Os efeitos da distorção descentrada podem ser divididos em duas componentes: radial e tangencial. Andrade (1998) apresenta o modelo matemático que expressa a distorção descentrada para as componentes nos eixos x e y do sistema referencial fotogramétrico:

$$\begin{aligned} \delta_x &= P_1[r^2 + 2 * (xc - x_0)^2] + 2P_2 * (xc - x_0) * (yc - y_0) \\ \delta_y &= P_2[r^2 + 2 * (yc - y_0)^2] + 2P_1 * (xc - x_0) * (yc - y_0) \end{aligned} \quad (5)$$

sendo:

- $\delta_x, \delta_y$  – componentes das distorções no eixos x e y; e
- $P_1, P_2$  – coeficientes da distorção descentrada.

#### 2.2.1.3 Modelo de afinidade

Outro possível erro nas coordenadas fotogramétricas pode ocorrer em casos onde a ortogonalidade entre os eixos do sistema não existe, a fim de modelar e corrigir tais erros, Tommaselli e Tozzi (1990) adaptaram o modelo criado, inicialmente, por Moniwa (1972), resultando na Equação 6.

$$\begin{aligned}\delta_{x_a} &= A * (xc - x_0) \\ \delta_{y_a} &= B * (xc - x_0)\end{aligned}\tag{6}$$

sendo:

- $\delta_{x_a}, \delta_{y_a}$  – componentes da afinidade nos eixos x e y; e
- $A, B$  – parâmetros de afinidade.

#### 2.3.4 Orientação exterior

Segundo Andrade (1998), a orientação exterior permite a recuperação da posição e atitude de cada fotografia segundo um referencial terrestre, geralmente aquele no qual se pretende realizar o trabalho fotogramétrico.

Pode-se afirmar que uma fotografia está orientada quando são conhecidas as coordenadas do centro de perspectiva e os ângulos de atitude que definem a posição do sensor em relação ao referencial adotado. Os ângulos que definem a atitude do sensor são os ângulos de Euler ( $\omega, \varphi$  e  $\kappa$ ), que estabelecem as rotações nos eixos do Sistema fotogramétrico para que coincidam com os eixos do sistema de coordenadas do espaço objeto.

A orientação exterior pode ser obtida de dois modos distintos, por orientação direta, ou seja, utilizando sistemas inerciais e de navegação para medir a posição e a atitude da câmara no momento da tomada da foto, ou por orientação indireta fazendo uso do processo de fototriangulação. Dentre as técnicas desenvolvidas é possível separar em métodos

analógicos e métodos analíticos, sendo que os métodos analógicos já foram praticamente todos abandonados.

No caso da fototriangulação analítica, é feito um ajustamento que pode ser realizado em uma única fotografia, em duas fotografias ou em um conjunto de fotografias simultaneamente (*Bundle Adjustment*). A vantagem do tratamento analítico se comparado ao tratamento analógico está na eliminação de etapas manuais e da necessidade de alguns equipamentos, tal eliminação do uso de equipamentos no trabalho faz com que sejam obtidos resultados mais precisos, uma vez que erros sistemáticos advindos de tais equipamentos não ocorrem.

No caso da fototriangulação analítica, o modelo matemático é constituído por equações projetivas, que tem como princípio a colinearidade entre pontos na imagem, o centro perspectivo da câmara e o ponto no espaço objeto. As equações utilizadas na fototriangulação analítica são conhecidas como equações de colinearidade (Equação 09), tais equações relacionam as coordenadas medidas no sistema fotogramétrico com as coordenadas no sistema referencial do espaço objeto.

$$\begin{bmatrix} x_i \\ y_i \\ -f \end{bmatrix} = \lambda_i * R(\omega, \varphi, \kappa) * \begin{bmatrix} X_i - X_{cp} \\ Y_i - Y_{cp} \\ Z_i - Z_{cp} \end{bmatrix} \quad (7)$$

$$\begin{aligned} x_i &= \lambda_i * [r_{11} * (X_i - X_{cp}) + r_{21} * (Y_i - Y_{cp}) + r_{31} * (Z_i - Z_{cp})] \\ y_i &= \lambda_i * [r_{21} * (X_i - X_{cp}) + r_{22} * (Y_i - Y_{cp}) + r_{23} * (Z_i - Z_{cp})] \\ -f &= \lambda_i * [r_{31} * (X_i - X_{cp}) + r_{32} * (Y_i - Y_{cp}) + r_{33} * (Z_i - Z_{cp})] \end{aligned} \quad (8)$$

O fator de escala  $\lambda_i$  pode ser eliminado dividindo a primeira e a segunda equação (Equação 8) pela terceira resultando na Equação 09.

$$\begin{aligned} x_i &= -f \left( \frac{r_{11} * (X_i - X_{cp}) + r_{12} * (Y_i - Y_{cp}) + r_{13} * (Z_i - Z_{cp})}{r_{31} * (X_i - X_{cp}) + r_{32} * (Y_i - Y_{cp}) + r_{33} * (Z_i - Z_{cp})} \right) \\ y_i &= -f \left( \frac{r_{21} * (X_i - X_{cp}) + r_{22} * (Y_i - Y_{cp}) + r_{23} * (Z_i - Z_{cp})}{r_{31} * (X_i - X_{cp}) + r_{32} * (Y_i - Y_{cp}) + r_{33} * (Z_i - Z_{cp})} \right) \end{aligned} \quad (9)$$

sendo:

- $(x_i, y_i, f)$  – coordenadas dos pontos no sistema fotogramétrico;

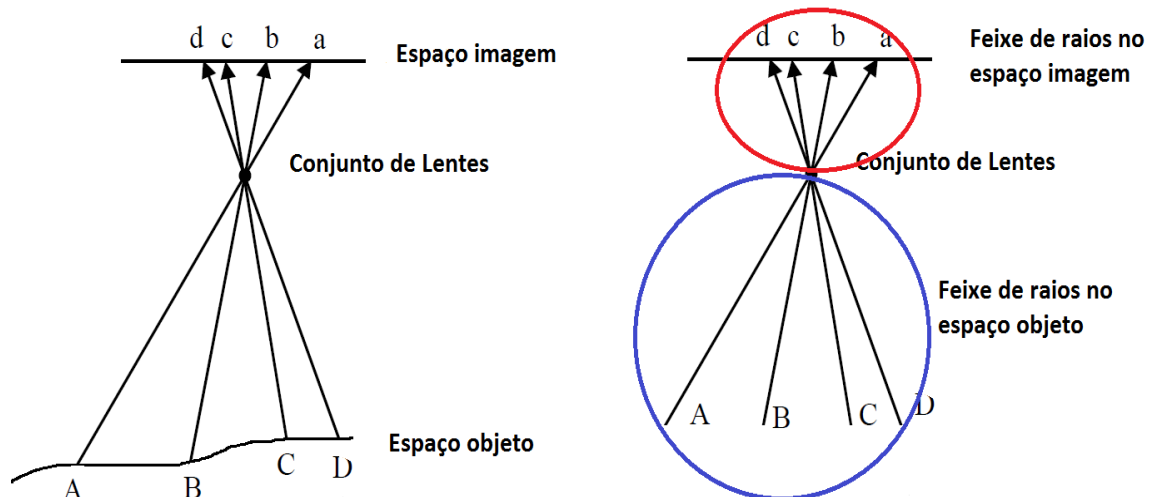
- $(r_{11}, r_{12}, \dots)$  – elementos da matriz de rotação 3D que relaciona os dois sistemas;
- $(X_i, Y_i, Z_i)$  – coordenadas dos pontos no espaço objeto; e
- $(X_{cp}, Y_{cp}, Z_{cp})$  – coordenadas do centro perspectivo da câmara no espaço objeto.

## 2.4 CALIBRAÇÃO DE CÂMARA

Através do processo de calibração são definidos os parâmetros para a correção dos erros sistemáticos, sendo estes essenciais na Fotogrametria. Em tese, imagens obtidas a partir de câmaras fotogramétricas permitem cálculos e mensurações mais precisas que àqueles obtidos com câmaras convencionais.

De acordo com Olivas e Andrade (1981), em se tratando de exatidão, é de fundamental importância, que se conheçam os parâmetros necessários à reconstrução do feixe perspectivo gerador da imagem fotográfica. Este, por sua vez, é definido pelo centro perspectivo e pelos pontos ao longo do plano focal, que de certo modo, deve ser considerado similar ao feixe de raios incidentes no conjunto de lentes no momento da exposição (Figura 5).

Figura 5 - Feixe de raios construídos considerando a condição de colinearidade entre pontos no espaço imagem, o centro perspectivo e pontos no espaço objeto



Fonte: Adaptado de Andrade (1998).

Andrade (1998) agrupa os métodos de calibração de câmaras fotogramétricas em métodos de campo e métodos de laboratório. Os métodos de laboratório são em geral realizados pelos fabricantes das câmaras, pois exigem equipamentos específicos.



### 2.4.1 Métodos de campo

Os métodos de campo, se comparados aos métodos de laboratórios, oferecem soluções mais completas, pois permitem a recuperação de todos os parâmetros no processo de calibração de câmaras, bem como a superabundância de observações, fato que torna possível o controle estatístico (ANDRADE, 1998).

Para a realização da calibração utilizando os métodos de campo, é realizado o processo de ajustamento por feixe de raios (*Bundle Adjustment*) considerando as equações de colinearidade com uma parametrização adicional, incluindo os parâmetros de orientação interior (Equação 10). Dentre as técnicas que utilizam deste processo destacam-se a autocalibração e a calibração em serviço.

$$\begin{aligned} xc - x_0 - \Delta x &= -f \left( \frac{r_{11} * (X - X_{cp}) + r_{12} * (Y - Y_{cp}) + r_{13} * (Z - Z_{cp})}{r_{31} * (X - X_{cp}) + r_{32} * (Y - Y_{cp}) + r_{33} * (Z - Z_{cp})} \right) \\ yc - y_0 - \Delta y &= -f \left( \frac{r_{21} * (X - X_{cp}) + r_{22} * (Y - Y_{cp}) + r_{23} * (Z - Z_{cp})}{r_{31} * (X - X_{cp}) + r_{32} * (Y - Y_{cp}) + r_{33} * (Z - Z_{cp})} \right) \end{aligned} \quad (10)$$

sendo:

- $\Delta x, \Delta y$  – As correções dos erros sistemáticos (distorção radial simétrica, distorção descentrada, etc).

O processo de ajustamento por feixe de raios considerando as equações de colinearidade com parâmetros adicionais é utilizada para recuperar os parâmetros, tanto de orientação interior, quanto os de orientação exterior. Neste processo deve ser considerada a existência de correlação entre os parâmetros de orientação interior ( $f, x_0, y_0$ ) e os parâmetros de orientação exterior referentes à posição do centro perspectivo ( $X_0, Y_0, Z_0$ ).

O Professor Dean Merchant<sup>1,2</sup> (1968, 1971 apud Andrade, 1998) realizou estudos sobre a dependência linear dos parâmetros considerados nas equações de colinearidade com parâmetros adicionais. Neste estudo foram consideradas fotos verticais e um terreno plano, como resultado foi verificado a existência de uma constante de multiplicação entre os parâmetros  $x_0$  e  $X_0$ ;  $y_0$  e  $Y_0$ ;  $f$  e  $Z_0$ , dada por  $-f/(Z-Z_0)$ .

<sup>1</sup> MERCHANT, D. C. *Calibration of the aerial photogrammetric system*. Rome Air Development Center, 1968.

<sup>2</sup> MERCHANT, D. C. *An investigation into dynamic aerial photographic system by calibration*. RADC, Final Technical Report, 1971.

Com o intuito de solucionar o problema de correlação entre os parâmetros, foi desenvolvido o método de câmaras convergentes, pela empresa DBA Systems (ANDRADE, 1998). Também tendo em vista o problema de correlação entre os parâmetros, Merchant desenvolveu o método de campos mistos. Ambos serão brevemente explicados nos subitens.

#### 2.4.1.1 Método de campos mistos

Tendo como base a razão entre os parâmetros, Merchant em 1972 desenvolveu o método de campos mistos. Neste método foram utilizados dois campos de testes: um montanhoso com poucos pontos conhecidos, com o intuito de quebrar a dependência linear entre os parâmetros; e outro plano, com vários alvos, para permitir a melhor determinação dos demais parâmetros (ANDRADE, 1998).

No início dos anos 80 Andrade e Olivas (1981), utilizaram o conceito desenvolvido por Merchant para implantar um campo de calibração no Brasil.

#### 2.4.1.2 Método das câmaras convergentes

Em se tratando de calibração de câmaras fotogramétricas, um dos métodos que foi muito aplicado foi o método das câmaras convergentes, por ser um método simples e de fácil aplicação. Normalmente, este método é aplicado em câmaras para fotos a curta distância.

O método exige apenas a fixação arbitrária de um referencial e de um fator de escala. É suficiente, por exemplo, fixar com injunção de posição o centro perspectivo de uma foto, com injunções de ângulo a orientação do referencial do espaço objeto em relação ao fotogramétrico e o fator de escala (ANDRADE, 1998). Ainda segundo Andrade (1998), torna-se necessário ao menos uma foto girada em torno do eixo Z da câmara em  $90^\circ$ , a fim de separar os coeficientes da distorção radial simétrica daqueles da distorção descentrada. Logo, as condições mínimas para calibrar uma câmara utilizando esse método exigem três fotos: duas convergentes entre si de  $90^\circ$  e uma com um giro  $\kappa$  em relação às outras de  $90^\circ$ .

#### 2.4.1.3 Auto calibração

Remondino e Fraser (2006) utilizam o termo auto-calibração quando, a partir de um conjunto de imagens, os parâmetros da câmara e da cena imageada são recuperados ao fim do processo de calibração. É importante ressaltar que neste tipo de calibração é possível a utilização de campo de calibração 3D, embora um dos méritos do método é que ele não exige injeção de qualquer informação de ponto de controle.

Consiste na técnica de calibração que faz uso das equações de colinearidade com parâmetros adicionais a fim de recuperar os parâmetros envolvidos no processo de ajustamento. Tal método faz uso do ajustamento por feixe de raios, em que para a solução faz-se necessário um mínimo de 7 injeções. Neste método usualmente é fixada a posição e orientação de, no mínimo, uma das câmaras (totalizando 6 injeções) e uma escala no espaço objeto. Além disso, Brown (1989) enumera alguns critérios que devem ser adotados afim de garantir o sucesso da execução da calibração:

1. Uma única câmara deve ser utilizada para tomar um mínimo de três imagens do objeto;
2. Tanto a geometria interna da câmara quanto os pontos a serem medidos devem permanecer estáveis durante o processo de medida;
3. A rede fotogramétrica deve ser rígida;
4. No mínimo uma imagem deve ser tomada com um ângulo significativamente diferente dos outros; e
5. Um grande número de pontos bem distribuídos deve ser utilizado.

#### 2.4.1.4 Calibração em serviço (*on-the-job*)

Segundo Clark e Fryer (1998), os termos calibração em serviço e auto-calibração são, por vezes, confundidos, sendo que de fato a auto-calibração, diferente da calibração em serviço, não necessita de pontos de controle. Como o próprio nome já diz, tal método é realizado simultaneamente ao processo de fototriangulação, para isto são colocados pontos de controle circundando o objeto (feição de interesse), em seguida é realizada a tomada de fotos para que os parâmetros sejam estimados juntamente com as coordenadas do objeto de interesse.

Este método de calibração consiste de um ajustamento que considera as equações de colinearidade com parâmetros adicionais. Cramer (2016) afirma que este método é capaz de recuperar os parâmetros de orientação interior da câmara considerando as condições ambientais do momento da realização da tomada de fotos do objeto em estudo. Segundo o mesmo autor, a calibração em serviço difere dos demais métodos, pois neste método o objetivo maior é a reconstrução do objeto imageado.

#### **2.4.2 Análise de significância dos parâmetros**

De acordo com Galo et al. (2008), o conjunto de parâmetros que deve ser considerado para cada câmara pode variar, sendo assim de extrema importância avaliar qual o melhor conjunto de Parâmetros de Orientação Interior (POI) que modelam as distorções de um determinado equipamento.

Galo et al. (2008) citam como exemplos de análise de significância, teste estatísticos para parâmetros isolados e para grupos de parâmetros, a análise da magnitude de cada componente do modelo de distorção, a análise de correlação entre os parâmetros e a análise baseada em componentes principais. Formulações matemáticas e procedimentos de análise de significância citados anteriormente podem ser encontrados em Merchant (1979, apud Galo et al., 2008), Johnson e Wichern (1992), Zhong (1997), Andrade (1998) e Camargo (1999).

A análise de magnitude dos parâmetros pode ser feita considerando apenas a magnitude do parâmetro e a magnitude do seu desvio-padrão, sendo esta não tão interessante por não considerar o tamanho da influência do mesmo no espaço imagem ou as possíveis correlações entre parâmetros. Outra possibilidade é considerar o efeito de correção que o parâmetro proporciona ao ser aplicado no modelo de distorção considerado.

Alternativa para a análise da significância é a aplicação de testes de hipóteses baseados na distribuição F, em que é testada a hipótese que o parâmetro é estatisticamente igual a zero. Para a aplicação do teste, Zhong (1997) e Camargo (1999) apresentam a Equação 11 para parâmetros individuais, a Equação 12 para conjunto de parâmetros e a Equação 13 para avaliar a significância. Tendo como base o vetor dos parâmetros ajustados e a matriz cofatora, obtidos ao final do ajustamento pelos mínimos quadrados, podem ser aplicados testes estatísticos tanto para parâmetros isolados quanto para conjuntos de parâmetros.

$$F = \frac{x_i^2}{\sigma_{x_i}^2} \quad (11)$$

$$F = \frac{\vec{x}^t * Q^{-1} * \vec{x}}{p * \hat{\sigma}_0^2} \quad (12)$$

$$F < F_{(1-\alpha, p, gl)} \quad (13)$$

sendo:

F – valor da distribuição F calculada, tanto para parâmetros individuais quanto para os conjuntos de parâmetros;

$x_i^2$  – quadrado do valor do parâmetro considerado;

$\sigma_{x_i}^2$  – variância do parâmetro;

$\vec{x}$  – vetor dos parâmetros do conjunto considerado;

Q – matriz cofatora dos parâmetros do conjunto;

p – número de parâmetros; e

$\hat{\sigma}_0^2$  – variância a posteriori.

### 2.4.3 Análise de estabilidade dos parâmetros

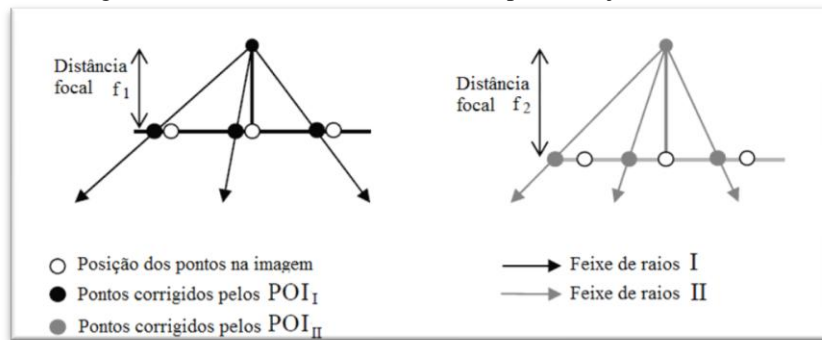
Segundo Habib et al. (2005), a análise da estabilidade tem como principal objetivo concluir se dois conjuntos de parâmetros de orientação interior podem ser considerados equivalentes. A estabilidade pode ser testada a partir de análise estatística ou por similaridade dos feixes de raios.

De acordo com Pullivelli (2005), testes estatísticos para avaliação da estabilidade de câmaras incluem um número de particularizações que tornam o método impraticável. Segundo o mesmo autor, por vezes, o teste estatístico pode fornecer resultados pessimistas, descartando a equivalência de conjuntos de POI em casos onde, do ponto de vista fotogramétrico, eles poderiam ser considerados iguais.

Considerando que o princípio da calibração é a obtenção de parâmetros que possibilitem a reconstrução do feixe de raios, é importante que os métodos de análise de estabilidade levem em consideração tal reconstrução. A análise de estabilidade baseada na similaridade de feixes de raios considera, um mínimo de, dois feixes reconstruídos a partir de conjuntos de POI determinados por calibrações distintas (Figura 6). Para tal, compara-se

numericamente as discrepâncias das posições de um mesmo conjunto de pontos corrigidos a partir de, ao menos, dois conjuntos de POI (Figura 7).

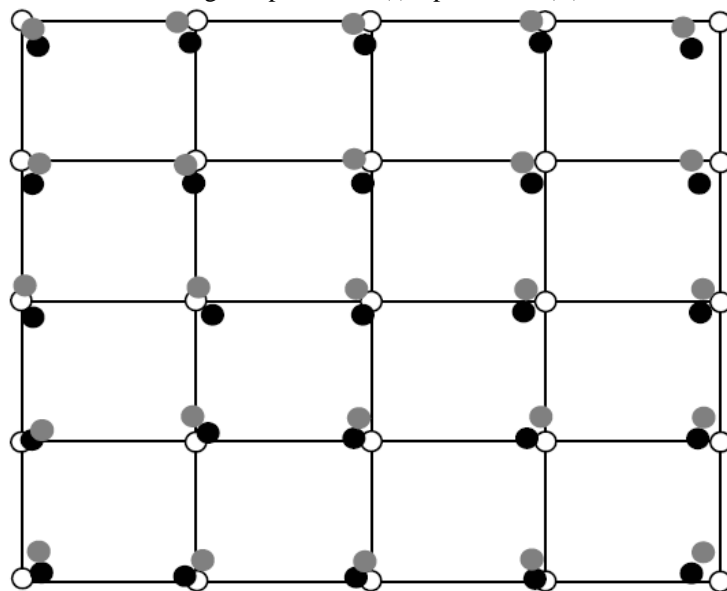
Figura 6 - Feixes de raios reconstruídos pelos conjuntos de POI



Fonte: Adaptado de Habib e Morgan (2005).

Os dois conjuntos de pontos, corrigidos pelos POI (I) e pelos POI (II), podem ser projetados sobre um plano focal comum, que pode ser o plano da focal média, juntamente com os pontos não corrigidos das distorções, para que seja mais fácil visualizar as discrepâncias resultantes. Na Figura 7 é possível visualizar um exemplo do grid com os pontos projetados.

Figura 7 - Grid com a representação das posições dos pontos não corrigidos das distorções e dos pontos corrigidos pelos POI (I) e pelos POI (II)



Fonte: Pulivelli (2005).

Dentre os métodos existentes para análise de similaridade dos feixes de raios, nesta seção estão descritos os métodos: *Misclosure Method* (MIS); *Zero Rotation Method* (ZROT); *Rotation Method* (ROT); e *Single Photo Resection Method* (SPR).

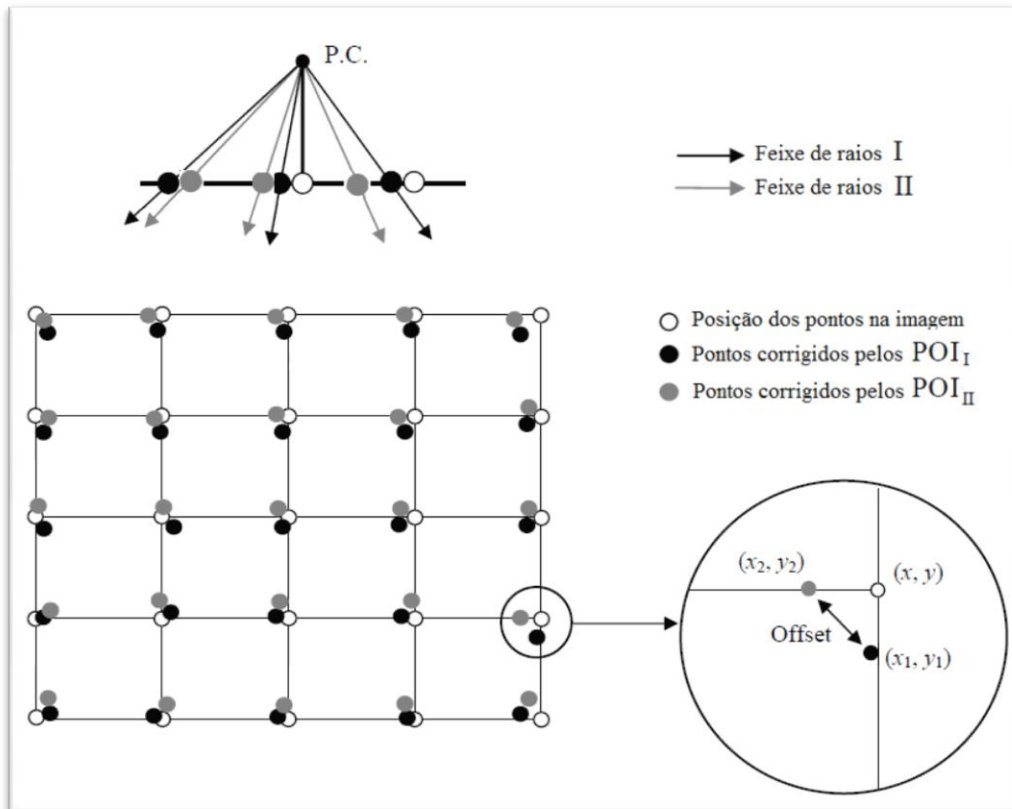
O *Misclosure Method* considera os dois conjuntos com o mesmo centro perspectivo, mesma distância focal e que não existe rotação entre os feixes. O *Zero Rotation Method* assume o mesmo centro perspectivo, que não há rotação entre os feixes, mas diferente do MIS, considera distâncias focais diferentes para os dois conjuntos de POI. O *Rotation Method* considera o mesmo centro perspectivo, diferentes distâncias focais, mas diferente dos métodos já citados, este considera a possibilidade de rotação entre os feixes. Por fim, o *Single Photo Resection Method* considera os dois feixes em posições diferentes no espaço e as demais considerações feitas no método ROT.

#### 2.4.3.1 *Misclosure method*

A forma que o feixe de raios assume é dependente da posição do centro perspectivo, da distância focal e das posições dos pontos sobre o plano focal. No caso do MIS, as distâncias focais advindas dos conjuntos de POI são consideradas iguais, os centros perspectivos são considerados coincidentes, não é admitida rotação entre os feixes e a comparação entre as posições dos pontos corrigidos é resumida ao espaço 2D.

O método é aplicado considerando um grid sobre a imagem e um valor de distância focal “f” padrão, ou médio, para os conjuntos de POI analisados. Importante levar em consideração a porção da imagem que o grid ocupa, sendo o ideal 100%. Partindo das coordenadas dos pontos (x, y), sem correção, da distância focal considerada “f” e dos conjuntos de POI, são calculadas as posições corrigidas resultando em duas posições para cada ponto do grid. A Figura 8 mostra uma vista lateral dos feixes sobrepostos e uma vista superior (projeção dos pontos corrigidos sobre o grid).

Figura 8 - Grid com pontos originais, pontos corrigidos pelos POI (I) e pontos corrigidos pelos POI (II)



Fonte: Adaptado de Pulivelli (2005).

As discrepâncias, nas componentes x e y, entre os conjuntos de pontos corrigidos são dados pela Equação 14. Com base nos valores de discrepância calculados é feito a somatória e calculada a raiz quadrada do erro médio quadrático (Equação 15). O valor de REMQ é comparado ao valor do desvio-padrão esperado e caso o valor de REMQ seja menor que o limite estipulado os dois conjuntos de POI podem ser considerados similares.

$$\Delta_x^i = x_2^i - x_1^i \quad \Delta_y^i = y_2^i - y_1^i \quad (14)$$

$$REMQ = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_1^n ((\Delta_x^i)^2 + (\Delta_y^i)^2)} \quad (15)$$

sendo:

$\Delta_x^i, \Delta_y^i$  - Discrepâncias nas componentes x e y; e

$(x_1^i, y_1^i), (x_2^i, y_2^i)$  - Coordenadas corrigidas pelos POI (I) e POI (II) respectivamente.

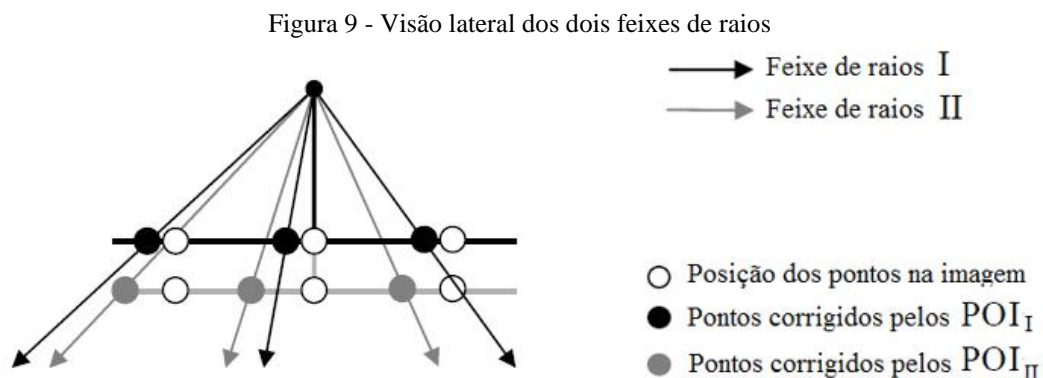


Os procedimentos para a aplicação do método MIS podem ser resumidos da seguinte forma:

1. Definição de uma malha de pontos;
2. Definição da distância focal que será adotada para a correção das distorções, usualmente é considerada a distância focal média;
3. Realizar a orientação interior, corrigindo os pontos do grid considerando os dois conjuntos de POI;
4. Calcular as discrepâncias resultantes entre os pontos correspondentes corrigidos pelos conjuntos de POI; e
5. Calcular e analisar o REMQ obtido e compará-lo com um limiar preestabelecido.

#### 2.4.3.2 Zero rotation method

O método ZROT considera os centros perspectivos coincidentes, e diferente do método MIS, considera duas distâncias focais (“ $f_1$ ” e “ $f_2$ ”) no processo de correção a partir dos POI. A partir de uma malha de pontos na imagem (grid), do centro perspectivo e dos conjuntos de POI, são calculadas as coordenadas corrigidas para cada ponto do grid (Figura 9).



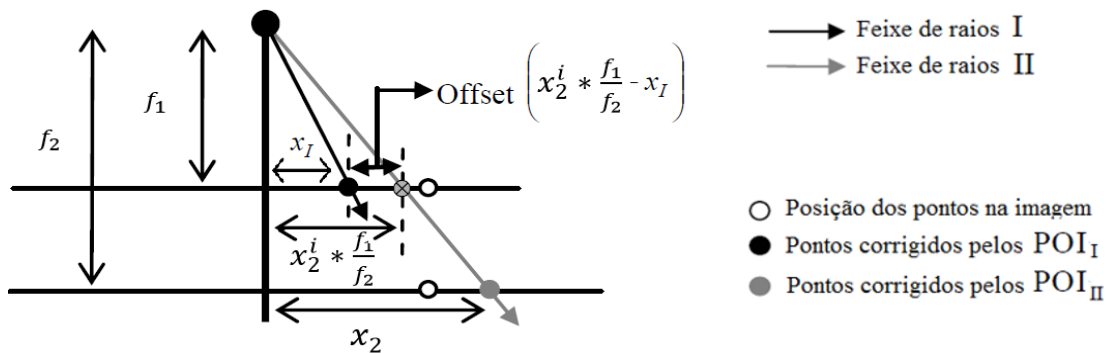
Fonte: Adaptado de Habib e Morgan (2005).

No caso do método ZROT é necessário que seja realizada a projeção do conjunto de pontos corrigidos por um dos conjuntos de POI para o plano focal do outro conjunto de POI, tal projeção é realizada utilizando a Equação 16 e pode ser visualizado na Figura 10.

$$x_2^i = x_2^i * \frac{f_1}{f_2}$$

$$y_2^i = y_2^i * \frac{f_1}{f_2}$$
(16)

Figura 10 - Projeção dos pontos corrigidos pelos POI (II) para o plano definido pelos POI (I)



Fonte: Adaptado de Habib et al. (2008).

Após a projeção, os valores de offset entre as coordenadas corrigidas pelos POI (I) e as coordenadas corrigidas pelos POI (II) podem ser calculadas e o valor de REMQ pode ser obtido pelas mesmas equações utilizadas no métodos MIS. Os conjuntos de POI serão analisados pela comparação do REMQ calculado e um desvio-padrão esperado para a medida de coordenadas na imagem.

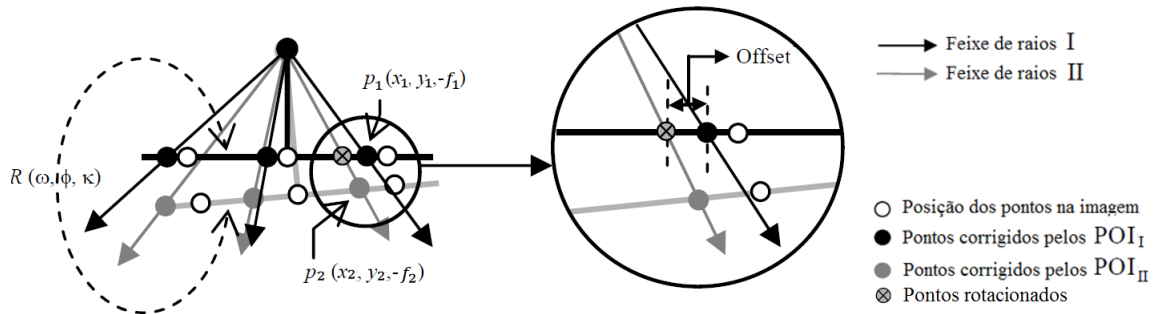
Os procedimentos para a aplicação do método ZROT podem ser resumidos da seguinte forma:

1. Definição de uma malha de pontos;
2. Realizar a orientação interior, corrigindo os pontos do grid considerando os dois conjuntos de POI;
3. Calcular as coordenadas dos pontos corrigidos considerando os POI (II) para o plano focal dado pela distância focal  $f_1$ ;
4. Calcular os offsets resultantes entre os pontos correspondentes corrigidos pelos conjuntos de POI; e
5. Calcular o REMQ obtido e compará-lo com um limiar preestabelecido.

### 2.4.3.3 Rotation method

O método ROT assume que os dois feixes de raios possuem centros perspectivos coincidentes, mas que pode haver diferença de orientação (Figura 11). De acordo com Habib et al. (2008), tal método permite verificar se há um conjunto de ângulos de rotação ( $\omega$ ,  $\varphi$ ,  $\kappa$ ) que possa ser aplicado para coincidir o primeiro feixe de raios ao segundo feixe. A determinação do conjunto de ângulos de rotação é feita aplicando um ajustamento pelo método dos mínimos quadrados (MMQ).

Figura 11 - Feixes de raios sobrepostos e rotacionados



Fonte: Adaptado de Habib et al. (2008).

O modelo matemático que relaciona as coordenadas corrigidas pelos POI (I) e as coordenadas corrigidas pelos POI (II) é dado pela Equação 17.

$$\begin{bmatrix} x_1^i \\ y_1^i \\ -f_1 \end{bmatrix} = \lambda * R^t(\omega, \varphi, \kappa) * \begin{bmatrix} x_2^i \\ y_2^i \\ -f_2 \end{bmatrix} \quad (17)$$

O fator de escala  $\lambda$  pode ser eliminado dividindo a primeira e a segunda equação (Equação 18) pela terceira.

$$\begin{aligned} x_1^i &= \lambda * (r_{11} * x_2^i + r_{21} * y_2^i - r_{31} * f_2) \\ y_1^i &= \lambda * (r_{12} * x_2^i + r_{22} * y_2^i - r_{32} * f_2) \\ -f_1 &= \lambda * (r_{13} * x_2^i + r_{23} * y_2^i - r_{33} * f_2) \end{aligned} \quad (18)$$

Por fim o modelo matemático aplicado no ajustamento é dado pela Equação

$$\begin{aligned}
 x_1^i &= -f_1 \left( \frac{r_{11} * x_2^i + r_{21} * y_2^i - r_{31} * f_2}{r_{13} * x_2^i + r_{23} * y_2^i - r_{33} * f_2} \right) \\
 y_1^i &= -f_1 \left( \frac{r_{12} * x_2^i + r_{22} * y_2^i - r_{32} * f_2}{r_{13} * x_2^i + r_{23} * y_2^i - r_{33} * f_2} \right)
 \end{aligned}
 \tag{19}$$

Com base nos conjuntos de “n” pontos corrigidos por cada um dos conjuntos de POI, teremos 2n observações e o ajustamento pelo método dos mínimos quadrados resultará nos ângulos que possibilitam a melhor coincidência entre os feixes de raios, e na variância das observações ( $\sigma_0^2$ ). Quanto menor o valor de variância calculada no ajustamento, melhor os feixes estarão coincidindo. A similaridade dos feixes será aceita caso a variância obtida ao fim do processo de ajustamento esteja dentro de um intervalo de variância, das coordenadas medidas na imagem, predeterminado.

Os procedimentos para a aplicação do método ROT podem ser resumidos nas seguintes etapas:

1. Definição de um grid sintético, de preferência que ocupe aproximadamente 100% do quadro da imagem;
2. Realizar a orientação interior, corrigindo os pontos do grid considerando os dois conjuntos de POI;
3. Considerar a rotação entre os feixes e realizar o ajustamento, seguindo o modelo matemático mostrado anteriormente; e
4. Analisar a variância obtida ao fim do ajustamento e compará-la com um limiar preestabelecido.

#### 2.4.3.4 *Single Photo Resection Method*

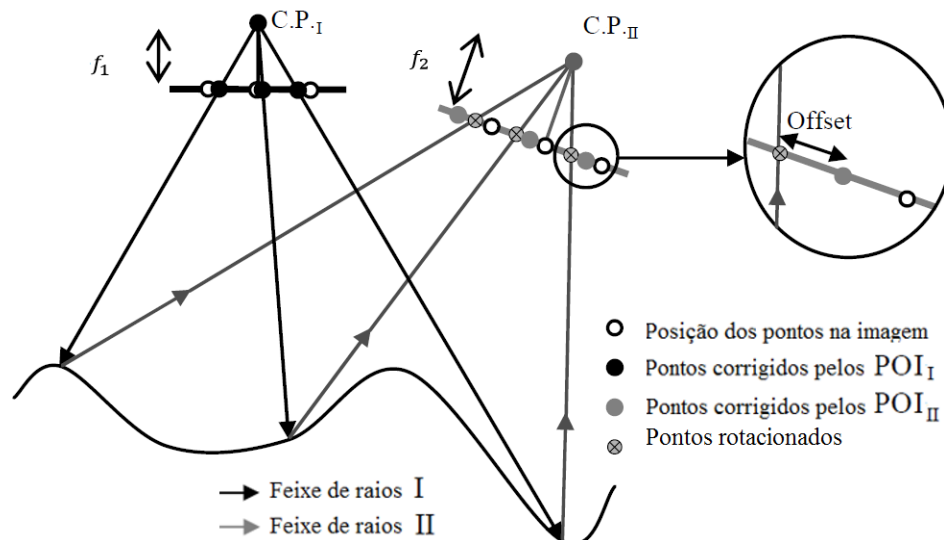
De acordo com Habib et al. (2008), o método SPR tem menos restrições, do ponto de vista da formação dos feixes de raios, se comparado aos métodos MIS, ZROT e ROT. Neste método, considera-se que os feixes podem apresentar translações e rotações entre si. A Figura 12 apresenta uma ilustração de como o método é aplicado.

De maneira simplificada, o método SPR consiste em um conjunto de pontos corrigidos a partir de um conjunto de POI formando um feixe de raios que partem do centro perspectivo e interceptam um objeto arbitrário no espaço objeto. Em seguida os pontos no

espaço objeto são utilizados no processo de resseção fotogramétrica a fim de retornar os parâmetros de orientação exterior, considerando um segundo feixe de raios, feixe este formado pelos pontos fotogramétricos orientados a partir do segundo conjunto de POI. O método pode ser dividido nas seguintes etapas:

1. Definição de um grid de pontos;
2. Realizar a orientação interior, corrigindo os pontos do grid considerando o conjunto de POI (I);
3. A partir de uma posição e orientação da imagem (podemos considerar o caso de fotografia vertical para simplificar os cálculos), dos pontos corrigidos das distorções e de um modelo de superfície (pode ser arbitrário) calcular as coordenadas dos pontos no espaço objeto;
4. Realizar a orientação interior, corrigindo os pontos do grid considerando o conjunto de POI (II);
5. No ajustamento realizado no processo de resseção fotogramétrica, considerar os pontos corrigidos das distorções a partir dos POI (II) como observação e recuperar os parâmetros de orientação exterior que ajuste o segundo feixe de raios ao espaço objeto; e
6. Analisar e comparar a variância resultante do processo de ajustamento com um limiar preestabelecido.

Figura 12 - Feixes de raios considerando translações e rotações entre os centros perspectivos (CP)



Fonte: Adaptado de Habib et al. (2008).

## 2.6 CONTROLE DE QUALIDADE

Quando se trata da elaboração de produtos cartográficos, torna-se necessário efetuar um controle de qualidade com procedimentos adequados de revisão e validação da identificação de erros e inconsistências, devendo se analisar qual a finalidade dos dados espaciais avaliados e a qualidade que se deseja (GUPTILL e MORRISON, 1997).

No Brasil, os produtos cartográficos devem atender ao Padrão de Exatidão Cartográfica dos Produtos Cartográficos Digitais (PEC-PCD), extraídos da Especificação Técnica dos Produtos de Conjuntos de Dados Geoespaciais (ET-PCDG) (Tabela 1 e Tabela 2). Estes valores são propostos para os produtos digitais produzidos após a publicação da ET-PCDG e complementam os estabelecidos, para produtos impressos, no Decreto nº 89.817, de 20 de junho de 1984. Para que um produto digital possa ser aceito como produto de Referência do Sistema Cartográfico Nacional (SCN), e consequentemente para a INDE, noventa por cento (90%) dos pontos coletados no produto cartográfico, quando comparados com as suas coordenadas levantadas em campo, devem apresentar erros iguais ou inferiores ao previsto no PEC-PCD.

Tabela 1 - PEC-PCD para planimetria

PEC-PCD	1:1000		1:2000		1:5000		1:10000		1:25000		1:50000	
	PEC (m)	EP (m)	PEC (m)	EP (m)	PEC (m)	EP (m)	PEC (m)	EP (m)	PEC (m)	EP (m)	PEC (m)	EP (m)
A	0,28	0,17	0,56	0,34	1,40	0,85	2,80	1,70	7,00	4,25	14,00	8,51
B	0,50	0,30	1,00	0,60	2,50	1,50	5,00	3,00	12,50	7,50	25,00	15,00
C	0,80	0,50	1,60	1,00	4,00	2,50	8,00	5,00	20,00	12,50	40,00	25,00
D	1,00	0,60	2,00	1,20	5,00	3,00	10,00	6,00	25,00	15,00	50,00	30,00

Fonte: Adaptado de CONCAR-EB (2011).

Tabela 2 - PEC-PCD para curvas de nível

PEC-PCD	1:1000 Eqd = 1 m		1:2000 Eqd = 1 m		1:5000 Eqd = 2 m		1:10000 Eqd = 5 m		1:25000 Eqd = 10 m		1:50000 Eqd = 20 m	
	PEC (m)	EP (m)	PEC (m)	EP (m)	PEC (m)	EP (m)	PEC (m)	EP (m)	PEC (m)	EP (m)	PEC (m)	EP (m)
A	0,50	0,33	0,50	0,33	1,00	0,67	2,50	1,67	5,00	3,33	10,00	6,67
B	0,60	0,40	0,60	0,40	1,20	0,80	3,00	2,00	6,00	4,00	12,00	8,00
C	0,75	0,50	0,75	0,50	1,50	1,00	3,75	2,50	7,50	5,00	15,00	10,00
D	1,00	0,60	1,00	0,60	2,00	1,20	5,00	3,00	10,00	6,00	20,00	12,00

Fonte: Adaptado de CONCAR-EB (2011).

Segundo Galo e Camargo (1994) a precisão está ligada à dispersão das observações em torno do valor médio, enquanto que a acurácia (ou exatidão) está relacionada com a proximidade do valor real, ou seja, sem a influência de erros sistemáticos.

Para Gemael (1994) o termo precisão está vinculado apenas a efeitos aleatórios (à dispersão das observações), enquanto que a acurácia vincula-se a ambos, efeitos aleatórios e sistemáticos.

A fim de estudar a influência dos fatores estudados e suas interações cruzadas durante a fase de ajuste, uma análise de variância pode ser utilizada. Sendo que pode ser utilizada a raiz quadrada média do erro planimétrico (REM<sub>Q2D</sub>) calculada sobre os pontos (AGUILAR et al. 2013).

As formulações para as análises estatísticas, de tendência e precisão, são baseadas nas discrepâncias entre as coordenadas de pontos obtidos na carta, ou no produto que esteja sendo submetido à análise, e as coordenadas de pontos homólogos no terreno. Maiores detalhes quanto ao desenvolvimento e uso das formulações podem ser encontrados em Merchant (1982), Galo e Camargo (1994) e Amorim (2000).

### 2.6.1 Análise de tendências utilizando teste estatístico *t-student*

Esta análise baseia-se nas discrepâncias ( $\Delta X_i$ ) das coordenadas E e N obtidas como referências ( $X_i$ ) e as coordenadas E e N medidas na carta ( $X_i^c$ ). Este cálculo pode ser visto de acordo com a Equação 20.

$$\Delta X_i = X_i - X_i^c \quad (20)$$

Obtidas as discrepâncias de cada ponto para as coordenadas E e N, calcula-se a média das mesmas ( $\overline{\Delta X}$ ),

$$\overline{\Delta X} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \Delta X_i \quad (21)$$

Após obtidas as médias, calcula-se então a variância das discrepâncias amostrais ( $S_{\Delta X}^2$ ),

$$S_{\Delta X}^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (\Delta X_i - \overline{\Delta X})^2 \quad (22)$$

Para se analisar a tendência, duas hipóteses devem ser analisadas:

$$\begin{aligned} H_0: \overline{\Delta X} &= 0 \\ H_1: \overline{\Delta X} &\neq 0 \end{aligned} \quad (23)$$

Visto as hipóteses, deve-se realizar o teste estatístico amostral *t-student* para cada coordenada (E e N), calculando da seguinte forma:

$$t_x = \frac{\overline{\Delta X}}{S_{\Delta X}} \sqrt{n} \quad (24)$$

Calculado o valor  $t_x$ , este deve ser comparado com valor *t-student* tabelado, da seguinte forma:

$$|t_x| < t_{(n-1, \alpha/2)} \quad (25)$$

sendo:

- $n$  – é o tamanho da amostra analisada;
- $\alpha$  – é o nível de significância; e
- $(n-1)$  – equivale aos graus de liberdade.

Sendo assim, realizado o teste, se a estatística amostral estiver fora do intervalo de confiança, rejeita-se a hipótese nula, sendo que o produto não pode ser considerada como livre de tendências significativas na coordenada avaliada, para um determinado nível de confiança. Caso note a existência de tendências, deve-se tentar identificá-las e seu efeito pode ser minimizado.



### 2.6.2 Análise da precisão utilizando o teste estatístico qui-quadrado

A análise de precisão, compara o desvio padrão ou erro padrão das discrepâncias das coordenadas E e N ( $S_{\Delta E}, S_{\Delta N}$ ) com o especificado para cada classe a que se deseja testar. Sendo assim, o teste de hipótese o qual deve ser analisado é o seguinte:

$$\begin{aligned} H_0 : S_{\Delta X}^2 &= \sigma_x^2 \\ H_1 : S_{\Delta X}^2 &\neq \sigma_x^2 \end{aligned} \quad (26)$$

Para o cálculo do Erro Padrão para as coordenadas planimétricas (E e N), ou seja, Erro Padrão Planimétrico ( $\sigma_E, \sigma_N$ ), utiliza-se da seguinte equação:

$$\sigma_E = \sigma_N = \frac{EP_{plan}}{\sqrt{2}} \quad (27)$$

Para verificação do valor calculado, o teste estatístico utilizado foi o Qui-quadrado ( $\chi^2$ ). Para tal, deve-se calcular o valor ( $\chi^2$ ) para cada uma das componentes E, N e H utilizando a seguinte equação:

$$\chi_X^2 = (n - 1) \frac{S_{\Delta X}^2}{\sigma_X^2} \quad (28)$$

sendo:

- n – o tamanho da amostra; e
- (n - 1) – o valor dos graus de liberdade.

Para análise, os valores calculados devem atender a seguinte equação:

$$\chi_X^2 \leq \chi_{n-1, \alpha}^2 \quad (29)$$

sendo:

- n – é o tamanho na amostra; e
- (n-1) – é o valor dos graus de liberdade.

## 3 MATERIAIS E MÉTODOS

### 3.1 INFRAESTRUTURA DE APOIO DISPONÍVEL

A infraestrutura utilizada para a realização deste trabalho foi:

- Laboratório de Fotogrametria Digital;
- Laboratório de Cartografia Digital e SIG;
- Laboratório de Topografia e Geodésia;
- Equipamentos de informática e Softwares;

### 3.2 MATERIAIS E EQUIPAMENTOS

Os materiais e equipamentos utilizados para a realização deste trabalho foram:

- RPAS modelo eBee<sup>1</sup>;
- Computador<sup>1</sup> com Processador Intel i7 - 3.3 Ghz - 15 MB CACHE 16 GB de Memória RAM - DDR4 - HD 2 TB;
- Paquímetro<sup>2</sup> PANTEC 2000mm / 80", leitura direta de 0,020 mm;
- Software Pix4Dmapper pro<sup>1</sup>;
- Software Erdas Imagine;
- Software Emotion 2.4.4<sup>1</sup>;
- Software CC (GALO, 2015);
- Software para leitura de alvos na imagem (Silva et al., 2014);
- PCCDU;
- Software MatLab;
- Software Trimble Business Center (TBC) versão 2.80; e
- Receptores GNSS L1/L2 HIPER GGD.

<sup>1</sup>Equipamento/Software adquirido por meio de recursos obtidos por projeto de pesquisa financiado pela FAPESP (Processo n° 2014/01841-1).

<sup>2</sup> Obtido com recursos do CNPq (Processo n° 481047/2004-2).

A câmara utilizada neste trabalho é uma câmara digital, Canon ELPH 110 HS (Figura 13), sendo que os parâmetros de calibração (distância focal, coordenadas do ponto principal, coeficientes da distorção descentrada e da distorção radial simétrica) foram fornecidos pelo fabricante (Canon) e estão apresentados no Quadro 1. Demais detalhes sobre a câmara estão apresentados na Tabela 3.

Quadro 1 - Parâmetros da câmara Canon ELPH 110 HS

Parâmetros fornecidos pelo fabricante	
$f$	4,38311 (mm)
$P_x$	3,15437 (mm)
$P_y$	2,276230 (mm)
$R^1$	-0,0409479
$R^2$	0,0381690
$R^3$	-0,0188473
$T^1$	-0,0024411
$T^2$	0,0038236

Fonte: Próprio autor.

Os parâmetros  $P_x$  e  $P_x$  correspondem à posição do ponto principal no sensor. Os parâmetros  $R^1$ ,  $R^2$  e  $R^3$  correspondem aos coeficientes da distorção radial simétrica. Por fim, os parâmetros  $T^1$  e  $T^2$  correspondem aos coeficientes da distorção descentrada. Detalhes sobre a formulação utilizada pelo *software* Pix4D podem ser encontrados na documentação disponível no site<sup>1</sup>.

Tabela 3 - Dados da câmara

<b>Câmara</b>	<b>Canon ELPH 110 HS</b>
Distância focal nominal	4,3 - 21,5 (mm)
Tipo do sensor	CMOS
Dimensões do sensor	6,17219 - 4,62914 (mm)
Dimensões da imagem	4608 - 3456 (pixels)
Tamanho do pixel	0,0013368 (mm)

Fonte: Próprio autor.

<sup>1</sup> "<https://support.pix4d.com/hc/en-us/articles/202559089-How-are-the-Internal-and-External-Camera-Parameters-defined-#gsc.tab=0>"

Figura 13 - Câmera Canon ELPH 110 HS



Fonte: Próprio autor.

A plataforma utilizada para a tomada de fotografias aéreas é considerada um RPAS (Figura 14), fabricado em polipropileno expandido, possuindo apenas 0,630 kg de peso e opera em sincronismo com uma estação de controle terrestre, que possibilita a tomada de decisões por parte do operador do equipamento durante a execução do voo.

Figura 14 - RPAS modelo eBee



Fonte: SenseFly.

### 3.3 MÉTODO

O objetivo principal deste trabalho consiste em avaliar a estabilidade dos parâmetros de calibração de uma câmara digital convencional e a influência de tais parâmetros na fototriangulação. Para tanto, foram realizadas as seguintes etapas:

1. Realização de calibrações, análises de significância e de estabilidade dos parâmetros de OI.
2. Análises da influência dos POI na fototriangulação.

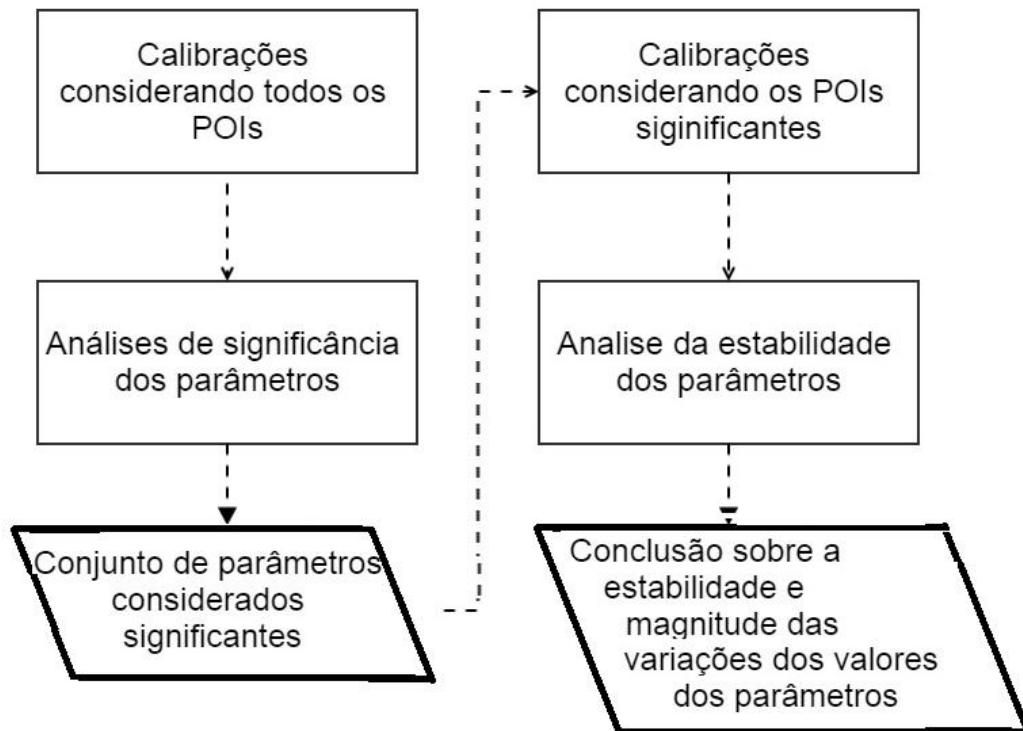
#### 3.3.1 Calibração e análises dos POI

Esta etapa tem como principal objetivo analisar a qualidade dos parâmetros de orientação interior realmente relevantes para a câmara em questão e sobre a estabilidade dos mesmos. Isto porque, baseado no resultado da estabilidade é possível inferir sobre a melhor estratégia de calibração para a mesma.

Inicialmente, foram realizadas calibrações por métodos terrestres no próprio campus da FCT/UNESP de Presidente Prudente, onde existe um campo de calibração. Para tal, foi utilizado o método de calibração de campo e os parâmetros de orientação interior foram recuperados após o processamento das imagens no software CC. A fim de minimizar a correlação existente entre alguns dos parâmetros de orientação interior e os parâmetros de orientação exterior, foram utilizados conceitos dos métodos de câmaras convergentes, campos 3D e autocalibração.

Os parâmetros estimados nas calibrações foram analisados por meio da análise de significância, conforme testes estatísticos descritos em Galo et al. (2008). Com base nos resultados da análise de significância, os parâmetros de interesse foram redefinidos. Por fim, foram realizadas análises da estabilidade dos conjuntos de parâmetros com base nos métodos ZROT, ROT e SPR.

Figura 15 - Análise dos POI



Fonte: Próprio autor.

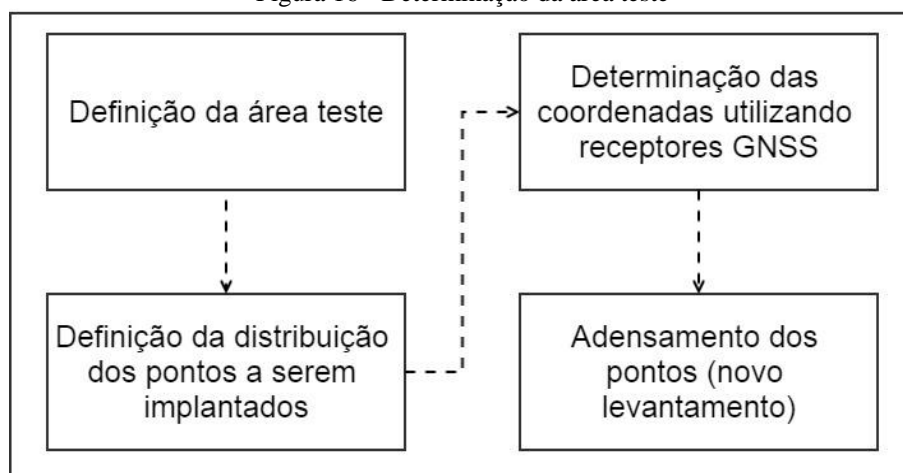
### 3.3.2 Análise da influência dos POI nas fototriangulações

Os experimentos de campo foram divididos em duas etapas: Determinação da área teste (Figura 16) e Geração e análise dos produtos finais (Figura 17). Os mesmos foram realizados na área teste localizada no Município de Presidente Prudente – SP.

A etapa de determinação da área teste teve como principal objeto a materialização dos pontos utilizados como controle/verificação nos demais experimentos. Para tal, foi realizado inicialmente um planejamento levando em consideração a qualidade esperada para os produtos finais.

A etapa de geração e análise dos produtos finais teve como objetivo principal: analisar a influência dos POI nas fototriangulações realizadas.

Figura 16 - Determinação da área teste



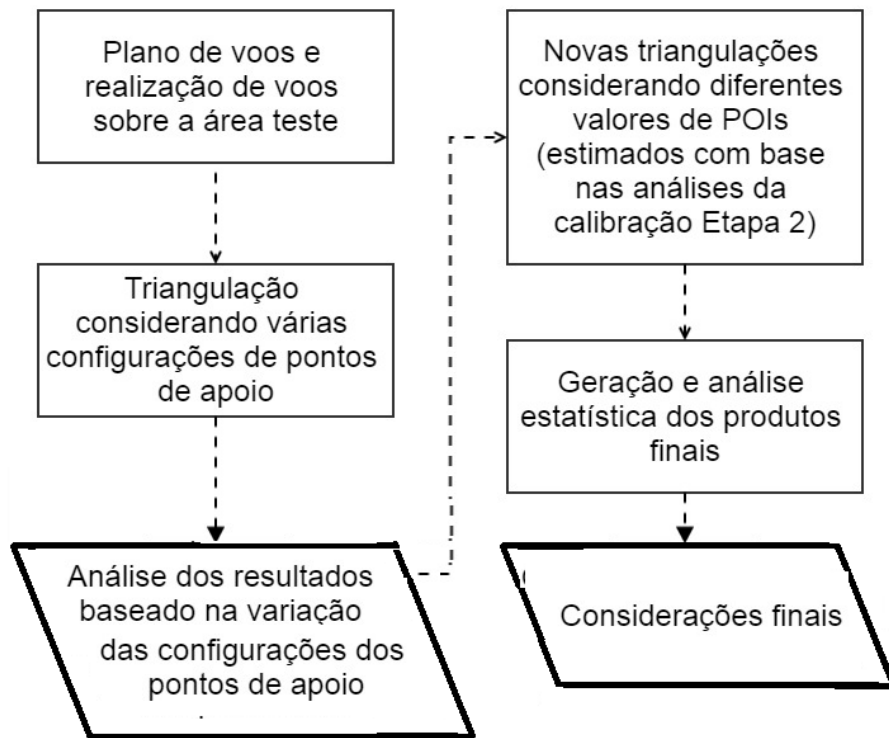
Fonte: Próprio autor.

A área de estudo foi definida levando em consideração a facilidade de acesso e o nível de urbanização. Tais critérios foram adotados a fim de garantir a segurança do equipamento, segurança da equipe nos trabalhos de campo e não causar nenhum tipo de risco à população. Na área de estudo foram implantados marcos de concretos com a finalidade de materializar pontos que, posteriormente, tiveram suas coordenadas determinadas a partir de métodos de posicionamento GNSS.

Os pontos com coordenadas determinadas foram utilizados, em um primeiro momento, para dar apoio ao processo de fototriangulação a fim de estimar os POE do bloco fotogramétrico. Em um segundo momento, esses pontos foram utilizados como "pontos de verificação" a fim analisar a qualidade dos produtos gerados.

Na geração e análises dos produtos finais (Figura 17) foram realizados voos sobre a área teste e as imagens foram fototrianguladas. Objetivando verificar a magnitude da influência da alteração dos parâmetros de orientação interior (POI) nos produtos cartográficos, depois das análises de significância e estabilidade dos mesmos, foram realizadas fototriangulações dos blocos considerando diferentes valores dos POI. Essas diferenças foram informadas com base nos resultados das análises das calibrações. Nesses processos de fototriangulação os dados advindos dos sensores embarcados no RPAS, GPS e inercial, foram utilizados para aproximar a posição e atitude da câmara. Por fim, foram feitas as análises estatísticas para verificar a existência de tendência e a precisão geométrica dos produtos gerados.

Figura 17 - Geração e análise dos produtos finais



Fonte: Próprio autor.



## 4 CALIBRAÇÃO DA CÂMARA, ANÁLISE DA SIGNIFICÂNCIA E ESTABILIDADE DOS POI

Para o processo de calibração foi utilizado um campo de calibração tridimensional, localizado no terraço do prédio da central de laboratórios do Departamento de Cartografia da FCT/UNESP (Figura 18). Tal campo foi instalado pelo grupo de pesquisa em Fotogrametria da FCT-UNESP, em 2013.

Figura 18 - Campo de calibração 3D



Fonte: Próprio autor.

O campo de calibração possui um total de 139 alvos codificados do tipo ARUCO (SILVA et al., 2014) com dimensões de 35x35 mm (Figura 19). Em cada alvo é possível executar medidas de 4 pontos, um em cada vértice do alvo, numerados de 0 a 3. A partir do procedimento implementado e descrito em SILVA et al. (2014) é possível a leitura das coordenadas no espaço imagem e a identificação da numeração destes pontos de forma automática. Destaca-se que, tal procedimento reduz de forma considerável o tempo gasto em cada calibração, visto que há em média 120 pontos em cada imagem coletada, e considerando que cada conjunto de imagens é composto por 12 imagens, o que totaliza 1440 pontos por conjunto.

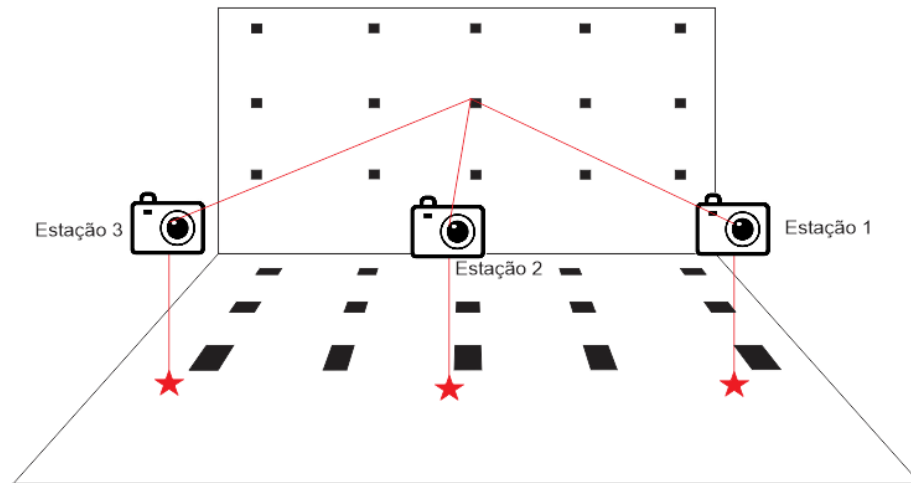
Figura 19 - Alvo do tipo ARUCO (código 662)



Fonte: Próprio autor.

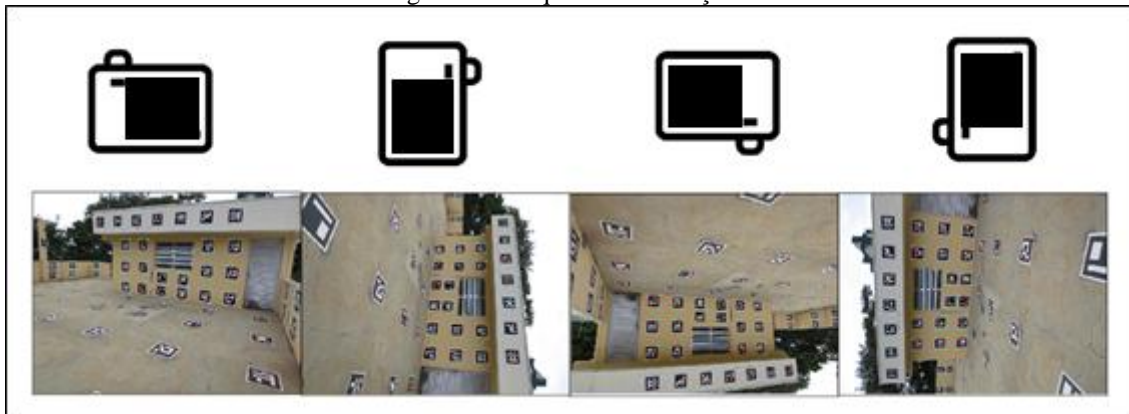
A coleta de dados, para o processo de calibração e estimação dos parâmetros de orientação interior, foi feita baseada na configuração de câmaras convergentes. A tomada das imagens foi feita posicionando o equipamento em três posições diferentes (estações), considerando um deslocamento em X de cerca de 3 m. Em cada estação foram tomadas quatro imagens, sendo que em cada tomada a câmara foi rotacionada em  $0^\circ$ ,  $90^\circ$ ,  $180^\circ$  e  $270^\circ$  no sentido horário em torno do eixo Z e sofreu pequenos deslocamentos, da ordem de dezenas de centímetros, nas posições  $X_0$ ,  $Y_0$  e  $Z_0$ . Tal procedimento foi adotado a fim de reduzir a dependência linear entre alguns parâmetros de OI e OE, e também garantir uma boa geometria do bloco e um bom resultado no processo de calibração. A Figura 20 mostra um esquema onde podem ser vistas as posições das tomadas e a Figura 21 mostra a sequência de rotações adotada.

Figura 20 - Configuração das tomadas de fotos



Fonte: Próprio autor.

Figura 21 - Sequência de rotações adotada



Fonte: Próprio autor.

Foram coletados 7 conjuntos de dados para a calibração, com 12 imagens cada, sendo que os conjuntos foram adquiridos em épocas distintas. Destaca-se que, os conjuntos de número 1 e 5 foram obtidos ligando e desligando a câmera em cada fotografia, tal procedimento foi adotado visando verificar a influência do movimento mecânico do conjunto de lentes. O Quadro 2 apresenta um resumo das épocas em que os dados foram coletados.

Quadro 2 - Data das coletas de dados para calibração

Data (2016)	Conjunto						
	1	2	3	4	5	6	7
09/03							
10/03							
25/05							
14/09							

A identificação dos alvos, nas imagens, e leitura das fotocoordenadas de cada um deles foi realizada utilizando do *software* de identificação dos alvos (SILVA et al., 2014). Por fim, a lista de pontos com coordenadas de imagem e de terreno foram utilizadas como dados de entrada no *software* CC.

As configurações de calibração foram adotadas como padrão para todas as calibrações. Foram selecionados os parâmetros de orientação interior considerados (distância focal, deslocamento do ponto principal  $x_0$  e  $y_0$ , parâmetros de distorção radial simétrica e descentrada ( $K_1$ ,  $K_2$ ,  $K_3$ ,  $P_1$  e  $P_2$ ) e parâmetros de afinidade A e B). A inserção das configurações no *software* foi feita a partir do carregamento de um arquivo de texto (Figura 22).

Figura 22 - Configuração dos parâmetros de calibração.

FILE	Parâmetro	Opções para o processamento						
2	f	[1]NC	[2]bv	[3]fv				
2	x0 y0	[1]NC	[2]bv	[3]fv				
4	K1 K2 K3	[1]NC	[2]k1 bv	[3]k1,k2 bv	[4]k1,k2,k3 bv	[5]k1 fv	[6]k1,k2 fv	[7]k1,k2,k3 fv
2	P1 P2	[1]NC	[2]bv	[3]fv				
2	A/B b1/b2 A1/A2	[1]NC	[2]bv	[3]fv	[4]b1,b2 bv	[5]b1,b2 fv	[6]A1,A2 bv	[7]A1,A2 fv
	cena.xyz							
	cena.cl							
	cena.par							
	cena.sai							
	STOP							

Fonte: Próprio autor.

Considerando o apresentado na Figura 22 destaca-se que, a opção 1 (NC) não considera o parâmetro em questão, 2 (BV) considera o parâmetro constante para o bloco e a opção 3 (FV) considera o parâmetro podendo ser diferente em cada uma das fotos utilizadas na calibração.

As coordenadas, referentes ao espaço imagem foram carregadas no *software* de calibração através do arquivo "cena.cl". Destaca-se que, tais pontos foram considerados pontos fotogramétricos, com precisão de 0,5 pixel, no processo de triangulação e estimação dos POI. A padronização da posição e da orientação de cada tomada facilita a realização das calibrações, visto que, o conjunto de POE (Quadro 3), informado como valores aproximados para o ajustamento, pôde ser o mesmo para todas as calibrações realizadas.

Quadro 3 - POE iniciais

ID_Foto	$\omega$ (°)	$\varphi$ (°)	$\kappa$ (°)	$X_0$ (m)	$Y_0$ (m)	$Z_0$ (m)
1	0	15	0	15	11	15
2	0	15	-90	15	11	15
3	0	15	180	15	11	15
4	0	15	90	15	11	15
5	0	0	0	12	11	15
6	0	0	-90	12	11	15
7	0	0	180	12	11	15
8	0	0	90	12	11	15
9	0	-15	0	9	11	15
10	0	-15	-90	9	11	15
11	0	-15	180	9	11	15
12	0	-15	90	9	11	15

Fonte: Próprio autor.

Como injunções foram utilizados 6 POE de uma das imagens de cada um dos conjuntos, no caso a imagem de número 5 (primeira imagem obtida na segunda estação), 2 distâncias e 2 pontos (alvo, 6421 e 6411), vale destacar que os desvios padrão informados para os 2 pontos injuncionados (1 metro) fazem com que tais injunções tenham peso quase que desprezível se comparados aos pesos das demais injunções. Detalhes sobre a precisão das injunções estão apresentados na Tabela 4 e as injunções no espaço objeto, distâncias e alvos, estão ilustradas na Figura 23.

Tabela 4 - Precisão das injunções

Injunções de POE		Desvios
$\omega$		0,0000000001(°)
$\varphi$		0,0000000001(°)
$\kappa$		0,0000000001(°)
$X_0$		0,0000001(m)
$Y_0$		0,0000001(m)
$Z_0$		0,0000001(m)
Injunções de Distância		Desvios
Pontos	Pontos	
6532	6233	0,00002 (m)
6532	6310	0,00002 (m)

Fonte: Próprio autor.

Figura 23 - Injunções de distância (linhas vermelhas) e pontos (pontos vermelhos)



Fonte: Próprio autor.

Para a medição das distâncias no campo de calibração foi utilizado um paquímetro que possibilita leituras de distâncias de até 2000 mm.

#### 4.1 RESULTADOS E ANÁLISES

Foram realizadas 7 calibrações, considerando todos os parâmetros do modelo. Inicialmente estão apresentados os resultados das 7 calibrações, considerando todos os parâmetros, além dos resultados da análise de significância para os POI. Na sequência estão apresentados os parâmetros significantes calibrados e as análises de estabilidade.

O Quadro 4 apresenta os números de observações e parâmetros utilizados em cada conjunto de dados.

Quadro 4 - Dados do ajustamento das calibrações.

	Conjuntos						
	1	2	3	4	5	6	7
Total de pontos de controle	2	2	2	2	2	2	2
Pontos no espaço imagem	1491	1487	1528	1275	1296	1200	1156
Total de observações	2982	2974	3056	2550	2592	2400	2312
POI	10	10	10	10	10	10	10
POE	72	72	72	72	72	72	72
Coord. 3D pontos	444	444	456	408	417	336	360
Total de parâmetros	526	526	538	490	499	418	442
Injunções	14	14	14	14	14	14	14
Graus de liberdade	2470	2462	2532	2468	2407	1996	1884

Fonte: Próprio autor

Após a realização do processo de calibração para todos os conjuntos de imagens, foi realizada a análise de significância pelo *software* CC e, considerando os resultados, foi definido o conjunto de parâmetros a ser adotado para a câmara utilizada no trabalho. Para o controle de qualidade do ajustamento das observações, o *software* CC realiza o teste Qui-quadrado que visa comparar estatisticamente as variâncias *à priori* e *à posteriori*, como explicado na Seção 2.6.2. Para tal, foi considerada a distribuição Qui-quadrado com 90% de significância. Os valores de Qui-quadrado tabelado e calculado estão apresentados na Tabela 5.

Tabela 5 - resultado do ajustamento da calibração

	Conjuntos						
	1	2	3	4	5	6	7
Variância à Priori (pixel)	1	1	1	1	1	1	1
Variância à Posteriori (pixel)	0,4894	0,4827	0,5657	0,8092	0,4612	0,3937	0,4973
	Análise global do ajustamento						
Qui-quadrado calculado	591,49	573,68	810,32	1616,11	448,24	309,35	465,85
Qui-quadrado tabelado	2560,49	2552,35	2623,61	2558,46	2190,61	2077,39	1963,08

Fonte: Próprio autor.

Analisando os dados apresentados na Tabela 5 pode-se observar que todas as calibrações realizadas apresentaram valores de Qui-quadrado inferiores aos valores tabelados, sendo assim, considerando as formulações apresentadas na Seção 2.6.2 é possível aceitar os valores estimados pelos ajustamentos dos processos de calibrações realizados.

Assim, os parâmetros obtidos ao fim da calibração, bem como os desvios padrão dos mesmos estão apresentados nas Tabelas 6, 7, 8 e 9.

Tabela 6 - POI e desvios-padrão resultantes das calibrações dos conjuntos 1 e 2

	Conjunto 1		Conjunto 2	
	Parâmetros	Desvio padrão	Parâmetros	Desvio padrão
f (mm)	4,370	+ - 0,1321E-02	4,3830	+ - 0,1323E-02
x <sub>0</sub> (mm)	0,0625	+ - 0,3811E-03	0,0625	+ - 0,3771E-03
y <sub>0</sub> (mm)	0,0427	+ - 0,4067E-03	0,0434	+ - 0,3971E-03
K <sub>1</sub> (mm <sup>-2</sup> )	-0,174185E-02	+ - 0,6792E-04	-0,1776504E-02	+ - 0,7288E-04
K <sub>2</sub> (mm <sup>-4</sup> )	0,2711334E-04	+ - 0,1490E-04	0,3448238E-04	+ - 0,1713E-04
K <sub>3</sub> (mm <sup>-6</sup> )	0,9651101E-06	+ - 0,1018E-05	0,5623659E-06	+ - 0,1246E-05
P <sub>1</sub> (mm <sup>-1</sup> )	0,8448316E-03	+ - 0,7104E-05	0,8462448E-03	+ - 0,6931E-05
P <sub>2</sub> (mm <sup>-1</sup> )	0,6318956E-03	+ - 0,7135E-05	0,6382000E-03	+ - 0,6864E-05
A	0,7730203E-04	+ - 0,1696E-04	0,7933755E-04	+ - 0,1685E-04
B	0,1877472E-04	+ - 0,1633E-04	0,2264641E-04	+ - 0,1573E-04

Fonte: Próprio autor.

Tabela 7 - POI e desvios-padrão resultantes das calibrações dos conjuntos 3 e 4

	Conjunto 3		Conjunto 4	
	Parâmetros	Desvio padrão	Parâmetros	Desvio padrão
f (mm)	4,3894	+ - 0,1687E-02	4,3792	+ - 0,1233E-02
x <sub>0</sub> (mm)	0,0552	+ - 0,4107E-03	0,0550	+ - 0,2932E-03
y <sub>0</sub> (mm)	0,0488	+ - 0,4645E-03	0,0439	+ - 0,3370E-03
K <sub>1</sub> (mm <sup>-2</sup> )	-0,185559E-02	+ - 0,8077E-04	-0,189338E-02	+ - 0,6059E-04
K <sub>2</sub> (mm <sup>-4</sup> )	0,2111065E-04	+ - 0,2028E-04	0,7081663E-04	+ - 0,1417E-04
K <sub>3</sub> (mm <sup>-6</sup> )	0,2164234E-05	+ - 0,1613E-05	-,2771880E-05	+ - 0,1014E-05
P <sub>1</sub> (mm <sup>-1</sup> )	0,7562987E-03	+ - 0,7655E-05	0,7603471E-03	+ - 0,5724E-05
P <sub>2</sub> (mm <sup>-1</sup> )	0,6995883E-03	+ - 0,7901E-05	0,6590979E-03	+ - 0,6080E-05
A	0,6382227E-04	+ - 0,1957E-04	-,4645594E-04	+ - 0,1506E-04
B	-,2420101E-04	+ - 0,1819E-04	0,2243399E-03	+ - 0,1360E-04

Fonte: Próprio autor.



Tabela 8 - POI e desvios-padrão resultantes das calibrações dos conjuntos 5 e 6

	Conjunto 5		Conjunto 6	
	Parâmetros	Desvio padrão	Parâmetros	Desvio padrão
f (mm)	4,3703	+ - 0,1717E-02	4,3746	+ - 0,1426E-02
x <sub>0</sub> (mm)	0,0472	+ - 0,3952E-03	0,0630	+ - 0,3774E-03
y <sub>0</sub> (mm)	0,0510	+ - 0,4665E-03	0,0477	+ - 0,4280E-03
K <sub>1</sub> (mm <sup>-2</sup> )	-0,1743267E-02	+ - 0,8401E-04	-0,1955745E-02	+ - 0,5671E-04
K <sub>2</sub> (mm <sup>-4</sup> )	-,1878320E-04	+ - 0,2082E-04	0,3085361E-04	+ - 0,1303E-04
K <sub>3</sub> (mm <sup>-6</sup> )	0,5050611E-05	+ - 0,1577E-05	0,1910223E-05	+ - 0,9828E-06
P <sub>1</sub> (mm <sup>-1</sup> )	0,6492402E-03	+ - 0,7268E-05	0,8378495E-03	+ - 0,6721E-05
P <sub>2</sub> (mm <sup>-1</sup> )	0,7449191E-03	+ - 0,7862E-05	0,6995028E-03	+ - 0,7084E-05
A	-,8885663E-04	+ - 0,1703E-04	0,2890164E-04	+ - 0,1456E-04
B	0,2606892E-03	+ - 0,1636E-04	0,2809361E-03	+ - 0,1564E-04

Fonte: Próprio autor.

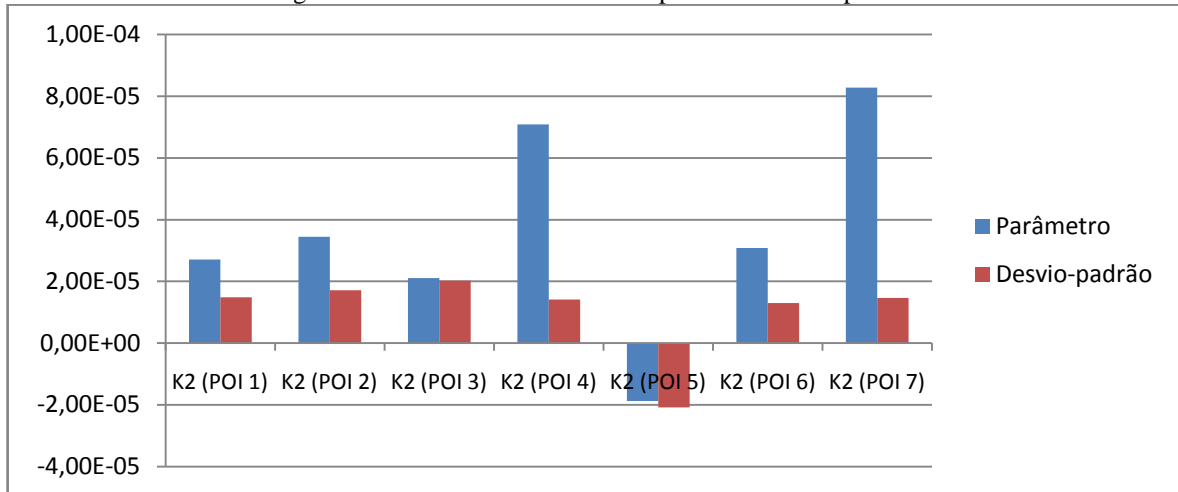
Tabela 9 - POI e desvios-padrão resultantes da calibração do conjunto 7

	Conjunto 7	
	Parâmetros	Desvio padrão
f (mm)	4,3977	0,1579E-02
x <sub>0</sub> (mm)	0,0565	0,4010E-03
y <sub>0</sub> (mm)	0,0490	0,5103E-03
K <sub>1</sub> (mm <sup>-2</sup> )	-0,211543E-02	0,6790E-04
K <sub>2</sub> (mm <sup>-4</sup> )	0,8283196E-04	0,1462E-04
K <sub>3</sub> (mm <sup>-6</sup> )	-,1553010E-05	0,9933E-06
P <sub>1</sub> (mm <sup>-1</sup> )	0,7653086E-03	0,7545E-05
P <sub>2</sub> (mm <sup>-1</sup> )	0,6958535E-03	0,8513E-05
A	0,5831746E-04	0,1919E-04
B	0,3771114E-04	0,1933E-04

Fonte: Próprio autor.

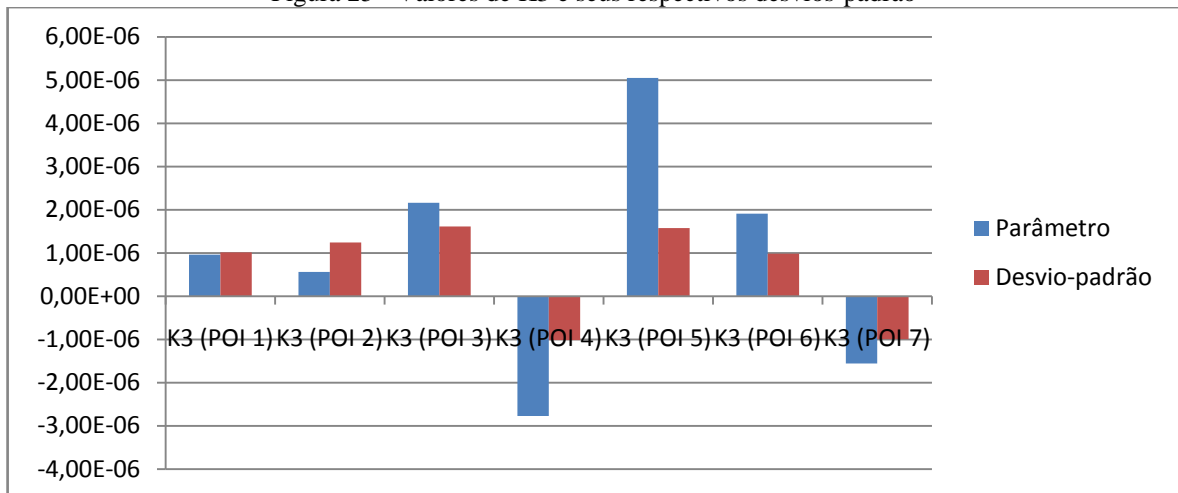
Ao considerar os valores dos parâmetros estimados e seus respectivos desvios, pode-se analisar a magnitude de cada um dos parâmetros estimados, em relação ao respectivo desvio-padrão, como apresentado na Seção 2.4.2. Uma análise inicial pode ser feita considerando que os valores de desvio padrão com magnitude similar ao valor do parâmetro é um indicativo de que o parâmetro possa não ser significativo. Com base nos valores apresentados nas Tabelas 6, 7, 8 e 9, é possível notar que os parâmetros K<sub>2</sub>, K<sub>3</sub> e B apresentam, em algumas calibrações, valores de desvio padrão próximos aos valores dos parâmetros propriamente ditos. Tal semelhança nos valores de desvio-padrão e dos parâmetros está representada nas Figuras 24, 25 e 26.

Figura 24 - Valores de K2 e seus respectivos desvios-padrão



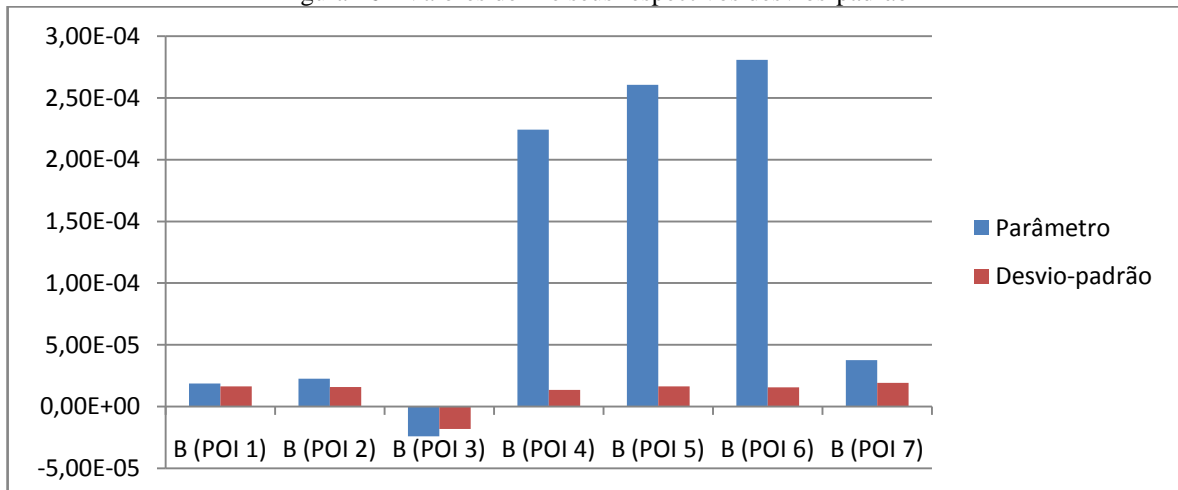
Fonte: Próprio autor.

Figura 25 - Valores de K3 e seus respectivos desvios-padrão



Fonte: Próprio autor.

Figura 26 - Valores de B e seus respectivos desvios-padrão



Fonte: Próprio autor.

Com base na Figura 24, é possível notar que os valores de  $K_2$  e os respectivos desvios-padrão para cada um dos conjuntos são bastante semelhantes nas calibrações 3 e 5. Destaca-se ainda que, na calibração 5 o valor de desvio-padrão encontrado para o parâmetro é maior que o próprio valor estimado para o mesmo. Analisando a Figura 25, pode-se verificar que os valores de  $K_3$  e seus respectivos desvios-padrão para cada um dos conjuntos apresentam valores semelhantes nas calibrações 1, 3 e 7. Por fim, observando a Figura 26, nota-se que os valores estimados para o parâmetro B e os respectivos desvios-padrão apresentam valores semelhantes nas calibrações 1, 2, 3, e 7. Considerando os resultados obtidos e ilustrados nas Figuras 24, 25 e 26, deve-se atentar para a possibilidade de exclusão dos parâmetros citados. Ainda assim, é interessante analisar tal exclusão a partir da análise de significância utilizando de métodos estatísticos.

#### **4.1.1 Análises de significância**

Ao fim do processo de calibração, estimados os valores de POI, uma questão interessante refere-se a quais parâmetros, do modelo ajustado, de fato são relevantes para a câmara considerada. No caso de câmaras tradicionalmente utilizadas em Fotogrametria, câmaras métricas, os parâmetros normalmente considerados são: Distância focal calibrada, posição do ponto principal, distorção radial simétrica ( $K_1$ ,  $K_2$  e  $K_3$ ), distorção descentrada ( $P_1$  e  $P_2$ ) e em alguns casos parâmetros do modelo de afinidade. No caso das câmaras digitais não há um padrão estabelecido, uma vez que diferentes modelos de câmaras com diferentes qualidades estão disponíveis no mercado. Neste caso, a análise de significância dos parâmetros estimados é fundamental.

Para aprofundar as análises foram aplicados testes estatísticos de significância a fim de verificar se dentre os parâmetros utilizados há algum que não seja significativo. Tal teste foi aplicado considerando parâmetros individuais e grupos de parâmetros ( $x_0$  e  $y_0$ ;  $K_1$ ,  $K_2$  e  $K_3$ ;  $P_1$  e  $P_2$ ; A e B), foram calculados valores de F, seguindo a formulação apresentada na Seção 2.4.2 (Equações 11, 12 e 13), utilizando os valores dos parâmetros e suas respectivas matrizes de variância e covariância. Na Tabela 10 estão apresentados os valores de F calculados para cada um dos parâmetros de cada processo de calibração, bem como o valor de F tabelado.

Tabela 10 - Valores da distribuição F para os parâmetros

		Calibração						
		Conjunto1	Conjunto2	Conjunto3	Conjunto4	Conjunto5	Conjunto6	Conjunto7
F Calculado	f	1,10E+07	1,10E+07	6,77E+06	1,45E+08	6,48E+06	9,41E+06	7,76E+06
	x <sub>0</sub>	2,69E+04	2,75E+04	1,81E+04	1,02E+04	1,42E+04	2,78E+04	1,99E+04
	y <sub>0</sub>	1,10E+04	1,20E+04	1,10E+04	6,57E+03	1,19E+04	1,24E+04	9,24E+03
	K <sub>1</sub>	6,58E+02	5,94E+02	5,28E+02	1,31E+03	4,31E+02	1,19E+03	9,71E+02
	K <sub>2</sub>	3,31E+00	4,05E+00	1,08E+00	2,89E+01	0,81E+00	5,61E+00	3,21E+01
	K <sub>3</sub>	0,90E+00	2,04E-01	1,80E+00	4,97E+00	1,03E+01	3,78E+00	2,45E+00
	P <sub>1</sub>	1,41E+04	1,49E+04	9,76E+03	5,14E+03	7,98E+03	1,55E+04	1,03E+04
	P <sub>2</sub>	7,84E+03	8,65E+03	7,84E+03	4,51E+03	8,98E+03	9,75E+03	6,68E+03
	A	2,08E+01	2,22E+01	1,06E+01	3,76E+00	2,72E+01	3,94E+00	9,24E+00
	B	1,32E+00	2,07E+00	1,77E+00	5,89E+01	2,54E+02	3,23E+02	3,81E+00
		Valor F Tabelado = 2,71						

Fonte: Próprio autor.

A Tabela 10 apresenta os valores da distribuição F para os parâmetros considerados no processo de calibração. Com base nos resultados da análise de significância, para os parâmetros individuais, pode-se notar que o parâmetro K<sub>2</sub> foi considerado não significante nas calibrações 3 e 5. O parâmetro K<sub>3</sub> foi considerado não significante nas calibrações 1, 2, 3 e 7. O parâmetro B, por sua vez, foi considerado não significante nas calibrações 1, 2 e 3. Considerando os valores apresentados na Tabela 11 para grupos de parâmetros, separados de acordo com as distorções, tem-se que todos os parâmetros são significantes.

Tabela 11 - Valores da distribuição F para os grupos de parâmetros

		Conjuntos						
		1	2	3	4	5	6	7
x <sub>0</sub> , y <sub>0</sub>		1,96E+04	2,00E+04	1,40E+04	9,17E+03	1,35E+04	2,29E+04	1,53E+04
P <sub>1</sub> , P <sub>2</sub>		1,11E+04	1,15E+04	8,20E+03	5,23E+03	8,41E+03	1,46E+04	8,81E+03
A, B		1,11E+01	1,22E+01	6,38E+00	3,17E+01	1,38E+02	1,63E+02	6,62E+00
Tabelado		2,3						
K <sub>1</sub> , K <sub>2</sub> , K <sub>3</sub>		2,34E+03	1,98E+03	1,79E+03	1,77E+04	1,26E+03	2,86E+03	1,95E+03
Tabelado		2,09						

Fonte: Próprio autor.

Na Tabela 11 estão apresentados os valores de F calculados para cada um dos grupos de parâmetros, bem como os valores de F tabelados. Destaca-se que, nas análises por grupo de parâmetros nenhum grupo de parâmetro foi considerado insignificante. Com base na análise de grupo de parâmetros é possível concluir que todos os conjuntos de

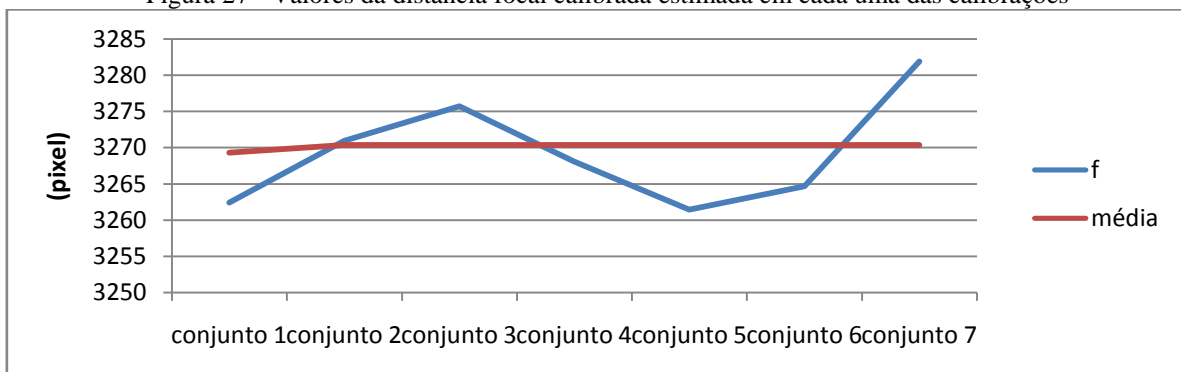
correções (distorção radial simétrica, distorção descentrada, modelo de afinidade e posição do ponto principal) são significativos para a câmara analisada.

Embora a análise de significância de parâmetros individuais aponte para uma possível exclusão do parâmetro  $K_3$  e do parâmetro B, para algumas calibrações, optou-se por considerar o modelo completo uma vez que tais parâmetros foram considerados não significantes apenas em metade do conjunto de calibrações sendo que nos conjuntos em que se mostraram significantes os valores de F calculados superam em mais de duas vezes o valor tabelado.

#### 4.1.2 Análises de estabilidade baseadas na magnitude dos parâmetros

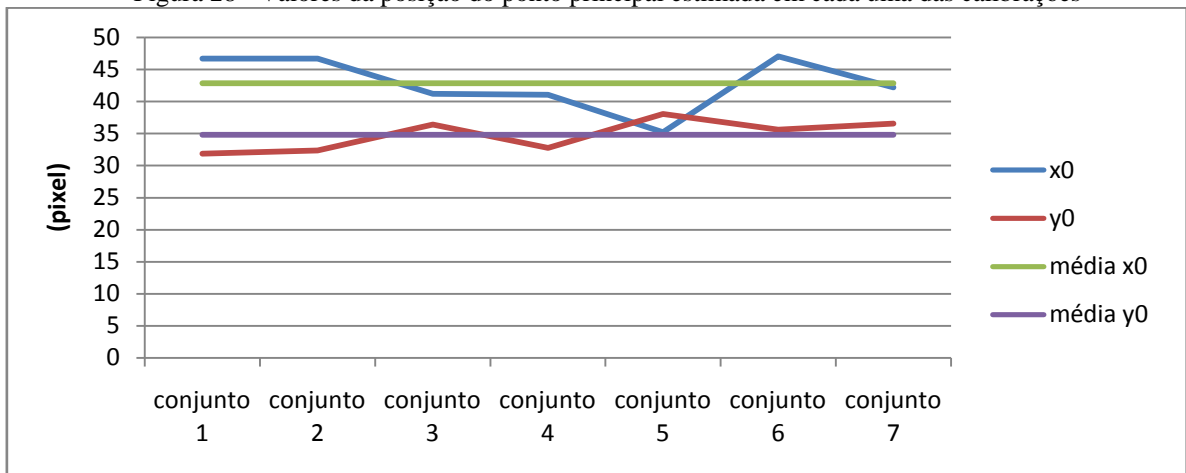
Considerando as calibrações de câmaras digitais, um dos principais pontos que requerem atenção é justamente se os POI destes equipamentos se mantêm constantes ao longo do tempo. Isto é, ao se comparar POI estimados para o mesmo equipamento em épocas distintas, estes possam ser considerados iguais. Diversos métodos de análise têm sido desenvolvidos e testados, como exemplos temos os métodos que analisam as variações nos parâmetros propriamente ditos, métodos estatísticos que assumem que os parâmetros têm distribuição normal, e por fim, métodos que analisam a similaridade dos feixes de raios. Neste sentido, foram gerados gráficos (Figura 27, Figura 28, Figura 29, Figura 30, Figura 31 e Figura 32) a fim de analisar o comportamento dos parâmetros apresentados nas Tabelas 6, 7, 8 e 9.

Figura 27 - Valores da distância focal calibrada estimada em cada uma das calibrações



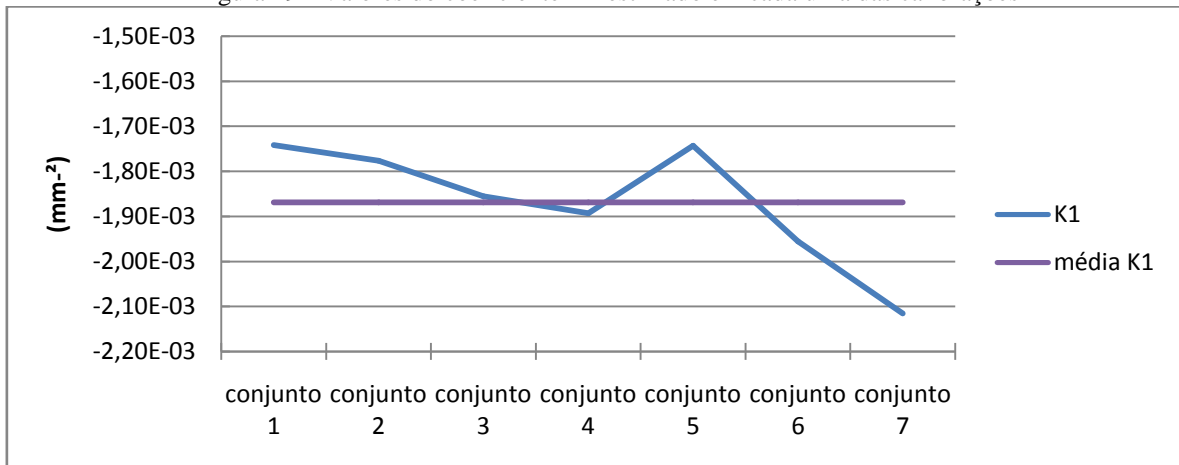
Fonte: Próprio autor.

Figura 28 - Valores da posição do ponto principal estimada em cada uma das calibrações



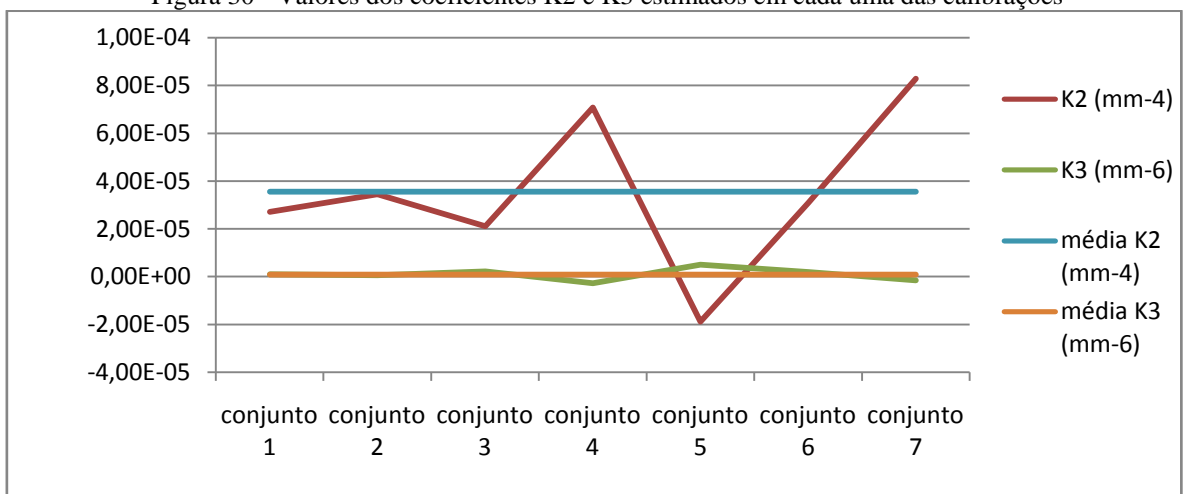
Fonte: Próprio autor.

Figura 29 - Valores do coeficiente K1 estimado em cada uma das calibrações



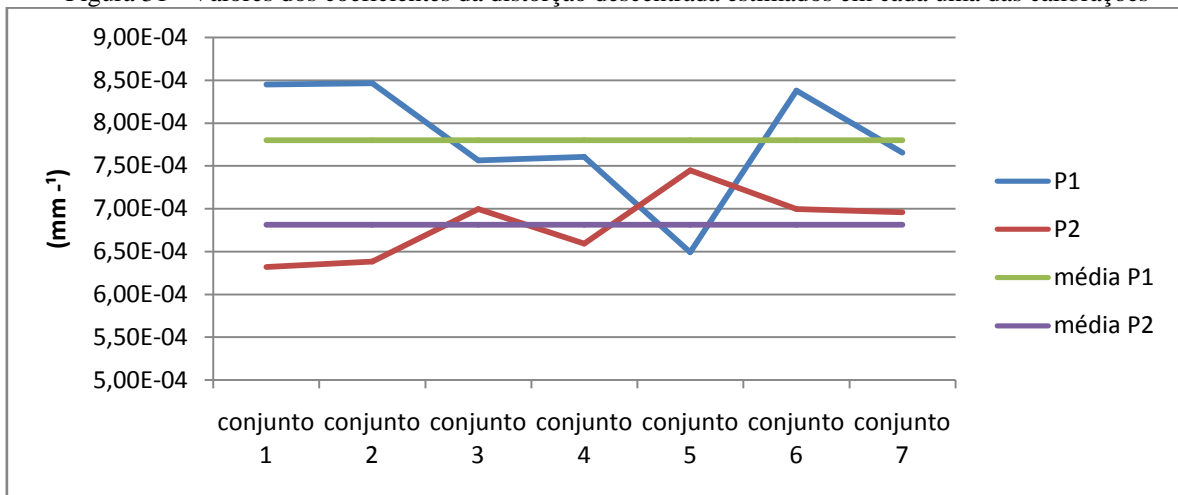
Fonte: Próprio autor.

Figura 30 - Valores dos coeficientes K2 e K3 estimados em cada uma das calibrações



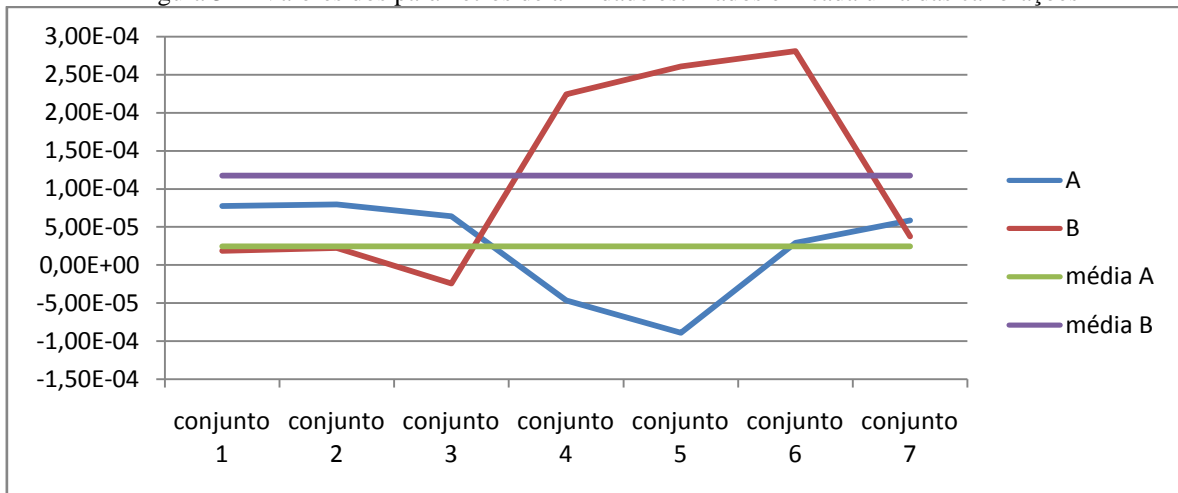
Fonte: Próprio autor.

Figura 31 - Valores dos coeficientes da distorção descentrada estimados em cada uma das calibrações



Fonte: Próprio autor.

Figura 32 - Valores dos parâmetros de afinidade estimados em cada uma das calibrações



Fonte: Próprio autor.

É comum que certos POI possuam um alto valor de correlação entre eles, sendo assim, a variação em um parâmetro pode ser explicada, ou absorvida, pela variação de outro parâmetro. Tal correlação pode ser percebida ao analisar a matriz dos coeficientes de correlação apresentada na Tabela 12. Destaca-se que, a matriz dos coeficientes de correlação apresentada, gerada pelo *software* CC a partir da Matriz de Variância-Covariância (MVC), é resultante do processo de calibração aplicado para o "conjunto 1". Neste sentido, os valores apresentados devem ser adotados como exemplo para ilustrar quais parâmetros apresentam maior correlação. A partir desta análise, é possível interpretar de maneira mais clara os resultados dos gráficos que apresentam os valores dos POI.

Tabela 12 - Matriz de correlação dos POI (conjunto 1)

	f	$x_0$	$y_0$	$K_1$	$K_2$	$K_3$	$P_1$	$P_2$	A	B
f	1,00									
$x_0$	-0,03	1,00								
$y_0$	-0,06	-0,03	1,00							
$K_1$	-0,51	0,04	0,05	1,00						
$K_2$	0,48	-0,02	-0,04	-0,92	1,00					
$K_3$	-0,43	0,02	0,03	0,83	-0,97	1,00				
$P_1$	-0,12	0,90	-0,03	0,10	-0,05	0,03	1,00			
$P_2$	-0,10	-0,02	0,90	0,08	-0,04	0,03	-0,01	1,00		
A	0,12	-0,02	-0,07	-0,18	0,08	-0,03	-0,05	-0,09	1,00	
B	-0,05	0,02	0,07	0,04	-0,03	0,03	0,03	0,05	-0,01	1,00

Fonte: Próprio autor.

Considerando os valores destacados na Tabela 12 é possível verificar que as maiores correlações apresentadas são entre os parâmetros:  $K_1$ ,  $K_2$  e  $K_3$ ;  $x_0$  e  $P_1$ ;  $y_0$  e  $P_2$ ; e em menor magnitude entre a focal  $f$  e  $K_1$ ,  $K_2$  e  $K_3$ . Considerando os valores dos coeficientes de correlação entre os referidos parâmetros é possível analisar as Figuras 27, 28, 29, 30, 31 e 32 e comparar com a variação entre eles.

Comparando-se as Figuras 29 e 30, mais especificamente os parâmetros  $K_1$  e  $K_2$ , considerando os valores apresentados para os conjuntos 4, 5, 6 e 7, pode-se notar um comportamento inverso na variação dos parâmetros. Nos conjuntos 1, 2 e 3 o comportamento é diferente dos demais e tal fato pode ser explicado pela correlação entre a distância focal ( $f$ ) e os coeficientes de distorção radial simétrica. Vale lembrar que, o efeito da variação na distância focal é a variação de escala que, por sua vez, provoca um deslocamento radial dos pontos de maneira semelhante ao efeito da distorção radial simétrica.

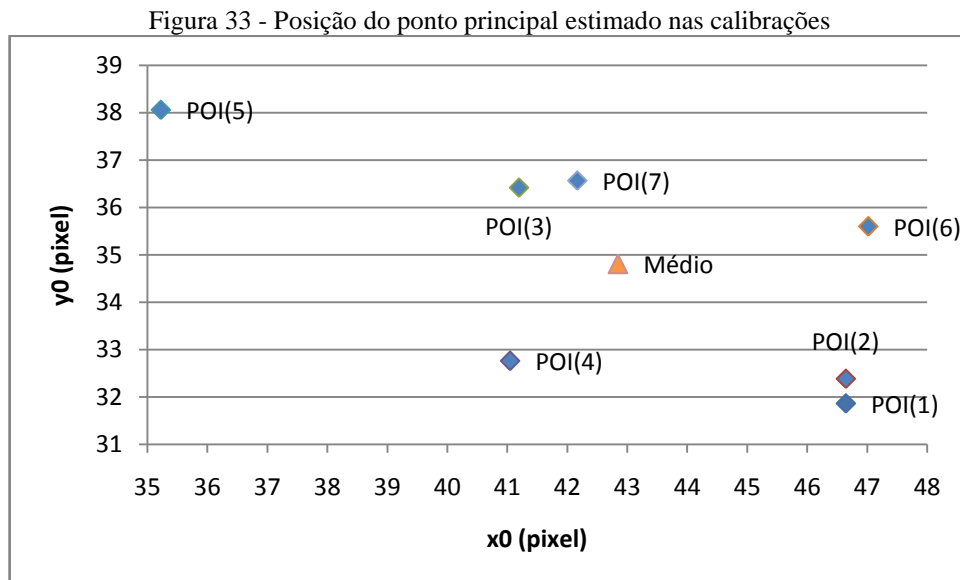
Comparando-se as Figuras 28 e 31, respectivamente os parâmetros  $x_0$  e  $P_1$ ;  $y_0$  e  $P_2$ , é possível notar um padrão de variação diretamente proporcional para a primeira comparação e um padrão inversamente proporcional para a segunda comparação. Destaca-se ainda a dificuldade em se obter conclusões sobre as análises do comportamento das variações dos parâmetros, devido à correlação existente entre os mesmos. Outro fator interessante é que, embora as variações possam ser notadas, o efeito das variações advém da aplicação de tais parâmetros em modelos matemáticos para o cálculo de distorções.

Neste sentido, para melhor analisar o efeito dos parâmetros, foram gerados gráficos aplicando os valores dos parâmetros em diferentes pontos (pixels) da imagem. Para tal, foi realizado o procedimento de cálculo dos valores de correção das distorções (radial



simétrica, descentrada e afinidade) para os pontos pertencentes à diagonal do sensor, partindo do ponto central até o extremo.

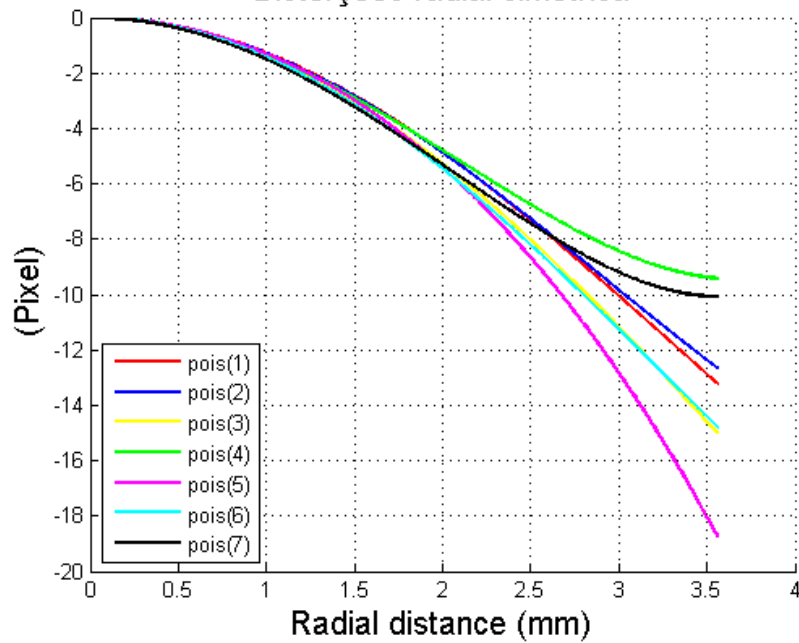
Observando a Figura 33, que mostra as diferentes posições para o ponto principal estimado a partir das calibrações realizadas, é possível notar que a calibração 5 apresenta valores de  $x_0$  e  $y_0$  mais distantes do valor médio das  $n$  calibrações realizadas. Verifica-se que, a maior diferença para os parâmetros em questão é encontrada ao se comparar os valores estimados pela calibração 1 e 5. Desconsiderando a calibração 5 pode-se perceber que as posições estimadas diferem da média em até 3 pixels na direção do eixo  $x$  e até 4 pixels na direção do eixo  $y$ .



Fonte: Próprio autor.

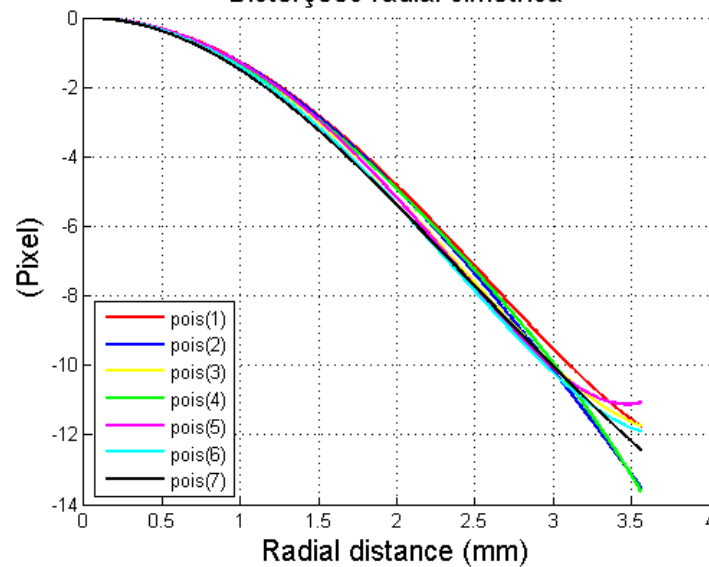
Considerando os pixels pertencentes à diagonal do sensor, o modelo de distorção radial simétrica e os coeficientes estimados para o mesmo, foram calculados os valores de correção aplicando tanto o modelo completo ( $K_1$ ,  $K_2$  e  $K_3$ ) quanto o modelo desconsiderando o coeficiente  $K_3$ . Os valores calculados estão apresentados nas Figuras 34 e 35.

Figura 34 - Gráfico da distorção radial simétrica (K1 e K2)  
**Distorções radial simétrica**



Fonte: Próprio autor.

Figura 35 - Gráfico da distorção radial simétrica (K1, K2 e K3)  
**Distorções radial simétrica**



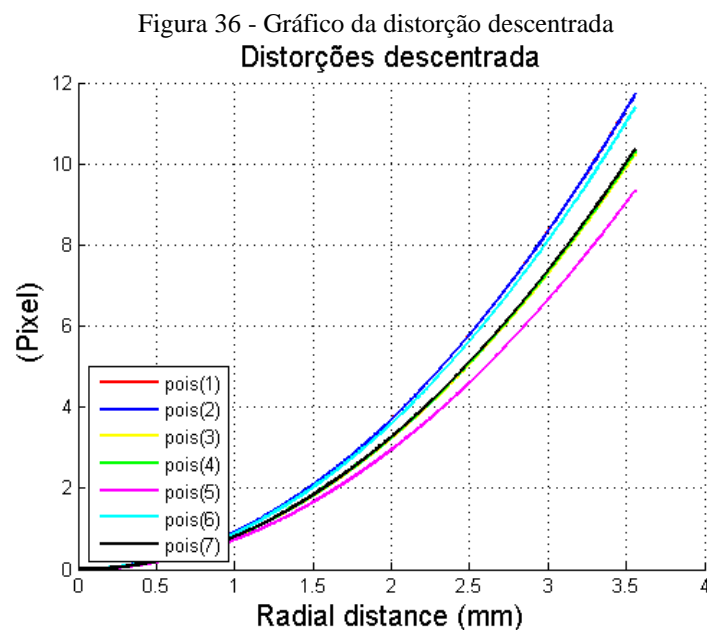
Fonte: Próprio autor.

Ao analisar os gráficos apresentados nas Figuras 34 e 35 é possível notar que ao desconsiderar o parâmetro  $K_3$  a curva modifica significativamente, principalmente, a partir de uma distância radial de 2 mm. Nota-se, portanto, que as diferenças entre as correções calculadas para pontos no extremo do sensor chegam à magnitudes entre 8 e 6 pixels, como é o caso das curvas obtidas com os coeficientes estimados nas calibrações 4 e 5 (verde e

magenta) respectivamente. A partir deste resultado, assim como o apresentado nas análises estatísticas de significância, optou-se por considerar todos os coeficientes da distorção radial simétrica nos demais experimentos realizados.

Considerando o gráfico apresentado na Figura 35 é possível notar que os efeitos da distorção radial simétrica diferem em menos de 0,5 pixels considerando uma distância radial de até 3 mm. Para distâncias radiais maiores que 3 mm a diferença do efeito da distorção, considerando diferentes calibrações, chega até cerca de 2,5 pixels (calibrações 4 e 5).

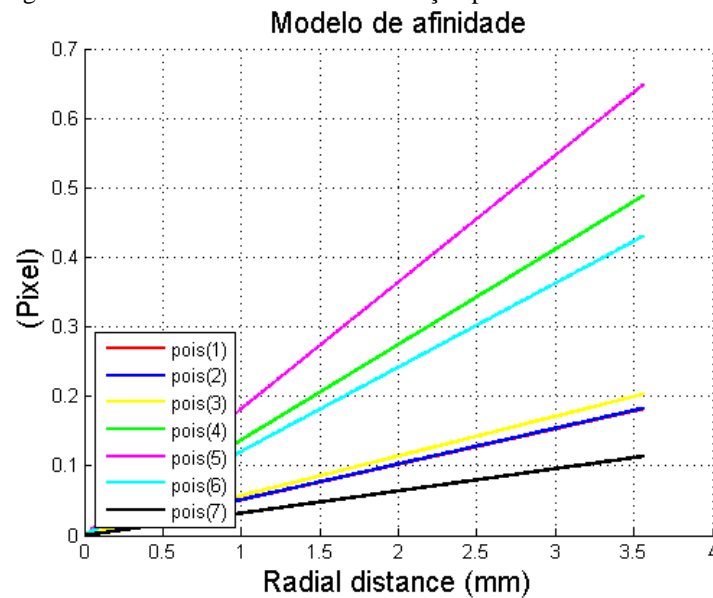
Observando o gráfico apresentado na Figura 36, assim como o resultado da distorção radial simétrica (Figura 35), é possível notar que os valores de distorção para pontos com distância radial do ponto principal de até 1,5 mm é de 0,5 pixel. No extremo do sensor, distância radial de 3,5 mm, a diferença do efeito da distorção descentrada resultante de parâmetros estimados em calibrações distintas chega a cerca de 3 pixels (calibrações 2 e 5).



Fonte: Próprio autor.

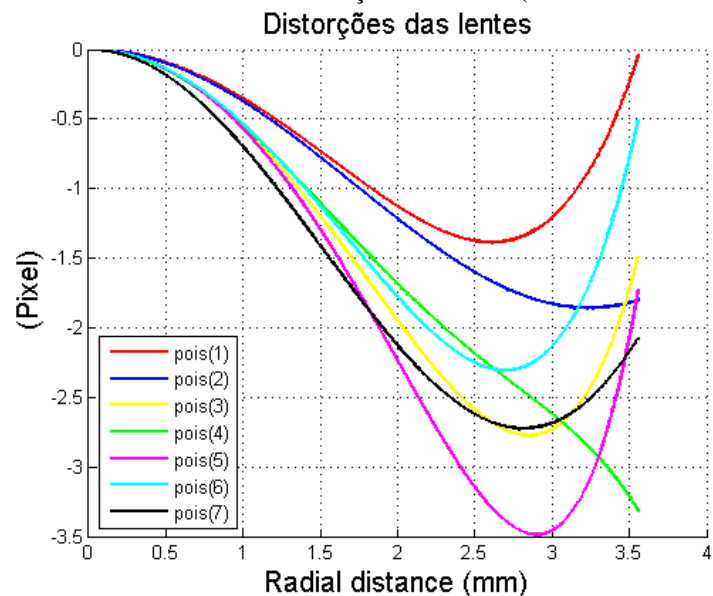
Na Figura 37 estão apresentados os valores de correção obtidos pela aplicação do modelo de afinidade. Comparado com o efeito das distorções das lentes o efeito do modelo de afinidade é bem menor, chegando a cerca de 0,6 pixels no extremo do sensor.

Figura 37 - Gráfico dos valores de correção para o modelo de afinidade



Fonte: Próprio autor.

Figura 38 - Gráfico dos valores das distorções das lentes (radial simétrica e descentrada)



Fonte: Próprio autor.

Ao comparar o efeito composto das distorções das lentes (radial simétrica e descentrada), as diferenças nos valores de correção são mais evidentes, mesmo nos pontos próximos ao ponto principal. Pode-se notar, na Figura 38, que a partir de distâncias radiais maiores que 1 mm as diferenças entre os valores de correção calculados, considerando diferentes POI, são maiores que 0,5 pixel. Para a distância radial de 2,5 mm a maior diferença encontrada foi da ordem de 2,0 pixels entre a curva referente às calibrações 1 e 5. Mais perto do extremo do sensor a discrepância chega a cerca de 3,3 pixels (calibrações 1 e 4).

A partir da análise dos efeitos dos parâmetros aplicados aos modelos matemáticos inerentes ao processo de orientação interior, pode-se concluir que, no caso da câmara analisada, as principais diferenças obtidas no cálculo das coordenadas fotogramétricas corrigidas serão causadas por diferença nos parâmetros distância focal ( $f$ ) e posição do ponto principal ( $x_0$  e  $y_0$ ). Neste sentido, considerando o conceito implícito no processo de calibração de câmaras, é importante que a análise de estabilidade dos parâmetros de calibração seja feita levando em consideração a reconstrução dos feixes de raios proporcionada pelos parâmetros.

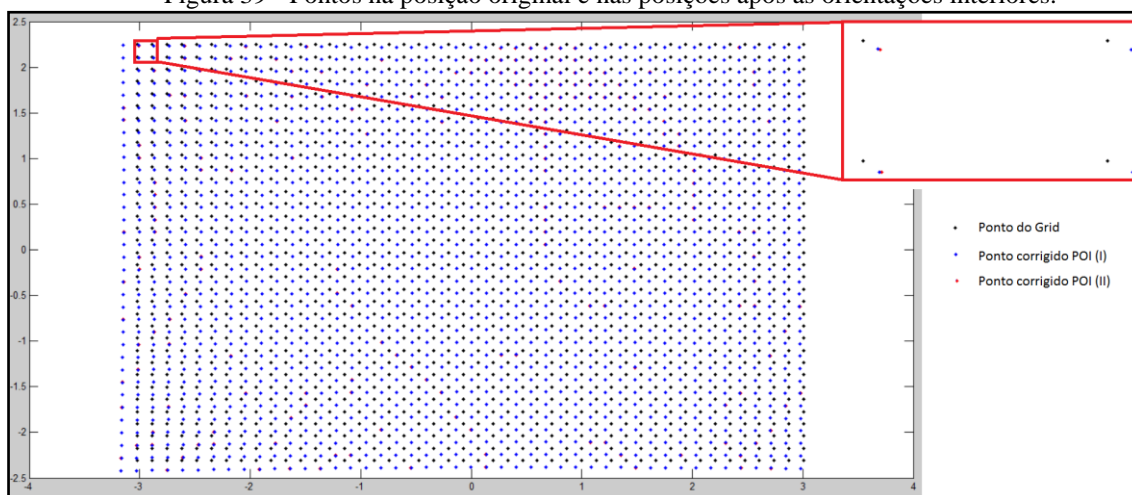
#### **4.1.3 Análises de estabilidade baseadas nos métodos de similaridade de feixe de raios**

Nesta seção estão descritos os procedimentos adotados para a análise de estabilidade baseado na similaridade dos feixes de raios. Três dos quatro métodos apresentados na Seção 2.4.3 (ZROT, ROT e SPR) foram implementados e aplicados aos dados oriundos das 7 calibrações.

Os cálculos para os testes de similaridades foram implementados utilizando *software* MatLab. Como mencionado na Seção 2.4.3, cada um dos métodos considera uma métrica para a avaliação da similaridade dos feixes. No caso do método ZROT, a medida das distâncias calculadas entre os pontos corrigidos das distorções, a partir dos diferentes conjuntos de POI, representa o REMQ. Considerando os outros dois métodos, a raiz quadrada da variância à posteriori estimada no processo de ajustamento representa o desvio-padrão das coordenadas corrigidas das distorções. Em casos em que o valor de REMQ ou raiz da variância à posteriori for menor que o erro esperado para as coordenadas na imagem, os conjuntos de POI comparados devem ser considerados similares. Para a análise da similaridade foram adotados dois limiares 0,5 pixel e 0,33 pixel.

Os três métodos partem de um conjunto de pontos simulados no espaço imagem. O grid formado pelos pontos simulados pode ser visualizado na Figura 39. Para a criação do grid de pontos no espaço imagem foi considerado o tamanho do sensor (4608 x 3456 pixels), informado o ponto inicial na posição (coluna x linha) 50 x 50 e o incremento de 100 pixels entre os pontos consecutivos. Como resultado foi gerada uma malha com 1610 pontos (46 x 35).

Figura 39 - Pontos na posição original e nas posições após as orientações interiores.



Fonte: Próprio autor.

A similaridade entre os feixes de raios foi comparada, considerando a aplicação da orientação interior ao grid, utilizando os conjuntos de POI dois a dois. Neste sentido, foram feitas 21 comparações em cada um dos métodos. A partir das coordenadas fotogramétricas dos pontos do grid, considerando cada um dos conjuntos de POI, os métodos foram aplicados seguindo as formulações específicas apresentadas na Seção 2.4.3.

No caso específico do método SPR, além do grid, foi necessário simular um MDT para que fosse possível, a partir das coordenadas fotogramétricas corrigidas e de uma posição e orientação, estimar as coordenadas de terreno dos pontos do grid. Neste caso foram simulados 2 MDT com características de relevo diferentes. Um deles foi simulado com altitude mínima de 200 m e variação de cota dos pontos de até 100 m (Equação 30) e outro com cota mínima de 200 m e variação de cota dos pontos de até 20 m. Tal procedimento foi adotado, uma vez que a primeira característica se assemelha ao encontrado na área teste, onde os pontos apresentam diferença de nível de 70 m.

Na primeira etapa do método, que consiste na estimação das coordenadas de terreno dos pontos do grid, foram realizadas as estimativas das coordenadas de terreno dos pontos, considerando todos os conjuntos de POI e os dois MDT simulados, ou seja, para cada conjunto de pontos corrigidos por cada um dos conjuntos de POI, resultou em um conjunto de coordenadas de terreno para cada um dos MDT.

$$Z_i = 200 + rand(0,1) * 100 \quad (30)$$

sendo:

200 – cota mínima dos pontos;

100 – diferença de cotas máxima;

$Z_i$  – coordenada Z do ponto i; e

rand (0,1) – função (do MatLab) que retorna um valor randômico entre 0 e 1;

Considerando os MDT simulados, a estimação das coordenadas de terreno para cada conjunto de pontos fotogramétricos foi realizada considerando os seguintes parâmetros de OE: ( $X_0 = 300$  m,  $Y_0 = 300$  m,  $Z_0 = 450$  m,  $\omega = 0$ ,  $\varphi = 0$ ,  $\kappa = 0$ ). Tal processo, resultou em um total de 14 conjuntos de pontos com coordenadas de terreno, dois para cada conjunto de coordenadas fotogramétricas, considerando os dois MDT.

No método SPR a similaridade dos feixes foi realizada comparando o feixe formado pelos pontos no terreno e a posição do CP com o feixe formado pelo CP e os pontos fotogramétricos. Como POE iniciais foram informados, os mesmos valores utilizados no cálculo das coordenadas de terreno, isto para que, no caso onde os POI sejam similares, o ajustamento convirja com o menor resíduo. Assim, para cada um dos conjuntos de pontos no terreno foi possível a geração de 6 comparações. Por exemplo, compararam-se os pontos de terreno advindos do POI (I) e do MDT (I) com os pontos fotogramétricos advindos dos demais POI.

Os resultados para os três métodos estão apresentados nas Tabelas 13, 14, 15 e 16.

Tabela 13 - Valores de REMQ para o método ZROT

		Conjuntos					
		1	2	3	4	5	6
Conjuntos	1	0					
	2	4,68	0,00				
	3	8,20	7,82	0,00			
	4	6,54	6,52	5,20	0,00		
	5	15,30	15,12	8,92	9,50	0,00	
	6	5,51	5,42	8,10	7,63	13,86	0,00
	7	8,12	7,63	2,70	7,16	11,31	9,50

Fonte: Próprio autor.

Tabela 14 - Valores da raiz quadrada da variância à posteriori para o método ROT

		Conjuntos					
		1	2	3	4	5	6
Conjuntos	1	0					
	2	0,68	0				
	3	0,75	0,72	0			
	4	1,26	1,23	1,21	0		
	5	1,15	1,13	0,53	1,58	0	
	6	1,02	0,99	0,54	1,29	0,80	0
	7	0,95	0,90	0,46	0,92	0,86	0,53

Fonte: Próprio autor.

Tabela 15 - Valores da raiz quadrada da variância à posteriori para o método SPR (I)

		Conjuntos					
		1	2	3	4	5	6
Conjuntos	1	0					
	2	0,37	0				
	3	0,47	0,45	0			
	4	0,97	0,97	1,24	0		
	5	1,02	1,05	0,92	1,59	0	
	6	0,59	0,63	0,72	1,25	0,61	0
	7	0,60	0,54	0,46	1,12	1,33	1,04

Fonte: Próprio autor.

Tabela 16 - Valores da raiz quadrada da variância à posteriori o método SPR (II)

		Conjuntos					
		1	2	3	4	5	6
Conjuntos	1	0					
	2	0,26	0				
	3	0,34	0,35	0			
	4	0,92	0,90	1,14	0		
	5	0,78	0,80	0,49	1,53	0	
	6	0,39	0,41	0,24	1,16	0,47	0
	7	0,23	0,22	0,36	0,84	0,80	0,45

Fonte: Próprio autor.

Os resultados das análises de similaridades estão diferenciados por cor, sendo “não similar” (vermelho), “similar considerando um limiar de 0,5 pixel” (azul) e “similar considerando um limiar de 0,33 pixel” (verde). Analisando os resultados do método ZROT (Tabela 13), o mais restritivo dos métodos utilizados neste trabalho, é possível perceber que nenhum dos conjuntos de POI foram classificados como similares. Considerando os resultados do método ROT (Tabela 14), os resultados apresentados pelos POI (I) e (II) se aproximam do limiar de 0,5 pixel, mas ainda assim não são considerados



similares. As demais comparações foram também consideradas não similares por apresentarem valores maiores que 0,5 pixel.

Os resultados do método SPR foram separados em duas Tabelas (Tabela 15 e Tabela 16), sendo os resultados da primeira tabela referentes aos testes considerando o MDT com desnível de até 100 m, e os resultados da segunda tabela referentes aos testes considerando o MDT com desnível de até 20 m. Tal diferença no MDT tem um efeito prático de alterar a correlação entre os parâmetros de OE e OI. É interessante notar que, quando se considera o terreno mais plano, cujos parâmetros utilizados no ajustamento foram: cota do CP (450 m) e cota dos pontos (200 a 220 m), os valores de raiz da variância *à posteriori* apresentados na Tabela 16 são bem inferiores aos apresentados na Tabela 15.

Mesmo o método SPR permitindo a variação na posição e orientação do feixe a fim de proporcionar a similaridade, nota-se que vários POI continuam a não apresentar similaridade.

As diferenças nas métricas encontradas podem ser explicadas pelas particularidades de cada método, enquanto o primeiro não permite mudanças de posição e orientação dos feixes, o que torna a geometria restrita, os dois últimos são mais permissivos, sendo que o método ROT permite mudança de orientação e o método SPR permite mudanças de orientação e posição. Como resultado das mudanças permitidas pelos métodos ROT e SPR, foram encontrados valores menores de desvios entre os pontos oriundos das orientações por POI diferentes, fato que se justifica pela relação entre os parâmetros de translação e rotação com os parâmetros de orientação interior.

As limitações, na posição e orientação, impostas pelos diferentes métodos aplicados neste trabalho, podem ser comparadas às diferentes técnicas de georeferenciamento. O método ZROT restringe as variações na posição e atitude do feixe assemelhando-se à técnica de georeferenciamento direto, na qual dados de sensor GNSS e inercial estão disponíveis com alta acurácia. O método ROT permite apenas variações na atitude, similar ao caso no qual apenas dados de sensor GNSS estejam disponíveis. O método SPR, por sua vez, permite variações tanto na posição quanto na atitude do feixe, assemelhando-se ao georeferenciamento indireto, no qual a partir de pontos do terreno os POE são estimados.

## 4.2 CONSIDERAÇÕES SOBRE AS ANÁLISES DA CALIBRAÇÃO

Nesta pesquisa, foram realizados processos de calibração utilizando um campo de calibração 3D e uma estratégia de auto-calibração com injunções de distância no espaço objeto com a finalidade de estimar os parâmetros de orientação interior. Os resultados desses processos de calibração foram analisados a partir de diferentes métodos de análise de significância e estabilidade. Os testes de estatísticos de significância apontaram para a possível exclusão do parâmetro  $K_3$  do modelo de distorção radial simétrica. No entanto, em virtude do resultado não ter sido o mesmo em todas as calibrações, optou-se por manter o modelo com todos os parâmetros.

Outro motivo importante para manter o parâmetro em questão foi a observação dos valores apresentados nas Figuras 34 e 35, que indicam que a exclusão do mesmo causaria grandes diferenças nos valores de correção das distorções calculadas, principalmente em pontos no extremo do quadro. Vale ressaltar que, devido ao fato de nenhum parâmetro ter sido retirado do modelo, não houve a necessidade de repetir os processos de calibração e estimar novos conjuntos de calibração apenas com os parâmetros significantes.

Considerando os métodos de análise de estabilidade utilizados, pôde-se concluir, considerando a magnitude dos parâmetros, que os mesmos apresentaram variações randômicas, sendo assim, não houve tendência ou repetitividade dos valores, mesmo para as calibrações em que a câmara foi ligada e desligada entre as tomadas das fotos, fazendo com que o conjunto de lentes fosse recolhido e exposto. Pode-se dizer ainda, com base nos resultados das análises de estabilidade e considerando a similaridade dos feixes de raios, que os feixes foram considerados não similares para os métodos ZROT e ROT para os dois limiares considerados, 0,5 pixel e 0,3 pixel.

Na análise de estabilidade pelo método SPR, algumas comparações foram consideradas como similares. A similaridade do método é dependente do relevo de terreno utilizado no processo de resseção fotogramétrica. Dessa forma, notou-se que os valores apresentados para a similaridade, quando o terreno utilizado nos testes apresentava baixa variação de altitude (aproximadamente plano), foi melhor do que o resultado para o terreno com grande variação (terreno acidentado). Tal resultado justifica-se pois em terrenos planos a resseção fotogramétrica utilizada possibilita a absorção de certas diferenças na formação do feixe de raios (causada por diferenças entre os POI) pelos parâmetros de orientação exterior.

Por fim, na grande maioria das análises realizadas os POI foram considerados não similares, mesmo para os métodos mais flexíveis, como é o caso do SPR.

## 5 INFLUÊNCIA DA VARIAÇÃO DOS POI NA FOTOTRIANGULAÇÃO

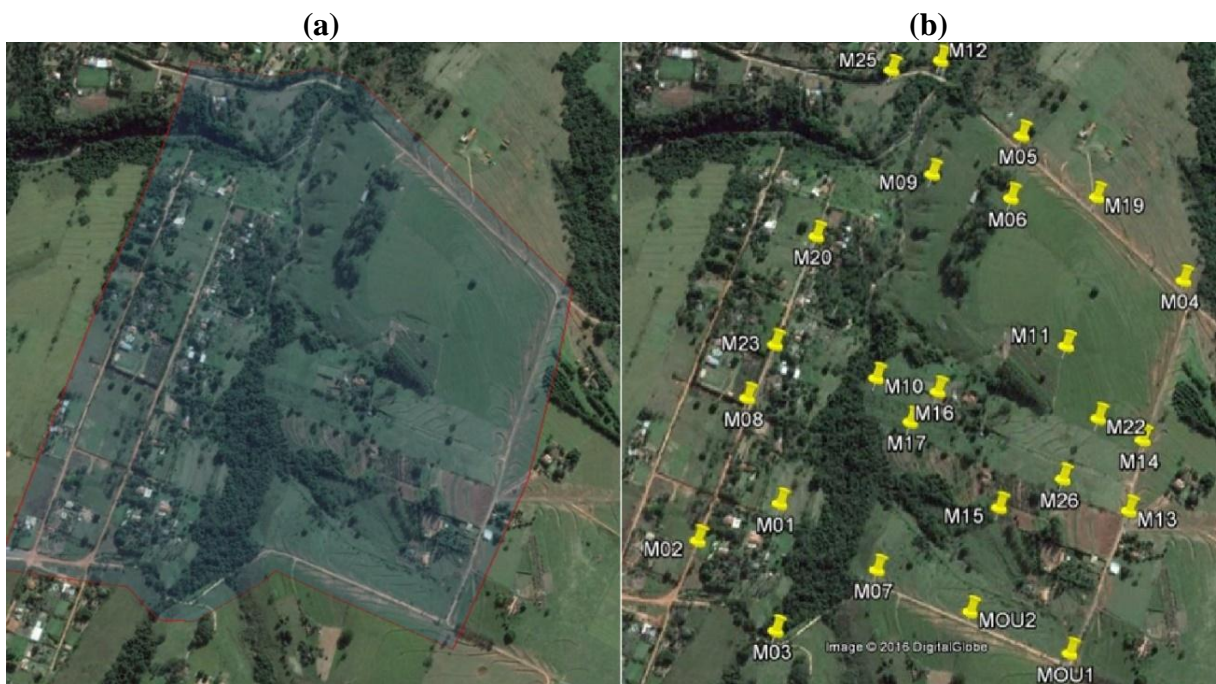
### 5.1 DETERMINAÇÃO DA ÁREA TESTE

A área de estudo fica localizada na área de expansão urbana do município de Presidente Prudente – SP, mais precisamente no bairro do Gramado e é limitada pela Rua 4, Estrada Bairro do Gramado e Estrada das 3 pontes.

A implantação da área teste contou com a materialização de 25 pontos de controle/verificação. No planejamento foi utilizado o *Google Earth* para definir distribuição e verificar a visibilidade dos pontos, considerando o ponto de vista aéreo.

A Figura 40 (a) mostra um polígono envolvendo a área teste e a Figura 40 (b) mostra a distribuição dos pontos de controle/verificação.

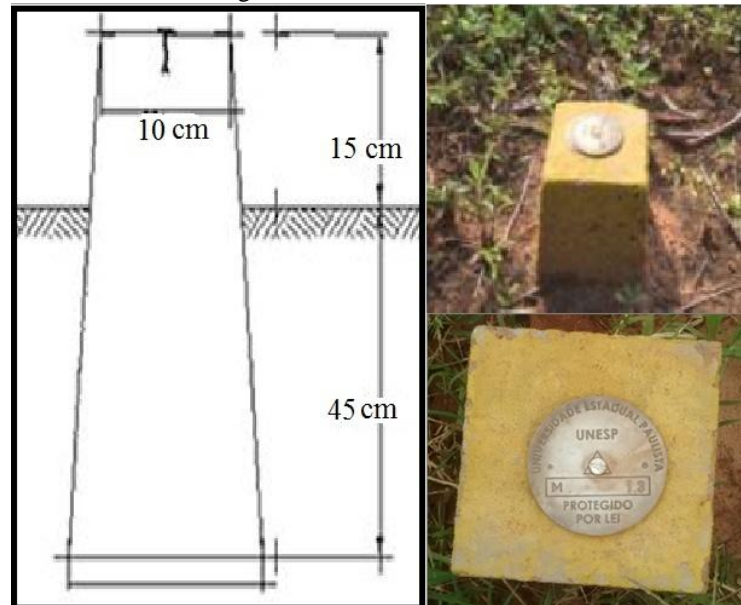
Figura 40 - Área teste e distribuição dos pontos determinados.



Fonte: Próprio autor.

Para a materialização dos pontos foram utilizados marcos de concreto tronco-piramidais, na cor amarela com dimensões de 60 cm de altura e topo quadrado com dimensões de 10 x 10 cm. Esses marcos foram implantados de modo que aproximadamente 15 cm de sua altura ficasse sobre a superfície do solo, como mostra a Figura 41.

Figura 41 - Marco de concreto.



Fonte: Próprio autor.

Para a escolha do método de levantamento utilizado na determinação das coordenadas dos pontos de controle/verificação foi necessário, inicialmente, definir a maior escala de mapeamento que seria possível ser realizar com as fotografias aéreas utilizadas neste trabalho. Para isso, utilizou-se da Equação de Paralaxe – Caso Normal (KRAUS, 2007).

#### Especificações da Fotografia:

- **Número de colunas:** 4608;
- **Número de linhas:** 3456;
- **Tamanho do sensor:** 6,17219 - 4,62914 mm;
- **Tamanho do pixel (x,y):** 0,0013368 mm;
- **Distância focal calibrada:** 4,38 mm;
- **GSD (*Ground Sample Distance*):** 0,08 m;
- **Superposição Longitudinal:** 80%

Os demais dados para o cálculo das estimativas de precisão, como denominador da escala da foto, altura de voo e aerobase, foram obtidos a partir das Equações (31), (32) e (33), respectivamente.

$$def = \frac{GSD}{Tam_{pixel}} \quad (31)$$

$$Z = f \cdot def \quad (32)$$

$$B = (1 - Sv) \cdot Tam_{quadro} \cdot def \quad (33)$$

sendo:

$Sv$  – Superposição longitudinal;

$Tam_{quadro}$  – Tamanho do quadro na direção do voo; e

$def$  – Denominador da escala da foto.

Uma vez realizados os cálculos, foram obtidos os valores: aerobase ( $B$ ) = 73,2 m e  $Z = 262,12$  m e  $def = 59844,40$ .

Sabe-se que a distorção aumenta radialmente à medida que o ponto está mais distante do centro do quadro (sensor). Dessa forma, para o cálculo da precisão esperada, foi escolhido um ponto na extremidade inferior direita da fotografia, subtraído de 10%. As coordenadas no sistema (coluna, linha) foram transformadas para o sistema fotogramétrico a partir das Equações (34) e (35). As coordenadas do ponto principal foram obtidas a partir do certificado de calibração da câmara.

$$x_{fot} = (C - C_x) \cdot Tam_{pixel} \quad (34)$$

$$y_{fot} = -(L - C_y) \cdot Tam_{pixel} \quad (35)$$

sendo:

$x_{fot}$ ;  $y_{fot}$  – Coordenadas fotogramétricas em X e Y, respectivamente;

$C$  – Coordenada do ponto, em colunas;

$L$  – Coordenada do ponto, em linhas;

$C_x$  – Coordenada do centro da imagem no eixo X, no sistema (C,L);

$C_y$  – Coordenada do centro da imagem no eixo Y, no sistema (C,L); e

$Tam_{pixel}$  – Tamanho do pixel na imagem.

Para os valores de  $C = 4377$ ,  $C_x = 2303,5$ ,  $C_y = 1727,5$  e  $L = 3283$ , o resultado obtido para  $(x_{fot}, y_{fot})$  foi  $(2,771, -2,079)$ mm.

A partir dos dados do levantamento fotogramétrico foi possível estimar qual seria a precisão das coordenadas dos pontos no espaço objeto.

$$\sigma_X = \frac{Z}{f} \sqrt{\left[ \left( \frac{x'_p}{f} \frac{Z}{B} \sigma_{px} \right)^2 + (\sigma_{x'_p})^2 \right]} \quad (36)$$

$$\sigma_Y = \frac{Z}{f} \sqrt{\left[ \left( \frac{y'_p}{f} \frac{Z}{B} \sigma_{px} \right)^2 + (\sigma_{y'_p})^2 \right]} \quad (37)$$

$$\sigma_Z = \frac{Z^2}{fB} \sigma_{px} \quad (38)$$

sendo:

$\sigma_X, \sigma_Y$  e  $\sigma_Z$  – Precisões esperadas nas componentes X, Y e Z respectivamente;

Z – Altura de voo;

f – Distância focal;

B – Aerobase;

$x'_p$  – Coordenada fotogramétrica do ponto em x;

$y'_p$  – Coordenada fotogramétrica do ponto em y;

$\sigma_{px}$  – Desvio padrão da paralaxe;

$\sigma_{x'_p}$  – Desvio padrão da componente x no sistema fotogramétrico; e

$\sigma_{y'_p}$  – Desvio padrão da componente y no sistema fotogramétrico.

Para a determinação do desvio padrão da paralaxe foi utilizado a equação  $p_x = x' - x''$  e considerado o valor do desvio padrão de  $x'$  e  $x''$  como o tamanho do pixel dividido por 2. Após a aplicação da propagação de erros, obteve-se que:

$$\sigma_{x'_p} = \sigma_{y'_p} = 0,0006684 \text{ mm}$$

$$\sigma_{px} = 0,000945 \text{ mm.}$$

Aplicando os valores encontrados anteriormente nas Equações (36), (37) e (38), chegou-se aos seguintes resultados para cada componente:

$$\sigma_x = 0,134 \text{ m}$$

$$\sigma_y = 0,104 \text{ m}$$

$$\sigma_z = 0,202 \text{ m}$$

A partir da precisão das componentes X e Y foi estimado o desvio padrão planimétrico:

$$\sigma_{plan} = \sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_y^2} = 0,170 \text{ m} \quad (39)$$

O produto deve atender a Classe A PEC – PCD. Visto que o erro máximo calculado para planimetria foi de 0,170 m, de acordo com o Tabela 1 foi determinada a escala de 1:1000, sendo necessário que o Erro Padrão Planimétrico seja inferior a 0,170 m. Para a altimetria a carta topográfica, que pode ser gerada a partir das imagens, deve atender a classe A também na escala 1:1000 (Tabela 2), no caso com equidistância de 1.

Considera-se que o trabalho possui basicamente três etapas que podem influenciar na qualidade do produto final (determinação das coordenadas do controle/verificação e fototriangulação e produto final). De acordo com Merchant (1982), o erro padrão de cada etapa subsequente deve ser 1/3 do erro padrão da etapa em questão. Seguindo esta afirmação, temos que:

#### **Planimetria:**

- Precisão da produto final: 0,17 m;
- Precisão da fototriangulação:  $0,170/3 = 0,056 \text{ m}$ ; e
- Precisão do ponto de controle levantado em campo:  $0,056/3 = 0,018 \text{ m}$ .

#### **Altimetria:**

- Precisão do produto final: 0,34 m;
- Precisão da fototriangulação:  $0,34/3 = 0,11 \text{ m}$ ; e
- Precisão do ponto de controle levantado em campo:  $0,11/3 = 0,036 \text{ m}$ .

Assim, levando em consideração a precisão estimada anteriormente, a determinação das coordenadas dos pontos implantados foi realizada a partir da técnica de posicionamento relativo estático rápido. As especificações do IBGE (Instituto Brasileiro de



Geografia e Estatística) para o tempo de coleta com relação ao comprimento da linha de base, equipamento utilizado e precisão a ser atingida estão apresentadas no Quadro 5.

Quadro 5 - Tempo de observação em função da precisão do posicionamento relativo, equipamento utilizado e comprimento da linha de base.

Linha de Base	Tempo de observação	Equipamento Utilizado	Precisão
00 – 05 Km	05 – 10 min	L1 ou L1/L2	5 - 10 mm + 1 ppm
05 – 10 Km	10 – 15 min	L1 ou L1/L2	5 - 10 mm + 1 ppm
10 – 20 Km	10 – 30 min	L1 ou L1/L2	5 - 10 mm + 1 ppm
20 – 50 Km	02 – 03 hr	L1/L2	5 mm + 1 ppm
50 – 100 Km	mínimo. 03 hr	L1/L2	5 mm + 1 ppm
> 100 Km	mínimo. 04 hr	L1/L2	5 mm + 1 ppm

Fonte: IBGE (2015).

Considerando que os equipamentos utilizados foram receptores GNSS de dupla frequência e que as bases utilizadas no processamento (PPTE e Base implantada na área teste) estão localizadas a menos de 10 km dos pontos de interesse, os mesmos tiveram o tempo de coleta variando de 15 a 20 minutos sem que a precisão fosse deteriorada. Vale ressaltar que o ponto M16, que foi utilizado de base para os demais, foi determinado fazendo uso do método de posicionamento relativo estático.

Os receptores utilizados foram configurados previamente utilizando o *software* PCCDU. Como parâmetros de configuração de coleta de dados foram adotados: Intervalo de coleta de 15 segundos; máscara de elevação de 10°; e modo estático.

Finalizado o rastreamento, os dados coletados pelo GNSS foram descarregados utilizando o *software* PCCDU. Os arquivos provenientes dos aparelhos são disponibilizados no formato binário do fabricante (tps), e os mesmos foram convertidos para o formato universal RINEX (*Receiver Independent Exchange Format*), pelo aplicativo TPS2RIN, para serem importados pelo *software* TBC para posterior processamento dos dados.

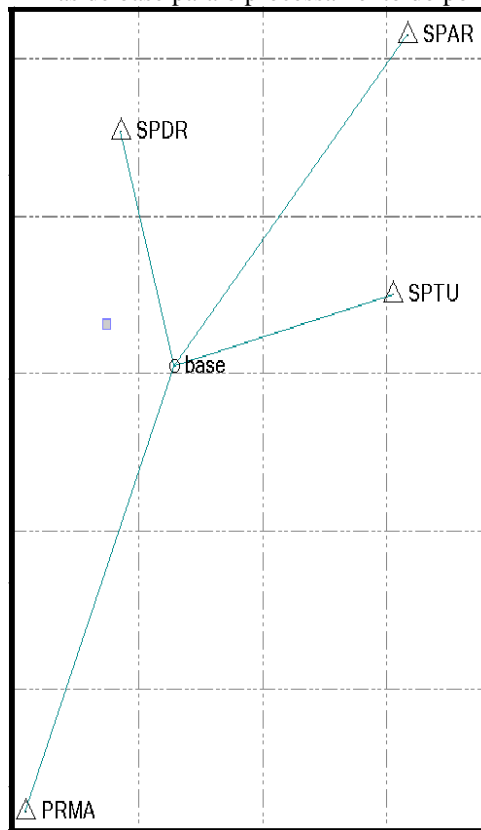
O processamento dos dados foi dividido em duas etapas: Processamento dos dados coletados no ponto Base (M16); Processamento dos dados coletados nos demais pontos. Como configuração de processamento foram selecionados o sistema de referência (SIRGAS2000), o sistema de projeção (UTM 22 S), máscara de elevação de 10°, GPS e GLONASS, nível de confiança de  $1\sigma$  e as frequências utilizadas (L1 + L2 para o processamento do ponto Base; L1 para os demais pontos).

Como foi necessário configurar de maneira diferente as frequências utilizadas, o processamento dos dados coletados no ponto Base (M16) foi realizado em

separado dos demais pontos. Para o ponto Base (M16) foram utilizadas 4 estações da Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo (RBMC): Tupã, Araçatuba, Dracena e Maringá, com distâncias de linha de base próximas e maiores que 100 km. Para o processamento dos demais pontos foram utilizados apenas 2 bases (PPTE e M16). Vale ressaltar que os RINEX das estações pertencentes à RBMC, bem como o descritivo das estações, foram obtidos junto ao site do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE).

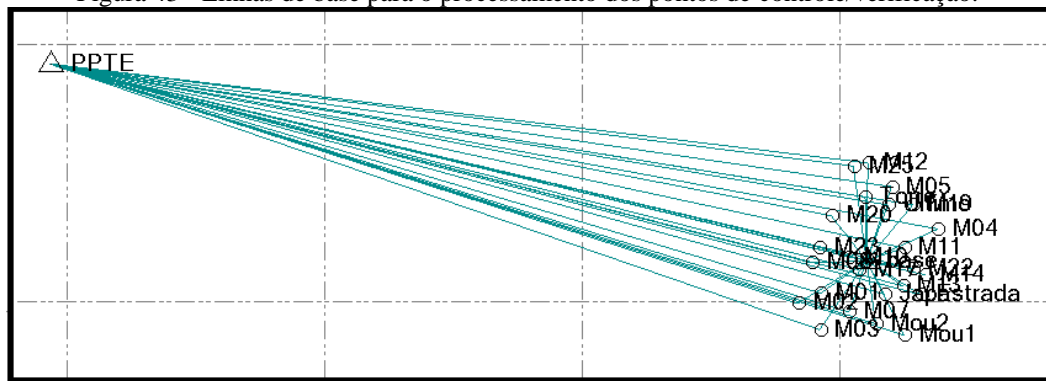
Na Figura 42 é possível visualizar as linhas de base formadas para o processamento relativo do ponto Base M16 e na Figura 43 é possível visualizar as linhas de base para o processamento dos demais pontos.

Figura 42 - Linhas de base para o processamento do ponto Base M16



Fonte: Próprio autor.

Figura 43 - Linhas de base para o processamento dos pontos de controle/verificação.



Fonte: Próprio autor.

Depois do processamento dos dados das linhas de base, apresentadas nas Figuras 42 e 43, por meio do *software* TBC foi feito o ajustamento das componentes das linhas de base para determinar as coordenadas dos pontos de controle e seus respectivos desvios padrão. Para o ajustamento das observações foram adotadas as seguintes configurações:

- Cálculo de deflexões de latitude e longitude: Não;
- Cálculo de rotação de azimute: Não;
- Cálculo de fator de escala: Não; e
- Injunção relativa: coordenadas das estações de referência.

Ao fim do ajustamento, o *software* forneceu um relatório com os resultados, onde são apresentadas as coordenadas UTM ajustadas dos pontos de controle e de verificação juntamente com seus desvios padrão, como mostra a Tabela 17.

Tabela 17 - Coordenadas UTM (fuso 22) e altitudes dos pontos materializados na área teste

<b>Pontos</b>	<b>Coord. E (m)</b>	<b><math>\sigma_E(m)</math></b>	<b>Coord. N (m)</b>	<b><math>\sigma_N(m)</math></b>	<b>Altitude geométrica (m)</b>	<b><math>\sigma_h(m)</math></b>
M01	463852,074	0,003	7552064,942	0,003	406,584	0,008
M02	463672,767	0,003	7551984,014	0,003	421,846	0,008
M03	463843,758	0,003	7551780,589	0,003	394,013	0,008
M04	464760,891	0,003	7552563,410	0,003	410,917	0,008
M05	464398,692	0,003	7552892,092	0,003	401,586	0,008
M06	464372,905	0,003	7552748,449	0,002	406,532	0,009
M07	464070,162	0,003	7551916,113	0,003	402,241	0,008
M08	463780,407	0,003	7552300,913	0,003	413,952	0,009
M09	464196,308	0,004	7552811,023	0,003	405,243	0,008
M10	464068,524	0,003	7552345,803	0,003	387,993	0,009
M11	464494,110	0,003	7552416,627	0,003	419,665	0,008
M12	464216,286	0,003	7553076,741	0,003	365,873	0,009
M13	464484,314	0,003	7552120,790	0,003	427,878	0,008
M14	464662,132	0,003	7552206,247	0,003	426,495	0,008
M15	464343,408	0,004	7552056,034	0,005	417,896	0,009
M16(base)	464207,175	0,002	7552314,767	0,001	407,484	0,005
M17	464145,178	0,003	7552246,234	0,003	402,261	0,008
M19	464565,062	0,003	7552750,986	0,003	416,990	0,008
M20	463932,500	0,003	7552666,428	0,003	397,174	0,008
M22	464564,627	0,003	7552254,327	0,003	423,728	0,008
M23	463841,112	0,003	7552420,694	0,003	407,343	0,008
M25	464103,624	0,003	7553053,273	0,003	371,805	0,009
M26	464629,157	0,004	7552050,562	0,003	433,244	0,010
Mou1	464497,824	0,005	7551737,455	0,004	426,528	0,014
Mou2	464278,911	0,003	7551826,412	0,003	418,380	0,008

Fonte: Próprio autor.

A partir do resultado do processamento destaca-se que os desvios padrão, planimétrico e altimétrico, das coordenadas dos pontos implantados ficaram abaixo da casa do centímetro, com exceção da componente altimétrica dos pontos M26 e Mou1. Vale ressaltar que os valores de desvio padrão dos pontos estão abaixo dos valores estimados como aceitáveis, sendo assim conclui-se que a etapa de determinação de coordenadas dos pontos de controle/verificação foi realizada conforme o planejado.

## 5.2 FOTOTRIANGULAÇÕES E ANÁLISES

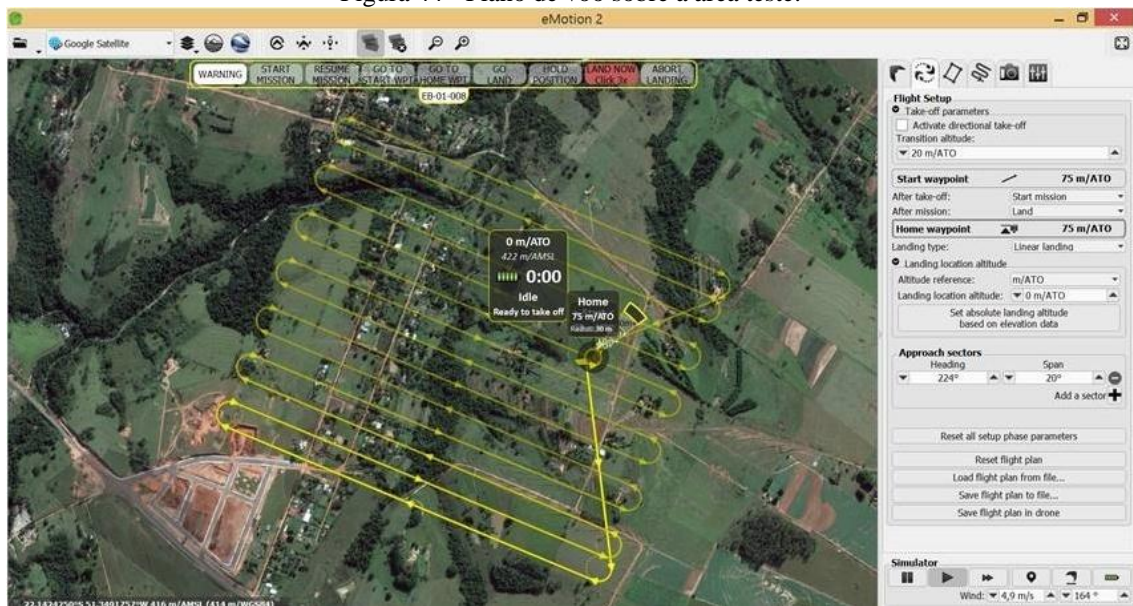
### 5.2.1 Plano de voo e aquisição das imagens

Considerando a área teste definida, inicialmente foram elaborados planos de voos utilizando o *software* eMotion. Tal *software* possibilita a elaboração do plano de voo de maneira automatizada, com destaque para a facilidade da identificação e delimitação da área teste, sendo este procedimento facilitado pela possibilidade de visualizar imagens aéreas a partir de *softwares* como *Open Street Maps*, *Google Maps*, entre outros.

Para a realização das tomadas de fotografias, foram elaborados planos de voos onde foram previstas linhas de voo paralelas entre si e com sobreposição longitudinal de 80% e lateral de 70%. Tais sobreposições são indicadas pelo fabricante devido ao fato do RPAS ser um equipamento leve e sofrer deslocamento devido a variação da intensidade e direção do vento. Vale ressaltar a importância de se utilizar tal configuração nas análises, pois usuários que detêm menor conhecimento sobre os processos fotogramétricos envolvidos, por vezes, apenas seguem as instruções do fabricante sem ao menos vislumbrar o efeito real de tal configuração no resultado final.

No *software* utilizado para elaborar o plano de voo, foram definidos: a câmara utilizada (Canon ELPH 110 HS); a área de interesse; o raio do alcance do rádio; e o tamanho do pixel, que por sua vez implicou na definição da escala aproximada das fotografias e altura de voo. Ainda na elaboração do plano de voo, foram definidos os locais de lançamento e aterrissagem do equipamento. Vale ressaltar que os pousos e decolagens devem ser realizados na direção contrária à direção de vento. Tal procedimento, básico nas regras da aviação convencional, vale também para os RPAS e deve ser adotado para diminuir a chance de acidentes com o equipamento e para que a aterrissagem seja mais suave.

Figura 44 - Plano de voo sobre a área teste.

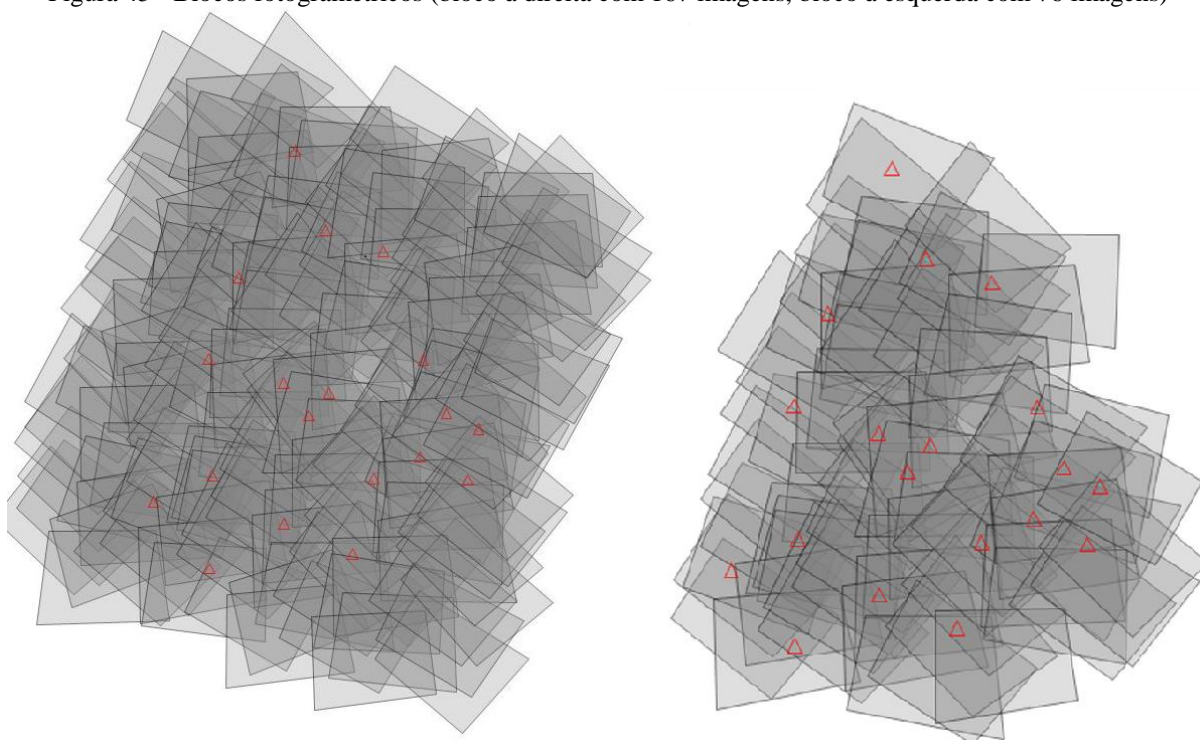


Fonte: Próprio autor.

Para a execução do referido voo há necessidade de se contar com ao menos duas pessoas, sendo uma responsável pelas manobras de calibração, do sensor inercial e do sensor de altitude, e pelo lançamento do RPAS e a outra responsável pelo monitoramento do voo e de todos os alertas e situação informados no *software* eMotion. Durante o voo o controlador pode, em casos em que seja necessário, adotar procedimentos de emergência, abortar a missão, solicitar que o RPAS retorne para a posição de lançamento, pousar de imediato ou retomar a missão.

Do total de imagem obtidas no voo realizado (167), apenas 76 foram utilizadas devido a distribuição espacial dos marcos implantados em campo. Ao considerar todas as imagens, notou-se que algumas das faixas de voo do extremo do bloco não apresentavam pontos de controle. Neste sentido, as faixas de voo dos extremos do bloco foram desconsideradas nos experimentos de campo. A distribuição espacial dos pontos de controle e verificação nos blocos fotogramétricos com 167 e 76 imagens está apresentada na Figura 45.

Figura 45 - Blocos fotogramétricos (bloco à direita com 167 imagens, bloco à esquerda com 76 imagens)



Fonte: Próprio autor.

### 5.2.2 Variação dos POI na fototriangulação

Neste experimento foram utilizadas as imagens adquiridas, as informações dos sensores embarcados (GPS e inercial), as coordenadas dos pontos de controle e os parâmetros de orientação interior apresentados na Seção 4.1. Inicialmente, foi realizada uma fototriangulação utilizando todos os pontos de terreno como pontos de controle. Para tal, foi utilizado o *software* Erdas Imagine que permite o processamento do bloco e a geração de produtos fotogramétricos. Em seguida, refinados os POE, foram realizados testes variando os POI a fim de analisar a influência dos mesmos no comportamento do REMQ dos pontos de verificação.

Os POE advindos dos sensores embarcados foram refinados a partir do processo de ajustamento da fototriangulação. Nesta etapa, foram utilizadas as 76 imagens juntamente com as coordenadas dos 19 pontos de controle, como mostrado na Figura 45 (b). Destaca-se ainda que, para o processo de fototriangulação, os parâmetros de OE e OI foram configurados como iniciais, sendo que, foram consideradas como injeção as coordenadas tridimensionais de 19 pontos de controle. Os valores de desvio-padrão informados para os parâmetros são apresentados na Tabela 18.

Tabela 18 - Desvios-padrão dos parâmetros utilizados no processo de fototriangulação (refinamento dos POE)

Parâmetro	Desvio-padrão	Unidade
Pontos fotogramétricos	0,5	Pixel
Pontos de controle	0,03	m
Posição do CP	2	m
Atitude do CP	1	°
Orientação interior	Desconhecido	

Fonte: Próprio autor.

Os resultados obtidos ao fim deste processo correspondem aos POE refinados para cada uma das imagens do bloco. Como métrica para a qualidade da fototriangulação foi considerado o REMQ das coordenadas dos pontos fotogramétricos (0,7886 pixel) e o REMQ dos pontos de controle (0,086 em X, 0,063 em Y e 0,0364 em Z). Neste sentido, os POE foram considerados como corretos e injuncionados nos testes realizados a fim de verificar a influência dos POI no processo de fototriangulação.

Os testes, variando os POI, foram conduzidos assumindo os POE refinados como advindos de georreferenciamento direto. Dessa forma, foram escolhidos um total de 10 pontos como controle e os demais foram informados como pontos de verificação (Figura 46 e Figura 47). Destaca-se ainda que, para os teste variando POI, foram realizadas 2 fototriangulações para cada conjunto de POI, em uma delas os POI eram configurados como parâmetros ponderados, e reajustados no processo, e na outra eram considerados como fixos. Os valores de desvio-padrão informados para os parâmetros estão apresentados na Tabela 19.

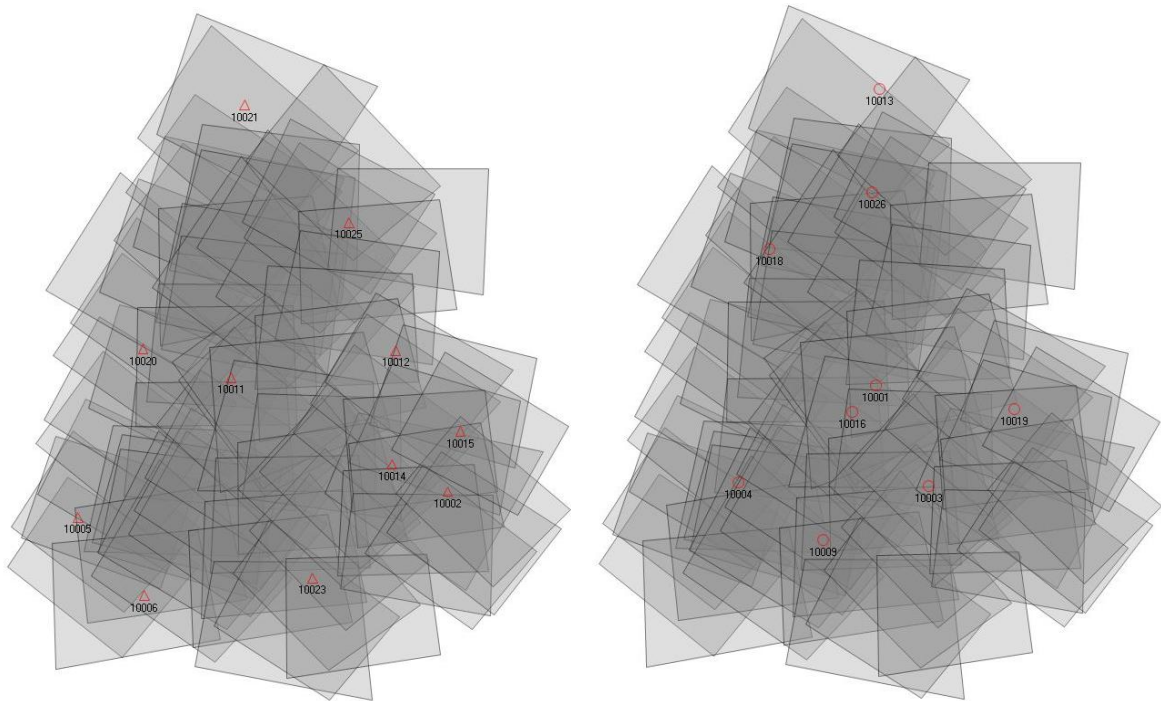
Tabela 19 - Desvios-padrão dos parâmetros utilizados no processo de fototriangulação (testes com POI)

Parâmetro	Desvio-padrão	Unidade
Pontos fotogramétricos	0,5	Pixel
Pontos de controle	0,03	m
Posição do CP	0,08	m
Atitude do CP	0,02	°
Orientação interior	Ponderado/fixo	

Fonte: Próprio autor.

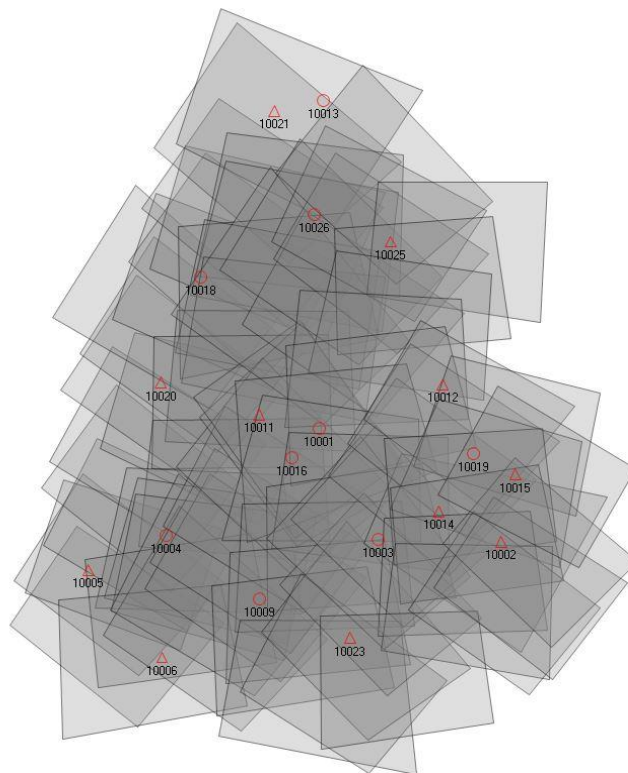


Figura 46 - Distribuição dos pontos de controle (esquerda) e verificação (direita)



Fonte: Próprio autor.

Figura 47 - Distribuição dos pontos de controle e verificação



Fonte: Próprio autor.

A partir das configurações apresentadas na Tabela 19, foram executadas 14 fototriangulações a fim de verificar a influência dos POI no processo. Os resultados foram analisados, inicialmente, com base nos valores de REMQ encontrados para os parâmetros de orientação exterior (Tabela 20) , e em um segundo momento foram analisados os resíduos encontrados para os pontos fotogramétricos observados (Tabela 21). Por fim, foram realizadas análises com base nos valores de REMQ para os pontos de verificação, como mostra a Tabela 22 . Destaca-se que, os resultados de REQM estão separados em tabelas de acordo com a configuração de POI utilizada no processamento (ponderado ou fixo).

Tabela 20 - REMQ dos parâmetros de orientação exterior

	REMQ dos POE					
	X (m)	Y (m)	Z (m)	$\omega$ (°)	$\varphi$ (°)	$\kappa$ (°)
POI_1	1,813	1,452	0,453	0,36896	0,499418	0,166959
POI_2	1,800	1,167	0,504	0,334106	0,558625	0,164622
POI_3	1,677	1,309	0,504	0,367531	0,529349	0,163815
POI_4	1,595	1,219	0,499	0,349003	0,511875	0,154506
POI_5	5,769	12,240	2,467	3,262533	1,477739	0,946861
POI_6	1,857	1,284	0,527	0,357088	0,572397	0,173378
POI_7	1,692	1,280	0,499	0,362121	0,534931	0,163974

Fonte: Próprio autor.

Levando em consideração os valores informados para os desvios-padrão dos POE (Tabela 19), para os experimentos de fototriangulação, e considerando os valores de REQM apresentados na Tabela 20, é possível verificar que a variação dos valores de POI informados causa discrepâncias nos valores de POE. Destaca-se que, os valores de REMQ encontrados são maiores que os desvios-padrão informados para os parâmetros, tal fato justifica-se, pois os valores de desvios-padrão são utilizados no processo de ajustamento para calcular o peso das injunções e não necessariamente limita a variação possível na estimativa dos parâmetros.

Considerando que possíveis erros nos conjuntos de parâmetros de orientação interior podem ser absorvidos não só pelos parâmetros de orientação interior, mas também pelos resíduos encontrados nos pontos fotogramétricos. Ao fim do ajustamento, foi calculada a média dos resíduos dos pontos fotogramétricos, os valores obtidos estão apresentados na Tabela 21. Com base nos valores apresentados é possível verificar altos valores de resíduos para todos os experimentos realizados. Destaca-se que para os experimentos em que os POI foram informados como injunções relativas (POI\_ponderado), os valores de resíduos foram

inferiores aos resíduos encontrados para o experimento considerando os POI como valores constantes (POI\_fixo).

Tabela 21 - Resíduos dos pontos fotogramétricos

		Resíduos POI_ponderado		Resíduos POI_fixo		
		x (pixel)	y (pixel)	x (pixel)	y (pixel)	
Conjunto POI	1	2,228	2,369	1	2,353	2,504
	2	3,540	3,344	2	3,603	3,405
	3	3,608	3,412	3	3,679	3,479
	4	3,614	3,388	4	3,663	3,432
	5	5,886	5,846	5	9,421	9,401
	6	3,651	3,471	6	3,727	3,550
	7	3,590	3,400	7	3,668	3,471

Tabela 22 - Valores de REMQ dos pontos de verificação

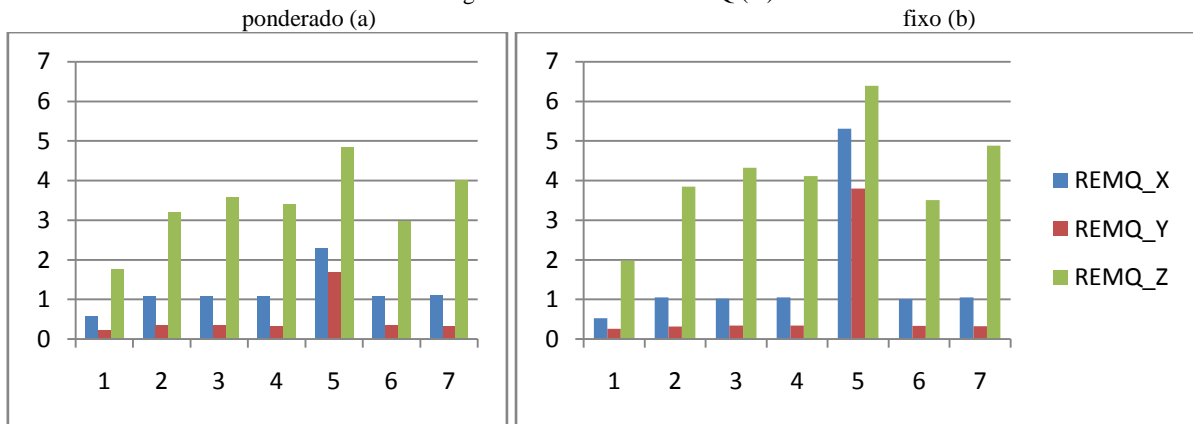
		Verificação_Ponderado			Verificação_Fixo			
		X (m)	Y (m)	Z (m)	X (m)	Y (m)	Z (m)	
Conjunto POI	1	<b>0,574</b>	0,226	1,753	1	0,526	0,256	1,977
	2	<b>1,088</b>	<b>0,333</b>	3,195	2	1,047	0,319	3,849
	3	<b>1,075</b>	0,333	3,572	3	1,021	0,336	4,323
	4	<b>1,086</b>	0,330	3,404	4	1,050	0,337	4,113
	5	2,292	1,673	4,828	5	5,312	3,795	6,390
	6	<b>1,076</b>	<b>0,342</b>	2,959	6	1,009	0,328	3,511
	7	<b>1,093</b>	<b>0,329</b>	4,002	7	1,048	0,324	4,885

Fonte: Próprio autor.

Analisando os valores apresentados na Tabela 22, verifica-se que, na maioria dos casos, os valores de REMQ encontrados para as componentes X e Y foram piores para os experimentos em que os POI foram reajustados (valores destacados em negrito). Destaca-se ainda que, a principal contribuição de possibilitar o refinamento dos POI foi a melhoria da precisão da componente Z.

Quanto à magnitude dos valores de REMQ calculados, nota-se que apenas as fototriangulações que utilizando dos conjuntos de POI 1 e 5 apresentaram resultados que destoam dos valores das demais. Para melhor visualizar foram gerados gráficos com os valores de REMQ, apresentados na Figura 48.

Figura 48 - Valores de REMQ (m)



Fonte: Próprio autor.

Uma análise mais detalhada foi realizada com a finalidade de verificar a existência de tendências nos pontos de verificação. Para tal, foi aplicado o teste estatístico *t-student* sobre os resíduos dos mesmos. Como resultado (mostrado na Tabela 23), verificou-se que nas fototriangulações com POI ponderados houve tendência na componente Z para todos os conjuntos de POI analisados, e em X para o conjunto de POI resultante da calibração 5. Para os experimentos com POI fixo houve tendência na componente Z para quase todos os conjuntos de POI, com exceção do conjunto de POI resultante da calibração 5, o mesmo apresentou tendência na componente X.

Tabela 23 - Valores de t-student dos pontos de verificação

	POI_ponderado				POI_fixo		
	X	Y	Z		X	Y	Z
POI_1	1,142	-0,386	-5,692		0,389	-0,587	-6,024
POI_2	1,778	-0,209	-7,768		1,568	-0,299	-9,098
POI_3	1,730	-0,727	-8,323		1,432	-1,335	-9,609
POI_4	1,773	-0,818	-7,514		1,545	-1,535	-8,657
POI_5	-6,828	-1,564	-4,707		-8,460	-1,481	-2,136
POI_6	1,684	-0,314	-7,310		1,364	-0,480	-8,631
POI_7	1,772	-0,602	-8,934		1,509	-1,112	-10,238
tabelado	2,306				2,306		

Fonte: Próprio autor.

Considerando o teste de tendência realizado, foram aplicadas correções nas coordenadas estimadas no processo de fototriangulação. As componentes que apresentaram valor de *t-student* acima do tabelado (valores destacados em vermelho na Tabela 23) foram corrigidas pelo valor da média dos resíduos encontrados. Os valores de REMQ calculados para os pontos de verificação já corrigidos da tendência estão apresentados na Tabela 24.

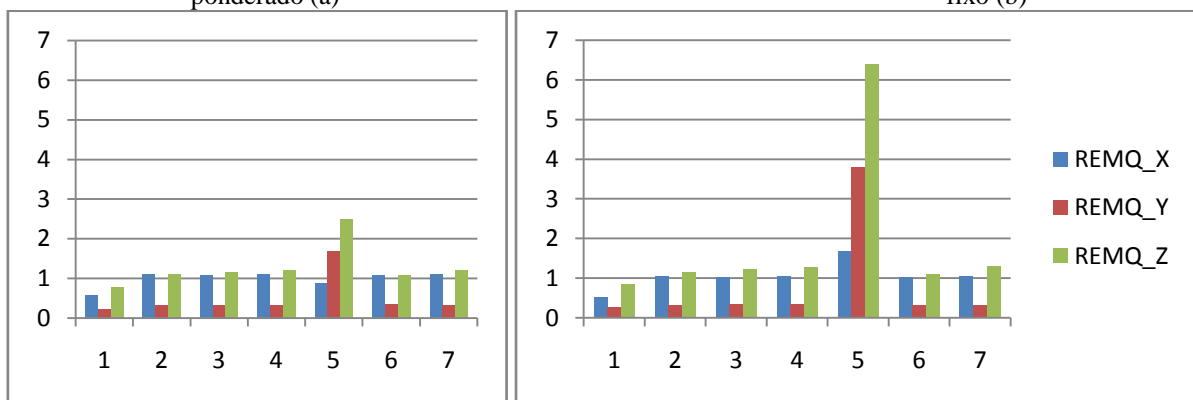
Tabela 24 - Valores de REMQ dos pontos de verificação corrigidos da tendência

		Verificação_ponderado			Verificação_Fixo			
		X (m)	Y (m)	Z (m)	X (m)	Y (m)	Z (m)	
Conjunto POI	1	<b>0,574</b>	0,226	0,780	1	0,526	0,256	0,840
	2	<b>1,088</b>	<b>0,333</b>	1,093	2	1,047	0,319	1,143
	3	<b>1,075</b>	0,334	1,149	3	1,021	0,336	1,221
	4	<b>1,086</b>	0,330	1,199	4	1,050	0,337	1,277
	5	0,877	1,673	2,487	5	1,685	3,795	6,390
	6	<b>1,076</b>	<b>0,342</b>	1,068	6	1,009	0,328	1,093
	7	<b>1,093</b>	<b>0,329</b>	1,208	7	1,048	0,324	1,300

Fonte: Próprio autor.

A partir dos valores apresentados na Tabela 22 e na Tabela 24, nota-se que os valores de REMQ diminuíram consideravelmente após a correção das tendências verificadas pelo teste estatístico *t-student*. Ainda assim, os valores de REMQ apresentados ao fim dos processos de fototriangulação estão acima de 1 m nas componentes X e Z e de 0,3 m na componente Y, desconsiderando os resultados em que foram testados os POI resultantes da calibração de número 5. Considerando que o GSD (*Ground Sample Distance*) das fotos utilizadas é cerca de 0,08 m, o REMQ das componentes X e Z apresentam magnitude de mais de 10 GSD e a componente Y mais de 4 GSD. A partir dos valores apresentados na Tabela 24 foram gerados gráficos (Figura 49). É possível notar através dos gráficos que os REMQ apresentados na Figura 49 são menores que os valores apresentados na Figura 48.

Figura 49 - Valores de REMQ (m) corrigidos da tendência ponderado (a) e fixo (b)



Fonte: Próprio autor.

Para melhor compreender a relação da variação dos POI com a estimação das coordenadas no processo fotogramétrico, foi realizada uma análise comparativa entre as coordenadas tridimensionais estimadas para os pontos de verificação. Tal procedimento foi

feito com base na estimação de um valor de REMQ para as diferenças entre as coordenadas estimadas em cada um dos processos de fototriangulação. Assim, as coordenadas foram comparadas duas a duas. Por exemplo, as coordenadas dos pontos de verificação estimadas na fototriangulação 1 foram comparadas com as homólogas estimadas na fototriangulação 2 e a partir das diferenças encontradas foram estimados valores de REMQ para as 3 componentes. Destaca-se que foram feitas comparações entre todas as coordenadas estimadas, como mostram as Tabelas 25, 26, 27 e 28.

Tabela 25 - Valores de REMQ (em m) da comparação entre as coordenadas estimadas para os pontos de verificação, à esquerda POI\_1 com os demais e à direita POI\_2 com os demais

		fototri (POI_1)					fototri (POI_2)		
		X (m)	Y (m)	Z (m)			X (m)	Y (m)	Z (m)
POI	2	0,705	0,242	2,427	POI	1	0,705	0,242	2,427
	3	0,683	0,208	2,853		3	0,053	0,130	0,500
	4	0,726	0,226	2,723		4	0,053	0,140	0,341
	5	5,387	3,647	5,200		5	5,907	3,841	5,389
	6	0,655	0,213	2,125		6	0,076	0,051	0,354
	7	0,714	0,212	3,373		7	0,041	0,099	1,060

Fonte: Próprio autor.

Tabela 26 - Valores de REMQ (em m) da comparação entre as coordenadas estimadas para os pontos de verificação, à esquerda POI\_3 com os demais e à direita POI\_4 com os demais

		fototriangulação (POI_3)					fototriangulação (POI_4)		
		X (m)	Y (m)	Z (m)			X (m)	Y (m)	Z (m)
POI	1	0,683	0,208	2,853	POI	1	0,726	0,226	2,723
	2	0,053	0,130	0,500		2	0,053	0,140	0,341
	4	0,052	0,029	0,270		3	0,052	0,029	0,270
	5	5,866	3,735	5,331		5	5,911	3,742	5,364
	6	0,053	0,096	0,835		6	0,099	0,112	0,644
	7	0,040	0,038	0,571		7	0,030	0,052	0,810

Fonte: Próprio autor.

Tabela 27 -Valores de REMQ (em m) da comparação entre as coordenadas estimadas para os pontos de verificação, à esquerda POI\_5 com os demais e à direita POI\_6 com os demais

		fototriangulação (POI_5)					fototriangulação (POI_6)		
		REMQ_X	REMQ_Y	REMQ_Z			REMQ_X	REMQ_Y	REMQ_Z
POI	1	5,387	3,647	5,200	POI	1	0,655	0,213	2,125
	2	5,907	3,841	5,389		2	0,076	0,051	0,354
	3	5,866	3,735	5,331		3	0,053	0,096	0,835
	4	5,911	3,742	5,364		4	0,099	0,112	0,644
	6	5,833	3,795	5,326		5	5,833	3,795	5,326
	7	5,902	3,766	5,442		7	0,085	0,074	1,404

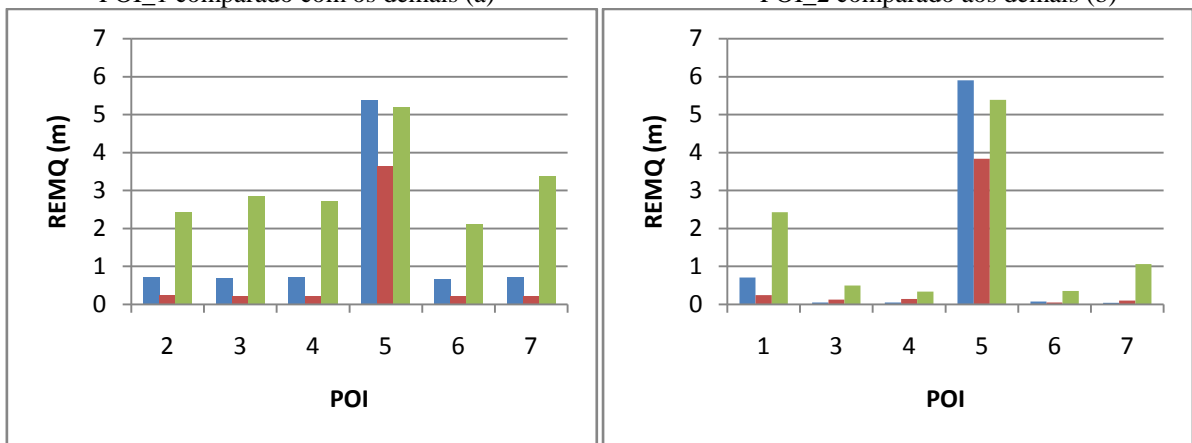
Fonte: Próprio autor.

Tabela 28 - Valores de REMQ (em m) da comparação entre as coordenadas estimadas para os pontos de verificação, POI\_7 com os demais

		fototriangulação (POI_7)		
		REMQ_X	REMQ_Y	REMQ_Z
POI	1	0,714	0,212	3,373
	2	0,041	0,099	1,060
	3	0,040	0,038	0,571
	4	0,030	0,052	0,810
	5	5,902	3,766	5,442
	6	0,085	0,074	1,404

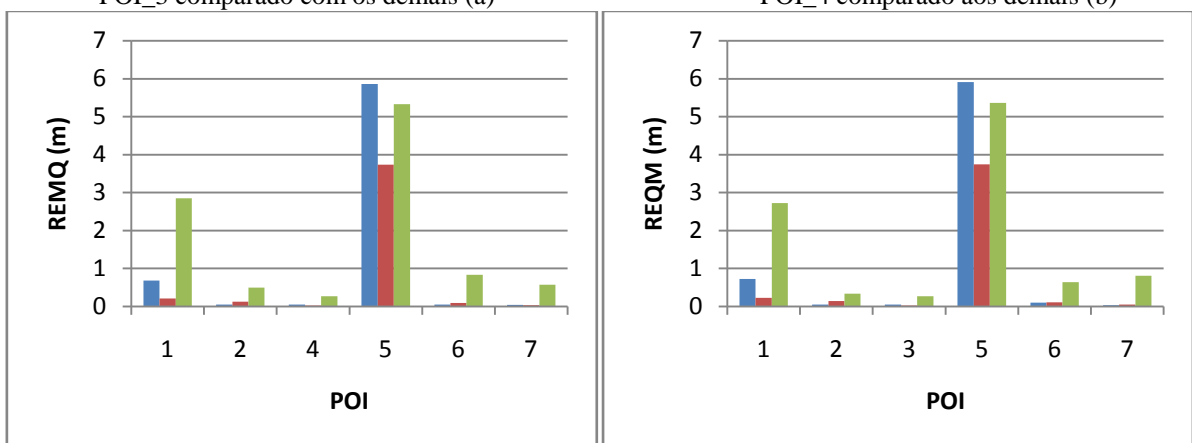
Fonte: Próprio autor.

Figura 50 - Valores de REMQ para fototriangulações com diferentes POI  
POI\_1 comparado com os demais (a) POI\_2 comparado aos demais (b)

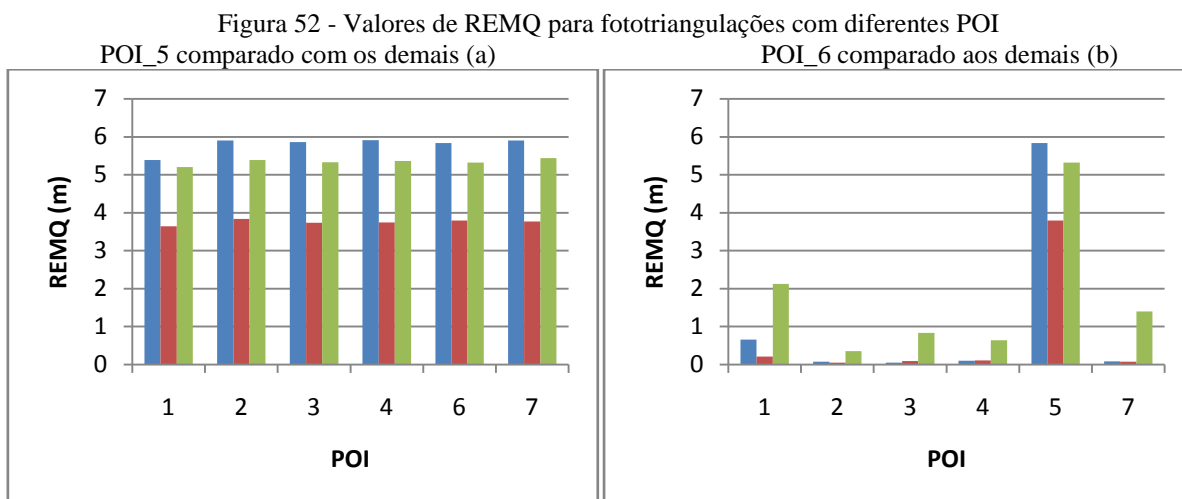


Fonte: Próprio autor.

Figura 51 - Valores de REMQ para fototriangulações com diferentes POI  
POI\_3 comparado com os demais (a) POI\_4 comparado aos demais (b)

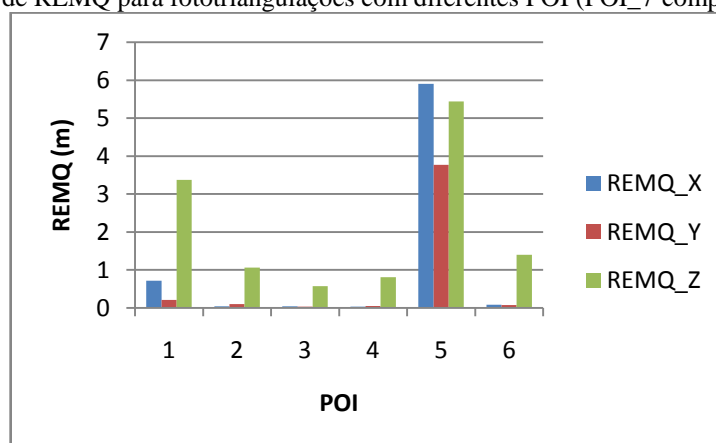


Fonte: Próprio autor.



Fonte: Próprio autor.

Figura 53 - Valores de REMQ para fototriangulações com diferentes POI (POI\_7 comparado com os demais)



Fonte: Próprio autor.

Observando-se os resultados apresentados nas Tabelas 25, 26, 27 e 28 e representados nas Figuras 52, 53, 54 e 55, é possível notar que a principal discrepância causada na estimação das coordenadas tridimensionais, em função da variação dos POI, é encontrada na componente Z. Destaca-se que, dos conjuntos de POI testados, a fototriangulação que utiliza do conjunto de POI 5 apresenta os maiores valores de REMQ quando comparado às demais, seguida pelos valores apresentados pela fototriangulação que utiliza do conjunto de POI 1. Com exceção dos resultados obtidos para os POI 1 e 5, os REMQ calculados para as componente X e Y são inferiores a 2 GSD.



### 5.3 CONSIDERAÇÕES SOBRE AS ANÁLISES DA FOTOTRIANGULAÇÃO

Para a execução dos experimentos de fototriangulação, variando os POI, inicialmente foi necessário realizar o refinamento do POE, uma vez que os sensores embarcados fornecem valores de posição com desvio-padrão da ordem de 5 metros e de atitude da ordem de graus. A partir do processo de fototriangulação utilizando-se todos os pontos como controle foi possível refinar as posições e orientações das imagens do bloco, as mesmas foram utilizadas como advindas de georreferenciamento direto nos processos seguintes.

Assim, os experimentos variando os POI e adotando os como valores não fixo, resultaram em menores valores de REMQ nas componentes planimétricas se comparados aos resultados dos experimentos que consideraram os POI como fixos. Por outro lado, resultado contrário foi verificado para a componente Z. Este resultado pode ser justificado pela variação da distância focal, tal variação está diretamente relacionada à variação nas coordenadas estimadas para a componente Z e causa um efeito de escala nas fotografias, por sua vez, este efeito faz com que os pontos sofram um deslocamento radial, aumentando assim sua incerteza nas componentes X e Y.

Ainda com base nos experimentos com variação dos POI foi verificada a existência de tendência nas coordenadas estimadas, principalmente para a componente Z. Esta tendência aponta para problemas nos valores de distância focal informados no processo de fototriangulação. Atribui-se tal tendência à distância focal, uma vez que, como mostrado na Figura 38, a diferença do efeito das distorções das lentes combinadas são da ordem de 3 pixels no extremo do sensor. Destaca-se ainda que, mesmo com a correção da tendência verificada, a principal componente afetada no processo permaneceu sendo a componente Z.

Com base nos resultados obtidos na análise de estabilidade, esperava-se que os teste das fototriangulações variando os POI apresentassem resíduos altos, destacando assim a influência das diferenças encontradas nos valores dos mesmos. Assim, as análises comparativas das coordenadas estimadas pelos processos de fototriangulação, considerando diferentes POI, mostraram que as calibrações de fato influenciam no processo de fototriangulação de maneira significativa, em especial na componente Z. Pode-se notar que parte da influência da orientação interior foi absorvida pelos POE, mas ainda assim nota-se o impacto dos diferentes valores da distância focal, apresentados na Figura 27 (Seção 4.1.2), no cálculo das coordenadas em Z. Em um segundo momento, de maneira menos impactante, a variação dos valores de correção das distorções das lentes podem refletir em incertezas na

estimação da componente  $Z$ , uma vez que, pontos homólogos em duas imagens podem sofrer um incremento ou um decréscimo no valor de paralaxe, este por sua vez está diretamente relacionado com a componente  $Z$  que será estimada no processo de fototriangulação.

Por fim, considerando os valores resultantes das comparações das coordenadas estimadas com as coordenadas de referência (Tabela 22 e Tabela 24) e as comparações das coordenadas estimadas entre si (Tabela 25, Tabela 26, Tabela 27 e Tabela 28). Pode-se dizer que as diferenças encontradas no primeiro caso são bem maiores que as diferenças encontradas para o segundo caso. Tal resultado indica que os parâmetros estimados durante os processos de calibração não são diferentes apenas entre si, como apontado pelos testes de estabilidade, mas que são diferentes em maior magnitude se comparados aos parâmetros no momento da tomada das fotos durante o voo.

## 6. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

### 6.1 CONCLUSÕES

Os RPAS possibilitam grande variedade de usos, dentre eles o uso em mapeamento, cujos principais fatores complicadores podem ser considerados: limitação de carga, autonomia e restrições de natureza legal. O uso de sensores de baixo custo e de baixa performance embarcados neste tipo de aeronave, quando utilizado para fins de mapeamento, deve ser analisado considerando que a qualidade dos produtos finais gerados está diretamente relacionada à precisão geométrica dos equipamentos utilizados, bem como dos parâmetros de orientação interior da câmara, da geometria das imagens utilizadas e da quantidade de pontos de controle utilizados no ajustamento do bloco fotogramétrico.

Com base nos resultados obtidos nos experimentos, pode-se concluir que a câmara analisada não deve ser considerada como um equipamento estável. Sendo assim, o processo prévio ou periódico de calibração em separado da tomada de fotos, como ocorre quando são utilizadas câmaras métricas em levantamento fotogramétrico por plataformas aerotransportadas, não é justificável. No caso deste equipamento sugere-se que seja realizado o processo de calibração em serviço, em que, os parâmetros de OI são estimados juntamente com os parâmetros de OE e com as coordenadas dos objetos de interesse no processo de fototriangulação. Para tal, faz-se necessário ter uma boa geometria do bloco juntamente com um número mínimo de injunções, além do uso de pontos de controle determinadas em campo, uma vez que os sensores embarcados neste tipo de plataforma nem sempre possuem alta qualidade em função das limitações de peso de tais plataformas. Tal fato vem de encontro com os resultados apresentados no experimentos de análise de qualidade do MDT na qual foram considerados diferentes números de pontos de controle, onde foi verificado a melhoria da qualidade posicional em função do aumento do número de pontos de controle utilizados.

Os impactos negativos da realização do processo de calibração em serviço, no caso do equipamento considerado, RPAS, estão justamente na necessidade de uma geometria mais rígida para o bloco e na necessidade da utilização de pontos de controle, uma vez que os valores de POE advindos dos sensores embarcados normalmente não apresentam precisão suficiente, como aqueles oriundos do georreferenciamento direto. Assim, restrições na sobreposição das faixas e até mesmo a necessidade de faixas cruzadas faz com que a área mapeada seja ainda mais restrita. A adoção de faixas de voo cruzadas possibilita melhor

geometria e por consequência melhoraria da qualidade da calibração em serviço. No entanto, em função da autonomia reduzida este procedimento, afeta de forma considerável a produtividade em termos de área mapeada.

## 6.2 RECOMENDAÇÕES

Os resultados indicam diferenças entre os parâmetros calibrados no campo de calibração e os parâmetros resultantes de processos de calibração em serviço. Neste contexto, sugere-se a realização de testes e análises de significância e estabilidade para parâmetros estimados por meio do método de calibração em serviço. Por fim, com base nessas análises, verificar se o comportamento dos parâmetros durante o voo se mantém constantes.

Outro aspecto importante, no caso da calibração em serviço, está ligado a necessidade de um número mínimo de pontos de controle, principalmente para casos em que não estejam disponíveis POE de qualidade suficiente para o georreferenciamento direto. Neste caso, sugere-se que sejam realizados testes com pontos distribuídos em uma pequena área próxima a região de interesse, variando a quantidade de pontos utilizados no processo de calibração em serviço e analisando a melhoria nos resultados da fototriangulação. Por fim, analisar o impacto da necessidade de utilização de pontos de controle, ou manobras para calibração em serviço, na autonomia da plataforma.

## BIBLIOGRAFIA

AGUILAR, M. A.; AGUILAR, F. J.; SALDAÑA, M. M. Assessing geometric accuracy of the orthorectification process from GeoEye-1 and WorldView-2 panchromatic images. **International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation**, 2013.

AMORIM, A. **Utilização de Modelos Estereoscópicos Híbridos na Atualização Cartográfica**. São Carlos. 124p. Tese. Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 2000.

ANDRADE, J. B. **Fotogrametria**. SBEE. Curitiba – PR. 1998.

ANDRADE, J. B.; OLIVAS, M. A. A. Calibração de câmaras aerofotogramétricas. **Boletim da Universidade Federal do Paraná**, Curitiba, n° 26, 1981.

BRASIL. **Instrução do Comando da Aeronáutica ICA-10-40-DECEA**. Comando da Aeronáutica. Departamento de Controle do Espaço Aéreo – DECEA. Publicado no BCA n° 212, de 19 de novembro de 2015.

BROWN, D. C. Decentering distortion of lenses. **Photogrammetric Engineering**, v. 32, n. 3 p. 444-462, 1966.

BROWN, D. C. **A strategy for multi-camera on-the-job self-calibration**. Institut Fur Photogrammetrie Stuttgart, Festschrift, Friedrich Ackermann. Geburtstag. 1989.

CLARK, T. A.; FRYER, J.G. The development of camera calibration methods and models. **Photogrammetric Record**, v.16, n. 91, p. 51-66, 1998.

CONCAR; EXÉRCITO BRASILEIRO - CONCAR-EB. **Especificação técnica para a aquisição de dados geoespaciais vetoriais**. Infraestrutura Nacional de Dados Espaciais. 2ed. Brasil. 2011.

CRAMER, M. **Euro SDR network on digital camera calibration**. Institute of photogrammetry, University of Stuttgart, Final Report, 2004. Disponível em: <[http://galaxy.uci.agh.edu.pl/~tokarcz/dyda/pdf/kalibracja\\_kamer\\_cyfrowych.pdf](http://galaxy.uci.agh.edu.pl/~tokarcz/dyda/pdf/kalibracja_kamer_cyfrowych.pdf)>. Acesso em : 08 jun. 2016.

EISENBEISS, H. A mini unmanned aerial vehicle (UAV): system overview and image acquisition. In: **International Workshop on Processing and visualization using high resolution imagery**. 2004. Anais. p. 18-20.2004

FRASER, C. S. Automatic camera calibration in close-range photogrammetry. In: **ASPRS 2012 Annual Conference**. 2012.

GALO, M.; CAMARGO, P.O. Utilização do GPS no controle da qualidade de carta. In: **Congresso Brasileiro de Cadastro Técnico Multifinalitário**. Florianópolis, 1994.

GALO, M.; TOMMASELLI, A. M. G.; HASEGAWA, J. K.; CAMARGO, P. O. Significância dos parâmetros de orientação interior na calibração de câmaras. In: **II Simpósio Brasileiro de Ciências Geodésicas e Tecnologias da Geoinformação**. Recife – PE. 2008.

GALO, M.; TOMMASELLI, A. M. G. Calibração de câmaras. In: PITERI, M. A.; RODRIGUES, J. C. **Fundamentos de visão computacional**. Presidente Prudente: Ed. Gráfica Viena, 2011. p. 1 – 60.

GALO, M. **Notas de aula de Fotogrametria**. UNESP, Departamento de Cartografia, 2014.

GALO, M. Estrutura dos dados de entrada/saída do aplicativo para a calibração de câmaras. **Relatório Interno – Unesp – Departamento de Cartografia**, Presidente Prudente, 28p. 2015.

GEMAEL, C. **Introdução ao Ajustamento de Observações: Aplicações Geodésicas**. Ed. UFPR, Curitiba, 1994.

GUPTILL, S. C.; MORRISON, J. L. **Elements of Spatial Data Quality**. International Cartographic Association – ICA. Pergamon, 1995.

HABIB, A. F.; PULLIVELLI, A. M.; MORGAN, M. F. Quantitative measures for the evaluation of camera stability. **Optical Engineering**, 44(3), 033605-033605. 2005.

HABIB, A. F.; MORGAN, M. F. Stability analysis and geometric calibration of-the-shelf digital cameras. **Photogrammetric Engineering & Remote Sensing**, v. 71, n. 6, p. 733-741. 2005.

HABIB, A. F.; JARVIS, A.; DETCHEV, I.; STENSAAS, G.; MOE, D.; CHRISTOPHERSON, J. Standards and specifications for the calibration and stability of amateur digital cameras for close-range mapping applications. **ISPRS, International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences** v. 37. Part B1. Beijing. 2008.

HARWIN, S.; LUCIEER, A.; OSBORN, J. The Impact of the Calibration Method on the Accuracy of Point Clouds Derived Using Unmanned Aerial Vehicle Multi-View Stereopsis. **Remote Sensing** 7(9). 11933-11953. 2015.

IBGE. **Recomendações para levantamentos relativos estáticos – GPS**. Disponível em: [ftp://geofp.ibge.gov.br/documentos/geodesia/pdf/recom\\_gps\\_internet.pdf](ftp://geofp.ibge.gov.br/documentos/geodesia/pdf/recom_gps_internet.pdf) Acesso em 15 de março de 2015.

JOHNSON, R. A.; WICHERN, D. W. **Applied multivariate statistical analysis**. New Jersey. Ed. Prentice Hall, 642 p. 1992.

KRAUS, K. **Photogrammetry: Geometry from images and laser scans**. Ed. Walter de Gruyter. 2007.

MERCHANT, D. C. Spatial Accuracy Standards for Large Scale Line Maps, **Technical Papers of the American Congress on Surveying and Mapping**, 222-231, 1982.

MIKHAIL, E. M.; BETHEL, J. S.; McGLONE, J.C. **Introduction to Modern Photogrammetry**. Editora John Wiley & Sons, Inc, 2001.

MONIWA, H. **Analytical camera calibration for close-range photogrammetry**. New Brunswick. Dissertação. University of New Brunswick, 194p. 1972.

PULLIVELLI, A. M. Low-Cost digital cameras: calibration, stability analysis and applications. **UCGE Reports Number 20216**. 2005.

REMONDINO, F.; FRASER, C. Digital câmera calibration methods: considerations and comparisons. **ISPRS, International Archives of Photogrammetry** v. 36. 266-272p. 2006.

SARRIS, Z.; ATLAS, S. Survey of UAV applications in civil markets. In **IEEE Mediterranean Conference on Control and Automation**. (p. 11). 2001.

SILVA, S. L. A.; TOMMASELLI, A. M. G.; ARTERO, A. O. Utilização de alvos codificados do tipo ARUCO na automatização do processo de calibração de câmaras. **Boletim de Ciências Geodésicas**. 20p (626-646). 2014.

THOMPSON, M. M.; GRUNER, H. **Manual of Photogrammetry**. American Society of Photogrammetry. 4 ed. Virginia: Falls Church, 1980.

TOMMASELLI, A. M. G.; TOZZI, C. L. Técnicas de calibração de câmaras em visão computacional. **Jornada EPUSP/IEEE**, 1990.

WOLF, P.; DEWITT, B.; WILKINSON, B. **Elements of Photogrammetry: with applications in GIS**.v. 3. New York: McGraw-Hill. 2000.

ZHONG, D. Robust estimation and optimal selection of polynomial parameters for the interpolation of GPS geoid Heights. **Journal of Geodesy**, Berlin, n. 71, p. 552-261. 1997.