

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

ROBERTO A. AROCHA BARRIOS

**INFLUÊNCIA DA CALIBRAÇÃO EM SERVIÇO DA CÂMARA DIGITAL
VEXCEL XP NO GEORREFERENCIAMENTO DIRETO DE IMAGENS**

**Curitiba
2013**

ROBERTO A. AROCHA BARRIOS

**INFLUÊNCIA DA CALIBRAÇÃO EM SERVIÇO DA CÂMARA DIGITAL
VEXCEL XP NO GEORREFERENCIAMENTO DIRETO DE IMAGENS**

Dissertação apresentada como requisito parcial à obtenção do grau de Mestre em Ciências Geodésicas ao Curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas da Universidade Federal do Paraná.

Orientador:

Prof. Dr. Edson Aparecido Mitishita

**Curitiba
2013**


TERMO DE APROVAÇÃO

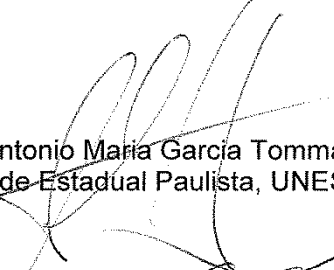
ROBERTO ARGENIS AROCHA BARRIOS

*"INFLUÊNCIA DA CALIBRAÇÃO EM SERVIÇO DA CÂMERA DIGITAL VEXCEL XP
NO GEORREFERENCIAMENTO DIRETO DE IMAGENS"*

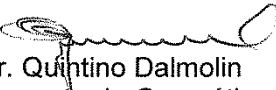
Dissertação nº 265 aprovada como requisito parcial do grau de Mestre no Curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas, Setor de Ciências da Terra da Universidade Federal do Paraná, pela seguinte banca examinadora:

Orientador:


Prof. Dr. Edson Aparecido Mitishita
Departamento de Geomática, UFPR


Prof. Dr. Antonio Maria Garcia Tommaselli
Universidade Estadual Paulista, UNESP


Prof. Dr. Anselmo Chaves Neto
Departamento de Estatística, UFPR


Prof. Dr. Quintino Dalmolin
Departamento de Geomática, UFPR

Curitiba, 26 de julho de 2013.

*a minha querida esposa Silvia, meus
filhos Fabrizzio e Fiorela e meus pais
Silveria e Roberto.*

Dedico.

AGRADECIMENTOS

Agradeço:

A Deus por ser guia espiritual em minha vida.

A minha Esposa Silvia uma profunda gratidão pelo incentivo e apoio em diversas horas de estudo durante toda a jornada.

Ao Gral. Jorge Parra Veja, Cnel. Ricardo Negrón Rivas e Cnel. José Gonzalez Briceño, pela oportunidade oferecida para estudar no Brasil.

Ao Prof. Dr. Edson A. Mitishita pelo seu incondicional apoio como orientador, pelos seus comentários e correções durante toda a jornada, mas de maneira especial como meu amigo, obrigado.

Ao Prof. Dr. Jorge Centeno pela sua ajuda oferecida para o pessoal estrangeiro, e seus conselhos durante toda a jornada, mas de maneira especial como meu amigo, obrigado.

Aos Professores do Curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas da Universidade Federal do Paraná, pelo suporte oferecido em todas as etapas de meus estudos, obrigado.

Aos colegas Niarkios Luiz, João Vitor, Ilich Contreras pelo sua apoio, ajuda e contribuições durante esta travessia.

A todos os colegas do Curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas, pelos momentos vividos de grande amizade.

A Topocart pela disponibilização das imagens aéreas e os dados que permitirem realizar esta pesquisa

Por último a quem de forma silenciosa trabalha por todos nós, Monica Kleuser, obrigado.

“Para el logro del Triunfo siempre ha sido indispensable pasar por la senda de los sacrificios”.

Simón Bolívar
El Libertador

RESUMO

O objetivo principal desta pesquisa foi de realizar estudo que viabilizasse a determinação das exatidões obtidas na interseção fotogramétrica, empregando imagens aéreas provenientes de uma câmara Vexcel XP, parâmetros de orientação exterior determinados diretamente de um sistema GPS/IMU e dois conjuntos de parâmetros de orientação interior, sendo um de fábrica e outro determinado num processo de calibração em serviço. Uma série de experimentos de fototriangulação foi realizada visando a determinação das exatidões obtidas na interseção fotogramétrica, empregando análises das discrepâncias tridimensionais em pontos de verificação. A fototriangulação com a fixação absoluta dos valores de POEs e POI fornecidos no certificado de calibração de fábrica não alcançou as exatidões toleráveis devido a elevados erros sistemáticos nos POEs. Duas metodologias foram empregadas para o refinamento dos valores de POEs na fototriangulação. Na primeira utilizou-se somente pontos fotogramétricos e na segunda foram adicionados pontos de apoio. Diversas configurações de pontos de apoio foram testadas. A calibração da câmara em serviço foi realizada com um bloco tradicional de duas faixas tomadas em sentidos opostos. Os resultados obtidos alcançaram as precisões e exatidões toleráveis. A utilização de POI, determinados na calibração em serviço, melhorou significativamente os resultados da fototriangulação com georreferenciamento direto, mas as exatidões obtidas na determinação tridimensional não alcançaram totalmente as exatidões toleráveis. Somente três experimentos fotogramétricos alcançaram as exatidões toleráveis na determinação tridimensional. Entre esses, a melhor das exatidões foi obtida no experimento de calibração em serviço; em segundo o experimento de fototriangulação que refinou os POEs com os POI da calibração em serviço e três pontos de apoio e por último a fototriangulação que refinou os POEs com o POI de fábrica e cinco pontos de apoio.

Palavras-chave: Calibração em Serviço, Câmara Vexcel XP, Fototriangulação, Georreferenciamento Direto, GPS/IMU.

ABSTRACT

The main objective of this research was to conduct a study that would make feasible the determination of accuracies obtained in photogrammetric intersection. This procedure uses aerial images from the camera Vexcel XP, exterior orientation parameters determined directly via the GPS/IMU system, and two sets of interior orientations parameters, one from factory calibration and the other given by on the job calibration process. Phototriangulation experiments were conducted to establish the accuracies in the photogrammetric intersection using three-dimensional analysis from the checkpoints discrepancies. The phototriangulation experiment that uses the IOP from factory calibration and fixed values of EOPs by absolute constrain did not achieve accuracies within tolerable precisions due to high systematic errors in the EOP values. Two methodologies were used to refine the values of EOPs in phototriangulation. The first uses only photogrammetric points and the other added control points in the process. Different designs of control point configurations were tested. The on-the-job camera calibration was performed using a traditional photogrammetric block with two strips in opposite directions. The results achieved tolerable precisions and accuracies. Using IOP, determined from the on-job calibration, improved, significantly, the quality of phototriangulation that uses the EOP from direct georeferencing. However, the tridimensional accuracies did not achieve fully tolerable accuracies. Only three photogrammetric experiments achieved accuracies below the tolerable precisions. Among the performed experiments, the best accuracies were obtained in the on-the-job camera calibration process; the second best results were obtained in the experiment of phototriangulation that refined the EOPs using the IOP from the on-the-job camera calibration with three 3D control points and the last, was the phototriangulation that refined the EOPs using the IOP from factory calibration with five 3D control points.

Key-words: On-the-job calibration, Camera Vexcel XP, phototriangulation, direct georeferencing, GPS / IMU.

Lista de Figuras

Figura 1: Grade Imagem Digital	23
Figura 2: Imagem multicanal	23
Figura 3: Referencial Fotogramétrico	25
Figura 4: Sistema de referência Imagem	27
Figura 5: Referencial geodésico	28
Figura 6: Referencial geodésico cartesiano	29
Figura 7: Sistema de referencial local	30
Figura 8: Colinearidade	33
Figura 9: Orientação Exterior	41
Figura 10: Cone Imagem Pancromática	43
Figura 11: Câmara UltraCam Xp	43
Figura 12: Campo de calibração do fabricante	44
Figura 13: Plataforma Giro Estabilizada	45
Figura 14: Imagem nível 1	46
Figura 15: Integração Imagem	46
Figura 16:GNSS	48
Figura 17: IMU	49
Figura 18: Fluxograma Verificação GD	50
Figura 19: Fluxograma refinamento dos POEs	51
Figura 20: Fluxograma da calibração em Serviço	51
Figura 21: Fluxograma refinamento dos POEs com POI determinados em serviço..	52
Figura 22: Pontos de Verificação	53
Figura 23: Configuração com um ponto de apoio	54
Figura 24: Configurações com dois pontos de apoio.	54
Figura 25: Configurações com três pontos de apoio	55
Figura 26: Configuração com quatro pontos de apoio	55
Figura 27: Configuração com cinco pontos de apoio	55
Figura 28: Faixa da calibração	56
Figura 29: Faixa de validação	57
Figura 30 Exp_2	67
Figura 31: Bloco de Calibração	75

Figura 32: Bloco-II.....	80
Figura 33: Acurácia Planimétrica experimento 4.4.1	82
Figura 34: Analise Altimetria experimento 4.4.1	82
Figura 35: Acurácia Planimétrica no experimento Exp_a.....	85
Figura 36: Análise Altimetria no experimento Exp_a.....	85
Figura 37: Configuração Exp_b.....	87
Figura 38: Acurácia Planimétrica no experimento Exp_b.....	89
Figura 39: Análise Altimetria no experimento Exp_b.....	89

Lista de Tabelas

Tabela 1: POE Providos pelo Sistema GPS/IMU Bloco I no Sistema Local.....	63
Tabela 2: Discrepâncias pontos de Verificação e Resíduos em Fotocoordenadas no experimento 4.1.....	64
Tabela 3: Teste Global do Ajustamento realizado no experimento 4.1	64
Tabela 4: Teste Estatísticos no experimento 4.1.....	65
Tabela 5: Discrepâncias dos pontos de Verificação e Resíduos em Fotocoordenadas no experimento Exp_2 item 4.2.....	67
Tabela 6: Teste Global do Ajustamento realizado no experimento Exp_2 item 4.2 ..	67
Tabela 7: Teste Estatísticos dos resíduos em Fotocoordenadas no experimento Exp_2 no item 4.2	68
Tabela 8: Teste Estatística das discrepâncias nos pontos de verificação no experimento Exp_2 - item 4.2.....	69
Tabela 9: Resíduos em Fotocoordenadas e Pontos de Apoio, nos experimentos Exp_3_1 a Exp_5 no item 4.2	70
Tabela 10: Teste Global do Ajustamento realizado nos experimentos Exp_3_1 a Exp_5 no item 4.2	72
Tabela 11: EQM dos Residuos em POEs.	72
Tabela 12: Discrepâncias nos 44 Pontos de Verificação dos experimentos Exp_3_1 a Exp_5 no item 4.2	73
Tabela 13: Teste Estatísticos Exp_3_3a e Exp_5 no item 4.2	73
Tabela 14: Teste Estatístico das Discrepâncias Altimétrica no experimento Exp_3_1 no item 4.2.....	74
Tabela 15: POI Determinados na Calibração em Serviço	76
Tabela 16: Resíduos em Fotocoordenadas, Pontos de Apoio e POEs, no experimento 4.3.....	77
Tabela 17: Teste Global da Calibração em Serviço	77
Tabela 18: Matriz de Correlação entre POI.....	78
Tabela 19: Matriz de Correlação Cruzada entre POI e POE.....	78
Tabela 20: Discrepâncias nos 44 Pontos de Verificação do experimento de calibração em serviço.....	78

Tabela 21: Testes Estatísticos das discrepâncias nos pontos de verificação do experimento de calibração em serviço	79
Tabela 22: POE Providos pelo Sistema GPS/IMU Bloco II	80
Tabela 23: Discrepâncias pontos de Verificação e Resíduos em Fotocoordenadas no experimento 4.4.1	81
Tabela 24: Teste Global do Ajustamento realizado no experimento 4.4.1	81
Tabela 25: Teste Estatísticos dos resíduos das fotocoordenadas e das discrepâncias nos pontos de verificação do experimento.	83
Tabela 26: Discrepâncias nos pontos de Verificação e Resíduos em Fotocoordenadas no experimento Exp_a.....	84
Tabela 27: Teste Global do Ajustamento realizado no experimento Exp_a.....	84
Tabela 28: Resultados dos Testes Estatísticos no experimento Exp_a	86
Tabela 29: Resíduos no pontos de Apoio e Resíduos em Fotocoordenadas no experimento Exp_b	87
Tabela 30: Teste Global do Ajustamento realizado no experimento Exp_b.....	87
Tabela 31: Discrepâncias nos 27 Pontos de Verificação realizado no experimento Exp_b	88
Tabela 32: Testes Estatísticos Exp_b	90

Lista de abreviaturas

ASP	- <i>American Society of Photogrammetry</i>
ASPRS	- <i>American Society of Photogrammetry and Remote Sensing</i>
CCD	- <i>Charge Coupled Device</i>
CMOS	- <i>Complementary Metal Oxide Semiconducto</i>
CP	- <i>Centro Perspectivo</i>
CPU	- <i>Central Processing Unit</i>
EQM	- <i>Erro Quadrático Médio</i>
FMC	- <i>Forward Motion Compensatio</i>
GIP	- <i>Gesellschaft für Industriephotogrammetrie mbH</i>
GNSS	- <i>Global Navigation Satellite Systems</i>
GPS	- <i>Global Positioning System</i>
GSD	- <i>Ground Sample Distance</i>
IGI	- <i>Ingenieur Gesellschaft für Interfaces mbH</i>
IGVSB	- <i>Instituto Geográfico Venezuelano Simón Bolívar</i>
IMU	- <i>Inertial Measurement Unit</i>
JFET	- <i>Junction Field Effect Transistor</i>
LPS	- <i>Leica Photogrammetric Suite</i>
OTF	- <i>On-the-fligh</i>
POI	- <i>Parâmetros de Orientação Interior</i>
POE	- <i>Parâmetros de Orientação Exterior</i>
SNI	- <i>Sistema de Navegação Inercial</i>
SGR	- <i>Sistema Geodésico de Referência</i>
TDI	- <i>Time Delay Intregation</i>
UTM	- <i>Universal Transversa Mercator</i>
WGS84	- <i>World Geodetic System 84</i>

Sumário

1. INTRODUÇÃO	16
1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS	16
1.2 JUSTIFICATIVA	19
1.3 OBJETIVO GERAL	20
1.4 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	20
2. REVISÃO DE LITERATURA	21
2.1 FOTOGRAMETRIA	21
2.2 FOTOGRAMETRIA DIGITAL	21
2.3 IMAGEM DIGITAL	22
2.4 REFERENCIAIS	24
2.4.1 REFERENCIAIS DO ESPAÇO IMAGEM	25
2.4.2 REFERENCIAIS DO ESPAÇO OBJETO	27
2.5 TRANSFORMAÇÕES MATEMÁTICAS	31
2.5.1 TRANSFORMAÇÃO AFIM GERAL NO PLANO.	31
2.5.2 TRANSFORMAÇÃO ISOGONAL NO ESPAÇO	32
2.6 COLINEARIDADE	32
2.7 ORIENTAÇÃO INTERIOR	34
2.7.1 ABERRAÇÕES DAS LENTES	35
2.7.2 REFRAÇÃO FOTOGRAMÉTRICA	37
2.8 CALIBRAÇÃO	38
2.9 ORIENTAÇÃO EXTERIOR.	40
2.9.1 GEORREFERENCIAMENTO INDIRETO	41
2.9.2 GEORREFERENCIAMENTO DIRETO	41
2.10 AEROTRIANGULAÇÃO	42
2.11 CAMERA FOTOGRAMETRICA VEXCEL Xp	42
2.11.1 MONTAGEM ESTABILIZADOR DA CÂMARA	44
2.11.2 IMAGEM	45
2.11.3 GNSS.	46
2.11.4 UNIDADE DE MEDIÇÃO INERCIAL (IMU)	48
3. MATERIAL E MÉTODOS	50
3.1 MATERIAIS UTILIZADOS	50

3.2 METODOLOGIA PROPOSTA.....	50
3.2.1 VERIFICAÇÃO DA ESTABILIDADE DO GEORREFERENCIAMENTO DIRETO.	52
3.2.2 REFINAMENTO DO GEORREFERENCIAMENTO DIRETO COM AEROTRIANGULAÇÃO.....	53
3.2.3 CALIBRAÇÃO EM SERVIÇO.....	55
3.2.4 VALIDAÇÃO DOS PARÂMETROS DE ORIENTAÇÃO INTERIOR DETERMINADOS NA CALIBRAÇÃO COM O GEORREFERENCIAMENTO DIRETO.	57
3.2.5 REFINAMENTO DO GEORREFERENCIAMENTO DIRETO COM A CALIBRAÇÃO EM SERVIÇO.....	57
3.2.6 ANÁLISES ESTATÍSTICAS DE PRECISÕES E EXATIDÕES.....	58
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	62
4.1. RESULTADOS OBTIDOS NA VERIFICAÇÃO DA ESTABILIDADE DO GEORREFERENCIAMENTO DIRETO.	62
4.2. RESULTADOS OBTIDOS NO REFINAMENTO DA POSIÇÃO E ORIENTAÇÃO DIRETA COM AEROTRIANGULAÇÃO.	66
4.3. RESULTADOS OBTIDOS DA CALIBRAÇÃO EM SERVIÇO.....	75
4.4. RESULTADOS DA VALIDAÇÃO DOS NOVOS PARÂMETROS DE ORIENTAÇÃO INTERIOR NO GEORREFERENCIAMENTO DIRETO.	79
4.4.1 AEROTRIANGULAÇÃO COM GEORREFERENCIAMENTO DIRETO.....	80
4.5 AEROTRIANGULAÇÃO COM REFINAMENTO DO GEORREFERENCIAMENTO DIRETO.....	83
5. CONCLUSÕES.....	91
6. RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	93
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	94
ANEXOS.....	97

1. INTRODUÇÃO

1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

A Fotogrametria sofreu uma evolução constante ao longo do tempo, devido à crescente necessidade de informação geoespacial. Desta forma, em 1980 a Sociedade Americana de Fotogrametria (ASP), hoje atual Sociedade Americana de Fotogrametria e Sensoriamento Remoto (ASPRS), atualizou a definição de Fotogrametria, como: “[...] ciência, arte e tecnologia de obtenção de informações confiáveis sobre objetos físicos e o meio ambiente por meio de processos de gravação, medição e interpretação de imagens fotográficas e padrões de energia eletromagnética radiante e outras fontes”(ASPRS,1997).

De acordo com esta definição, pode-se considerar, segundo Wolf e Dewitt (2000), duas áreas diferentes; a Fotogrametria métrica, responsável pela obtenção bidimensional e tridimensional de informações georreferenciadas, a partir de medições em imagens, e Fotogrametria interpretativa, que reconhece e interpreta objetos e fenômenos a partir da análise sistemática de imagens, incluindo o espectro eletromagnético.

Durante as últimas décadas, o desenvolvimento de tecnologias permitiu o aprimoramento dos sensores digitais, sendo estes capazes de obter dados de alta resolução espacial, radiométrica, espectral e temporal. As Imagens aéreas ou de satélite são utilizadas freqüentemente como fontes primárias de obtenção de dados. A versatilidade e a grande quantidade de dados capturados são apenas limitadas pela capacidade de armazenamento e processamento. Ao mesmo tempo, a velocidade, agilidade, precisão e rapidez, sem dúvida, trazem uma melhoria significativa na análise do processo de tomada de decisão. No entanto, os dados capturados com imagens não têm validade se eles não forem localizados espacialmente, ou seja, não teriam sentido se não houvesse uma metodologia que permita transformar a informação bidimensional em informação tridimensional necessária para a definição da forma, tamanho e posição do objeto num referencial geodésico ou cartográfico.

A formação geométrica de uma imagem é sustentada pela condição teórica de um modelo determinístico, que descreve com aproximação a realidade da projeção de pontos entre os espaços do objeto para o da imagem. Esta relação é dada pela

condição de colinearidade, propriedade que permite, teoricamente, traçar uma reta que contenha o ponto objeto, centro de projeção e o ponto imagem.

Na realidade física, a condição de colinearidade é afastada por uma série de fenômenos e, muitos desses, como por exemplo, as condições ambientais (temperatura, umidade e pressão), podem ser modeladas matematicamente, viabilizando a aplicação do modelo em aplicações fotogramétricas. Entretanto, para que os afastamentos da condição de colinearidade sejam perfeitamente modelados é necessário conhecer com exatidão os parâmetros que recuperam a geometria da imagem no instante da sua formação.

A geometria interna de um sensor é definida por meio de parâmetros de orientação interior (POI), determinados por um processo, geralmente chamado de calibração, no qual são estimados a distância focal da câmara (f), as coordenadas do ponto principal (x_0, y_0); os parâmetros de distorção radial simétrica (k_1, k_2, k_3), os parâmetros da distorção descentrada (P_1, P_2), e a distorção por afinidade (A, B).

Além disso, não basta apenas a orientação interna para extrair informação de imagens, é necessário determinar a sua posição e orientação num dado referencial geodésico ou cartográfico, definindo assim os parâmetros de orientação exterior (POE). Esses parâmetros são definidos pela posição do centro de projeção (X_0, Y_0, Z_0) e as orientações angulares do sensor (ω, ϕ, κ) nos respectivos eixos coordenados (X, Y e Z).

A tecnologia GPS (Sistema de Posicionamento Global) possibilitou a incorporação e integração de sistemas de posicionamento espaciais, junto com a combinação do SNI (Sistema de Navegação Inercial), tornando possível a determinação direta dos parâmetros de orientação exterior de uma imagem, permitindo assim, a integração desses dados nos processos fotogramétricos. Este processo foi denominado de georreferenciamento direto (SKALLOUD, 1999), ou orientação direta de sensores (JACOBSEN, 2003). A rigor, o georreferenciamento direto de imagens, corresponde a que todos os *pixels* que a compõem estão georreferenciados, incluindo, além da posição e orientação, o processo de ortorretificação. Caso contrário, os *pixels* ainda estariam afetados pelo deslocamento devido ao relevo (REIS, T. D. 2011). Entretanto, o termo georreferenciamento direto, tem sido usado como sinônimo de orientação e posição direta na maioria dos artigos.

A principal vantagem está relacionada com a redução de pontos de apoio empregados no processo de fototriangulação tradicional. Entretanto, no momento que os parâmetros de orientação exterior são fixados, no processo de georreferenciamento direto, a exatidão dos parâmetros de orientação interior é requerida para a recuperação exata da geometria projetiva no instante da formação da imagem, pois não é possível a compensação das inexatidões dos parâmetros de orientação interior através da determinação apropriada dos parâmetros de orientação exterior, como ocorre na fototriangulação tradicional. Considerando ainda, a proposta apresentada por Eisenhart (1963), sobre a calibração de instrumento de medida, que a mesma deve ser realizada tão próxima quanto possível das suas condições de uso, verifica-se que os parâmetros de orientação interior, presentes no certificado de calibração de fábrica de uma câmara aerofotogramétrica podem não atender perfeitamente às exigências do referenciamento direto de imagens.

Com base no exposto, a presente pesquisa tem por objetivo principal verificar a exatidão do georreferenciamento direto de imagens obtidas com uma câmara Vexcel Xp, utilizando parâmetros de orientação interior determinados num processo de calibração em serviço (*in Situ*). Serão avaliadas as exatidões do georreferenciamento direto empregando os parâmetros de orientação interior de fábrica e estudos das possibilidades de refinamento dos parâmetros de orientação exterior com o processo de fototriangulação.

1.2 JUSTIFICATIVA

Justifica-se a pesquisa pelo interesse nos dias atuais da importância de se ter uma metodologia confiável com o emprego de imagens aéreas, de fácil operação e que permita extrair informações geodésicas ou cartográficas no menor tempo possível, apresentando uma rápida resposta às inúmeras aplicações, tais como situações de desastres, áreas de difícil acesso e outras que requerem uma pronta intervenção.

Além disso, a aquisição de uma câmara Vexcel Xp, pelo Instituto Geográfico Venezuelano Simón Bolívar (IGVSB), levou ao estudo específico deste sistema, a fim de conhecer com exatidão a potencialidade que possui. A posição e orientação desta câmara permitirá minimizar os custos dos levantamentos de pontos de apoio, reduzindo significativamente o uso dos mesmos, de acordo à acessibilidade que possua a região a ser mapeada, associada com o aumento da exatidão do produto cartográfico a ser elaborado.

Concluindo, o desenvolvimento desta pesquisa permitirá encontrar um processo rápido e eficiente, que viabilize uma redução nos tempos de execução de projetos de mapeamento fotogramétrico, o que finalmente se traduz numa redução dos custos, aumentando significativamente a produtividade na atualização da cartografia sistemática da República Bolivariana de Venezuela.

1.3 OBJETIVO GERAL

Estudos e análises de exatidões do georreferenciamento direto de imagens de uma câmara digital Vexcel Xp.

1.4 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- a) Analisar a exatidão da intersecção fotogramétrica utilizando parâmetros de orientação exterior fornecidos pelo sistema de georreferenciamento direto de uma câmara Vexcel XP utilizando parâmetros de orientação interior de fábrica;
- b) Estudar e analisar os processos de fototriangulação com variação do número de pontos de apoio, visando o refinamento dos parâmetros de orientação exterior obtidos na determinação direta;
- c) Realizar a calibração em serviço (*in Situ*) da câmara Vexcel XP.
- d) Analisar a exatidão da intersecção fotogramétrica utilizando parâmetros de orientação exterior fornecidos pelo sistema de georreferenciamento direto de uma câmara Vexcel XP utilizando parâmetros de orientação interior determinados na calibração em serviço.

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1 FOTOGRAMETRIA

Fotogrametria é tradicionalmente definida como o processo de derivação de informações métricas de objetos, através de medições feitas em imagens. A fotointerpretação está intimamente relacionada à Fotogrametria e pode ser entendida como sendo um processo que permite reconhecer e obter informações semânticas dos objetos.

Segundo Mikhail et al. (2001), a tarefa fundamental da Fotogrametria é estabelecer com rigor a relação geométrica entre a imagem e objeto no momento de sua captura. Esta relação pode ser estabelecida, por exemplo, pelo meio analógico que utiliza equipamentos ópticos/mecânicos e imagens analógicas e o digital que emprega modelos matemáticos e imagens digitais.

2.2 FOTOGRAMETRIA DIGITAL

A Fotogrametria Digital pode ser definida como a parte da Fotogrametria que trata dos aspectos geométricos do uso de imagens digitais em meio magnético, com a finalidade de obter valores precisos de comprimentos, alturas e formas de objetos (FRITSCH, 1993).

Atualmente, parte do processamento fotogramétrico usa técnicas de Fotogrametria Digital, sendo esta entendida como processamento digital de imagens, pois como mostrado por Jain et al. (1995), “[...] tratamento digital de imagem geralmente refere-se ao processamento de uma imagem bidimensional por um computador com o sentido de obter informações existentes na imagem”.

As ferramentas de tratamento digital de imagens, para a realização de procedimentos fotogramétricos, tiveram o propósito de automatização de tarefas repetitivas e laboriosas, visando à diminuição de tempo e custos na obtenção de soluções mais confiáveis. Além disso, o tratamento digital de imagens permitiu substituir técnicas fotogramétricas analógicas tradicionais, proporcionando novas possibilidades que anteriormente não estavam disponíveis nem contempladas nos

sistemas fotogramétricos, como o ajustamento de fixas por raios e o volume de dados processados, entre outras.

As fotografias ou imagens no formato digital podem ser obtidas através da digitalização de negativos em “*scanners*” de alta precisão geométrica e fidelidade de radiométrica ou diretamente a partir de câmaras digitais com sensores semicondutores CCD – “*Charge Coupled Device*” (dispositivo de carga acoplado), CMOS – “*Complementary Metal Oxide Semiconductor*” (Semicondutor de Metal Óxido Complementar), ou JFET – “*Junction Field Effect Transistor*” (Transistores de Efeito de Campo em Junções). Todos estes sensores registram eletronicamente a imagem, esta é armazenada em dispositivos rígidos de dados não volátil que usam um sistema de gravação magnético para armazenar dados digitais.

2.3 IMAGEM DIGITAL

Segundo Gonzáles e Woods (1992), uma imagem digital, pode ser definida como uma função bidimensional de intensidade da energia eletromagnética $F(u, v)$, na qual u e v são as coordenadas espaciais, F é o valor proporcional à intensidade de energia capturada (numero digital) numa posição da imagem. O processo da obtenção de imagens digitais consiste na decomposição da imagem real numa matriz discreta de pontos de um determinado tamanho, onde a cada célula tem um valor proporcional a seu nível de cor. Assim, pode dizer-se que uma imagem digital consiste em uma matriz de células de n linhas e m colunas. Cada célula da matriz é denominada de *pixel* (*Picture x element*) e este representa uma superfície com tamanho $(\Delta x, \Delta y)$, conforme mostrado na Figura 1. Cada *pixel* possui um valor digitais (número digital “Nd” ou valor digital). O número digital pode representar informações de diversas naturezas, por exemplo, às características físicas da área (radiância, refletividade, transmissividade, emissividade) ou representar os valores resultantes da manipulação da informação original, mediante técnicas de processamento de imagens.

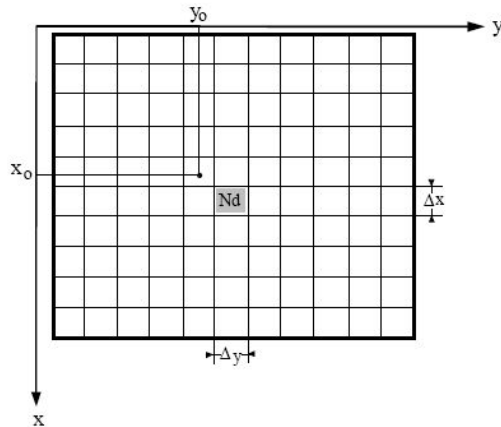


Figura 1: Grade Imagem Digital
Fonte: Perez Alvaréz, J. (2001)

A matriz definida pelos números digitais pode ter caráter multidimensional quando as camadas de informação armazenadas (bandas ou canais) possuem características distintas, conforme mostrado na Figura 2. As imagens mais freqüentes, empregadas em Fotogrametria, são as de multicanais ou multiespectrais (RGB).

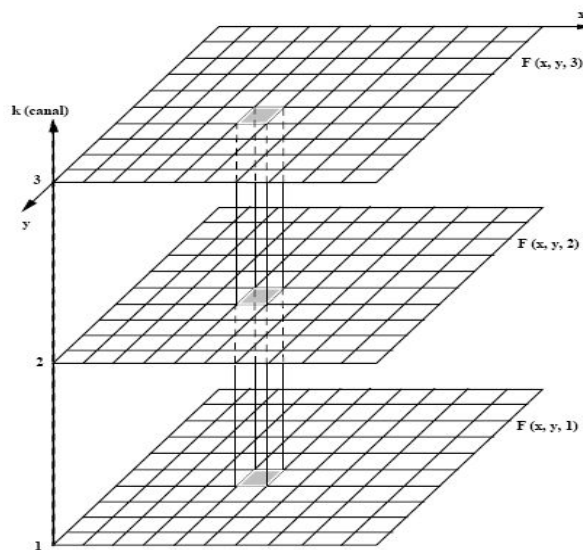


Figura 2: Imagem multicanal
Fonte: Perez Alvaréz, J. (2001)

Nas imagens digitais, a informação contida num *pixel* (número digital) é geralmente representada por 8 bits (1 byte). Com esta dimensão tem-se a possibilidade de codificar 2^8 tons de cinza ou 256 tons (0 a 255). Este intervalo, que em princípio pode parecer pequeno, em aplicações visuais é suficiente, pois o olho humano só pode distinguir aproximadamente 24 tons ou 65 níveis de cinza

(SANCHEZ, J.M. 1997). Geralmente a correspondência entre o valor digital e o tom é feita por meio de uma tabela de referência ou *Look Up Table*–LUT, onde a cor preta corresponde a (0) e a cor branca a (255). Nas imagens coloridas o esquema de correspondência é similar a que foi utilizada para a imagem preta/branca ou cada *pixel* possui três números inteiros de 8 bits (um para cada canal RGB), exigindo três vezes mais o espaço de memória para o armazenamento da imagem.

A qualidade de uma imagem digital depende da capacidade para discriminar informação detalhada do objeto em estudo, ela pode ser estudada de acordo com três aspectos, o primeiro de acordo com a sua resolução espectral a qual determina a capacidade do sensor em discriminar longitudes de onda (quantidade de bandas que capta um sensor), segundo a resolução radiométrica a qual determina a sensibilidade que pode um sensor ter para discriminar a energia captada (numero digital de cada *pixels*) e por último a resolução espacial a qual define a capacidade de representar corretamente pequenos objetos da superfície imageada, determinada pelo elemento de resolução (*pixel*).

2.4 REFERENCIAIS

De acordo com Andrade (2003), para definir a posição de um objeto no espaço será necessária à adoção de um referencial adequado. A correta definição do referencial condicionará a simplificação na obtenção de dados (observações), de cálculos no aumento da exatidão do procedimento realizado. Pelas razões expostas são muitos os referenciais utilizados para referenciar as informações espaciais. Daí resulta a necessidade de transformações entre referenciais envolvidos numa determinada aplicação.

Uma aplicação comum em Ciências Geodésicas pode ser considerada como sendo a transformação entre dois referenciais bidimensionais e vice-versa, por isso, as transformações matemáticas são consideradas biunívocas. Por outro lado, tem casos em que não existe uma função de transformação inversa, o que não permite uma relação biunívoca, apenas unívoca, como é o caso de algumas funções polinomiais.

Na Fotogrametria, são utilizados modelos matemáticos que relacionam entidades entre os espaços da imagem e do objeto. O estabelecimento de um

Onde:

CP: centro perspectivo da câmara, considerado para fins de simplificação como uma abstração pontual do centro de projeção do sistema de lentes;

f: distância focal calibrada da câmara;

pp: ponto principal definido pelo ponto de intersecção entre a projeção ortogonal do CP da câmara e o plano fotográfico, com coordenadas (x_0, y_0) ; e

\vec{V} : vetor posição no espaço imagem definido por $\vec{V} = \overline{CPp'}$

2.4.1.2 REFERENCIAL MATRICIAL DE IMAGEM DIGITAL

Uma imagem digital é um conjunto de elementos espacialmente ordenados em um arranjo matricial, cuja posição é dada por colunas e linhas (C,L), sendo que a cada elemento da imagem (*pixels*) é associado um nível de cinza. O sistema referencial digital é usualmente definido com sua origem no centro do *pixel* do canto superior esquerdo da imagem. Esse referencial é determinado pelo eixo das abscissas (colunas) coincidente com a primeira linha da imagem, e o eixo das ordenadas (linhas), coincidente com a primeira coluna (ver figura 4).

A posição do sensor em relação ao sistema de lentes deve ser considerada como sendo invariável. Considera-se o centro do sensor como sendo a origem do sistema de coordenadas de imagem em milímetros. Este referencial possui o eixo Ox' , orientado positivamente no sentido de voo e eixo Oy' , orientado positivamente a 90º no sentido anti-horário, a partir do eixo Ox' , tornado um sistema de coordenadas dextrogiro de acordo com a Figura 4.

As coordenadas de um ponto em linha e coluna podem ser transformadas para o referencial de imagem em milímetros empregando as equações (1).

$$\begin{bmatrix} x' \\ y' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P_c & 0 \\ 0 & P_l \end{bmatrix} \begin{bmatrix} col - \left(\frac{N_c-1}{2}\right) \\ lin - \left(\frac{N_l-1}{2}\right) \end{bmatrix} \quad (1)$$

Onde;

x', y' - Coordenadas no referencial de imagem em milímetros;

P_l e P_c - Tamanho do *pixel* na linha e coluna respectivamente, em milímetros;

col, lin - Coordenada do ponto em linha e coluna;

N_c - Número máximo de colunas da imagem;

N_l - Número máximo de linhas da imagem.



Figura 4: Sistema de referência Imagem
Fonte: Autor

No caso de imagens digitais provenientes de sensores sólidos (CCD e CMOS), conhecendo-se as coordenadas do ponto principal no referencial de imagem em milímetros, determinadas por um processo de calibração de câmara, a transformação de coordenadas de imagem em milímetros para o referencial fotogramétrico se dá através de uma simples translação (equação 2).

$$\begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x' \\ y' \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} x_0 \\ y_0 \end{bmatrix} \quad (2)$$

2.4.2 REFERENCIAIS DO ESPAÇO OBJETO

Os sistemas de coordenadas do espaço objeto permitem definir as posições espaciais de pontos pertencentes à superfície terrestre ou qualquer outra superfície equivalente ao espaço objeto. No caso da superfície terrestre o sistema de coordenadas poderá ser geocêntrico, topocêntrico ou local.

2.4.2.1 REFERENCIAL GEODESICO ELIPSOIDAL

Um Sistema Geodésico de Referência (SGR) é geralmente definido com base num conjunto de parâmetros e convenções que são associados a um elipsoide ajustado e devidamente orientado às dimensões da Terra, resultando num referencial adequado para a atribuição de coordenadas de pontos da superfície física da terra. As coordenadas de um ponto P, referidas ao elipsoide, são ditas coordenadas geodésicas: latitude (ϕ), longitude (λ) e altitude geométrica ou elipsoidal (h). Maiores detalhes sobre a definição de um referencial geodésico elipsoidal podem ser vistos em (MONICO, 2000).

A latitude ϕ de um ponto P é o ângulo formado entre a normal do ponto e sua projeção no plano do equador, variando de 0 a 90º grau ao norte e de 0 a -90º grau ao sul. A longitude λ é o ângulo diédrico formado no plano equatorial medido a partir do meridiano de *Greenwich* até o meridiano local que passa pelo ponto, variando de 0 a 180º graus a leste e de 0 a -180º graus a oeste. A altura geométrica h é a distância desde a superfície do elipsóide até a superfície física do ponto, contada sobre a normal que passa pelo ponto (WOLF e DEWITT, 2000), como mostrado na Figura 5.

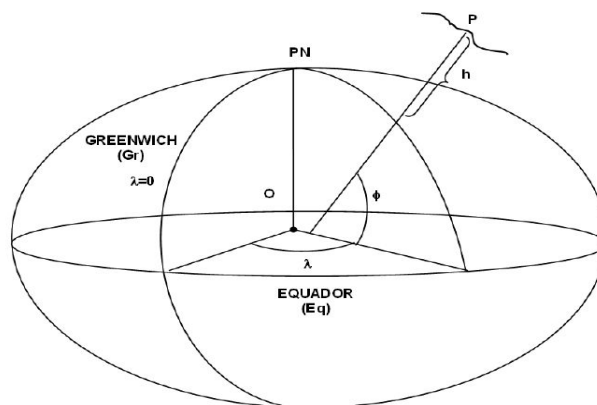


Figura 5: Referencial geodésico
Fonte: Monico (2000)

2.4.2.2 REFERENCIAL GEODÉSICO CARTESIANO

O referencial geodésico cartesiano é um sistema tridimensional de coordenadas (X,Y,Z), cuja posição do origem é definido no centro da massa da terra. O eixo Z estende-se direcionado ao polo norte médio convencional terrestre, o plano equatorial é perpendicular ao eixo Z e contém os eixos X e Y. O eixo X é orientado

ao meridiano de *Greenwich* como é mostrado na Figura 6 (WOLF e DEWITT, 2000). A transformação de coordenadas geodésicas para coordenadas cartesianas é direta, como mostrado nas equações 3 a 7. Maiores informações sobre essas transformações podem ser consultadas em (SEEBER, 1993).

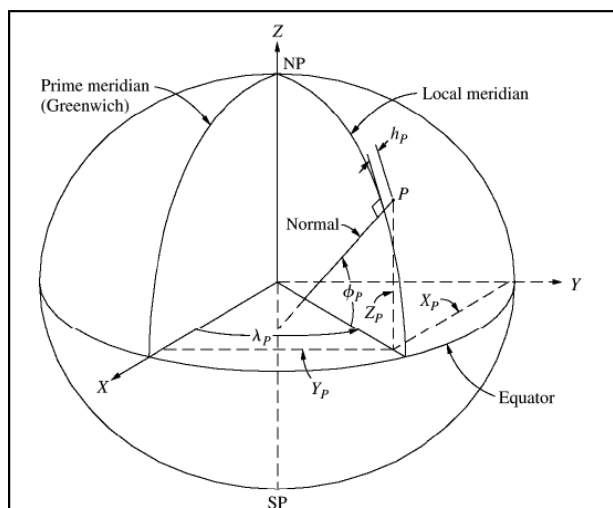


Figura 6: Referencial geodésico cartesiano
Fonte: Wolf e Dewitt (2000)

$$X_p = (N_p + h_p) \cos \varphi_p \cos \lambda_p \quad (3)$$

$$Y_p = (N_p + h_p) \cos \varphi_p \sen \lambda_p \quad (4)$$

$$Z_p = [N_p(1 - e^2) + h_p] \sen \varphi_p \quad (5)$$

$$N_p = \frac{a}{(1 - e^2 \sen^2 \varphi_p)^{1/2}} \quad (6)$$

$$e^2 = 2f - f^2 = \frac{a^2 - b^2}{a^2} \quad (7)$$

Onde;

X_p, Y_p e Z_p = coordenadas cartesianas do ponto P;

φ_p e λ_p = coordenadas geodésicas do ponto P;

h_p = altitude geométrica ou elipsoidal do ponto P;

N_p = raio de curvatura da seção 1º vertical no ponto P (ou grande normal);

a = semi-eixo maior do elipsóide de referência;

b = semi-eixo menor do elipsóide de referência;

f = achatamento do elipsóide de referência;

e^2 = quadrado da 1ª excentricidade do elipsóide de referência.

2.4.2.3 REFERENCIAL LOCAL.

O referencial cartesiano local, é estabelecido com origem num ponto específico na área do projeto; o eixo Z é coincidente com a normal ao elipsóide na origem, os eixos X e Y são tangentes ao elipsóide sendo as orientações positivas dos eixos, o este e norte respectivamente, mostradas na Figura 7 (WOLF e DEWITT, 2000).

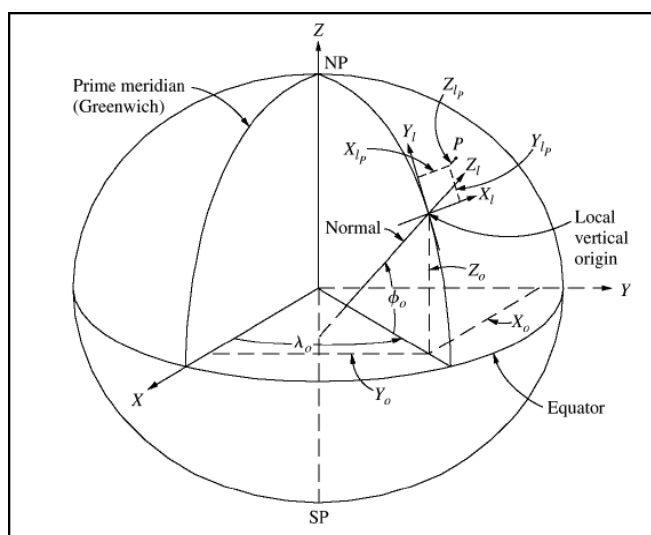


Figura 7: Sistema de referencial local
Fonte: Wolf e Dewitt (2000)

2.4.2.4 TRANSFORMAÇÃO DE UTM PARA UM SISTEMA GEODÉSICO LOCAL

O Sistema UTM (*Universal Transverse Mercator*) conhecido pelas coordenadas N, E e H constituem um sistema referencial híbrido, pois as coordenadas N, E são planas e H está referido a uma superfície curva. Tais sistemas tendem a ser ineficientes quando se requer processamento de dados com certa precisão e análise estatística de resultados, pois a incompatibilidade de sistema dá origem a efeitos sistemáticos, principalmente no caso de extensas áreas (LUGNANI, 1987).

Em aplicações fotogramétricas é desejável transformar a coordenada UTM para um referencial geodésico tridimensional local. Inicialmente, a coordenada UTM é transformada para elipsoidas (Φ , λ e H) e dessas para o referencial geodésico

cartesiano tridimensional e finalmente para o referencial geodésico cartesiano tridimensional local. Maiores detalhes dessas transformações podem ser obtidos em Andrade, 2003.

2.5 TRANSFORMAÇÕES MATEMÁTICAS

Uma aplicação freqüentemente encontrada em Fotogrametria é a transformação de coordenadas entre referenciais, pois os processos fotogramétricos fundamentam-se em medidas de pontos realizadas no espaço da imagem visando a determinação desses pontos em referenciais do espaço objeto.

A transformação de um sistema de coordenadas planas para outro pode estar relacionada com uma simples mudança de posição e orientação que nesse caso é conhecida como sendo transformação de corpo rígido. No caso de mudança de escala uniforme, junto com a posição e orientação, a transformação é denominada de Isogonal. Quando a escala não se mantém constante nas direções dos eixos cartesianos e a ortogonalidade entre eles é perdida, mantendo o paralelismo, a transformação matemática é conhecida como sendo Afim Geral.

2.5.1 TRANSFORMAÇÃO AFIM GERAL NO PLANO.

A transformação afim geral preserva o paralelismo entre linhas retas. A sua forma geral simplificada no plano é:

$$\begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix}_B = \begin{bmatrix} a_1 & b_1 \\ a_2 & b_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix}_A + \begin{bmatrix} c_1 \\ c_2 \end{bmatrix} \quad (8)$$

A formulação 8 considera que a obtenção das coordenadas no sistema B é função das coordenadas no sistema A, após uma rotação no plano, fatores de escalas nos eixos x e y e a modelagem de não ortogonalidade entre eixos (parâmetros a_1 , b_1 , a_2 , b_2) e translação (parâmetros c_1 e c_2). Para que a transformação inversa seja definida é necessário que a matriz dos (parâmetros a_1 , b_1 , a_2 , b_2) seja tal que:

$$\det \begin{bmatrix} a_1 & b_1 \\ a_2 & b_2 \end{bmatrix} \neq 0 \quad (9)$$

Se ambos os referenciais utilizados (A e B) forem cartesianos ortogonais, isto é, os seus eixos forem perpendiculares entre si, tem-se uma transformação Afim Ortogonal, com preservação do paralelismo, linearidade e ortogonalidade, conforme mostrado na equação 10, sempre quando $C_x = C_y$.

$$\begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix}_B = \begin{bmatrix} C_x \cos \alpha & C_y \operatorname{sen} \alpha \\ -C_x \operatorname{sen} \alpha & C_y \cos \alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix}_A + \begin{bmatrix} c_1 \\ c_2 \end{bmatrix} \quad (10)$$

Onde;

C_x e C_y são os fatores de escala segundo os eixos X e Y, respectivamente, e α é o ângulo formado entre os sistemas de coordenadas A e B.

2.5.2 TRANSFORMAÇÃO ISOGONAL NO ESPAÇO

A transformação isogonal no espaço é um caso particular da transformação afim geral no espaço, com preservação de forma, paralelismo e ortogonalidade. Também é conhecida por transformação de Helmert, de similaridade e conforme (equação 11). Esta transformação emprega sete parâmetros sendo um para o fator de escala uniforme (λ), três para as rotações nos três eixos ortogonais (matriz de rotação R), e três para as translações nos três eixos (x_0, y_0, z_0).

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix}_B = \lambda R \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix}_A + \begin{bmatrix} x_0 \\ y_0 \\ z_0 \end{bmatrix} \quad (11)$$

2.6 COLINEARIDADE

A relação matemática que permite descrever a projeção de um ponto do espaço objeto para o espaço da imagem é dada pela condição de colinearidade entre três pontos ou a propriedade matemática que permite, teoricamente, traçar uma reta que contenha o ponto objeto, o centro de projeção e o ponto imagem,

conforme mostrado na Figura 8. A dedução dessas equações, mostradas em 12 e 13, pode ser vista em MERCHANT (1979); MITISHITA (1997); MIKHAIL et al (2001); ANDRADE (2003).

$$x = -f \frac{m_{11}(X-X_0)+m_{12}(Y-Y_0)+m_{13}(Z-Z_0)}{m_{31}(X-X_0)+m_{32}(Y-Y_0)+m_{33}(Z-Z_0)} \quad (12)$$

$$y = -f \frac{m_{21}(X-X_0)+m_{22}(Y-Y_0)+m_{23}(Z-Z_0)}{m_{31}(X-X_0)+m_{32}(Y-Y_0)+m_{33}(Z-Z_0)} \quad (13)$$

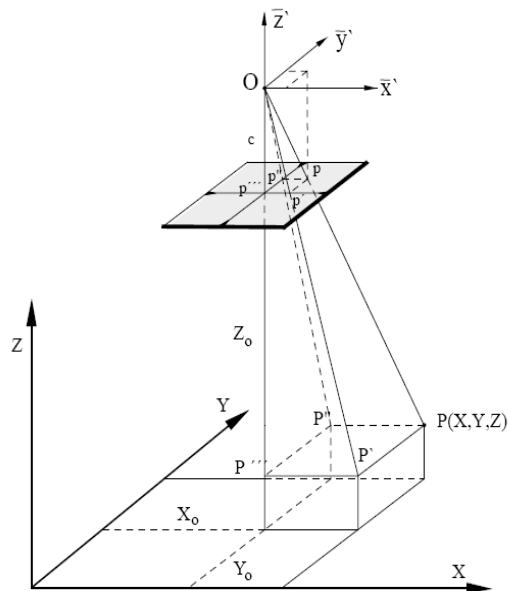


Figura 8: Colinearidade
Fonte: Wolf e Dewitt (2000)

Onde;

f é a distância focal calibrada da câmara; m_{ij} são elementos da matriz ortogonal de rotação R ;

X, Y, Z são coordenadas de um ponto no espaço objeto; x, y são coordenadas do mesmo ponto no espaço imagem no referencial fotogramétrico; X_0, Y_0, Z_0 são coordenadas do centro de projeção no espaço objeto.

A matriz R é o produto de três matrizes de rotação:

$$R = M = R_z(\kappa) \cdot R_y(\varphi) \cdot R_x(\omega) = \begin{bmatrix} m_{11} & m_{12} & m_{13} \\ m_{21} & m_{22} & m_{23} \\ m_{31} & m_{32} & m_{33} \end{bmatrix} \quad (14)$$

Onde;

$$m_{11} = \cos \varphi \cdot \cos \kappa$$

$$m_{12} = \cos \omega \cdot \sin \kappa + \sin \omega \cdot \sin \varphi \cdot \cos \kappa$$

$$m_{13} = \sin \omega \cdot \sin \kappa - \cos \omega \cdot \sin \varphi \cdot \cos \kappa$$

$$m_{21} = -\cos \varphi \cdot \sin \kappa$$

$$m_{22} = \cos \omega \cdot \cos \kappa - \sin \omega \cdot \sin \varphi \cdot \sin \kappa$$

$$m_{23} = \sin \omega \cdot \cos \kappa + \cos \omega \cdot \sin \varphi \cdot \sin \kappa$$

$$m_{31} = \sin \varphi$$

$$m_{32} = -\sin \omega \cdot \cos \varphi$$

$$m_{33} = \cos \omega \cdot \cos \varphi$$

Conforme mostrado em Mitishita (1997), conhecendo-se a coordenada Z do ponto, pode-se ter a forma inversa (Equações 15 e 16) que permite relacionar as coordenadas no espaço imagem com as coordenadas no espaço objeto.

$$X = X_0 + (Z - Z_0) \frac{m_{11}x + m_{21}y - m_{31}f}{m_{13}x + m_{23}y - m_{33}f} \quad (15)$$

$$Y = Y_0 + (Z - Z_0) \frac{m_{12}x + m_{22}y - m_{32}f}{m_{13}x + m_{23}y - m_{33}f} \quad (16)$$

2.7 ORIENTAÇÃO INTERIOR

A orientação interior na Fotogrametria Digital pode ser definida por um conjunto de parâmetros que permite recuperar a geometria da imagem no momento da sua obtenção. As coordenadas no referencial fotogramétrico são obtidas por um processo que pode ser entendido como sendo a orientação interior ou por um refinamento das coordenadas do espaço imagem, denominado de correção de erros sistemáticos da imagem.

2.7.1 ABERRAÇÕES DAS LENTES

As aberrações podem ser consideradas como sendo perturbações sofridas por um raio de luz ao atravessar o sistema de lentes, causadas por efeitos ópticos oriundos da incapacidade do homem produzir um sistema de lentes exatamente igual ao que foi concebido teoricamente. Seidel et al (1916, citado por ANDRADE, 2003), definiu cinco aberrações causadas pelo processo de fabricação de uma lente. Essas ficaram conhecidas como: aberração esférica, coma, astigmatismo, curvatura de campo e distorção. As quatro primeiras aberrações estão relacionadas com a qualidade visual da imagem, enquanto a distorção prejudica a qualidade geométrica da imagem.

2.7.1.1 DISTORÇÃO RADIAL SIMÉTRICA

Novamente, segundo Andrade (2003), a distorção radial simétrica pode ser encarada como sendo a parcela não desejável da refração sofrida por um raio de luz ao atravessar uma lente ou sistema de lentes. Conrady, em 1919, desenvolveu um modelo matemático para parametrizar a distorção radial simétrica num sistema de lentes.

As componentes da distorção radial simétrica no referencial de imagem em milímetros (δ_{rx} e δ_{ry}) mostradas nas equações 17 e 18, são calculadas com base nos coeficientes da distorção radial simétrica, obtidos num certificado de calibração da câmara (k_1, k_2, k_3) e das coordenadas do ponto principal no sistema de coordenadas de imagem em milímetros (x_0, y_0):

$$\delta_{rx} = (k_1 r^2 + k_2 r^4 + k_3 r^6) \cdot (x' - x_0) \quad (17)$$

$$\delta_{ry} = (k_1 r^2 + k_2 r^4 + k_3 r^6) \cdot (y' - y_0) \quad (18)$$

Onde;

x' e y' : coordenadas do ponto no referencial de imagem em milímetros

$$r = \sqrt{(x' - x_0)^2 + (y' - y_0)^2} . \quad (19)$$

As coordenadas corrigidas da distorção radial simétrica são dadas pela equação 20.

$$\begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix}_{\text{corrigido}} = \begin{bmatrix} x' \\ y' \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \delta_{rx} \\ \delta_{ry} \end{bmatrix} \quad (20)$$

2.7.1.2 DISTORÇÃO DECENTRADA

A distorção descentrada origina-se da impossibilidade do fabricante em alinhar perfeitamente os eixos ópticos das lentes que compõem uma objetiva. Conrady, em 1919, demonstrou que a distorção descentrada é composta pela distorção tangencial e radial assimétrica.

Na década de 1960, Brown (1966) adaptou o trabalho de Conrady (1919) e desenvolveu o modelo para a correção da distorção descentrada para aplicações em Fotogrametria. Esse modelo foi denominado de Conrady Brown (ANDRADE, 2003).

As componentes de distorção descentrada (δ_{dx} e δ_{dy}) são calculadas pelas Equações 21 e 22.

$$\delta_{dx} = P_1[r^2 + 2(x' - x_0)^2] + 2P_2(x' - x_0)(y' - y_0) \quad (21)$$

$$\delta_{dy} = 2P_1(x' - x_0)(y' - y_0) + P_2[r^2 + 2(y' - y_0)^2] \quad (22)$$

Onde;

r é calculado conforme equação (19); P_1 e P_2 são os coeficientes da distorção descentrada (fornecidos pelo certificado de calibração da câmara). As coordenadas corrigidas são calculadas pela Equação 23.

$$\begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix}_{\text{corrigido}} = \begin{bmatrix} x' \\ y' \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \delta_{dx} \\ \delta_{dy} \end{bmatrix} \quad (23)$$

2.7.1.3 COEFICIENTES DE AFINIDADE

Os parâmetros de afinidade estão relacionados com a modelagem das deformações de não ortogonalidade e diferença de escala nos eixos x e y dos

elementos sensores de um sensor sólido. Segundo Galo (1993) e Reiss (2002), este efeito ocorre em câmaras digitais quando o *pixel* possui dimensões diferentes em X e Y, ou seja, não é perfeitamente quadrado; e/ou o sensor CCD não é perfeitamente perpendicular ao eixo óptico.

A formulação matemática empregada por Galo (1993) é apresentada nas Equações 24 e 25. Essas calculam as correções da distorção de afinidade (δ_{ax} e δ_{ay}) no referencial de imagem em milímetros. A e B são parâmetros de afinidade; x' é a abscissa de um ponto qualquer referido ao sistema de coordenadas da imagem em milímetros;

$$\delta_{ax} = A(x' - x_0) \quad (24)$$

$$\delta_{ay} = B(x' - x_0) \quad (25)$$

As coordenadas corrigidas são calculadas pela Equação 26.

$$\begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix}_{\text{corrigido}} = \begin{bmatrix} x' \\ y' \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \delta_{ax} \\ \delta_{ay} \end{bmatrix} \quad (26)$$

2.7.2 REFRAÇÃO FOTOGRAMÉTRICA

Os desvios da condição de colinearidade podem ser ocasionados por fatores externos. Os raios de luz que formam a imagem, ao atravessarem a atmosfera são desviados de sua trajetória devido à variação dos índices de refração; este efeito causa um deslocamento radial do ponto na imagem sendo denominado de refração fotogramétrica. Segundo Mitschta e Olivas (2001) a refração fotogramétrica é um erro sistemático que não pode ser parametrizado nas equações de colinearidade, junto com a distorção radial simétrica, pois são fisicamente o mesmo fenômeno e por tanto correlacionados.

A modelagem da refração fotogramétrica é bastante complexa devido à dificuldade da obtenção de parâmetros que descrevam as condições meteorológicas em solo e do ambiente da câmara no exato instante da tomada das imagens. Considerando este fato, foram desenvolvidos diferentes modelos de atmosfera

padrão. Em Mikhail et al (2001) é apresentado o seguinte modelo de atmosfera padrão:

$$K = \frac{2410H}{H^2 - 6H + 250} - \frac{2410h}{h^2 - 6h + 250} \left(\frac{h}{H}\right) \quad (27)$$

$$\delta x_{ref} = x' \left(1 + \frac{r^2}{f^2}\right) \cdot K \quad (28)$$

$$\delta y_{ref} = y' \left(1 + \frac{r^2}{f^2}\right) \cdot K \quad (29)$$

Onde H representa a altura de voo em metros, h a elevação do terreno em metros e $\delta x_{ref}, \delta y_{ref}$ representam as componentes da refração fotogramétrica em x' e y' .

Concluindo, conhecendo-se os parâmetros $f, x_0, y_0, k_1, k_2, k_3, P_1, P_2, A$ e B , denominados parâmetros de orientação interior (POI) é possível transformar as coordenadas de um ponto no referencial de imagem em milímetros para o referencial fotogramétrico sem distorção, mostrado na equação 30. Na prática, a medida realizada na imagem foi minimizada dos afastamentos da condição de colinearidade que sofre o raio de luz no instante da formação da imagem.

$$\begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix}_{fotogramétrico} = \begin{bmatrix} x' \\ y' \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} x_0 \\ y_0 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \delta_{rx} \\ \delta_{ry} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \delta_{dx} \\ \delta_{dy} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \delta_{ax} \\ \delta_{ay} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \delta x_{ref} \\ \delta y_{ref} \end{bmatrix} \quad (30)$$

2.8 CALIBRAÇÃO

Segundo Eisenhart (1963) calibrar é uma maneira refinada de realizar medidas. As medições devem ser repetitivas e executadas de modo a se obter um valor representativo da grandeza observada, bem como a sua precisão. Para manter as características do equipamento calibrado, as medições devem ser realizadas em condições ambientais e operacionais semelhantes àquelas que serão empregadas no instante da utilização do equipamento.

De acordo com Andrade (2003), num processo de calibração fundamentado nas equações de colinearidade e num ajustamento (MMQ) que determina, simultaneamente, os parâmetros de orientação interior e exterior de um conjunto de imagens, existirá uma forte correlação entre as coordenadas da estação de exposição (X_0, Y_0, Z_0) com os parâmetros de orientação interior (x_0, y_0, f) , em fotografias aéreas verticais tomadas sobre terreno plano. Para quebrar a correlação, existem os métodos de calibração das câmaras convergentes e dos campos mistos, entre os mais usados. Clarke e Fryser (1998) fizeram estudo sobre os métodos de calibração de câmaras. Outros métodos de calibração podem ser obtidos em (WOLF e DEWITT, 2004) e (MOFFITT, 1980).

Dentre os métodos de calibração existentes, o método das câmaras convergentes é o de mais fácil execução e extremamente robusto em termos de determinação dos parâmetros de orientação interior (ANDRADE, 2003). Esse método está baseado na obtenção de fotografias de um campo de prova a partir de três estações de exposição distintas. Para quebrar a correlação linear existente entre os parâmetros de orientação interior e os de orientação exterior, o ângulo de convergência entre as estações extremas deverá ser de 90 graus.

Com o intuito de separar os coeficientes da distorção radial simétrica dos coeficientes da distorção descentrada, é necessário que pelo menos uma fotografia seja tomada com rotação de 90° em torno do eixo Z. Portanto são necessárias três fotografias como condição mínima para calibrar uma câmara por este método, sendo duas fotografias convergentes entre si com ângulo de 90° e uma com giro no eixo X em relação às outras de 90° (ANDRADE, 2003).

O método dos campos mistos baseia-se na variação da altitude dos pontos, como maneira de quebrar a correlação linear existente entre os parâmetros de orientação interior e os parâmetros de orientação exterior. Por este motivo, a correlação linear pode ser quebrada tomando fotografias em um terreno com fortes diferenças em altitude.

A grande vantagem dos métodos de calibração que utilizam fotografias aéreas, como no método dos campos mistos, é que os parâmetros de orientação interior de uma câmara podem ser recuperados nas mesmas condições das tomadas das fotografias para o aerolevanteamento.

A determinação dos parâmetros de distorção das lentes exige um campo de prova com um conjunto denso de alvos. Devido à dificuldade de determinação precisa das coordenadas dos alvos num terreno acidentado, antes do advento da geodésia por satélites, a solução encontrada foi a utilização de dois campos de calibração, um plano altamente densificado e outro acidentado com um número reduzido de pontos.

As equações de colinearidade (12) e (13), acrescidas de sete parâmetros de orientação interior (29), coordenadas do ponto principal (x_0, y_0) , coeficientes da distorção radial simétrica (k_1, k_2, k_3) , e coeficientes da distorção descentrada (P_1, P_2) , são comumente empregadas num processo de calibração equação (31) e (32).

$$x' = -f \frac{m_{11}(X-X_0)+m_{12}(Y-Y_0)+m_{13}(Z-Z_0)}{m_{31}(X-X_0)+m_{32}(Y-Y_0)+m_{33}(Z-Z_0)} + x_0 + \delta_{rx} + \delta_{dx} \quad (31)$$

$$y' = -f \frac{m_{21}(X-X_0)+m_{22}(Y-Y_0)+m_{23}(Z-Z_0)}{m_{31}(X-X_0)+m_{32}(Y-Y_0)+m_{33}(Z-Z_0)} + y_0 + \delta_{ry} + \delta_{dy} \quad (32)$$

2.9 ORIENTAÇÃO EXTERIOR.

A orientação exterior permite definir a posição e atitude de cada imagem com respeito a um referencial, geralmente aquele no qual se pretende realizar o trabalho. Uma imagem está externamente orientada de acordo com um referencial adotado, quando são conhecidas as três coordenadas X_0, Y_0, Z_0 do centro de perspectiva, com os ângulos de Euler ω, ϕ, κ . (Figura 9) Estes ângulos representam rotações que são aplicadas para fazer coincidir os referenciais.

A determinação dos parâmetros de orientação exterior é essencial para a avaliação geométrica de qualquer tipo de imagem aérea, terrestre ou orbital (CRAMER et al, 2000). Dois tipos de georreferenciamento são utilizados para a determinação destes parâmetros em Fotogrametria. Um, denominado de Georreferenciamento indireto e outro de direto.

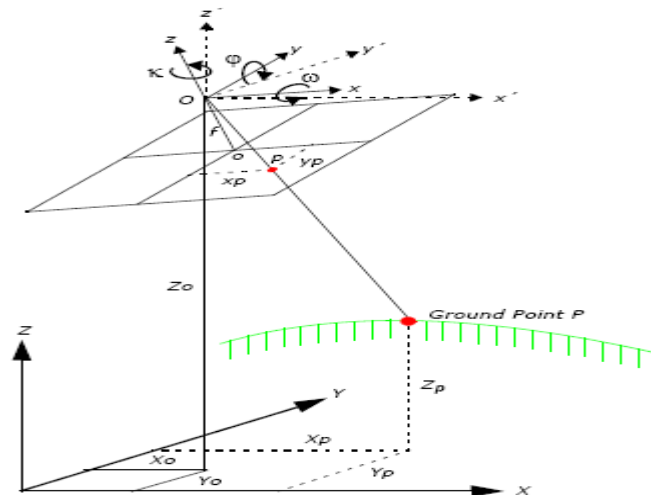


Figura 9: Orientação Exterior
Fonte: Pérez Álvarez (2001)

2.9.1 GEORREFERENCIAMENTO INDIRETO

O método de georreferenciamento indireto utiliza um modelo matemático que relaciona as coordenadas dos pontos de apoio no espaço objeto com as suas respectivas coordenadas medidas no espaço imagem. O modelo matemático clássico empregado é o das equações de colinearidade (12) e (13) (CRAMER et al, 2000). Os pontos de controle assumem um papel fundamental no georreferenciamento indireto, pois através destes, torna-se possível a materialização do referencial a ser adotado e a determinação dos parâmetros de orientação exterior de um conjunto de imagens por meio de um ajustamento por mínimos quadrados.

2.9.2 GEORREFERENCIAMENTO DIRETO

O georreferenciamento direto ou a medição direta dos parâmetros de orientação exterior está consolidado na combinação do “Global Navigation Satellite Systems” (GNSS) junto com a “Inertial Measurement Unit” (IMU), ou Unidade de Medida Inercial Aldino, W.F. (2012). O GNSS fornece as informações de posição do centro de projeção do sensor de imageamento (X_0, Y_0, Z_0) no referencial geodésico, enquanto o IMU fornecerá informação de deslocamento do sistema de navegação a traves da integração da velocidade em relação ao tempo e determinará a orientação (ω, ϕ, κ) por meio de medições de velocidade angular do sistema em relação ao tempo Gutjahr K.H 41 tal (2010). A união dos sensores GNSS e IMU gera um

Sistema de Navegação Inercial (SNI), também conhecido como “Inertial navigation system” (INS). Esta união pode ser realizada em tempo real ou pós-processada para a determinação dos parâmetros de orientação exterior (POE).

2.10 AEROTRIANGULAÇÃO

O procedimento fotogramétrico de aerotriangulação, é denominado nos dias atuais de Georreferenciamento indireto de imagens, sendo entendida como a recessão e a interseção espacial de um conjunto de imagens realizadas simultaneamente. O procedimento determina indiretamente os parâmetros de orientação exterior de um conjunto de imagens, através de um ajustamento simultâneo que tem como base as equações de colinearidade, observações de pontos fotogramétricos e de pontos de apoio, geometricamente distribuídos nas imagens, como também das precisões resultantes nos procedimentos utilizados nas obtenções das coordenadas de pontos nos referenciais envolvidos. Segundo Andrade (2003), o procedimento fotogramétrico conhecido na sua forma geral como fototriangulação, pode ser denominado de aerotriangulação, triangulação aérea ou triangulação quando são empregadas fotografias aéreas

O procedimento de aerotriangulação analítica, mais empregado nos dias atuais, é realizado através do ajustamento por feixes de raios (*Bundle Adjustment*). As equações de colinearidade (12) e (13) são utilizadas como modelo funcional. Na forma mais usual para a realização do processo, um pré processamento será necessário a fim de minimizar os afastamentos da condição de colinearidade nas observações fotogramétricas, provocados pelo afastamento do ponto principal e das distorções de lentes. Para tanto, um procedimento de calibração de câmaras sempre será necessário para a determinação dos parâmetros da orientação interior.

2.11 CAMERA FOTOGRAMETRICA VEXCEL Xp

A câmara aérea de grande formato UltraCam Xp (figura 11) é fabricada pela Vexcel Imaging, empresa adquirida pela Microsoft Corporation em Maio de 2006. Esta câmara foi lançada no mercado no ano de 2008. É formada por um total de 8 cones ópticos colocados de maneira a gerar uma imagem digital de grande formato,

em RGB e infra vermelho próximo. O mínimo intervalo entre duas imagens consecutivas é de 2 seg. Conta com um sistema de compensação de movimento (“*Forward Motion Compensation*” FMC) controlado pelo atraso do tempo da integração (“*Time Delay Intregation*” TDI), o que permite remover a redundância temporal entre imagens seqüenciais até 50 pixels (WIECHERT, A. 2008). Dispõe também de múltiplos formatos de saída, permitindo obter diferentes tipos de resultados. Para isso usa 13 CCDs (9 para pancromático e 4 para cor e infra vermelho próximo).O "cone mestre" proporciona um sistema único de coordenadas para o controle da precisão geométrica da imagem virtual (isenta de distorções) gerada (Figura 10).



Figura 10: Cone Imagem Pancromática
Fonte: Gruber M (2007)

Conta com 14 CPUs que lhe dão uma grande potência no processamento dos dados em tempo real. Permite o cálculo de produtos intermediários para avaliação da qualidade da imagem durante o voo (processa imagens a bordo, em tempo real, para obter arquivos de vista rápida e histogramas). Admite várias unidades de dados intercambiáveis, a cada uma das quais pode armazenar até 4,2 TB (6.600 imagens). A informação técnica completa desta câmara é apresentada no Anexo 01.



Figura 11: Câmara UltraCam Xp
Fonte: Gruber e Wiechert (2009)

A determinação dos parâmetros internos da câmara é realizada pela fábrica por um processo de calibração em laboratório, empregando a metodologia das câmaras convergentes. A calibração é realizada a partir da captura de oitenta e quatro (84) imagens de um campo de prova com 394 pontos (figura 12), dando uma quantidade de pontos medidos nas imagens pancromáticas de 19105 e na multiespectral de 64864. A determinação dos parâmetros de orientação interior da câmara é realizada por meio do ajustamento das observações, pelo método de mínimos quadrados, utilizando o software BINGO, pertencente à companhia "Gesellschaft für Industriephogrammetrie mbH" (GIP).

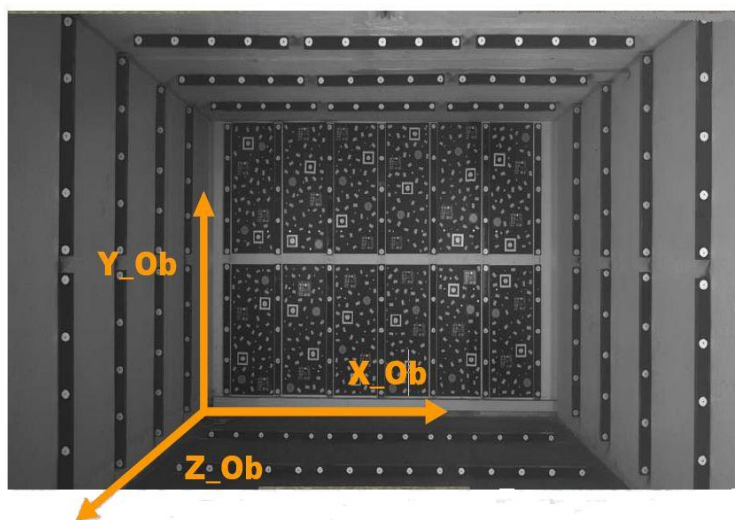


Figura 12: Campo de calibração do fabricante
Fonte: Gruber e Wiechert (2009)

2.11.1 MONTAGEM ESTABILIZADOR DA CÂMARA

A 3000 GSM (Figura 13), é fabricada pela empresa *Ingenieur Gesellschaft für Interfaces mbH* (IGI). Trata-se de um sensor que permite a estabilização e controle da deriva de sistemas aerotransportados. Esta base permite estabilizar em tempo real correções em três eixos (roll, pitch, yaw), através de giroestabilizadores compensando os movimentos da aeronave determinados pela distância com respeito ao nadir, por meio de nivelamento automático. Possui também de mecanismo de minimização das vibrações geradas pelos movimentos do avião.



Figura 13: Plataforma Giro Estabilizada
Fonte: Gruber M (2007)

2.11.2 IMAGEM

A imagem digital é resultante da combinação de 8 cones ópticos colocados de maneira a se ter uma imagem de grande formato. A imagem pancromática do modelo possui uma dimensão de 17.310 x 11.310 pixels, de dimensões físicas de 0,006 mm. A imagem multiespectral possui uma dimensão de 5.770 x 3.770 pixels, de dimensões físicas de 0,018 mm. O sistema UltraCam opera com os seguintes níveis de dados:

Nível-00: cada imagem ativa consiste de 13 subimagens com duplo armazenamento (redundância de dados);

Nível-0: igual ao Nível-00, mas sem a cópia duplicada;

Nível-1: formato interno intermediário que mantém 13 subimagens, sendo 9 pancromáticas e 4 multiespectrais (figura 14). A correção radiométrica é realizada com arquivos de calibração;

Nível-2: formato de saída onde as subimagens pancromáticas e multiespectrais são conectadas e corrigidas geometricamente utilizando os arquivos da calibração. Os quatro canais de cor e os dados pancromáticos são fusionados em uma única imagem, mantendo a resolução espacial da imagem pancromática com a resolução espectral das imagens multiespectrais.

Nível-3: As imagens então em RGB - CIR ou em RGB- NIR, com 8 ou 16 bits, no formato TIFF ou JPEG.

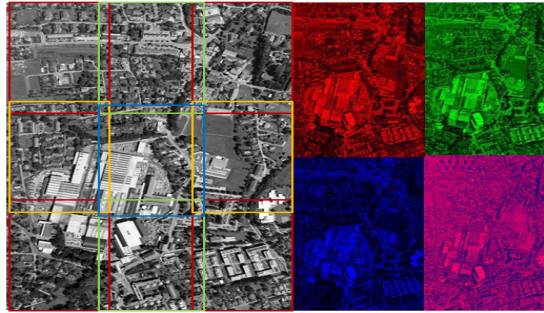


Figura 14: Imagem nível 1
Fonte: Gruber M (2007)

A imagem resultante das conexões das subimagens é efetuada por meio de transformações geométricas realizadas com pontos comuns em áreas de sobreposição entre as subimagens. A Figura 15 mostra esta relação entre as nove imagens e sua conexão.

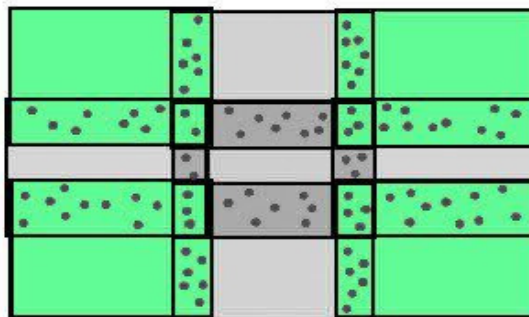


Figura 15: Integração Imagem
Fonte: Gruber M (2007)

2.11.3 GNSS.

O “Global Navigation Satellite System” – GNSS, ilustrado na Figura 16, é o termo genérico para os sistemas mundiais de navegação por satélite. O sistema fornece um posicionamento geoespacial com cobertura global. O GNSS permite que pequenos receptores determinem a localização (longitude, latitude e altitude) de pontos na superfície terrestre com precisão variando de 10 m até mm, dependendo do tipo empregado. A medida de cálculo pode ser o tempo de percurso do sinal de rádio transmitido do satélite até o receptor o através da diferença de fase da onda portador.

Para utilização do método estático e cinemático de posicionamento, são empregados dois ou mais receptores de dupla frequência (L1/L2), a fim de se calcular as coordenadas de um ponto desconhecido ou de uma trajetória. Um dos rastreadores é posicionado no ponto desconhecido onde se deseja calcular as coordenadas (móvel) e os demais receptores (base) em pontos de coordenadas conhecidas de modo que todos os receptores recebam os mesmos sinais de rádio dos satélites, possibilitando a diminuição de erros de natureza sistemática, aumentando a precisão na determinação da coordenada desconhecida. As coordenadas cartesianas tridimensionais no referencial geodésico cartesiano (X, Y, Z) são transformadas para coordenadas geodésicas elipsoidais de latitude, longitude geodésica e altitude geométrica (φ , λ , h).

O método estático permite a determinação das diferenças de fase de todos os satélites observados durante o tempo de rastreo. Os dados obtidos sofrerão, desde o levantamento de campo até o pós-processamento, correções de frequência, transformações de referencial e ajustamento global pelo método dos mínimos quadrados com injunções de posições, obtendo-se assim as coordenadas finais geodésicas (latitude, longitude e altitude geométrica). Frequentemente, são aplicadas dois tipos de injunções para o pós-processamento: Absolutas para os elementos orbitais; Relativas para os pontos de partida. Tal procedimento permite a análise da variância da unidade de peso "a posteriori", do teste de "Qui-quadrado", dos resíduos, da matriz variância-covariância dos parâmetros incógnitos e do grau de aproximação das ambiguidades das fases flutuantes para seu valor inteiro.

Para o método cinemático, o pós-processamento consiste na determinação das ambiguidades sem uma inicialização estática. Essa técnica é conhecida por "*on-the-flight*" – OTF. O processamento é do tipo ida e volta – "*forward-backward*", ou seja, a trajetória é processada no sentido do levantamento e também no sentido contrário ao levantamento. Após estes dois processamentos é realizada uma composição dos resultados. O aspecto mais crítico do levantamento cinemático é a interpolação dos pontos entre os intervalos de observação (1s). Esta interpolação é realizada a partir de pontos adjacentes e tendo como algoritmo estimador o filtro de Kalman. Este filtro é um estimador Bayesiano, não tendencioso, consistente, eficiente e de variância mínima (CAMARGO, 1992). É, portanto, um método de se estimar o vetor posição de um modelo dinâmico a partir de observações randômicas, produzindo

estimadores do vetor posição com propriedades estatísticas bem definidas. Tais propriedades são ótimas no sentido de serem não tendenciosas e de variância mínima, entre a classe dos estimadores não tendenciosos (JUBANSKI, 2005).

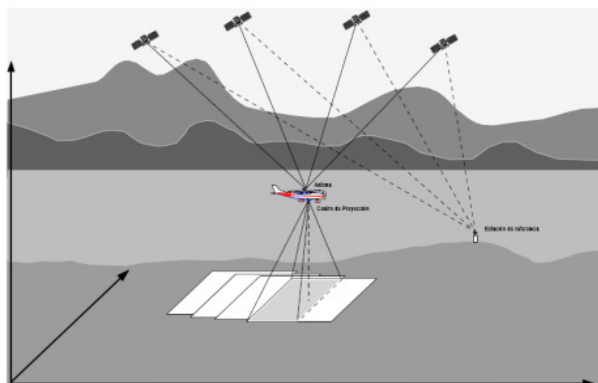


Figura 16:GNSS
Fonte: Pérez Alvaréz (2001)

2.11.4 UNIDADE DE MEDIÇÃO INERCIAL (IMU)

Uma Unidade de Medida Inercial – IMU, também conhecida como “*Inertial Measurement Unit*” – é um dispositivo que realiza medições continuamente de posição e atitude em relação ao tempo. Estas são compostas de três medidas ortogonais de aceleração linear e três de medidas angulares. A teoria de navegação inercial baseia-se na segunda lei de Newton, que descreve que todo corpo em repouso precisa de uma força para se movimentar e todo corpo em movimento precisa de uma força para parar. O corpo adquire a velocidade e sentido de acordo com a força aplicada. Ou seja, quanto mais intensa for a força resultante, maior será a aceleração adquirida pelo corpo. Quando uma força resultante atua sobre uma partícula, esta adquire uma aceleração na mesma direção e sentido da força, segundo um referencial inercial. Neste caso, a relação entre a causa (força resultante) e o efeito (aceleração) constitui o objetivo principal da Segunda Lei de Newton, cujo enunciado pode ser simplificado em palavras da seguinte forma: a resultante das forças que agem em um corpo é igual à taxa de variação do momento linear (quantidade de movimento) do mesmo em relação ao tempo.

O sistema de navegação inercial é o processo pelo qual se estabelecem informações sobre posição, velocidade, atitude (posição de um corpo que é

determinada pela determinação de seus eixos com relação a algum sistema de referência) e direção de um veículo com relação a um referencial, utilizando informações fornecidas por sensores inerciais, tais como acelerômetros e giroscópios (TITTERTON e WESTON, 1997). Medindo-se a aceleração de um corpo, torna-se possível calcular as mudanças de velocidade e posição através de sucessivas integrações matemáticas. Movimentos rotacionais podem ser obtidos a partir de giroscópios que medem a velocidade de rotação em torno de um eixo. Basicamente, existem dois tipos de sistemas de navegação inercial: os sistemas isolados de rotação ou “*gimbaled systems*” e os sistemas não isolados de rotação ou “*strapdown systems*” (analíticos).

“*Strapdown systems*” é o nome dado para um sistema integrado de medição inercial no qual três acelerômetros e três giroscópios são montados sobre eixos ortogonais coincidentes e sobre uma mesma base rígida (TITTERTON e WESTON, 1997). Os eixos dos acelerômetros e dos giroscópios devem ser coincidentes (paralelos) para que se possam realizar transformações de coordenadas. Esta tríade de sensores é então fixada numa aeronave e passa a formar o sistema de coordenadas da aeronave, denominado sistema móvel de coordenadas ou sistema de coordenadas “roll, pitch, yaw”. Quando um sistema de sensores inerciais “*strapdown*” é embarcado juntamente com um sistema de controle eletrônico dedicado, tem-se então uma estrutura denominada unidade de medição inercial, ou “*Inertial measurement unit*” – IMU (figura 17).

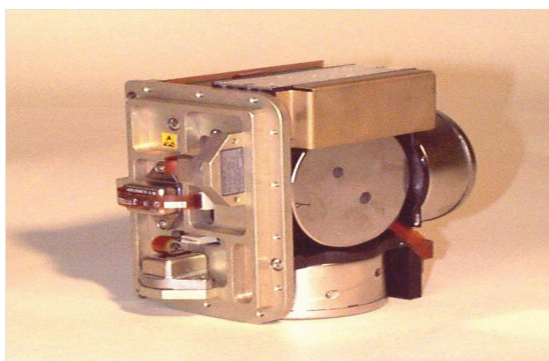


Figura 17: IMU
Fonte: Gruber e Wiechert (2009)

3. MATERIAL E MÉTODOS

3.1 MATERIAIS UTILIZADOS

Para o desenvolvimento desta pesquisa foram utilizados os dados que foram adquiridos pelo sistema aerofotogramétrico da Empresa Topocart que utiliza de uma câmara digital UltraCam Xp acoplada com um sistemas de posição e orientação (POS/AVTM-410). Esta câmara possui, segundo o certificado de calibração, fornecido pelo fabricante da câmara, denominado neste trabalho como sendo os de fábrica, uma distância focal de 100.5 mm, posição do Ponto Principal ($x=0$ mm, $y=0.12$ mm) e tamanho de *pixel* de 6 μ m. A área de trabalho encontra-se na cidade de Curitiba, especificamente no bairro Bacacheri. Para a presente pesquisa utilizou-se de 18 imagens que compõem um conjunto que contem quatro faixas, tomadas na altura média de voo de 2500 metros uma escala 1/24875, com uma sobreposição longitudinal de 70%. Todas as imagens possuem parâmetros de orientação exterior que foram determinados pelo sistema de georreferenciamento direto.

3.2 METODOLOGIA PROPOSTA.

Para alcançar os objetivos, geral e específico que foram definidos neste trabalho, condiciona-se a investigação a uma série de processos e procedimentos que são descritos de forma simplificada nos fluxogramas mostrados nas Figuras 18 ate 21 e de forma detalhada nos subitens a seguir.

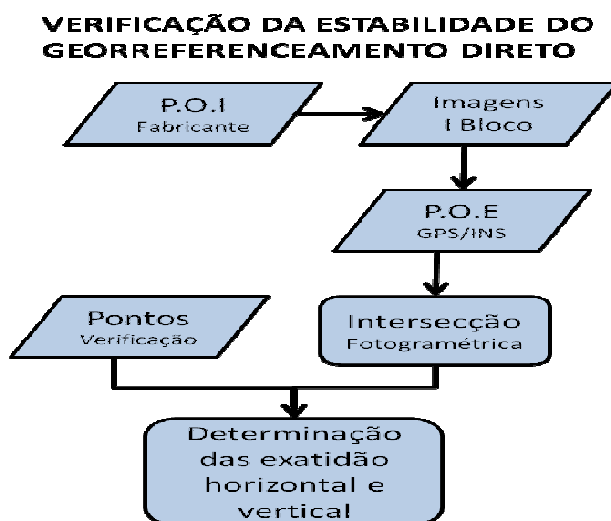


Figura 18: Fluxograma Verificação GD
Fonte: Autor

REFINAMENTO DO GD COM AEROTRIANGULAÇÃO

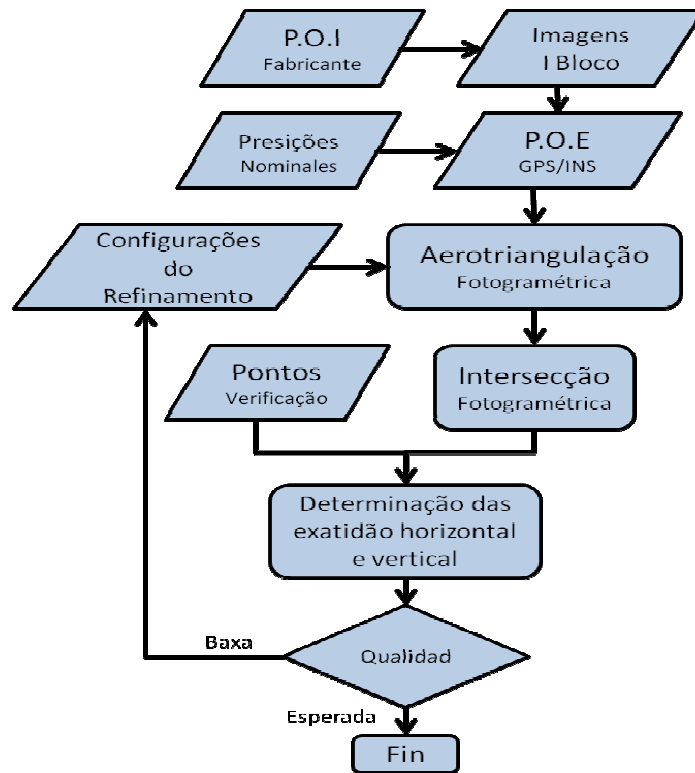


Figura 19: Fluxograma refinamento dos POEs
Fonte: Autor

CALIBRAÇÃO EM SERVIÇO

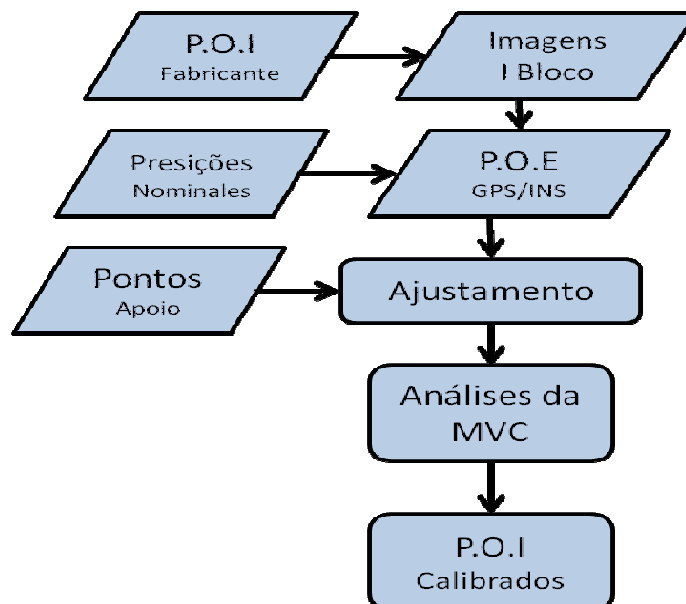


Figura 20: Fluxograma da calibração em Serviço
Fonte: Autor

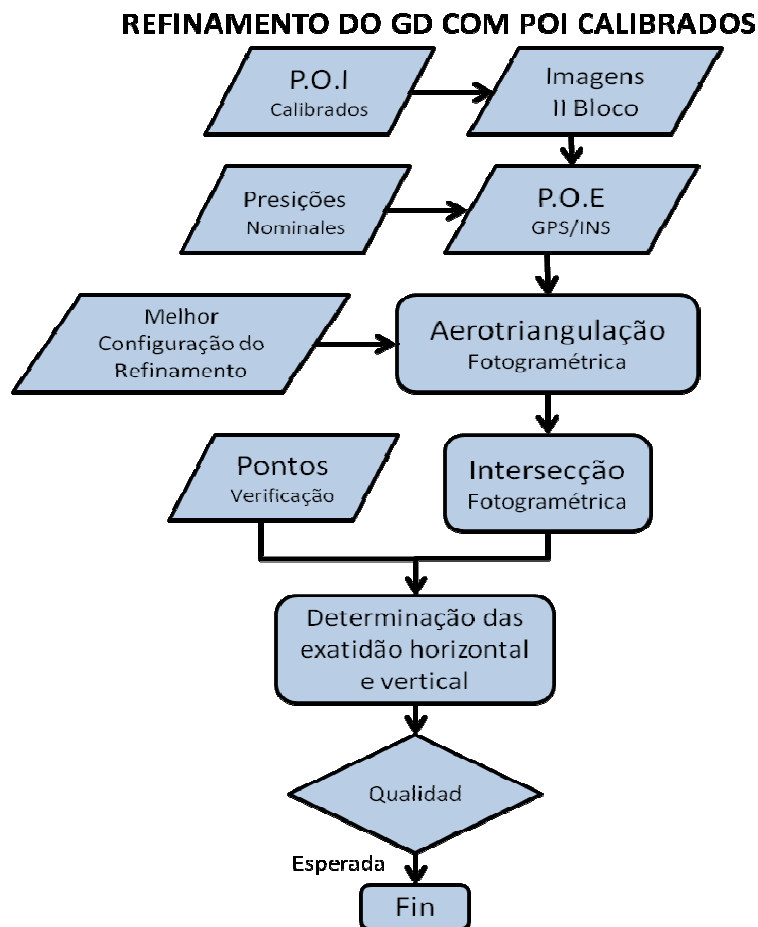


Figura 21: Fluxograma refinamento dos POEs com POI determinados em serviço
Fonte: Autor

3.2.1 VERIFICAÇÃO DA ESTABILIDADE DO GEORREFERENCIAMENTO DIRETO.

O primeiro passo desta pesquisa consiste em analisar a qualidade da determinação dos parâmetros de orientação exterior pelo sistema de georreferenciamento direto das imagens. Utilizando-se da intersecção dos pares de raios homólogos no espaço objeto (intersecção fotogramétrica), as coordenadas geodésicas tridimensionais de pontos de verificação serão determinadas. O processo utiliza os parâmetros da orientação interior de fábrica e os dados de posição (X_0, Y_0, Z_0) e de orientação (ω, ϕ, κ) providos diretamente pelo sistema GPS/IMU no instante aproximado da formação geométrica da imagem.

Uma vez que os pontos empregados na intersecção são pontos de verificação que possuem coordenadas tridimensionais determinadas com levantamento geodésico espacial (GPS diferencial), as exatidões horizontal e vertical da intersecção fotogramétrica serão determinadas pela comparação das coordenadas

obtidas pelos dois processos, o geodésico com o fotogramétrico. A Figura 22, mostra a distribuição de pontos de verificação no modelo fotogramétrico a ser utilizado no experimento de intersecção fotogramétrica proposto.

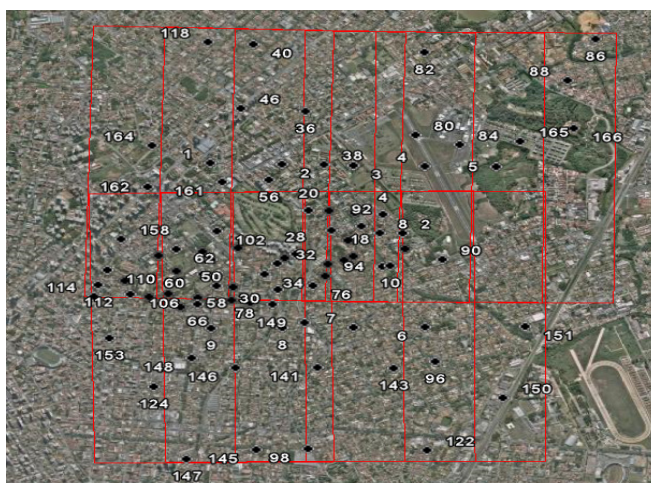


Figura 22: Pontos de Verificação
Fonte: Autor

3.2.2 REFINAMENTO DO GEORREFERENCIAMENTO DIRETO COM AEROTRIANGULAÇÃO.

Nove experimentos de fototriangulação serão realizados com o objetivo de refinar os parâmetros da orientação exterior que foram determinados no georreferenciamento direto das imagens. Diferentes configurações de pontos de apoio no bloco, variando de um a cinco, serão avaliadas. Os valores dos parâmetros de orientação exterior serão injuncionados na fototriangulação com base nas suas precisões nominais fornecidas pelo fabricante. O valor de 30 cm será empregado para os desvios padrão das coordenadas tridimensionais dos centros de projeção e 30 segundos de arco para os desvios padrão dos ângulos (ω, φ) e 54 segundos para o ângulo (κ).

A variação do número de pontos de apoio na aerotriangulação tem por finalidade estudar a distribuição que viabilize o ajustamento dos parâmetros de orientação exterior no seu intervalo de precisão e que resulte na melhor exatidão na intersecção fotogramétrica tridimensional. Em cada um dos experimentos, as exatidões horizontal e vertical da intersecção fotogramétrica serão determinadas via análise de discrepâncias nos pontos de verificação.

Os processamentos da aerotriangulação e calibração da câmara serão

efetuados no programa “CALIBRAV”, disponível no laboratório de Fotogrametria e Sensoriamento Remoto da UFPR. No módulo de Fotogrametria do aplicativo “Leica Photogrammetry Suite” (LPS), do software “Erdas Imagine”, da fabricante “Leica Geosystems”, serão realizadas as medidas manuais dos pontos fotogramétricos e com a ferramenta *Compute image coordinates from the ground points*, o ponto medido é projetada para as outras imagens.

Um bloco contendo 9 imagens, distribuídas em duas faixas paralelas com 30% de recobrimento lateral, foi empregado nos experimentos. Uma das faixas possui 5 imagens e sentido de voo de Oeste – Leste. A outra contém 4 imagens com sentido oposto de voo. Ambas possuem recobrimento entre fotos de aproximadamente 60%.

O primeiro estudo de refinamento será realizado com o processamento do bloco sem a utilização de pontos de apoio. Os parâmetros de orientação exterior das 9 imagens serão injuncionados com as precisões nominais apresentadas na aerotriangulação que utilizará somente de pontos de passagem, entre fotos e faixas. Os valores ajustados dos parâmetros de orientação exterior, dentro dos seus limites de precisões, serão empregados para a realização da intersecção fotogramétrica.

Os outros estudos de refinamento serão realizados com a utilização de pontos de apoio no bloco. Oito configurações de distribuição de pontos de apoio, variando de 1 a 5, são apresentadas nas Figuras (23 a 27).

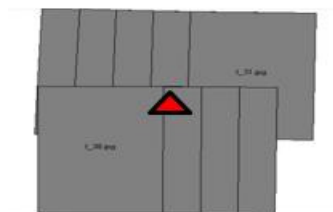


Figura 23: Configuração com um ponto de apoio

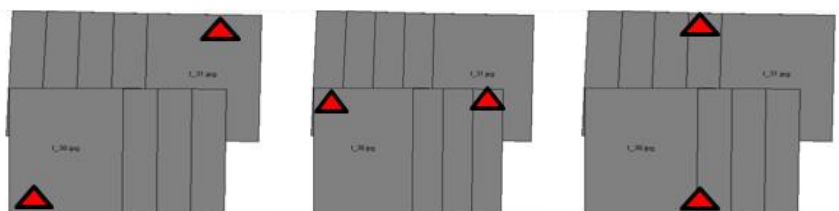


Figura 24: Configurações com dois pontos de apoio.

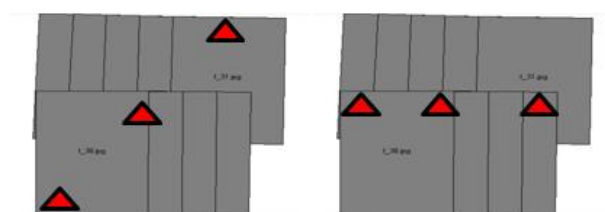


Figura 25: Configurações com três pontos de apoio

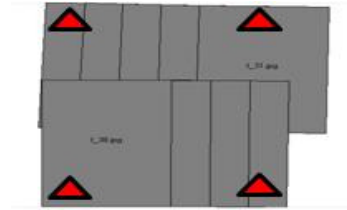


Figura 26: Configuração com quatro pontos de apoio

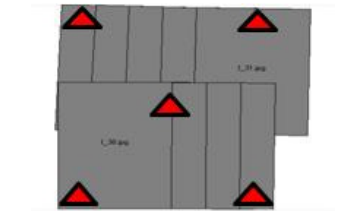


Figura 27: Configuração com cinco pontos de apoio

Em cada uma das configurações apresentadas, os valores dos parâmetros de orientação exterior ajustados serão utilizados em experimentos de intersecção fotogramétrica para avaliar as exatidões horizontais e verticais obtidas no processo.

3.2.3 CALIBRAÇÃO EM SERVIÇO.

Um procedimento de calibração em serviço (in Situ) será realizado para determinar os parâmetros de orientação interior nas condições de uso da câmara. O processo consiste de um ajustamento por feixes de raios (Bundle Adjustment) com parâmetros adicionais nas equações de colinearidade e injunção de peso nos parâmetros de orientação exterior, obtidos com o georreferenciamento direto das imagens. Adicionalmente, um conjunto de pontos de apoio pré-sinalizados na área do recobrimento aerofotogramétrico é adicionado no processo. Os pontos de apoio são também injuncionados no ajustamento visando melhorar a geometria necessária para a recuperação dos parâmetros de orientação exterior no instante da realização do recobrimento aéreo. O modelo determinístico usado consiste nas equações projetivas acrescidas de oito parâmetros; distância focal gaussiana (f), coordenadas do ponto principal (x_0, y_0) , coeficientes de distorção radial simétrica (k_1, k_2, k_3) , e coeficientes de distorção descentrada (P_1, P_2) .

Considera-se aqui que as imprecisões existentes nos parâmetros de orientação exterior, determinados pelo georreferenciamento direto, são devidas somente

relacionadas com as precisões nominais do sistema, como já mencionado. Outras imprecisões, relacionadas com a calibração do sistema, tais como as ligações da câmara e da antena GPS (lever arms) com a IMU (GPS+INS) e os problemas de alinhamento do sistema inercial com a câmara (boresight), instante da formação da imagem e sincronização do sistema, não serão consideradas no processo de calibração da câmara. Espera-se que os parâmetros de orientação interior, estimados no instante da formação da imagem, possam modelar suas possíveis variações provocadas pelas diferenças atmosféricas, vibrações e outras perturbações.

A fixação da posição espacial do centro de projeção da câmara (X_0, Y_0, Z_0), dentro do seu limite de precisão, viabilizará a determinação da distância focal e da posição do ponto principal no processo da calibração, pois sendo imagens tomadas próximas da vertical e a região recoberta, possuir uma pequena variação na altitude de voo, a injunção de posição em (X_0, Y_0, Z_0) quebrará a dependência linear existente entre os parâmetros descritos. O mesmo bloco de imagens, empregado nos experimentos anteriores, será utilizado na calibração proposta. Como visto, o bloco possui duas faixas de voo com sentidos opostos, conforme mostrado na Figura 28, o que viabiliza a separação dos coeficientes da distorção radial simétrica dos coeficientes da distorção descentrada, conforme descrito em Andrade, 2003.

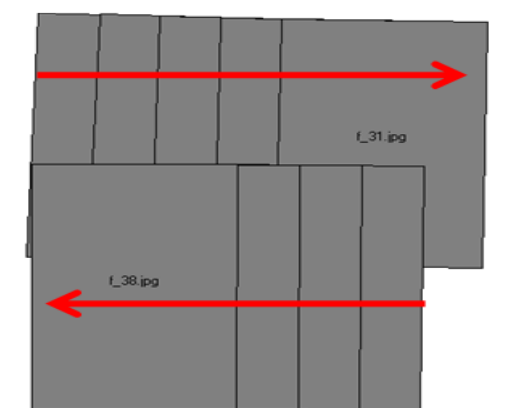


Figura 28: Faixa da calibração
Fonte: Autor

O ajustamento com o método dos mínimos quadrados com injunções de posição nos parâmetros de orientação exterior e coordenadas dos pontos de apoio será usado, visando a estimação dos parâmetros de orientação interior, coordenadas tridimensionais de pontos de passagem, bem como a matriz variância-

covariância dos parâmetros envolvidos no processo. A análise do ajustamento será feita através da comparação das variâncias a priori com a posteriori, a qualidade dos parâmetros calculados será feita através da análise estatística dos desvios (resíduos), das medições realizadas e das correlações entre os parâmetros envolvidos através da MVC.

3.2.4 VALIDAÇÃO DOS PARÂMETROS DE ORIENTAÇÃO INTERIOR DETERMINADOS NA CALIBRAÇÃO COM O GEORREFERENCIAMENTO DIRETO.

Após o processo de calibração em serviço, será verificada a sua eficiência para a execução da intersecção fotogramétrica empregando os parâmetros de orientação exterior obtidos do georreferenciamento direto de imagens. Empregando modelos fotogramétricos de um segundo bloco com faixas ortogonais ao primeiro bloco (Figura 29), com recobrimento aéreo realizado no mesmo dia, serão realizados experimentos de intersecção fotogrametria em pontos de verificação. As análises de discrepâncias horizontal e vertical permitirão a validação das exatidões obtidas no processo com os novos parâmetros de orientação interior.

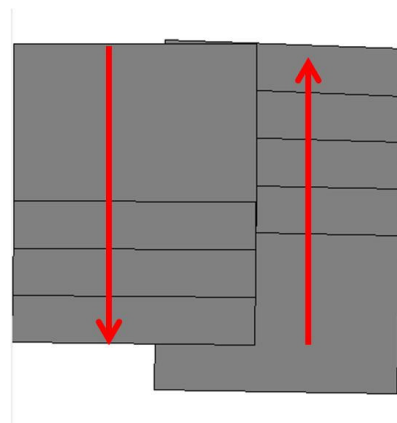


Figura 29: Faixa de validação
Fonte: Autor

3.2.5 REFINAMENTO DO GEORREFERENCIAMENTO DIRETO COM A CALIBRAÇÃO EM SERVIÇO

A calibração em serviço (in situ) será avaliada para o refinamento dos parâmetros de orientação exterior determinados no georreferenciamento direto. Empregando-se o segundo bloco, mostrado na Figura 26 com configuração de

pontos de apoio que apresentou melhor resultado nos experimentos realizados em 3.2.2, e as condições especificadas para a calibração em serviço no item 3.2.3 será realizada uma segunda determinação dos parâmetros de orientação exterior em serviço. Simultaneamente ao processo, os parâmetros de orientação exterior serão ajustados dentro dos seus limites de precisão.

Utilizando-se dos novos parâmetros de orientação interior e exterior determinados no processo de calibração realizado, novos experimentos de intersecção fotogramétrica, similares aos que forem realizados em 3.2.4 serão efetuados para determinar as exatidões horizontais e verticais do processo de intersecção empregando uma calibração em serviço com refinamento dos parâmetros de orientação exterior. Evidencia-se aqui que essa verificação poderia ser realizada no mesmo processo de calibração com análises de discrepâncias em pontos de verificação empregados no ajustamento. Utilizou-se a intersecção fotogramétrica com base num modelo a fim de determinar a exatidão obtida em somente dois raios.

3.2.6 ANÁLISES ESTATÍSTICAS DE PRECISÕES E EXATIDÕES

A precisão dos ajustamentos nas aerotriangulações e calibrações realizadas foram obtidas com base na análise dos resíduos das observações. Os valores dos erros quadráticos médios (EQM) dos resíduos das observações foram comparados e validados com o valor adotado de tolerância (1/2 pixel ou 0,003mm). Além disso, foi aplicado um teste estatístico baseado na distribuição qui-quadrado (X^2), conforme recomendado por Gemael (1994), para verificar a precisão do ajustamento com base na hipótese de igualdade da variância a priori (σ_0^2) com a variância a posteriori ($\hat{\sigma}_0^2$). Aplicou-se o teste empregando nível de significância de 5 %, e adotou-se a forma unilateral do teste. A equação (33) mostra a estatística do teste que tem distribuição qui-quadrado com n-1 graus de liberdade. A hipótese nula testada e apresentada na equação (34), junto com a hipótese alternativa.

$$X^2 = \frac{(n-1).s^2}{\sigma_0^2} \sim X_{n-1}^2 \quad (33)$$

Onde;

X^2 : estatística do teste

$n-1$: é o número de graus de liberdade

σ_0^2 : variância populacional sobre hipótese nula H_0

$\hat{\sigma}_0^2$: estimativa amostral da variância populacional σ^2

$$\begin{aligned} H_0: \sigma^2 &= \sigma_0^2 \\ H_1: \sigma^2 &< \sigma_0^2 \end{aligned} \quad (34)$$

Para garantir a confiabilidade das calibrações feitas nessa pesquisa, foram associadas com as análises de resíduos, as precisões das estimativas dos parâmetros conforme análises das matrizes de variância-covariância e de correlações entre as estimativas dos parâmetros de orientação interior e entre as estimativas dos parâmetros de orientação interior e exterior determinada nas calibrações realizadas.

As análises de exatidões obtidas nos experimentos realizados tomaram como base a qualidade da determinação tridimensional de pontos no espaço objeto via intersecção fotogramétrica. Foram validados os valores de discrepâncias horizontais e verticais, determinadas pela comparação entre as coordenadas obtidas pelo levantamento geodésico e processo fotogramétrico em pontos de verificação.

Adotou-se como valor empírico da exatidão planimétrica esperada na intersecção fotogramétrica, o valor de 1 GSD das imagens tomadas a 2.500 m de altura determinada pela Equação 35 (Klaus J. Neumann, 2008) (15 cm) e como exatidão altimétrica esperada o valor determinado pela Equação 36 (ALBERTZ;KREILING, 1980).

$$GSD = h/f \cdot px \quad (35)$$

Onde;

h é altura de voo

f é a distância focal

px é tamanho do pixel

$$d_z = \pm \frac{H^2}{B \cdot f} d_{px} \quad (36)$$

Onde;

d_z é o valor da exatidão altimétrica esperada na intersecção

H é altura de voo

B é a base fotogramétrica

f é a distância focal

d_{px} é a precisão de medida da paralaxe.

Tomando-se como base o bloco fotogramétrico, o qual possui altura média de voo de 2500 m, aerobase de 510 m, distância focal aproximada de 100,5 mm e como precisão de medida da paralaxe de 1 pixel da imagem, calculou-se como exactidão altimétrica esperada o valor de 0,73m.

Segundo Wolf e Ghilani (1997) a distribuição t de *Student* é usada para verificar a validade de hipótese sobre a média populacional. Assim, este teste verifica se a média populacional de μ é igual a um valor específico μ_0 ou se dois grupos apresentam médias iguais $\mu_1 = \mu_2$. Este teste é empregado quando amostra é considerada pequena, pois no caso da amostra ser considerada grande, pelo Teorema Central do Limite, a estatística $t = \frac{\bar{x} - \mu}{s/\sqrt{n}} \xrightarrow{n \rightarrow \infty} z$, $z \sim (0,1)$. E, então, o teste “t” é equivalente ao teste z com a distribuição Gaussiana. Mais, também, pode ser utilizada para grandes amostras Marques J. (2004). Desta forma, o teste “t” de *Student* foi utilizado para verificar se a média das discrepâncias planimétricas e altimétrica é compatível com os valores esperados (0,15 m e 0,73 m). Para a aplicação deste teste estatístico paramétrico, a normalidade dos dados foi verificada aplicando-se o teste de Shapiro-Wilk, ao nível de significância de 5% ($\alpha=0,05$). Como os dados tem uma distribuição normal, as seguintes hipóteses foram confrontadas:

$$H_0: \mu \leq \mu_0$$

$$H_1: \mu > \mu_0$$

(37)

A hipótese nula, ou básica (H_0), pressupõe que a média populacional (μ), é menor ou igual ao valor fixado (μ_0). A hipótese alternativa (H_1) pressupõe que a

média populacional é maior que o valor fixado na hipótese nula (μ_0).

Os valores das médias populacionais da planimetria e altimetria foram calculados em função das estatísticas determinadas pelas discrepâncias planimétricas e altimétricas. A estimativa por intervalo de confiança da média populacional é determinada pela equação 38, é feita através da média amostral (\bar{X}), do desvio padrão amostral (S), do tamanho da amostra (n) e da estatística (t_α).

$$\mu \leq \left| \bar{x} \pm t_\alpha \cdot \left(\frac{s}{\sqrt{n}} \right) \right| \quad (38)$$

$$\left(\bar{x} - t_\alpha \cdot \left(\frac{s}{\sqrt{n}} \right) \leq \mu \leq \bar{x} + t_\alpha \cdot \left(\frac{s}{\sqrt{n}} \right) \right) = 1 - \alpha \quad (39)$$

Onde;

μ : média populacional

t_α : escores da distribuição t_{n-1} correspondente a área $(1 - \alpha/2)$

\bar{x} : média amostral

s : desvio padrão amostral

A estatística amostral calculada (t_{cal}) é dada pela equação 40:

$$t_{cal} = \frac{\bar{X} - \mu_0}{s / \sqrt{n}} \sim t_{n-1} \quad (40)$$

Onde;

t_{cal} : estatística do teste

μ_0 : media amostral fixada na hipótese H_0

A hipótese nula não será rejeitada ao nível de significância de α se o valor t_α for maior que a estatística amostral (t_{cal}) (41).

$$t_{cal} < t_{\alpha, n-1} \quad (41)$$

No caso dos dados não possuírem uma distribuição normal deve ser empregado o teste não paramétrico de Wilcoxon *signed-rank test*, que pode ser considerado como equivalente ao teste t de *Student* (DALGAARD, 2008). Neste

caso a hipótese testada é:

$$\begin{aligned} H_0: \eta &\leq \eta_0 \\ H_1: \eta &> \eta_0 \end{aligned} \tag{42}$$

Onde η é a mediana.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES.

No presente capítulo são apresentados os resultados e discussões do estudo de técnicas relacionadas com o georreferenciamento direto de imagens de uma câmara digital Vexcel Xp. Através de uma série de experimentos, foram realizados estudos sobre a verificação da estabilidade do georreferenciamento direto, o refinamento dos parâmetros de orientação exterior com uso de aerotriangulação e a determinação de novos parâmetros de orientação interior com a calibração em serviço.

4.1. RESULTADOS OBTIDOS NA VERIFICAÇÃO DA ESTABILIDADE DO GEORREFERENCIAMENTO DIRETO.

Para a verificação da estabilidade do posicionamento e orientação direta, foram utilizados os POI do certificado de calibração (da fábrica da câmara) e os POE fixos com inunção de posição absoluta. Justifica-se o uso de inunção absoluta no experimento com o intuito de somente verificar a exatidão da determinação da interseção fotogramétrica no espaço objeto com o uso dos POE advindos diretamente do sistema GPS/IMU no instante aproximado da formação geométrica das imagens.

A Tabela 1 apresenta os valores dos POE para cada uma das imagens usadas no experimento. Tais valores são os obtidos pelo sistema GPS/IMU para cada uma das imagens que compõem o aerolevantamento realizado, fornecidos pela Empresa Topocart. Neste caso, os dados estão na projeção UTM (Universal Transversa Mercator), meridiano central -51, Elipsóide WGS84 e hemisfério Sul. Pelo fato dos dados estarem em uma determinada projeção cartográfica, sabe-se que as

distorções associadas podem influenciar nos resultados. Com a finalidade de evitar estes efeitos provenientes da curvatura terrestre, tais dados foram transformados para um sistema geodésico local, o que possibilitou melhores inferências acerca das exatidões obtidas. Nessa transformação somente o ângulo kappa dos POE sofre alteração no seu valor, pois a orientação do eixo Y local passa ser o norte verdadeiro. A diferença entre o norte verdadeiro com o de quadricula (UTM) foi determinada com o cálculo da convergência meridiana para o centro do bloco. Com o valor determinado de 13,8523 seg, o ângulo kappa transformado foi obtido com a simples adição desse valor no ângulo kappa antigo.

Tabela 1: POE Providos pelo Sistema GPS/IMU Bloco I no Sistema Local

Imagens	Xo	Yo	Zo	Omega	Phi	Kappa
27	-434,459	810,124	3426,672	-0,10401	0,14850	-1,40285
28	75,180	798,741	3429,496	-0,12520	0,13094	-1,43422
29	583,551	787,950	3429,534	-0,11969	0,15768	-1,00365
30	1092,876	780,585	3429,004	-0,12406	0,15101	-0,41681
31	1602,166	776,326	3427,445	-0,13055	0,13540	-0,30028
32	2112,180	774,005	3426,420	-0,09325	0,15508	-0,15049
35	1093,916	-780,314	3428,155	0,11380	-0,12018	180,04617
36	584,139	-783,541	3425,879	0,12271	-0,14033	180,29318
37	75,829	-787,745	3426,582	0,12041	-0,14563	180,46245
38	-433,530	-793,263	3425,951	0,10197	-0,12288	180,71785

O Bloco-I, usado nessa etapa, contém 10 imagens que compõem as 2 faixas e 44 pontos de verificação pré-sinalizados com distribuição espacial apresentada na figura 28. No bloco foram acrescentados 23 pontos fotogramétricos de ligação de fotos conforme distribuição apresentada na Figura 30. Todos os pontos foram medidos nas imagens por procedimentos de leitura monocular manual, utilizando o software LPS.

No ajustamento para determinar a intersecção fotogramétrica, como já mencionado, os POEs foram fixados com injunção absoluta e adotou-se como variância a priori o valor unitário e, como desvio padrão das fotocoordenadas, $\frac{1}{2}$ pixel (0,003mm). Na Tabela 2 são apresentados a Média, o Desvio Padrão e o EQM dos resíduos das discrepâncias das coordenadas geodésicas tridimensionais dos pontos determinados pela intersecção fotogramétrica, além de apresentar a Média, Desvio padrão e EQM dos resíduos das fotocoordenadas. Para facilitar as análises realizadas, com base na resolução do *pixel* no terreno e da imagem, apresentam-se

a razão entre os valores do erro quadrático médio e o valor tolerável esperado, em número das discrepâncias nos pontos de verificação no espaço objeto, e no espaço imagem.

Tabela 2: Discrepâncias pontos de Verificação e Resíduos em Fotocoordenadas no experimento 4.1

Discrepâncias nos 44 Pontos Verificação				Resíduos em Fotocoordenadas	
	X (m)	Y (m)	Z (m)	x (mm)	y (mm)
Media	-0,205	-0,108	4,006	0,0007	-0,0006
Desvio Padrão	0,409	0,346	0,210	0,0022	0,0031
EQM	0,458	0,363	4,012	0,0025	0,0036
EQM/ Valor tolerável	3,05	2,42	5,49	0,83	1,2

Tabela 3: Teste Global do Ajustamento realizado no experimento 4.1

gl	$\hat{\sigma}_0^2$	X_a^2	$X_{(gl,1-\alpha)}^2$
312	2,928	913,6	354,1937

Analisando-se os resultados apresentados na Tabela 2 é possível verificar, nas discrepâncias dos 44 pontos de verificação, a existência de um desvio maior que 3 GSD em planimetria e maior que 5 GSD em altimetria o que presume uma estimativa pouco confiável, indicando a existência de possível erro acima do tolerável nos valores dos parâmetros de orientação exterior determinados diretamente no sistema. Os valores das médias das discrepâncias mostram uma provável tendência nos resultados obtidos.

Na Tabela 3 é apresentada a comparação entre variância a priori (σ_0^2) e posteriori ($\hat{\sigma}_0^2$) como indicador da qualidade do ajustamento da aerotriangulação realizada. Observa-se uma discrepância significativa entre as duas variâncias analisadas e de acordo com GEMAEL (1994), tem-se que aplicar um teste de hipótese baseado na distribuição de X^2 para constatar se a discrepância é significativa num certo nível de confiança. Realizando-se o teste de hipótese ao nível de significância de 5%, conforme descrito na página 59, verifica-se que o valor do X^2 calculado é maior que o valor tabelado (Tabela 3). Assim, conclui-se que a igualdade das variâncias não pode ser aceita, mostrando um problema na aerotriangulação

realizada.

Por tanto, deve-se proceder a um análise cuidadosa do ajustamento. Inicialmente, o erro causado pelas observações das fotocoordenadas foi descartado, devido ao fato que os EQMs encontram-se dentro dos valores toleráveis (0,003 mm). O teste t de Student, mostrado na Tabela 4, comprova que as medidas manuais dos pontos fotogramétricos realizadas no software LPS, encontram-se de acordo com as precisões admitidas no processo a um nível de significância de 5%, não se observando tendência.

Tabela 4: Teste Estatísticos no experimento 4.1

	Teste Normalidade (p-valor)	t_{α}	t_{cal}	Teste Wilcoxon (p-valor)
x	4,4408E-16	1,6506	-13,9913	0,9883
y	4,5445E-6	1,6506	-12,0552	0,9947

Para validar o teste t de student, a normalidade dos resíduos foi verificada com o teste Shapiro-Wilk. Entretanto, o teste mostrou que as distribuições dos resíduos em fotocoordenadas x e y não possuem normalidade, pois os p-valores calculados foram menores que 0,05. Sendo assim, um teste não paramétrico de “Wilcoxon” foi realizado com intuito de verificar se a média populacional é igual ou inferior ao valor de exatidão admitido (fixado). Nesse teste, o p-valores foram maiores que 0,05, corroborando com o resultado obtido pelo teste paramétrico t de Student. Com base neste resultado, pode-se admitir ou afirmar com 95% de confiança que a média populacional das discrepâncias das fotocoordenadas é igual ou inferior a 0,003 mm, descartando-se o erro nas observações.

O consagrado modelo matemático utilizado, equação da colinearidade, pode ser descartado como fonte de erro, mostrando-se consistente segundo (WOLF e DEWITT, 2000).

Por último, a hipótese mais provável de erro no experimento realizado como sendo os valores dos parâmetros de orientação exterior das imagens, utilizados como sendo corretos e isentos de qualquer tipo de erros que afastam de seus valores reais, tais como as imprecisões relacionadas com a calibração do sistema (*lever arms, boresight, shift, drift* entre outras). A fixação destes parâmetros, no ajustamento realizado, o que provavelmente acarretou as discrepâncias elevadas

nos pontos de verificação.

4.2. RESULTADOS OBTIDOS NO REFINAMENTO DA POSIÇÃO E ORIENTAÇÃO DIRETA COM AEROTRIANGULAÇÃO.

Para o processo do refinamento da posição e orientação, foram injuncionados os POE com base nas suas precisões nominais fornecidas pelo fabricante, para o modelo POS/AV™ 410 (30 cm para a posição do centro de projeção, 30 segundos de arco para os ângulos ω e ϕ , e 54 segundos ângulo k) no processo de fototriangulação, usando-se o mesmo do Bloco-I do experimento 4.1.

Para determinar a qualidade do ajustamento realizado, foi empregado o valor unitário para a variância *a priori*. Ainda neste procedimento, foram utilizadas fotocoordenadas com o desvio padrão de $\frac{1}{2}$ *pixel* (0,003 mm), sendo a leitura dos pontos fotogramétricos, realizada de forma monoscópica manual no programa LPS. Sendo as coordenadas tridimensionais dos pontos de apoio, determinadas com técnicas de levantamento GPS relativo, os desvios padrão utilizados para as coordenadas foram de 0,03 m. Diferentes configurações de pontos de apoio foram adotadas nos experimentos com o objetivo de encontrar aquela que viabilize a melhor exatidão na intersecção fotogramétrica tridimensional em pontos de verificação. A qualidade da intersecção fotogramétrica foi avaliada por meio de um conjunto de pontos pré-sinalizados (44), indicados como pontos de verificação na Figura 19.

No primeiro experimento, denominado Exp_2, não foi utilizado nenhum ponto de apoio. Somente pontos de ligação entre fotos foram empregados. Esses pontos foram os pontos fotogramétricos apresentados na Figura 30 e os pontos de verificação mostrados na Figura 28. O experimento teve por objetivo de avaliar se somente medidas de pontos homólogos seriam capazes de refinar os POEs. Os EQMs das discrepâncias das coordenadas geodésicas tridimensionais dos pontos de verificação, determinados pela intersecção fotogramétrica e dos resíduos em fotocoordenadas do bloco são apresentados na Tabela 5.

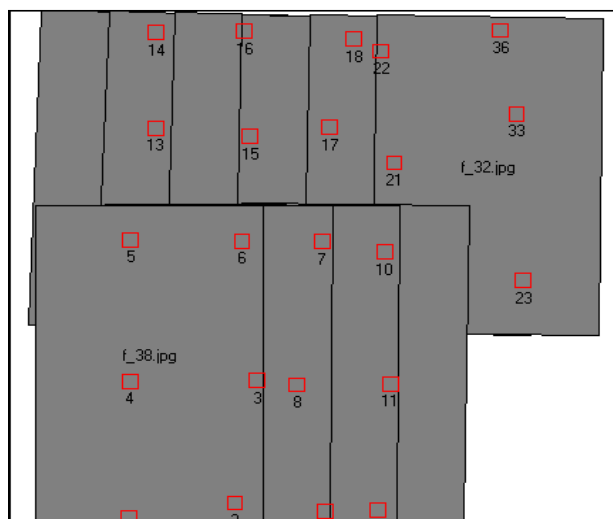


Figura 30 Exp_2
Fonte: Autor

Tabela 5: Discrepâncias dos pontos de Verificação e Resíduos em Fotocoordenadas no experimento Exp_2 item 4.2

Discrepâncias nos 44 Pontos Verificação Exp_2				Resíduos em Fotocoordenadas	
	X (m)	Y (m)	Z (m)	x (mm)	y (mm)
Media	-0,121	-0,094	3,830	1,70E-6	1,17E-5
Desvio Padrão	0,375	0,270	0,119	0,0006	0,0008
EQM	0,394	0,286	3,832	0,0006	0,0008
EQM/ Valor tolerável	2,63	1,90	5,24	0,2	0,26

Resíduos nos Parâmetros de Orientação Exterior						
	Omega (´´)	Phi (´´)	Kappa (´´)	Xo (m)	Yo (m)	Zo (m)
Media	-1,9440	3,6720	13,4640	-1E-05	0	0
Desv. P	8,9439	8,615	30,9617	0,0598	0,0890	0,1110
EQM	9,1527	9,3655	33,7625	0,0598	0,0890	0,1110

Tabela 6: Teste Global do Ajustamento realizado no experimento Exp_2 item 4.2

gl	$\hat{\sigma}_0^2$	X_a^2	$X_{(gl,1-\alpha)}^2$
312	0,1486	46,38	354,1937

Na Tabela 6 são apresentados os resultados do teste global do ajustamento da aerotriangulação, sendo avaliada a qualidade do ajustamento por meio da confrontação dos valores da variância a posteriori com a variância *a priori*: Utilizou-se, também, do teste X^2 para confirmar se a discrepância entre as variâncias é estatisticamente significativa.

Observa-se que a variância a posteriori possui valor menor que a unidade, indicando que os resíduos das observações encontram-se abaixo de valores admitidos de precisão de medida (0,003 mm); como podem ser vistos nos erros quadráticos médios dos resíduos, apresentados na Tabela 5. Assim, um teste X^2 foi aplicado para verificar se os resultados obtidos no ajustamento realizado podem ser aceito a um nível de significância de 5%. Verifica-se na Tabela 6 que o valor do Q-quadrado calculado é menor que o valor tabelado, portando pode aceitar a igualdade das variâncias obtidas. Deste modo, podemos aceitar que as precisões obtidas no ajustamento são iguais as que foram as admitidas.

Na Tabela 5, verifica-se que os erros quadráticos médios dos resíduos das medidas realizadas manualmente, encontram-se abaixo das precisões de medidas admitidas no processo, como já visto na análise de variâncias a priori com a posteriori. Com base no teste t de Student, apresentado na Tabela 7, foi comprovado, ao nível de significância de 5%, que os resíduos em fotocoordenadas são menores que a precisão de medida empregada. Os resíduos obtidos nos parâmetros de orientação exterior (POE), como eram esperados, encontram-se dentro das precisões admitidas, pois devido a inexistência de informações do espaço objeto (pontos de apoio) e de erros nas medidas nos pontos fotogramétricos, os POEs não poderiam sofrer alterações significativas nos seus valores.

A normalidade dos resíduos foi avaliada através do teste Shapiro-Wilk, resultado uma distribuição não normal. Isso indicou a necessidade da utilização de um teste não paramétrico que verificasse se a média populacional era igual ou inferior ao valor admitido, sendo utilizado o teste de Wilcoxon. Neste teste, mostrado na (Tabela 7), verifica-se que o “p” valor resultante corrobora com o resultado obtido no teste paramétrico t de Student que admitiu a normalidade nos resíduos das observações.

Tabela 7: Teste Estatísticos dos resíduos em Fotocoordenadas no experimento Exp_2 no item 4.2

	Teste Normalidade (p-valor)	t_{α}	t_{cal}	Teste Wilcoxon (p-valor)
x	0,0	1,6506	-82,1118	0,9993
y	0,0	1,6506	-61,3785	0,9993

Comparando-se a exatidão da interseção fotogramétrica obtida nesse experimento com a obtida no experimento 4.1, verifica-se pelos erros quadráticos médios das discrepâncias planimétricas que houve um incremento de precisão planimétrica de aproximadamente 10 cm. Entretanto, a exatidão planimétrica continua baixa, pois o desvio planimétrico aproxima-se de 3,2 GSD. Com relação à altimetria, a melhoria foi de 18 cm, mas a exatidão altimétrica também continua baixa, pois apresenta um valor aproximado de 5,24 GSD.

Tabela 8: Teste Estatística das discrepâncias nos pontos de verificação no experimento Exp_2 - item 4.2

	Teste Normalidade (p-valor)	t_{α}	t_{cal}
X	0,1239	1,6498	4,3244
Y	0,5527	1,6498	3,3423
Z	0,0507	1,6498	203,881

Testes estatísticos com nível de significância de 5% foram realizados para verificar a exatidão da determinação tridimensional por intersecção fotogramétrica. Inicialmente, foi verificado se as discrepâncias nas três coordenadas possuíam distribuição normal com o teste Shapiro-Wilk. A Tabela 8 mostra que os p-valores calculados confirmam distribuição normal nas três componentes, pois seus valores são maiores que 0,05. O fato do teste indicar uma normalidade nas discrepâncias altimétricas não elimina a inexistência de uma tendência na determinação altimétrica, como pode ser visto pelo valor da média na Tabela 5. Com o teste t de Student foi verificado se 95% das discrepâncias nas componentes planimétricas (X e Y) encontram-se abaixo de 1 GSD (0,15 m) e em altimetria se a discrepância altimétrica encontra-se abaixo da precisão da intersecção fotogramétrica (0,75 m). Pelos resultados apresentados na Tabela 8, verifica-se que os valores de exatidões obtidas nas três componentes estão acima dos valores esperados.

Pelos resultados obtidos no experimento pode-se considerar que a utilização de somente pontos fotogramétricos na aerotriangulação não viabilizou o refinamento dos valores dos POEs o que não permitiu alcançar as exatidões esperadas.

Nos seguintes experimentos de fototriangulação, foram utilizados pontos de apoio planialtimétricos com diferentes configurações de distribuição espacial no

bloco. O objetivo foi de verificar se alguma das configurações propostas viabilizaria o refinamento dos parâmetros de orientação exterior das imagens para a realização da determinação de coordenadas tridimensionais por intersecção fotogramétrica com as exatidões toleráveis. Na Tabela 9 são apresentados os resultados obtidos dos resíduos das fotocoordenadas e dos pontos de apoio, para cada experimento realizado.

Tabela 9: Resíduos em Fotocoordenadas e Pontos de Apoio, nos experimentos Exp_3_1 a Exp_5 no item 4.2

	Exp_3_1			Exp_3_2a			Exp_3_2b		
Resíduos no espaço da imagem									
	x (mm)	y (mm)		x (mm)	y (mm)		x (mm)	y (mm)	
Media	-3,15E-05	-4,44E-05		-3,20E-05	-1,01E-05		-1,22E-05	-8,65E-06	
Desv. P	0,0007	0,0009		0,0017	0,0014		0,0017	0,0016	
EQM	0,0007	0,0009		0,0017	0,0014		0,0017	0,0016	
Resíduos nos Pontos de Apoio									
Ponto	X (m)	Y (m)	Z (m)	X (m)	Y (m)	Z (m)	X (m)	Y (m)	Z (m)
72	0,0155	0,0061	-0,0263						
74				0,0001	-0,0400	-0,0381			
75				0,0092	0,0369	-0,0274			
68							0,1242	0,0186	-0,0616
76							-0,1186	-0,0134	-0,0556
	Exp_3_2c			Exp_3_3a			Exp_3_3b		
Resíduos no espaço da imagem									
	x (mm)	y (mm)		x (mm)	y (mm)		x (mm)	y (mm)	
Media	-3,49E-05	-2,73E-05		-6,61E-07	4,35E-06		-1,70E-05	4,86E-06	
Desv. P	0,0018	0,0015		0,0012	0,0020		0,0018	0,0013	
EQM	0,0018	0,0015		0,0012	0,0020		0,0019	0,0013	
Resíduos nos Pontos de Apoio									
Ponto	X (m)	Y (m)	Z (m)	X (m)	Y (m)	Z (m)	X (m)	Y (m)	Z (m)
69	-0,001	-0,0804	-0,0558						
71	0,0006	0,0741	-0,0633						
72				0,014	0,0146	-0,0959	-0,0066	-0,0032	-0,0702
74				-0,0524	-0,1016	-0,0580			
75				0,0382	0,0875	-0,0502			
68							0,1492	0,0260	-0,0392
76							-0,147	-0,0174	-0,0322

Exp_4			Exp_5			
Resíduos no espaço da imagem						
	x (mm)	y (mm)	x (mm)	y (mm)		
Media	5,79E-06	1,79E-05	1,38E-06	-2,06E-05		
Desv. P	0,0019	0,0017	0,0012	0,0019		
EQM	0,0019	0,0017	0,0012	0,0019		
Resíduos nos Pontos de Apoio						
Ponto	X (m)	Y (m)	Z (m)	X (m)	Y (m)	Z (m)
70	-0,0102	0,0435	-0,0301	-0,0215	0,0545	-0,0308
73	-0,0015	-0,0401	-0,0249	0,0240	-0,0603	-0,0314
74	0,0214	-0,0276	-0,0278	-0,0301	-0,0664	-0,0388
75	-0,0039	0,0194	-0,015	0,0167	0,0501	-0,0277
72				0,0106	0,0237	-0,1020

Pela análise dos resultados apresentados na Tabela 9, pode-se verificar que os erros quadráticos médios dos resíduos das fotocoordenadas, a menos do experimento Exp_3_1, apresentam valores similares próximos de 0,002 mm. Com relação ao Exp_3_1, os erros quadráticos médios em fotocoordenadas são quase três vezes menores que os demais experimentos. Os resíduos nas coordenadas geodésicas dos pontos de apoio são todos menores que um GSD (0,15 m). Considerando somente esses resultados, pode-se concluir que as precisões obtidas nos ajustamentos realizados encontram-se dentro dos valores esperados e em vários, até melhores.

Entretanto, ao analisar os testes globais dos ajustamentos por meio da confrontação dos valores da variância a posteriori com a variância *a priori* empregando o teste estatístico do X^2 com significância de 5% mostrados na Tabela 10, verificam-se os experimentos Exp_3_2b, Exp_3_2c, Exp_3_3a, Exp_3_3b, Exp_4 e Exp_5, não alcançam as precisões admitidas como toleráveis no processo.

Analisando-se a Tabela 11, onde se tem os erros quadráticos médios dos resíduos nos POEs, verificam-se os maiores erros no parâmetro Z_0 quando comparados com o valor de precisão admitida (0,30 m). Os outros parâmetros de posição (X_0 e Y_0) e de orientações (Ω , ϕ e κ) apresentaram erros médios próximos das precisões admitidas. Assim, pode concluir que a influência nos testes globais realizados é devido principalmente aos resíduos na posição Z_0 do CP. Concluindo, se for considerado apenas as análises de precisões obtidas nas fototriangulações realizadas, as configurações de pontos de apoio apresentadas nos

experimentos Exp_3_1 e Exp_3_2a são as que apresentaram resultados em conformidade com as precisões admitidas. Entretanto, se foram analisadas as exatidões obtidas nos pontos de verificação, outros resultados são verificados. Na tabela 12 são mostradas as análises de discrepâncias obtidas entre coordenadas nos pontos de verificação. Observa-se que as configurações de pontos de apoio, Exp_3a e Exp_5, são as que apresentaram as menores discrepâncias em planimetria e altimetria. Por outro lado, são os experimentos que tiveram maiores valores de variâncias a posteriores, indicando as piores precisões no ajustamento.

Estes resultados evidenciam um elevado erro nas coordenadas Zo dos centros de projeções das imagens ou na distância focal. As duas configurações de pontos de apoio, já mencionadas, viabilizaram mudanças significadas nessas coordenadas, melhorando as exatidões planialtimétricas das interseções fotogramétricas obtidas nos pontos de verificação, mas com essas alterações, ocorreram resíduos significativos nas injunções feitas nesses elementos, provocando aumento considerável na variância a posteriori.

Tabela 10: Teste Global do Ajustamento realizado nos experimentos Exp_3_1 a Exp_5 no item 4.2

	gl	$\hat{\sigma}_0^2$	X_a^2	$X_{(gl,1-\alpha)}^2$
Exp_3_1	315	0,5200	163,8	357,3909
Exp_3_2a	318	0,8251	262,4	360,5872
Exp_3_2b	318	1,390	441,9	360,5872
Exp_3_2c	318	1,334	424,3	360,5872
Exp_3_3a	321	2,282	732,6	363,7825
Exp_3_3b	321	1,662	533,6	363,7825
Exp_4	324	1,132	366,9	366,9770
Exp_5	327	2,524	825,4	370,1705

Tabela 11: EQM dos Resíduos em POEs.

Erro Médio Quadrático dos Resíduos em POEs						
Experimento	Omega (")	Phi (")	Kappa (")	Xo (m)	Yo (m)	Zo (m)
Exp_3_1	57,3385	57,140	32,591	0,41476	0,4098	0,2671
Exp_3_2a	30,0224	18,488	93,128	0,19184	0,1239	0,6645
Exp_3_2b	45,0435	35,820	47,057	0,24502	0,1156	1,1729
Exp_3_2c	30,3006	19,014	64,844	0,18430	0,2594	1,1932
Exp_3_3a	18,0557	33,814	57,717	0,20262	0,3291	2,0428
Exp_3_3b	53,4578	44,088	47,790	0,18090	0,0941	1,4177
Exp_4	34,6269	19,143	85,292	0,08778	0,1962	0,9807
Exp_5	7,4494	35,282	58,163	0,09192	0,3103	2,3072

Tabela 12: Discrepâncias nos 44 Pontos de Verificação dos experimentos Exp_3_1 a Exp_5 no item 4.2

	Exp_3_1			Exp_3_2a			Exp_3_2b		
	X (m)	Y (m)	Z (m)	X (m)	Y (m)	Z (m)	X (m)	Y (m)	Z (m)
Media	0,0872	-0,0264	0,3205	0,1268	-0,1046	3,9511	0,0649	0,0073	1,2215
Desv. P	0,7539	0,7672	0,2105	0,5733	0,5635	0,6634	0,1997	0,2111	0,3977
EQM	0,7589	0,7676	0,3834	0,5871	0,5732	4,0064	0,2100	0,2112	1,2846
EQM/ Valor tolerável	5,05	5,11	0,52	3,91	3,82	5,48	1,4	1,4	1,75
	Exp_3_2c			Exp_3_3a			Exp_3_3b		
	X (m)	Y (m)	Z (m)	X (m)	Y (m)	Z (m)	X (m)	Y (m)	Z (m)
Media	-0,0246	-0,0403	3,0471	-0,0239	0,0798	0,5901	0,0322	-0,0090	0,6046
Desv. P	0,4590	0,4337	0,5546	0,1191	0,0943	0,1606	0,2863	0,2884	0,3164
EQM	0,4596	0,4355	3,0972	0,1214	0,1236	0,6116	0,2881	0,2886	0,6824
EQM/ Valor tolerável	3,06	2,90	4,24	0,8	0,84	0,83	1,92	1,92	0,93
	Exp_4			Exp_5					
	X (m)	Y (m)	Z (m)	X (m)	Y (m)	Z (m)			
Media	0,0406	-0,1009	3,5420	-0,0226	-0,0834	0,5910			
Desv. P	0,5703	0,5143	0,7406	0,0510	0,0508	0,1560			
EQM	0,5717	0,5241	3,6186	0,0557	0,0976	0,6112			
EQM/ Valor tolerável	3,81	3,49	4,95	0,37	0,65	0,83			

Com a finalidade de comprovar se as exatidões obtidas nos experimentos Exp_3a e Exp_5 correspondem com a realidade da população, foi testada inicialmente a normalidade das discrepâncias através do teste *Shapiro-Wilk* e neste foi considerando que a amostra apresenta uma distribuição normal, com 95% de confiança, quando o “p” valor calculado é maior que 0,05. O teste t de Student foi realizado para verificar se as discrepâncias obtidas da interseção fotogramétrica nas componentes planimétricas (X e Y) encontram-se abaixo de 1 GSD (0,15 m) e em altimetria se a discrepância altimétrica encontra-se abaixo da precisão da interseção fotogramétrica (0,73 m).

Tabela 13: Teste Estatísticos Exp_3_3a e Exp_5 no item 4.2

		Teste Normalidade (p-valor)	t_{α}	t_{cal}	Teste Wilcoxon (p-valor)
Exp_3_3a	X	0,115165	1,6496	-9,57619	
	Y	0,070926	1,6496	-15,9846	
	Z	0,497131	1,6496	-5,71223	
Exp_5	X	0,00224	1,6495	-22,2141	0,936804
	Y	0,16759	1,6495	-30,155	
	Z	0,66755	1,6495	-5,84507	

Na tabela 13, observam-se, a menos de um, que os “p” valores calculados nas discrepâncias planimétricas e altimétricas, nos pontos de verificação, são maiores que 0,05; evidenciando uma distribuição normal nas discrepâncias. Somente nas discrepâncias relacionadas com a coordenada X do Exp_5, que não se verificou a normalidade da distribuição. Sendo assim, um teste não paramétrico de Wilcoxon foi realizado. Nesse teste, o “p” valor resultante corrobora com o resultado obtido pelo teste paramétrico t de *Student* realizado. Os testes de t de *Student*, apresentados na Tabela 13 comprovam ao nível de 5% de significância que as exatidões das interseções fotogramétricas em planimétrica e altimétrica encontram-se de acordo com os valores esperados.

Uma distribuição de pontos de apoio no bloco que merece ser discutida foi a utilizada no Exp_3_1. Verifica-se neste experimento que um ponto de apoio no centro do bloco acarretou alterações significativas nas orientações Omega e Phi das imagens e com isso, a determinação de coordenadas altimétricas nos pontos de verificação com exatidão dentro de valores toleráveis. Para avaliar a significância estatística deste resultado, foram aplicados os testes de *Shapiro-Wilk* e o teste t de *Studet*.

Tabela 14: Teste Estatístico das Discrepâncias Altimétrica no experimento Exp_3_1 no item 4.2

		Teste Normalidade (p-valor)	t_{α}	t_{cal}	Teste Wilcoxon (p-valor)
Exp_3_1	Z	0,00064	1,6497	-12,7589	0,779805

Pela análise dos resultados dos testes estatísticos apresentados na tabela 14 pode-se afirmar com 95% de confiança que a exatidão da interseção fotogramétrica em altimetria no experimento Exp_3_1 encontra-se abaixo da precisão de interseção (0,73 m) admitida nesse trabalho. Concluindo, para o bloco estudado, somente um ponto de apoio planialtimétrico no centro do bloco, permite melhorar a precisões da interseção fotogramétrica em altimetria.

4.3. RESULTADOS OBTIDOS DA CALIBRAÇÃO EM SERVIÇO.

No procedimento foram determinados os parâmetros de orientação interior nas condições de uso da câmara. O modelo funcional usado na calibração foram as equações projetivas (colinearidade) acrescidas de oito parâmetros (distância focal, coordenadas planas do ponto principal, 3 parâmetros de distorção radial e dois de distorção descentrada). As posições e orientações espaciais da câmara no instante da tomada das imagens foram fixadas com injunção de posição (dentro dos seus limites de precisão), visando minimizar as correlações matemáticas que ocorrem no processo de calibração (Z_0 com distância focal e x_0 e y_0 com as coordenadas do ponto principal).

A calibração foi realizada com o mesmo Bloco-I, empregado nos experimentos anteriores. A configuração deste bloco teve como objetivo utilizar um recobrimento fotogramétrico convencional, ou seja, sem o uso de faixas de vôo cruzadas e/ou fotografias tomadas com diferentes alturas de voo. O bloco utilizou-se de 9 pontos de apoio planialtimétrico com distribuição apresentada na Figura 31 e 67 pontos de ligação.

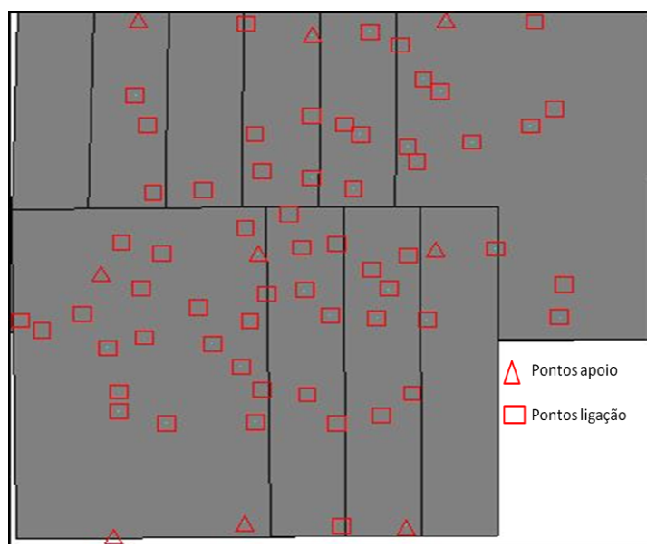


Figura 31: Bloco de Calibração
Fonte: Autor

No ajustamento realizado, adotou-se como variância *a priori* o valor unitário, como desvio padrão das medidas realizadas o valor de $\frac{1}{2}$ pixel (0,003 mm) e 0,03 m o valor para o desvio padrão para as coordenadas dos pontos de apoio. Para as coordenadas da posição da câmara no instante da tomada foi adotado como desvio

padrão o valor de 0,30 m e para as orientações os valores de 30 segundos de arco para os ângulos ω e ϕ , e 54 segundos ângulo k . Na tabela 15 são apresentados os valores significativos dos POI, determinados através da análise da MVC (matriz de variância e covariância) do ajustamento da Calibração em Serviço e seus respectivos desvios padrões.

Tabela 15: POI Determinados na Calibração em Serviço

	f (mm)	σf (mm)	x_0 (mm)	σx_0 (mm)	y_0 (mm)	σy_0 (mm)
Valor de Fábrica	100,5	0,002	-0,120	0,002	0	0,002
Valor Calibrado	100,3821	0,0018	-0,1106	0,0024	0,0126	0,0025

Observa-se na calibração em Serviço, que os valores obtidos para a distância focal, e as coordenadas do ponto principal, são diferentes dos valores constantes no certificado de calibração de fábrica. Para a distância focal houve um diminuição de 0.1179 mm e para a posição do ponto principal um acréscimo de 0,0094 mm no eixo x e 0,0126 mm no eixo y. Tais diferenças podem ser atribuídas as condições de uso da câmara no momento da formação geométrica das imagens, principalmente as relacionadas com a exatidão das coordenadas espaciais dos centros de projeção das imagens que foram fixados na calibração. Os valores dos parâmetros relacionados com distorção radial simétrica e descentrada, não foram significativos na análise da MVC. Esses parâmetros, também, não são apresentados no certificado de calibração original de fábrica. Pelos resultados obtidos na determinação dos parâmetros de distorção radial, pode-se considerar que a distorção provocada pela refração fotogramétrica não foi significativa.

Na tabela 16 são apresentados das análises dos resíduos das coordenadas dos pontos de apoio e das fotocoordenadas.

Tabela 16: Resíduos em Fotocoordenadas, Pontos de Apoio e POEs, no experimento 4.3

Resíduos em fotocoordenadas			Resíduos nas coordenadas dos Pontos Apoio			
	x (mm)	y (mm)	X (m)	Y (m)	Z (m)	
Media	-2,43E-05	-8,52E-06	0,0007	0,0004	-1,1E-05	
Desv. P	0,0007	0,0009	0,005	0,009	0,006	
EQM	0,0007	0,0009	0,005	0,009	0,006	
Resíduos nos Parâmetros de Orientação Exterior						
	Omega (")	Phi (")	Kappa (")	Xo (m)	Yo (m)	Zo (m)
Media	0,180	7,560	44,460	-0,062	-0,037	0,001
Desv. P	5,279	17,326	31,926	0,088	0,059	0,058
EQM	5,282	18,903	54,735	0,108	0,070	0,058

Pela análise dos resultados apresentados na Tabela 16, pode-se verificar que os erros quadráticos médios dos resíduos nas fotocoordenadas apresentam valores próximos de 0,001 mm. Os erros quadráticos médios dos resíduos nas coordenadas geodésicas dos pontos de apoio são todos menores que um GSD (0,15 m). Os erros quadráticos médios dos resíduos dos valores dos parâmetros de orientação exterior (POEs) estão dentro das precisões toleráveis. Considerando esses resultados, pode-se concluir que a calibração realizada apresentou precisões dentro de valores toleráveis.

Tabela 17: Teste Global da Calibração em Serviço

GI	$\hat{\sigma}_0^2$	X_a^2	$X_{(gl,1-\alpha)}^2$
339	0,1766	59,87	382,9359

Os resultados do teste global do ajustamento da calibração em Serviço, apresentados na Tabela 17 mostram a qualidade do ajustamento por meio da confrontação dos valores da variância a posteriori com a variância *a priori*. Realizou-se um teste estatístico do Q-Quadrado (X^2) para confirmar se a discrepância entre as variâncias é estatisticamente significativa. Os resultados obtidos com o cálculo do Q-quadrado, mostrado na Tabela 17, confirma que as precisões obtidas na calibração realizada encontram-se dentro das precisões admitidas no processo.

A Tabela 18 apresenta a matriz de correlação entre os POI determinados na Calibração em Serviço. Observa-se a inexistência de correlação entre os parâmetros que foram considerados como sendo significativos.

Tabela 18: Matriz de Correlação entre POI

	f	x_0	y_0
f	1		
x_0	-0,00	1	
y_0	0,04	0,01	1

Na Tabela 19, são apresentadas as correlações existentes entre os POI significativos e os POEs. Como era esperado, verifica-se que existe uma correlação média significativa entre a distância focal e a coordenada Z_0 , pois como visto nos resíduos desse parâmetro, na Tabela 16, o erro existente em Z_0 (visto nos experimentos anteriores) foi absorvido pela distância focal. As correlações existentes entre os outros parâmetros podem ser consideradas como sendo não significativas, pois apresentam valores abaixo de 50%. Assim, o valor da distância focal determinada absorveu uma parcela considerável dos erros das posições de Z_0 injuncionadas na calibração.

Tabela 19: Matriz de Correlação Cruzada entre POI e POE

	f	x_0	y_0
Omega	0,01	0,00	0,46
Phi	0,02	0,38	0,01
Kappa	0,02	0,03	0,07
X_0	0,01	0,30	0,00
Y_0	0,01	0,00	0,34
Z_0	0,75	0,02	0,00

Tabela 20: Discrepâncias nos 44 Pontos de Verificação do experimento de calibração em serviço

	X	Y	Z
Media	-0,0108	-0,0134	0,0178
Desv. P	0,0596	0,0461	0,1064
EQM	0,0606	0,0480	0,1078
EQM/ Valor tolerável	0,40	0,32	0,14

Na tabela 20 são mostradas as análises de discrepâncias obtidas no processo de calibração em serviço entre as coordenadas calculadas pela interseção fotogramétrica e as geodésicas nos pontos de verificação. Os erros médios obtidos nas discrepâncias planialtimétricas confirmam que a calibração foi realizada com exatidões superiores as precisões admitidas como toleráveis nesse trabalho.

Comparando-se os resultados de exatidões, obtidas na calibração, com as alcançadas no melhor experimento de aerotriangulação com pontos de apoio (Exp_5), Verifica-se na calibração um incremento de exatidão de aproximadamente 3 cm em planimetria e de 50 cm em altimetria.

Com a finalidade de comprovar se as exatidões obtidas na calibração em serviço são estatisticamente significantes foram realizados testes estatísticos. Inicialmente foi testada a normalidade das discrepâncias através do teste *Shapiro-Wilk*. Neste, quando a amostra apresenta uma distribuição normal com 95% de confiança, o “p” valor calculado é maior que 0,05. Se as discrepâncias não apresentam normalidade, um teste não paramétrico de Wilcoxon é aplicado. O teste t de Student foi realizado para verificar se as discrepâncias obtidas da interseção fotogramétrica nas componentes planimétricas (X e Y) encontram-se abaixo de 1 GSD (0,15 m) e em altimetria se a discrepância altimétrica encontra-se abaixo da precisão da interseção fotogramétrica (0,73 m).

Pela análise dos resultados dos testes estatísticos propostos, apresentados na tabela 21, pode-se afirmar com 95% de confiança que a exatidões da interseção fotogramétrica em planimetria e altimetria, encontram-se abaixo das precisões toleráveis. Concluindo, pode-se afirmar que a calibração foi realizada dentro das precisões e exatidões admitidas no processo e as imprecisões das posições dos POEs foram absorvidas pelo processo de Calibração em Serviço.

Tabela 21: Testes Estatísticos das discrepâncias nos pontos de verificação do experimento de calibração em serviço

	Teste Normalidade (p-valor)	t_{α}	t_{cal}	Teste Wilcoxon (p-valor)
X	0,00224	1,6494	-33,489	0,93680
Y	0,16759	1,6494	-45,460	
Z	0,66755	1,6494	-8,811	

4.4. RESULTADOS DA VALIDAÇÃO DOS NOVOS PARÂMETROS DE ORIENTAÇÃO INTERIOR NO GEORREFERENCIAMENTO DIRETO.

Para analisar a qualidade dos POI calculados no processo de calibração em serviço, novos experimentos fotogramétricos foram realizados, utilizando-se os

POEs obtidos pelo sistema do georreferenciamento direto. Estes experimentos foram feitos em um novo bloco de imagens, denominado Bloco-II.

O Bloco-II possui recobrimento aéreo realizado no mesmo dia da tomada das imagens do Bloco I (utilizada na calibração em serviço). O bloco II possui duas faixas com 06 imagens. O sentido de voo dessas faixas é ortogonal ao das faixas do bloco I, conforme esquema mostrado na figura 32. Todos os experimentos foram realizados empregando-se um conjunto de 27 pontos de verificação pré-sinalizados e medidos nas imagens por meio de procedimento descrito anteriormente, utilizando o software LPS.

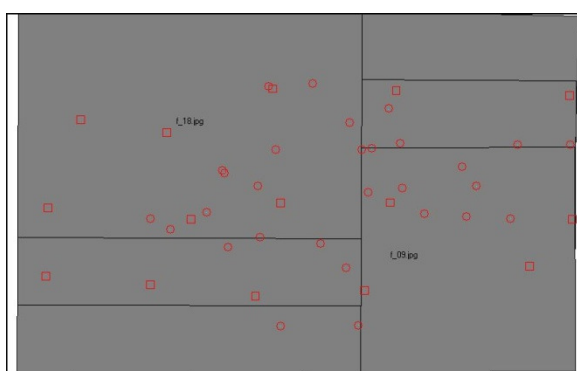


Figura 32: Bloco-II
Fonte: Autor

A Tabela 22 apresenta os valores dos POEs para cada uma das imagens usadas no experimento.

Tabela 22: POE Providos pelo Sistema GPS/IMU Bloco II

Imagens	Xo	Yo	Zo	Omega	Phi	Kappa
07	681,482	337,082	3426,873	0,1564	0,1295	-91,3757
08	673,665	-172,318	3426,619	0,1472	0,1268	-90,2898
09	675,104	-681,723	3423,752	0,1550	0,1216	-89,7422
16	-953,338	-682,735	3428,737	-0,1557	-0,1045	89,6968
17	-951,330	-173,508	3429,445	-0,1453	-0,1146	89,9208
18	-949,704	335,348	3429,216	-0,1407	-0,1025	89,8898

4.4.1 AEROTRIANGULAÇÃO COM GEORREFERENCIAMENTO DIRETO

Visando analisar a qualidade dos POI determinados na calibração em serviço, foi realizada a aerotriangulação com fixação dos POEs sem pontos de apoio. O ajustamento empregou os mesmos procedimentos descritos no item 4.1. Os EQMs dos resíduos das discrepâncias das coordenadas geodésicas tridimensionais dos

pontos de verificação determinados pela interseção fotogramétrica e dos resíduos, das fotocoordenadas, são apresentados na Tabela 23.

Tabela 23: Discrepâncias pontos de Verificação e Resíduos em Fotocoordenadas no experimento 4.4.1

Discrepâncias nos 27 Pontos de Verificação				Resíduos em Fotocoordenadas	
	X (m)	Y (m)	Z (m)	x (mm)	y (mm)
Media	0,090	0,029	0,588	0,0035	0,0005
Desvio Padrão	0,163	0,156	0,301	0,0039	0,0017
EQM	0,187	0,158	0,660	0,0033	0,0028
EQM/ Valor tolerável	1,24	1,05	0,90	1,12	0,95

Pela análise dos resultados apresentados na Tabela 23, verifica-se que os resíduos das medidas em fotocoordenadas encontram-se no eixo x um pouco acima das precisões admitidas no processo e no eixo y aproxima-se da precisão tolerável. Apesar do valor do EQMs próximos de valores de precisões toleráveis, ocorrem resíduos no x, em alguns pontos, acima de 3 vezes o valor de precisão tolerável (0,013 mm). Esses resíduos elevados refletiram na determinação de uma variância a posteriori elevada. Assim, na Tabela 24 apresenta o teste global do experimento com base na verificação da igualdade de variâncias a priori com a posteriori. O teste χ^2 realizado, para um nível de confiança de 95% (Tabela 24), confirma a desigualdade entre as variâncias e reprovando o ajustamento dentro das precisões toleráveis.

Tabela 24: Teste Global do Ajustamento realizado no experimento 4.4.1

gl	$\hat{\sigma}_0^2$	χ_a^2	$\chi_{(gl,1-\alpha)}^2$
155	4,057	628,9	185,0523

Considerando-se a análise de exatidão do ajustamento realizado, verifica-se na Tabela 23 que a exatidão planimétrica obtida (1,65) é inferior à admitida como sendo tolerável nesse trabalho (1GSD). Por outro lado, a exatidão altimétrica encontra-se abaixo (0,10) do valor da exatidão esperada, mas com elevada tendência nos valores das discrepâncias (valores somente positivos), como pode ser constatado no valor da média e na Figura 34. As discrepâncias planimétricas apresentam também

uma pequena tendência como pode ser vista na Figura 33.

Apesar das precisões e exatidões obtidas no experimento não serem totalmente aceitáveis, se comparadas com as exatidões do experimento 4.1 onde fez um experimento similar com IOP de fábrica, verifica-se que nesse houve um incremento considerável de exatidões obtidas. Na exatidão planimétrica houve uma melhora de aproximadamente 41 cm e em altimetria um incremento significativo de 3,34 m.

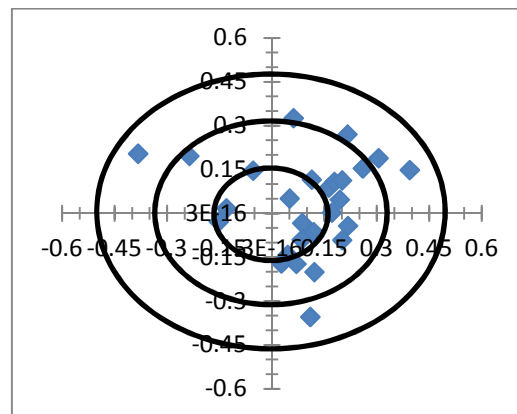


Figura 33: Acurácia Planimétrica experimento 4.4.1
Fonte: Autor

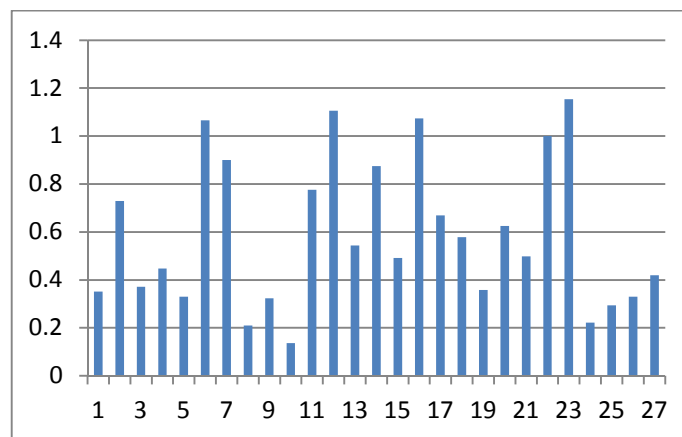


Figura 34: Análise Altimetria experimento 4.4.1
Fonte: Autor

Com a finalidade de verificar a significância estatística das precisões e exatidões obtidas na aerotriangulação com georreferenciamento direto, foram realizados testes estatísticos. Inicialmente foi testada a normalidade das discrepâncias e dos resíduos através do teste *Shapiro-Wilk*. Para as mostras que não apresentaram normalidade, um teste não paramétrico de Wilcoxon foi aplicado. O teste t de Student foi realizado para verificar se as precisões e exatidões obtidas encontram-se dentro dos valores toleráveis.

Com base nos EQMs dos resíduos, apresentados na Tabela 25, verifica-se com 95% de confiança que as precisões das medidas realizadas nos pontos fotogramétricos encontram-se dentro dos valores de precisão tolerável. Resultado esse que diverge do teste global de variância que não aprova o ajustamento, como foi discutido anteriormente. Analisando-se os EQMs das discrepâncias nos 27 pontos de verificação na Tabela 25, verifica-se pelo teste t de student que a exatidão planimétrica obtida na interseção fotogramétrica é inferior a exatidão tolerável de 1 GSD. Entretanto, pelo teste de Shapiro Wilk, mostrado na Tabela 25, aceita com 95% de confiança a normalidade da distribuição das discrepâncias no eixo X e Y. Os testes estatísticos realizados com as discrepâncias altimétricas aprovam ao nível de 95% de confiança que a exatidão altimétrica obtida encontra-se de acordo com a exatidão tolerável para o experimento realizado, apesar da existência de uma elevada tendência nas discrepâncias, apresentada na Figura 34.

Tabela 25: Teste Estatísticos dos resíduos das fotocoordenadas e das discrepâncias nos pontos de verificação do experimento.

		Teste Normalidade (p-valor)	t_{α}	t_{cal}	Teste Wilcoxon (p-valor)
Fotocoordenada	x	0,0	1,6547	0,5233	0,9680
	y	0,0003	1,6547	-9,3864	0,9897
Discrepâncias nos 27 pontos de Verificação	X	0,0653	1,6547	2,8519	
	Y	0,9281	1,6547	-3,9395	
	Z	0,0435	1,6547	-2,3988	0,6779

4.5 AEROTRIANGULAÇÃO COM REFINAMENTO DO GEORREFERENCIAMENTO DIRETO

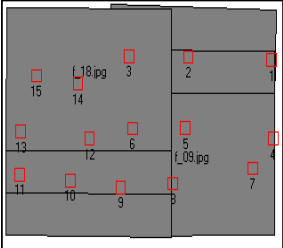
Para a realização dos experimentos, foram utilizadas duas configurações, a primeira, denominada de Exp_a, usou somente pontos de ligação, e a segunda, determinada de Exp_b, usou uma configuração similar a que apresentou melhor resultado nos experimentos no item 4.2. Para ambas as configurações, os POEs foram injuncionados com as precisões nominais fornecidas pelo fabricante.

Na Tabela 26 são apresentados os resultados das análises das discrepâncias dos pontos de verificação e dos resíduos das observações do ajustamento realizado na aerotriangulação da primeira configuração (Exp_a). Observa-se, neste caso, que os erros quadráticos médios das discrepâncias nas três coordenadas são menores

que os valores obtidos no experimento anterior. A fixação não absoluta dos POEs viabilizou o ajustamento dos valores de POEs dentro da precisão nominal do fabricante, acarretando um incremento de exatidão planimétrica de aproximadamente 7 cm, como pode ser visto na Tabela 26 e Figura 35. Na altimetria se obteve um aumento de exatidão de 37 cm e como pode ser visto na Figura 36; houve a diminuição de tendência das discrepâncias. Apesar do incremento das exatidões no experimento, verifica-se ainda que o valor da exatidão planimétrica obtida (1,18 GSD) encontra-se um pouco acima do valor de exatidão tolerável. A exatidão altimétrica obtida (0,41) encontra-se abaixo do valor tolerável.

Analisando-se os erros EQMs dos resíduos nos POEs, como eram esperados, mostram que valores medidos encontram-se dentro as precisões adotadas no ajustamento, pois como já visto no experimento 4.2, a inexistência de pontos de apoio no ajustamento e de erros nas medidas nos pontos de ligação acarretaria somente alterações dos POEs dentro de suas precisões. Por outro lado, as exatidões planialtimétricas obtidas aqui são muito superiores as que foram encontradas no experimento similar realizado no item 4.2, mostrando que os novos POI conseguiram modelar grande parte dos erros sistemáticos existentes nos POEs.

Tabela 26: Discrepâncias nos pontos de Verificação e Resíduos em Fotocoordenadas no experimento Exp_a

	Discrepâncias nos 27 Pontos Verificação			Resíduos em Fotocoordenadas	
	X (m)	Y (m)	Z (m)	X (mm)	Y (mm)
Media	0,137	0,063	-0,104	2,18E-05	1,34E-05
Desvio Padrão	0,062	0,069	0,280	0,0009	0,0008
EQM	0,151	0,093	0,299	0,0009	0,0009
EQM/ Valor tolerável	1,007	0,62	0,41	0,3	0,3

Resíduos nos Parâmetros de Orientação Exterior						
	Omega (")	Phi (")	Kappa (")	Xo (m)	Yo (m)	Zo (m)
Media	0,12	-1,62	14,16	1,7E-05	0	3,3E-05
Desv. P	9,90854	5,4468	17,7738	0,06601	0,12117	0,0644
EQM	9,90927	5,68261	22,7247	0,06601	0,12117	0,0644

Tabela 27: Teste Global do Ajustamento realizado no experimento Exp_a

GI	$\hat{\sigma}_0^2$	X_a^2	$X_{(gl,1-\alpha)}^2$
155	0,201	31,26	185,0523

Na Tabela 27 são apresentados os resultados do teste estatístico do Q-Quadrado que verifica a igualdade das variâncias a priori, admitida como sendo unitária, com a posteriori (calculada) a fim de verificar se a precisão obtida no ajustamento encontra-se de acordo com as admitidas. Pelos resultados apresentados na Tabela 27, verifica-se que o valor calculado do Q-quadrado é menor que o tabelado, aprovando as precisões alcançadas no ajustamento com um nível de significância de 5%.

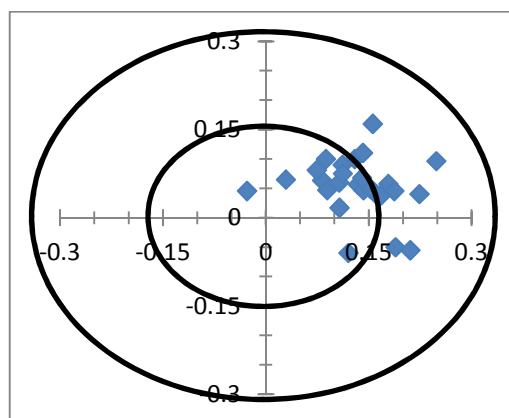


Figura 35: Acurácia Planimétrica no experimento Exp_a
Fonte: Autor

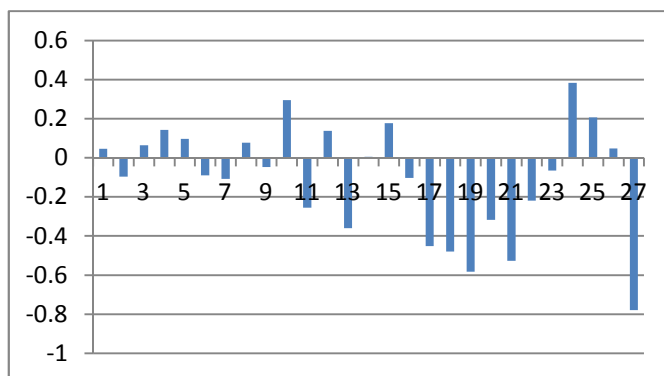


Figura 36: Análise Altimetria no experimento Exp_a
Fonte: Autor

Na Tabela 28 são apresentados os valores obtidos do teste estatístico t de *Student*, aplicados aos resíduos em fotocoordenadas. Verifica-se que os valores de precisões estimadas encontram-se de acordo com os valores toleráveis e os valores de exatidões das discrepâncias planialtimétricas, nos pontos de verificação, são também considerados como aceitáveis.

As normalidades da distribuição dos resíduos nos pontos fotogramétricos e das discrepâncias nos pontos de verificação foram avaliadas com o teste de Shapiro-

Wilk. Os resultados apresentados na Tabela 28 mostram a inexistência de normalidade na distribuição dos resíduos, acarretando a realização do teste não paramétrico de Wilcoxon para comprovar os resultados obtidos no teste t de student. No caso das distribuições das discrepâncias planialtimétricas, verificou-se pelo teste de Shapiro-Wilk (Tabela 28) que somente a distribuição da discrepância em Y não possui normalidade, acarretando a realização do teste de Wilcoxon. Os resultados obtidos nos testes t de Student, apresentados na Tabela 28, comprovam que as exatidões das discrepâncias da interseção fotogramétrica encontram-se de acordo com as precisões esperadas.

Tabela 28: Resultados dos Testes Estatísticos no experimento Exp_a

		Teste Normalidade (p-valor)	t_{α}	t_{cal}	Teste Wilcoxon (p-valor)
Fotocoordenada	x	0,0	1,6547	-0,000355	0,99566
	y	0,0	1,6547	-40,235	0,998369
Discrepâncias nos 27 pontos de Verificação	X	0,836148	1,6547	-1,00968	
	Y	0,000164	1,6547	-6,38678	0,862647
	Z	0,423904	1,6547	-15,1435	

O próximo experimento de aerotriangulação empregou a configuração que foi denominada de Exp_b. Nessa, três pontos de apoio foram adicionados ao bloco II de imagens, conforme distribuição espacial mostrada na Figura 37. Todas as condições de precisões empregadas no experimento Exp_a foram também utilizadas aqui. A única diferença foi que as coordenadas dos pontos de apoio foram injuncionadas com precisões espaciais de 3 cm.

Na Tabela 29 são apresentados os principais resultados das análises de resíduos das medidas resultantes do ajustamento realizado. Pelos erros quadráticos médios dos resíduos em fotocoordenadas e nas coordenadas dos pontos de apoio, pode-se considerar que as precisões resultantes nas medidas realizadas são melhores que as admitidas como toleráveis. Pelos erros médios quadráticos dos resíduos nos POEs, apresentados na Tabela 29, verifica-se que houve um ajustamento desses parâmetros de acordo com as precisões que foram pré-estabelecidas. Comparando-se esses EQMs com os obtidos nos experimentos similares realizados com o Bloco I no item 4.2, verifica-se que os POIs determinados na calibração em serviço modelaram com eficiência os erros sistemáticos existentes

na posição Z_0 dos centros de projeção das imagens.

Tabela 29: Resíduos no pontos de Apoio e Resíduos em Fotocoordenadas no experimento Exp_b

Resíduos nos pontos de apoio				Resíduos em Fotocoordenadas	
	X (m)	Y (m)	Z (m)	X (mm)	Y (mm)
Media	-0,001	-0,0004	0,001	1,333E-05	-0,00032
Desvio Padrão	0,010	0,001	0,001	0,0001	0,0001
EQM	0,010	0,001	0,001	0,0001	0,0003
EQM/ Valor tolerável	0,3	0,03	0,03	0,03	0,1

Resíduos nos Parâmetros de Orientação Exterior						
	Omega (°)	Phi (°)	Kappa (°)	Xo (m)	Yo (m)	Zo (m)
Media	1,8	-6,12	22,38	0,0504	0,02375	-0,0584
Desv. P	10,2920	7,2567	18,0974	0,0553	0,1156	0,0612
EQM	10,4482	9,4929	28,7816	0,0749	0,1181	0,0846

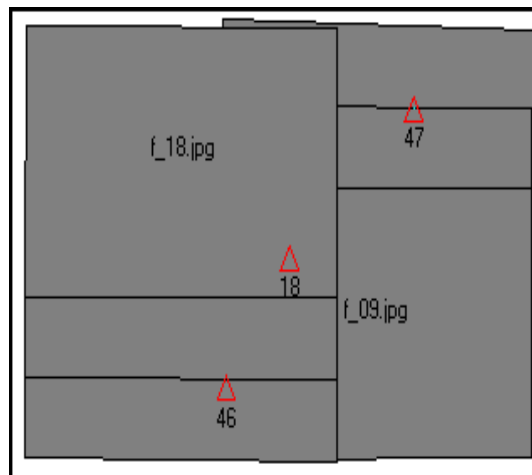


Figura 37: Configuração Exp_b
Fonte: Autor

Tabela 30: Teste Global do Ajustamento realizado no experimento Exp_b

GI	$\hat{\sigma}_0^2$	X_a^2	$X_{(gl,1-\alpha)}^2$
164	0,2039	33,44	194,8825

Na Tabela 30, observa-se a variância a posteriori bem abaixo da unidade. Como já visto nas análises anteriores, esse resultado indica que as precisões obtidas no ajustamento, encontram-se melhores que as admitidas como toleráveis. Os resultados do teste X^2 , mostrados na Tabela 30, confirmam ao nível de significância de 5% que as precisões globais, alcançadas no ajustamento realizado,

encontram-se dentro de valores de precisões toleráveis.

Apresentam-se, na Tabela 31, as análises de exatidões realizadas com base nas discrepâncias tridimensionais dos pontos de verificação visando determinar a qualidade da determinação tridimensional de pontos no espaço objeto via intersecção fotogramétrica. Com base nos erros quadráticos médios obtidos nas três componentes (X, Y e Z) pode-se admitir que as exatidões planialtimétricas das determinações tridimensionais obtidas pela intersecção fotogramétrica são melhores que as precisões admitidas como sendo toleráveis. Comparando-se os EQMs, obtidos no experimento Exp_a, como os do Exp_b, verifica-se que houve no Exp_b um incremento de aproximadamente 7 cm de exatidão planimétrica. O gráfico na Figura 37 que mostra a distribuição espacial das discrepâncias planimétricas evidencia o ganho de exatidão planimétrica no experimento realizado. No caso da exatidão altimétrica, os resultados obtidos em ambos os experimentos, padram ser considerados como sendo iguais. A comparação das distribuições das discrepâncias altimétricas apresentadas nas Figuras 36 e 38 evidencia bem a igualdade das exatidões altimétricas nos experimentos realizados. Concluindo, pode-se afirmar que a configuração empregada de três pontos de apoio no bloco de imagem testado viabilizou um melhor refinamento dos POEs se comparado com a utilização de somente de pontos fotogramétricos.

Tabela 31: Discrepâncias nos 27 Pontos de Verificação realizado no experimento Exp_b

Discrepâncias nos 27 Pontos Verificação			
	X (m)	Y (m)	Z (m)
Media	0,043	0,005	-0,177
Desvio Padrão	0,060	0,052	0,255
EQM	0,075	0,052	0,311
EQM/ Valor tolerável	0,5	0,34	0,42

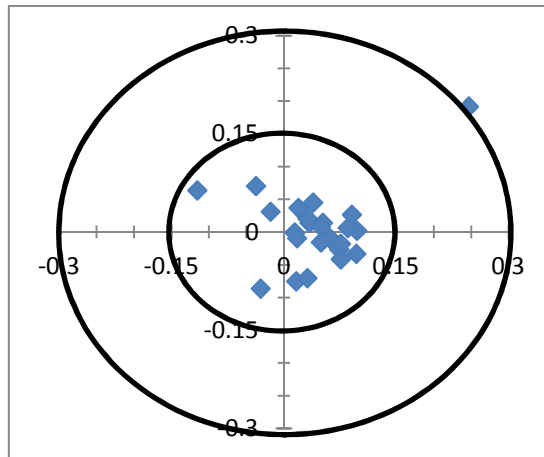


Figura 38: Acurácia Planimétrica no experimento Exp_b
Fonte: Autor

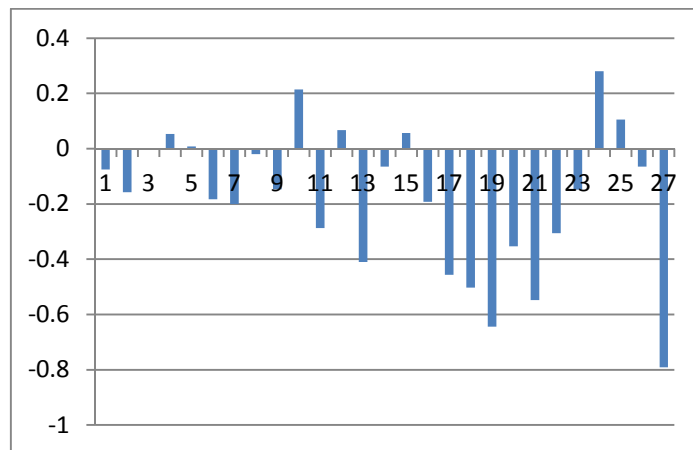


Figura 39: Análise Altimetria no experimento Exp_b
Fonte: Autor

Na Tabela 32 são apresentados os testes estatísticos, com a finalidade de verificar se os resultados obtidos de exatidões no experimento são significativos estatisticamente. Inicialmente foi testada a normalidade da distribuição das discrepâncias através do teste Shapiro-Wilk. Em seguida, empregando o teste t de *Student* verificou se as exatidões obtidas na determinação tridimensional de pontos no espaço objeto via intersecção fotogramétrica são significativas a um nível de significância. Pelos resultados apresentados na tabela 32 verifica-se que somente a discrepâncias em Z foram consideradas tendo uma distribuição normal. As componentes planimétricas não apresentaram normalidades e nessas o teste de Wilcoxon foi realizado para validar os resultados de avaliação de exatidões feitos com o teste t de student. Na Tabela 32, são mostrados os resultados obtidos com o

teste t de student. Nestes, pode inferir, ao nível de 95% de confiança, que as exatidões tridimensionais obtidas na interseção fotogramétrica são aceitáveis e encontram-se de acordo com as precisões admitidas no processo desta pesquisa.

Tabela 32: Testes Estatísticos Exp_b

		Teste Normalidade (p-valor)	t_{α}	t_{cal}	Teste Wilcoxon (p-valor)
Pontos de Verificação	X	0,0112736	1,6542	-8,87796	0,876265
	Y	0,0065585	1,6542	-14,1588	1,0
	Z	0,664429	1,6542	-18,0683	

5. CONCLUSÕES.

Neste trabalho, que teve como proposição a realização de estudos e análises de exatidões do georreferenciamento direto de imagens de uma câmara digital Vexcel Xp, o objetivo geral foi alcançado por meio da execução, análise e discussão de vários experimentos fotogramétricos que envolvem a tecnologia do georreferenciamento direto de imagens. Os estudos enfatizaram as análises e avaliações de exatidões de POEs de imagens determinadas por sistema GPS/IMU associados com POI determinados via calibração em serviço, visando a utilização destas ferramentas para a diminuição de tempos e custos de execução de projetos, aumentando significativamente a produtividade de um trabalho de mapeamento fotogramétrico.

Os resultados obtidos ao se estudar os POE fornecidos pelo sistema de orientação direta, permitiram determinar a importância da calibração do sistema antes ou em conjunto com o levantamento aerofotogramétrico, pois em experimentos realizados foram encontrados erros sistemáticos possivelmente associados à falta de calibração. Como consequência, percebeu-se a degradação da exatidão na interseção fotogramétrica com valores acima de 3 GSD, fato que inviabiliza a realização de projetos fotogramétricos que utilizam dados da orientação direta de imagens sem uma previa calibração do sistema.

A utilização dos POI fornecidos pelo fabricante em procedimentos fotogramétricos que fixaram absolutamente os POEs, determinados diretamente com o sistema GPS/IMU, sem um processo de calibração do sistema, não viabilizou a determinação tridimensional no espaço objeto dentro das exatidões toleráveis. A injeção de fixação absoluta dos POEs inviabilizou os ajustamentos dos POEs para realizar a interseção tridimensional do espaço objeto dentro da exatidão estabelecida. Experimento realizado com essa condição alcançaram exatidões planimétricas baixas (3,89 GSD em planimétrica e 5,49 da precisão da interseção fotogramétrica).

O refinamento dos parâmetros de orientação exterior com procedimento de aerotriangulação empregando os POI de fábrica e somente pontos fotogramétricos de ligação não viabilizou a correção dos erros sistemáticos envolvidos. As exatidões na interseção fotogramétrica tridimensional foram aproximadamente 3,24 GSD em

planimétrica e 5,24 em altimetria da exatidão esperada. O refinamento dos parâmetros que viabilizou a interseção fotogramétrica dentro de exatidões toleráveis somente foi possível com a utilização de 5 pontos de apoio, sendo um ponto em cada canto do bloco e o quinto no centro. Neste caso a exatidão planialtimétrica obtida foi de 0,75 GSD e em altimetria o valor de 0,83 da exatidão tolerável.

O refinamento dos parâmetros de orientação exterior com procedimento de aerotriangulação empregando os POI de fábrica, pontos fotogramétricos de ligação e somente um ponto de apoio planialtimétrico no centro do bloco permitiu melhorar significativamente a exatidão altimétrica da interseção fotogramétrica. A exatidão altimétrica foi de 0,52 da exatidão tolerável enquanto que em planimetria foi de 7,18 GSD.

A calibração da câmara Vexcel em serviço foi realizada para a determinação de novos POI visando o aumento das exatidões dos procedimentos fotogramétricos relacionados com o georreferenciamento direto das imagens. Empregou-se nessa calibração um voo convencional de duas faixas com sentidos opostos, assemelhando-se a um projeto fotogramétrico cotidiano. A fixação da posição e orientação do CPs permitiu recuperar a distância focal e as coordenadas do ponto principal com minimização de correlações entre os parâmetros de posição das imagens (X_o , Y_o , e Z_o). As exatidões obtidas na calibração em serviço, com base nos EQM das discrepâncias nos pontos de verificação, foram 0,51 GSD em planimetria e 0,14 da exatidão tolerável em altimetria.

O experimento de georreferenciamento direto das imagens, empregando os novos parâmetros de orientação interior, alcançou exatidões planialtimétricas superiores às obtidas com os POI de fábrica. As exatidões na interseção fotogramétrica tridimensional resultantes foram de aproximadamente 1,62 GSD em planimétrica e 0,90 em altimetria. Comparando-se com as exatidões obtidas no experimento similar com POI de fábrica, os incrementos da exatidão foram de 2,4 vezes em planimetria e 6,1 vezes em altimetria. Esses resultados mostram que os novos POI, determinados na calibração em serviço, modelarem prováveis erros sistemáticos existentes no sistema fotogramétrico.

O refinamento dos parâmetros de orientação exterior com procedimento de aerotriangulação empregando os POI determinados na calibração em serviço e somente pontos fotogramétricos de ligação melhorou as exatidões do procedimento

fotogramétrico com o georrefereciamento direto das imagens. As exatidões obtidas na interseção fotogramétrica tridimensional foram aproximadamente 1,18 GSD em planimétrica e 0,41 em altimetria. Assim, com a utilização de POI determinados na calibração em serviço, o refinamento dos parâmetros que viabilizou a interseção fotogramétrica dentro de exatidões toleráveis somente foi possível com a utilização de 3 pontos de apoio. Neste caso a exatidão planialtimétrica obtida foi de 0,60 GSD e em altimetria o valor de 0,42 da exatidão tolerável.

6. RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Durante o desenvolvimento deste trabalho foram verificados alguns aspectos que podem ser desenvolvidos e analisados em investigações futuras:

Realização de estudos similares empregando bloco de imagens com maior dimensão para verificar o desempenho das metodologias propostas;

Realizar estudos similares que envolvam a calibração do sistema fotogramétrico;

Realizar estudos similares que envolvam diferentes recobrimentos aerofotogramétricos com diferentes tipos de câmaras digitais.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.

ALBERTZ, J.; KREILING, W. **Photogrammetric Guide**. Karlsruhe: Wichmann, 1980.

ALDINO F. W. Direct Georeferencing :A new standard in photogrammetry for high accuracy mapping. **International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences**, volume xxxix-b1,xxii isprs congress, 94elbourne, Australia, 2012.

ANDRADE, J.B. **Fotogrametria**. Curitiba: SBEE, 2003.

ASPRS. **Digital photogrammetry: an addendum to the manual of photogrammetry**. Estados Unidos: The American Society for Photogrammetry and Remote Sensing, 1997.

BROWN, D. G. Decentering Distortion of Lenses. **Photogrammetric Engineering**, 1966.

CAMARGO, P. **Controle de Qualidade Aplicado ao Filtro de Kalman**. Dissertação (mestrado), Curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas, UFPR, Curitiba, 1992.

CONRADY, A. E. Decentered Lens System. **Monthly Notices of the Royal Astronomical Society**, 1919.

CLARKE, T. A. e FRYER, J. G. The Development of Camera Calibration Methods and Models. **Photogrammetric Record**, v 16, n 91, 1998.

CRAMER, M., STALLMANN, D. and HAALA, N. Direct georeferencing using GPS/inertial exterior orientations for photogrammetric applications, in International. **Archives of Photogrammetry and Remote Sensing**, Vol. 33 Part B3, 2000.

DALGAARD, P. **Introductory statistics with R**. 2 ed. New York: Springer, 2008.

DEBIASI, P. **Desenvolvimento de Metodologias de Calibração de uma Câmara Digital de Baixo Custo Integrada com um Sistema Lidar**. 194 f. Tese (Doutorado), Curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas, UFPR, Curitiba, 2012.

REIS, T. T. **Estudo e Implementação de Técnicas de Sincronismo de Dispositivos para o Georreferenciamento de Imagens Digitais**. Dissertação (mestrado), Curso de Pós-Graduação em Cartográficas, UNESP, Presidente Prudente, 2009.

REIS, T. T. **Sincronismo de dispositivos para o georreferenciamento de imagens digitais**, Curso de Pós-Graduação em Ciências Cartograficas, UNESP, São Paulo, 2011.

EISENHART, C. Realistic evaluation of the precision and of accuracy of Instrument Calibration System. **Journal of Research of the national bureau of standars. Engineering and Instrumentation**, USA, June 1963.

FRITSCH, D. Photogrammetric Image Processig. **Photogrammetric Week**. Stuttgart Wichmann. ISBN 3-87907-255-8 (1993).

GONZALEZ, R.C.; WOODS, R.E. **Digital Image Processing**. Addison-Wesley Iberoamericana, 1992.

GALO, M. **Calibração e Aplicação de Câmaras Digitais**. 139 f, Dissertação (Mestrado em Ciências Geodésicas), Setor de Ciências Geodésicas, UFPR, Curitiba, 1993.

GEMAEL, C. **Introdução ao Ajustamento de Observações: Aplicações Geodésicas**. Curitiba: UFPR, 1994. 314 f.

GUTJAHR KH.; HAFNER P; OFNER M; LÄNGAUER K; WIESER M; KÜHTREIBER N. Performance of GNSS/IMS integration methods in context of a near real-time airborne mapping platform, **EuroCOW10**, Commission III, WG III/1, 2010.

GRUBER, M. *UltraCamX, the new digital aerial camera system by Microsoft Photogrammetry*. **Proceedings of the Photogrammetric Week**, Stuttgart, 2007.

GRUBER, M. & WIECHERT, A. New digital aerial cameras by Vexcel Imaging / Microsoft, **Proceedings of the Remote Sensing and Photogrammetry Society (RSPSoc) Annual Conference**, Leicester, UK, 2009.

JAIN, R.; KASTURI, R.; SCHUNCK, B.G. **Machine Vision**. McGraw-Hill, Cingapura, 1995.

JACOBSEN K. System Calibration for Direct and Integrated Sensor Orientation, **Theory, Technology and Realities of Inertial/GPS Sensor Orientation**, ISPRS WG I/5, Barcelona 2003.

JUBANSKI, J. J. **Desenvolvimento e Avaliação de um Sistema de voo Apoiado por GPS para Aerotriangulação por Feixes de Raios**. Dissertação (mestrado), Curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas, UFPR, Curitiba, 2005.

LUGNANI, J. B. **Introdução à Fototriangulação**. UFPR, Curitiba, 1987.

LERMA G. J. L. **Fotogrametría Moderna: Analítica y Digital**. UPV. Valencia, 2002.

MARQUES, JAIR M. **Testes Estatísticos para cursos das áreas biológica e da Saúde com uso do computador**. Dominio do Saber, Curitiba, 2004.

MARTINEZ SANCHEZ, JOSE MARIA. **Introduccion a las imágenes digitales: creación y utilización**. Universidad politécnica de Madrid, 1997.

MIKHAIL, E. M.; BETHEL, J. S.; MCGLONE, J. C. **Introduction to Modern Photogrammetry**. New York : John Wiley & Sons, 2001.

MONICO, J. F. G. **Posicionamento pelo NAVSTAR-GPS**. Unesp, São Paulo, 2000.

MERCHANT, D. **Analytical Photogrammetry**. Theory and Practice Part I. Ohio 1979.

MITISHITA, E. A.; OLIVAS, M. A. A. Calibração de Câmaras Aerofotogramétricas a partir de Aerofotos Digitalizadas. **Boletim de Ciências Geodésicas**, v. 7 (1). UFPR. Curitiba, 2001.

MITISHITA, E. A. **Monorestituição Digital de Aerofotos, Associada com Sistema de Computação Gráfica C.A.D., para fins de Mapeamento na Área Florestal**. 253f. Tese (Doutorado em Ciências Geodésicas), Setor de Ciências Geodésicas, UFPR, Curitiba, 1997.

MOFFITT, F.H. **Photogrammetry**. 3rd ed. New York: Harper & Row, 1980.

PEREZ ALVAREZ, J.A. **Apuntes de Fotogrametría II**. 217 f. Apostila. Universidad de Extremadura, España, 2001.

PEREZ ALVAREZ, J.A. **Apuntes de Fotogrametría III**. 242 f. Apostila. Universidad de Extremadura, España, 2001.

REISS, M. L. **Restituição Fotogramétrica Flexível de Imagens à Curta Distância: Estudo de Métodos e Desenvolvimento de Protótipo**. 162 f. Dissertação (Mestrado), Programa de Pós-Graduação de Ciências Cartográficas, Universidade Estadual Paulista, Presidente Prudente, 2002.

SANTOS. DANIEL. **Elementos de Fotogrametria e Sensoriamento Remoto**, Departamento de Geomática, UFPR, Curitiba, 2010.

SEEBER, GÜNTER. **Satellite geodesy: foundations, methods, and applications**. Universität Hannover, Germany, 1993.

SKALLOUD, J. **Optimizing Georeferencing of Airbone Survey Systems by INS/DGPS**. Ph.D Thesis. Dept of Geomatics Engineering. The University of Calgary, Calgary, 1999.

TITTERTON, D. H.; WESTON, J. L. **Strapdown Inertial Navigation Technology**. Peter Peregrinus Ltd, United Kingdom, 1997.

WIECHERT, ALEXANDER. Vexcel imaging gmbh-innovationg in photogrammetry. **Proceedings of the Photogrammetric Week**, Stuttgart, 2008.

WOLF, P.R; DEWITT, B.Q. **Elements of Photogrammetry with Applications in GIS**. McGraw-Hill, 2000.

WOLF, P.R. GHILANI, C.D. **Adjustment computations: statistics and least squares in surveying and GIS**. Wiley, 1997.

ANEXOS

ANEXO 01- Especificações Técnicas Câmara Digital Vexcel Xp



UltraCam-Xp Technical Specifications

Image Product Specification

Image format	JPEG; TIFF with options for 8 and 16 bits, standard tiff format
Analogous to an aerial film image at a format of 23 cm x 15 cm, scanned at 13 µm	Full resolution panchromatic, separate color channels at color resolution
Image data formats	Full resolution R, G, B, Near-IR channels, planar or pixel-interleaved
Image storage format in level 2	
Color at level 3	

Digital Camera Technical Data (Sensor Unit S-X)

Panchromatic image size	17,310 * 11,310 pixels
Panchromatic physical pixel size	6 µm
Input data quantity per image	624 Mega Bytes
Physical format of the focal plane	104 mm * 68.4 mm
Panchromatic lens focal distance	100 mm
Lens aperture	f= 1/5.6
Angle-of-view from vertical, cross track (along track)	55° (37°)
Color (multi-spectral capability)	4 channels -- RGB & NIR
Color image size	5,770 * 3,770 pixels
Color physical pixel size	6 µm
Color lens system focal distance	33 mm
Color lens aperture	f = 1/4.0
Color field of view from vertical, cross track (along track)	55° (37°)
Shutter speed options	1/500 to 1/32
Forward-motion compensation (FMC)	TDI controlled
Maximum FMC-capability	50 pixels
Pixel size on the ground (GSD) at flying height of 500 m (at 300m)	2.9 cm (1.8 cm)
Frame rate per second (minimum inter-image interval)	1 frame per 2 seconds
Analog-to-digital conversion at	14 bits
Radiometric resolution in each color channel	>12 bit
Physical dimensions of the camera unit	45cm x 45cm x 60 cm
Weight	~ 55 kg
Power consumption at full performance	150 W

In Flight Data Storage D-X and Data Processing C-X

In-flight storage capacity	Unlimited with use of multiple data units D-X; per D-X unit ~4.2 TB
In-flight capacity to collect uncompressed frames	Unlimited with multiple D-X units; per D-X unit ~ 6600 images
Method of exchanging D-X units in-flight	In less than 3 minutes
Configuration of Storage D-X and Computing C-X	C-X with 14 Pentium-M CPUs; each D-X with 14 disks
Redundancy	Storing mirror images of the data on two DX units
Data transfer into office environment	Removable D-X data units; docking station (optionally mobile)
Physical dimensions	Width 50cm x Depth 36cm x Height 65 cm
Weight of C-X + 2 D-X	< 92 kg
Weight of C-X	~ 65 kg
Weight of single D-X	~ 16 kg
Power consumption at full performance	700 W

Operational Specification

Data collection period at 70% & 20 % overlap, at 20 cm GSD (film scale 1:10,000), 140knts	11 hours per single D-X unit
Post-processing of collected raw images	OPC Software, Mobile Server, Office PC Network, Laptop, C-X
Data transfer from aircraft to office	Shipping of D-X, or transfer to high capacity storage medium via Mobile Server
Mounting of the camera	Using adapter ring for all current film camera mounts (PAV-30, Z/I T-AS, GSM3000)
Flight planning support	Compatible with commercial systems (CCNS-4, Trackair, Vega, ...)
Exterior orientation support	Compatible with DGPS/IMU systems (IGI's Aero-Control, Applanix POS-AV)
Photogrammetric Production	TIFF-output compatible with Customer's photogrammetric production software
Image geometric accuracy	Approximately ±2 µm



For more information, contact:

Vexcel Imaging GmbH | a Microsoft company
Anzengruebergasse 8
A-8010 Graz, Austria
mpsinfo@microsoft.com | www.ultracamx.com